

# Histoire des énergies renouvelables en France, 1880-1990

Anael Marrec

▶ **To cite this version:**

Anael Marrec. Histoire des énergies renouvelables en France, 1880-1990. Histoire, Philosophie et Sociologie des sciences. Université de Nantes, 2018. Français. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-01969705⟩

**HAL Id: tel-01969705**

**https://shs.hal.science/tel-01969705v1**

Submitted on 4 Jan 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

UNIVERSITE SOCIETES BRETAGNE TEMPS LOIRE TERRITOIRES

UNIVERSITÉ DE NANTES

# THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE DE NANTES

COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 604
*Sociétés, Temps, Territoires*
Spécialité : Histoire des sciences et des techniques

Par
**Anaël Marrec**

## Histoire des énergies renouvelables en France, 1880-1990

**Thèse présentée et soutenue à Nantes, le 26 septembre 2018**

**Unité de recherche : Centre François Viète, EA1161**

**Rapporteurs avant soutenance** :

| | |
|---|---|
| Christophe Bonneuil | Directeur de recherche, CNRS, Centre Alexandre Koyré |
| Jean-Pierre Williot | Professeur des Universités, UMR-SIRICE, Sorbonne Université |

**Composition du Jury :**

| | | |
|---|---|---|
| Président : | Lamard, Pierre | Professeur des Universités, RECITS, UTBM |
| Examinateurs : | Rainaud, Laurence | Maître de conférences, CETCOPRA, Université Paris 1 |
| Dir. de thèse : | Pécaud, Dominique | Professeur des Universités, Centre François Viète, Université de Nantes |
| Co-dir. de thèse : | Pierre Teissier | Maître de conférences, Centre François Viète, Université de Nantes |

# Histoire des énergies renouvelables en France, 1880-1990

Anaël Marrec

26 septembre 2018

# Table des matières

**Remerciements** **11**

**Introduction générale** **17**

**Bilan historiographique. Des histoires des énergies** **18**

**Méthodologie : objet, cadrage spatio-temporel** **32**

**Périodisation - Plan** **52**

**Corpus** **56**

**I Les « forces naturelles », sources de nouvelles conquêtes pour la nation française (1880-1918)** **59**

Introduction . . . . . 61

**1 Les forces naturelles : caractérisation d'un champ** **73**

1.1 Chronologie de l'intérêt porté aux forces naturelles . . . . . 73

1.2 Un champ aux appellations multiples . . . . . 75

1.3 Des sources d'énergie disponibles, abondantes, gratuites et inépuisables . . 78

1.4 Des sources d'énergie dispersées et intermittentes . . . . . 82

1.5 Synthèse Chapitre 1 . . . . . 85

**2 Les convertisseurs : plusieurs chemins pour la modernité** **87**

2.1 Les forces artificielles comme idéal de modernité . . . . . 88

2.2 L'étranger, un modèle à suivre . . . . . 98

2.3 La « modernité de la tradition » : les moulins à vent . . . . . 101

2.4 Synthèse Chapitre 2 . . . . . 115

**3 Projets français : vent, marées, vagues et soleil** **117**

3.1 Le vent et la production d'électricité. L'expérience du duc de Feltre . . . . 118

3.2 Les marées : une ressource proche de la houille blanche . . . . . 122

3.3 Les vagues : une ressource plus difficile à dompter que les marées . . . . . 124
3.4 L'énergie solaire et l'« orientalisme technologique » aux colonies . . . . . 125
Conclusion . . . . . 133

**II « Arc-en-ciel des houilles » et politique énergétique nationale (1919-1939) 137**

Introduction . . . . . 139

**4 L'« arc-en-ciel des houilles » : une mise en ressource du territoire pour l'économie nationale 151**

4.1 Une augmentation du nombre de discours et de projets . . . . . 152
4.2 Des forces naturelles aux houilles colorées. Une palette géographique de sources d'énergies . . . . . 155
4.3 Formes des convertisseurs et territoires . . . . . 180
4.4 Synthèse Chapitre 4 . . . . . 198

**5 Typologie des projets en fonction des acteurs impliqués 201**

5.1 Un cas à part : les constructeurs d'aéromoteurs . . . . . 205
5.2 Des idées d'inventeurs sans soutien financier ni réalisations . . . . . 209
5.3 Des initiatives privées menant à des tests de machines ou à la construction de prototypes . . . . . 211
5.4 L'implication d'institutions publiques au niveau national. Les projets soutenus par l'ONRSI . . . . . 227
5.5 Synthèse Chapitre 5 . . . . . 249

**6 Houille bleue, électrification du territoire et politique d'indépendance énergétique métropolitaine 251**

6.1 La commission de la Houille bleue (1919-1943) : un élément du dispositif d'encouragement pour l'énergie hydraulique . . . . . 252
6.2 Un intérêt presque exclusif pour les systèmes à bassins régulateurs et la production d'électricité par les marées . . . . . 260
6.3 Les usines marémotrices : espoirs et échecs . . . . . 264
6.4 Les appareils houlomoteurs : quelques expérimentations, un prototype opérationnel . . . . . 279
6.5 Synthèse Chapitre 6 . . . . . 302
Conclusion . . . . . 307

**III Les « énergies naturelles » pour la modernisation et le rayon-**

**nement de la France (1940-1970) 311**
Introduction . . . 313

**7 Les énergies naturelles au service du productivisme 341**
7.1 Énergies naturelles, énergies de remplacement : faire flèche de tout bois . . 342
7.2 Un intérêt soutenu puis une désaffection pour les énergies naturelles . . . . 349
7.3 Deux pôles de l'imaginaire technicien : modernité et simplicité . . . . . 355
7.4 Synthèse Chapitre 7 . . . 366

**8 Les « énergies de remplacement » pour l'économie de guerre (1940-1945) 369**
8.1 Métropole : approvisionnement du réseau électrique . . . 371
8.2 Colonies : maintien de l'Empire et politique industrielle . . . 389
8.3 Synthèse Chapitre 8 . . . 411

**9 Les énergies naturelles outils de « développements » (1946-1970) 415**
9.1 Métropole : réseau électrique et grandeur technologique (marées, vent, soleil) 418
9.2 Outre-mer : réseaux électriques, exploitation des richesses et recherche de marchés (solaire, énergie thermique des mers, vent et houle) . . . 470
9.3 Synthèse Chapitre 9 . . . 517
Conclusion . . . 521

**IV Les « énergies nouvelles » face à la « crise » économique et culturelle (1970-1990) 529**
Introduction . . . 531

**10 Institutionnalisation des énergies nouvelles 541**
10.1 Les institutions dédiées aux énergies nouvelles . . . 542
10.2 Enjeux et réalisations : « gouvernement de la critique », politique énergétique et positionnement international . . . 569
10.3 Énergies douces, nouvelles et renouvelables : un point socio-sémantique . . 622
10.4 Synthèse Chapitre 10 . . . 631

**11 Les énergies marines dans la course internationale à l'innovation (1973-1987) 633**
11.1 Le programme « énergies marines » au CNEXO (1978-1986) . . . 634
11.2 L'énergie thermique des mers et le consortium Ergocéan. Compétition internationale pour un marché tropical (1975-1987) . . . 638
11.3 L'énergie des vagues et le LHN. Un parent pauvre de l'énergie thermique des mers pour les pays pauvres (1978-1990) . . . 662
11.4 Synthèse Chapitre 11 . . . 672

Conclusion . . . . . 675

**Conclusion générale** **681**

**Une lecture globale** **683**

Marées et énergie thermique des mers. Des convertisseurs inscrits dans le système énergétique. Peu de réalisations . . . . . 688

Géothermie et biomasse. Des convertisseurs inscrits dans le système énergétique. De nombreuses réalisations . . . . . 691

Houle, vent et soleil. Une variété d'acteurs, de convertisseurs, d'usages et de territoires. De nombreuses réalisations . . . . . 693

**Une lecture par types de temporalité historique** **699**

Trois types de temporalité : retours cycliques, résurgences en spirale, singularités ponctuelles . . . . . 699

Une réflexion sur la mémoire et ses usages . . . . . 704

**Annexes** **761**

**A Projet Decoeur : cycle, turbine, plan de l'aménagement du Havre** **761**

**B Prix de revient annuel entre l'électricité obtenue par un aéromoteur Cyclone, un moteur à essence et le réseau électrique** **763**

**C Publicité de la Société des ateliers mécaniques Saint-Jacques** **765**

**D Composition de la Commission de la houille bleue (1919-1941)** **767**

**E Composition du Comité technique de l'énergie des mers (1949)** **775**

**F Brochure de la Société anonyme de construction de Paimboeuf** **777**

**G Composition des sous-commissions du Comité technique de l'énergie des mers (1944)** **779**

**H Composition du Comité technique de l'énergie des vents** **781**

**I Publicités de la société Insol (vers 1940)** **785**

**J Chauffe-eau système Pasteur commandé par l'AOF en 1942** **787**

**K Brochure de l'Office général des éoliennes (v. 1950)** **789**

**L La Houille bleue et fluviale - Projet de François Baudot** **793**

**M Relevés de l'énergie éolienne par le Comité technique de l'énergie des vents en France métropolitaine 797**

**N Cartes des Hauts plateaux oranais. Points d'eau aménagés par le Service de la colonisation et de l'hydraulique en 1954 803**

**O Liste des installations géothermiques mises en service entre 1970 et 1986 805**

**P Centrales ETM Empain-Schneider et CGE (1980) 809**

**Index des noms d'acteurs 811**

**Index des institutions 819**

**Index des noms de lieux 829**

# Remerciements

La thèse, un petit morceau de vie, un chemin initiatique parsemé de rencontres. Sans elles, je n'aurais pas trouvé le goût, le sens et le courage à entreprendre ce travail sur l'homme et son monde. Parfois, les mots manquent, mais j'aimerais adresser à tous ces guides, inspirateurs et soutiens ma profonde gratitude.

Tout d'abord, je remercie Dominique Pécaud d'avoir accepté de diriger cette thèse.

Ma reconnaissance toute spéciale va à Pierre Teissier. Pierre, comment te remercier ! Tu as changé ma vie. Dès que je t'ai entendu parler des hommes et de leurs savoirs, j'ai voulu suivre ton chemin. Guide infatigable, tu m'as été d'un indéfectible soutien. Ta curiosité et ton esprit lumineux m'ont aidée à démêler les sacs de nœuds de notre monde et à leur donner un sens.

Le Centre François Viète a fait partie intégrante de mon quotidien pendant toutes ces années. Jenny Boucard, Anaïs Durand, Stéphane Tirard, vous m'avez tout de suite accueillie comme une des vôtres et donné une place à part entière dans la vie du laboratoire. Jenny, partenaire de travail, de jardinage, experte ès LaTeX, je te fais une spéciale dédicace. Qu'aurait été mon doctorat sans le Potagex, sans nos sessions sportives, sans nos goûters dominicaux dans la serre Viète, et j'en passe. Puissent nos cultures de menthe régaler des générations de curieux autour de notre chère bibliothèque. Anaïs, cœur vibrant de notre équipe, fière et habile pilote du navire CFV dans un océan administratif parfois opaque et tumultueux, tu as illuminé de nombreuses de mes journées par ta présence si profondément humaine et chaleureuse. Stéphane, tu as toujours été prêt à me conseiller sur tous types de questionnements (de la structure d'un cours à l'arrosage des tomates), tu fus aussi un œil bienveillant quoique sceptique de notre Potagex, et l'adversaire redouté d'un match de badminton dont le régime de temporalité m'échappe — fait-il partie du passé ou de l'avenir ou d'un présent qui s'étale indéfiniment (tout un programme pratique et théorique s'ouvre encore à nous) ? Paul Naegel, en plus d'être un inestimable partenaire de recherches, est un mécène du Potagex. Quelle chance que de pouvoir échanger avec un historien qui a vécu une bonne partie du XX$^{e}$ siècle, s'est introduit dans les groupes bulbes de l'usine marémotrice de la Rance, est un fin connaisseur de la culture des tomates, et fait preuve d'une prodigieuse culture alimentée par une insatiable curiosité.

Je salue également mes camarades doctorants, Karine Le Jeune, Matthieu Quantin, Gérard Meyer, Daniel Tozzini, Loïc Péton, Loïc Jeansson, Marine Carrère, Océane Fiant, Clément Guiraud, avec qui j'ai partagé, parmi bien d'autres choses, les joies et les difficultés de la recherche et de la rédaction. Karine, de ton petit bureau en face du mien, tu m'as ouvert le chemin. Ton enthousiasme et tes doutes ont précédé les miens et m'y ont doucement préparée. Matthieu, ma thèse ne peut pas se penser sans toi. Entre Boulbi, Chantenay, le bocage, le master, les ateliers de doctorants, la guilde des philosophes nantais, nos chemins s'éloignent et se croisent sans arrêt. Ça doit être notre côté « ingénieur

déchu ». Au passage, je salue tous ces déserteurs d'un monde stérile et aveugle souvent servi comme seul horizon à de jeunes têtes qu'on cherche obstinément à détourner d'une vie riche et terrestre. Ugo Robert, Aissame Afrouss, Coline Feral, Lucile Chauveau, Alice Maine, Matthieu Gallezot, Simon Boulier, depuis quelques années je me suis construite avec vous, grâce à la variété des lignes d'existence que nous dessinons chacun.e à notre façon. Nous ne sommes pas devenu.e.s les ingénieurs que l'on a pu attendre, et c'est tant mieux.

Les personnels de la Bibliothèque universitaire du campus Lombarderie m'ont chaleureusement accueillie et aidée dans mes recherches documentaires. Joël Parthenay et Michel Ruchaud montrent mieux que quiconque qu'il faut cultiver son jardin par les mots et la grelinette. Je remercie aussi tout spécialement les employées du service de Prêt entre bibliothèques qui se sont toujours montrées arrangeantes dans mes demandes documentaires. Merci également aux personnels des archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine, des archives d'EDF et des archives nationales d'Outre-mer.

François Lê fut d'un secours inestimable pour manier LaTeXdans une période où ma patience envers les caprices de l'informatique était sérieusement entamée. François, je te remercie encore pour ton aide.

Sarah Ghaffari et Yves Bouvier, ont accepté de faire partie de mon Comité de suivi de thèse, et ont suivi l'évolution de mon travail pour lequel ils ont fait preuve de tout leur intérêt. Christophe Bonneuil, Jean-Pierre Williot, Alain Gras, Pascal Acot, m'ont également consacré de leur temps pour des échanges riches et stimulants. Tou.te.s ces chercheur.e.s m'ont donné de précieux conseils pour élargir mes perspectives ou au contraire recentrer mon approche.
Christophe, tu m'as convaincue par la parole et le geste qu'on peut avoir une pratique sérieuse et enrichissante de l'histoire en n'oubliant pas ses convictions profondes, bien au contraire. Je t'en suis vivement reconnaissante.

Plusieurs témoins se sont rendus disponibles pour donner vie à mon récit et l'enrichir de leurs expériences. Je remercie encore Alain Clément, Philippe Marchand, Jean-Louis Bal, Philippe Chartier, Christophe Clergeau, Christian Frouin, Camille Solliec, Henri Mora et Pierre-Guy Therond d'avoir accepté de me livrer une partie de leur vécu.

Mes proches m'ont donné le courage et l'envie de mener ce travail à bien. Je remercie tout particulièrement les deux opiniâtres relectrices de ma famille qui ont eu le courage de parcourir entièrement ma thèse et de la passer au peigne fin. Ivan, mon étoile du bocage, toujours tu éclaires des horizons que je ne soupçonne pas. Où que tu sois, ta voix m'inspire et me donne la force d'affronter les puissances que je choisis de défier. Mes ami.e.s, colocs d'hier et d'avant-hier, Brestoises du 44, Brestois du monde entier, copain.e.s de Chantenay,

de la guilde des philosophes et du groupe Potagex, explorat.eur.rice.s du savoir, planteurs d'arbres et ami.e.s des tritons, vous êtes le socle de ma ténacité et de ma joie dans ce long travail. Camille, Laura, Nico, Gauthier, Aless, Clémou, Anne-Clé, Cécile, Méloche, Gwendal, Lucile, Julia, Caro, Sam, Malek, Maia, Gwen, Clément, Angèle, Sarah, Erwan, Aurélie, Amandine, Gwenola. Je n'oublie pas Camille, et puis aussi Camille et Camille et nos frères et sœurs.

Ce travail n'aurait pas été possible sans la région Pays de la Loire, qui m'a financée pendant trois ans, ni sans l'Université de Nantes qui m'a accueillie et m'a donné l'opportunité d'enseigner.

Je remercie enfin Christophe Bonneuil, Pierre Lamard, Laurence Raineau et Jean-Pierre Williot d'avoir accepté d'évaluer mon travail de thèse.

# Introduction générale

L'énergie, en tant que ressource, mais aussi en tant que concept, est un élément fondamental de la civilisation industrielle. La croissance de sa consommation, et en premier lieu celle des énergies fossiles (charbon, puis pétrole et gaz), a accompagné le processus d'industrialisation qui, à partir de quelques régions de l'Europe, a connu une expansion mondiale. Alain Gras parle plus précisément de civilisation « thermo-industrielle », pour souligner la place prépondérante de la machine thermique et de l'imaginaire associé dans le système technique [1] industriel (Gras, 2003, p. 8). En outre, si « l'invention même du concept d'énergie [...] est la « conséquence d'un changement de vision du monde précisément lié à l'apparition du moteur thermique » (Gras, 2003, p. 28-29), l'histoire du moteur thermique est aussi inextricablement liée au concept d'énergie et à l'imaginaire qu'il véhicule. Comme l'a souligné Anne-Françoise Garçon, cet imaginaire, partant de la machine à vapeur, a ensuite colonisé la manière de concevoir tous les autres moteurs, à commencer par le moteur hydraulique (Garçon, 2012).

Cette importance reconnue à l'énergie et aux manières de l'exploiter dans l'histoire récente des sociétés humaines explique qu'elle ait été centrale dans les approches globales de l'histoire des techniques . Or, exception faite de l'énergie hydraulique, dans la majorité de ces récits, les énergies dites aujourd'hui renouvelables (vent, marées, vagues, soleil, géothermie, énergie thermique des mers) occupent une place marginale voire inexistante. Pourtant, certains usages anciens de l'énergie (vent, eau, animaux, force humaine) ont persisté plus longtemps que ne le laissent entendre (ou ne l'affirment) ces récits. De plus, nombreuses ont été les tentatives pour exploiter les énergies renouvelables grâce à de nouvelles machines depuis la fin du XIX$^{e}$ siècle. La présente thèse sur l'histoire des énergies renouvelables en France au XX$^{e}$ siècle se penche sur ces dernières tentatives.

Pour commencer, cette introduction expose le sujet de la thèse. Elle décrit son positionnement historiographique, son objet, ses limites spatio-temporelles et sa construction chronologique. Elle débute par une synthèse de la littérature secondaire sur l'histoire de l'énergie en France et la place des énergies renouvelables dans cette histoire, et précise la manière de la mobiliser. Ensuite, elle explicite le cadrage méthodologique : l'objet de cette thèse (plus spécifique que les « énergies renouvelables »), la période (1880-1990) et le territoire (la France et ses colonies puis la France et ses territoires d'Outre-mer). Puis elle décrit le corpus mobilisé, avant d'annoncer le plan, qui est construit selon la chronologie établie.

1. Le « système technique » est une notion d'histoire des techniques reprise à Bertrand Gille et qui désigne l'ensemble des techniques interdépendantes dans une société. Je la développerai plus bas dans la section méthodologique.

# Bilan historiographique. Des histoires des énergies

## Histoires des énergies « classiques » : approches évolutionnistes et économiques

On qualifie de « classiques » les sources d'énergie devenues dominantes dans le bilan énergétique français. Pour ce qui concerne la France, l'histoire de ces sources d'énergie a été largement étudiée, en particulier par les historiens des techniques influencés par une approche anthropologique évolutionniste, et les historiens des techniques adoptant une approche économique. Elle a permis de saisir des tendances globales en termes de production et de consommation d'énergie, et des techniques mises en œuvre à cette fin par les groupes sociaux à l'œuvre dans ce système dominant. Deux types de récits ont prévalu dans l'histoire des énergies « classiques » depuis la fin du XIX^e siècle : les grandes fresques de l'histoire des techniques, et les approches plus spécifiquement économiques, et nationales, par source d'énergie.

Les premiers types de récits décrivent l'histoire des techniques par grandes phases définies par des modes de production. Considérant la technique sous l'angle de la transformation à but productif, ils donnent une place centrale à l'énergie dans les évolutions techniques mondiales. Ainsi Lewis Mumford propose, dès 1934, une histoire des techniques dans la civilisation occidentale depuis le X^e siècle, et y distingue trois âges caractérisés par un matériau et une source d'énergie : la phase éotechnique basée sur le bois et l'eau, la phase paléotechnique basée sur le charbon et le fer, et la phase néotechnique basée sur l'électricité et les alliages (Mumford, 2016). En France, c'est après la seconde guerre mondiale qu'une histoire des techniques universitaire prend naissance (Fressoz, 2013, p. 72-73). Maurice Daumas, titulaire de la première chaire d'histoire des techniques au Conservatoire national des arts et métiers (CNAM), entreprend une synthèse à caractère encyclopédique de l'histoire des techniques dans le monde. Celle-ci décrit, de façon internaliste, quatre grandes phases dans l'évolution des techniques mondiales, et si elles sont associées de manière moins systématique à une forme d'utilisation de l'énergie, l'« accélération » des « progrès » dans son utilisation est une donnée fondamentale dans le passage d'une phase à une autre. Ces étapes vont des « origines » (jusqu'au XV^e siècle) aux « premières étapes du machinisme » (XV^e-VIII^e siècles), puis à « l'expansion du machinisme » (1725-1860), et, enfin, à la « civilisation industrielle ». Cette dernière étape dispose d'ailleurs d'un volume entier (sur cinq) consacré à la seule question de l'énergie et des matériaux (Daumas, 1978).

À la suite de Daumas, Bertrand Gille propose une histoire des techniques dans laquelle de grandes phases sont caractérisées par un « système technique », déterminé par l'en-

semble machine (ou « convertisseur »)/source d'énergie/matériau. La notion de système technique rend compte du fait qu' « en règle très générale, toutes les techniques sont, à des degrés très divers, dépendantes les unes des autres, et qu'il faut nécessairement entre elles une certaine cohérence ». Il est défini de la manière suivante : « ensemble de cohérences de toutes les structures de tous les ensembles et de toutes les filières » (Gille, 1978, p. 19). La filière technique est, quant à elle, une « suite[ ] d'ensembles techniques destinés à fournir le produit désiré, dont la fabrication se fait, très souvent, en plusieurs étapes successives ». L'ensemble technique est une « technique[ ] complexe[ ] qui nécessite non pas ce qu'on pourrait appeler une technique unitaire [par exemple, le taille-crayon pour tailler un crayon] mais des techniques affluentes dont l'ensemble, dont la combinaison concourt toujours à un acte bien défini [ex : fabrication de la fonte, qui nécessite l'apport de combustible, de minerai, une certaine régulation de la température, etc.] (Gille, 1978, p. 16)». Le concept de filière technique est familier en économie, avec la notion d' « intégration verticale », qui consiste en l'intégration par une seule structure de plusieurs ensembles techniques de la filière. Dans la fresque de Gille, l'histoire des techniques est scandée par des changements dans ces systèmes techniques, et le système technique industriel, base de la civilisation industrielle, est caractérisé par l'apparition (au XVIII$^{e}$ siècle) de l'ensemble fer/charbon/machine à vapeur, qui succède, avec la « révolution industrielle », au système technique bois (matériau)/énergies naturelles (eau, vent, animaux)/roues.

Qu'elles la critiquent (cas de Mumford) ou qu'elles la louent (cas de Daumas et de Gille), ces fresques décrivent l'histoire des techniques comme une évolution linéaire depuis le début de l'humanité. La machine thermique y prend une place centrale dans l'avènement de la civilisation industrielle, ainsi que l'augmentation, à la fois de la quantité d'énergie utilisée [2], et de l'efficacité des convertisseurs énergétiques. Chez Daumas et Gille, ces évolutions sont perçues, positivement, comme la manifestation d'un progrès toujours en marche, et nécessaire, de l'humanité. Influencés par les écrits de l'économiste Joseph Schumpeter sur les « grappes d'innovation », ils donnent à cette dernière une place cruciale dans l'histoire des civilisations (Fressoz et Jarrige, 2013, p. 72-73). En outre, ancrés dans les problématiques économiques de l'après guerre, ils ne considèrent la technique que dans sa dimension productive. Aussi, selon eux, les possibilités présentées par la machine thermique, puis par l'électricité, ne pouvaient que balayer les usages « traditionnels » des sources d'énergie (vent, eau, animaux) aujourd'hui assimilées aux énergies renouvelables. Ces nouveaux convertisseurs rendent en effet possible la mise à disposition et la délocalisation de puissances théoriquement aussi importantes que possible, grâce à l'aspect concentré, stockable (fossiles) et transportable (fossiles et électricité,) de ces formes d'énergie. Ces caractéristiques sont favorables à une production de masse, qui fasse fi du temps et de l'espace. À l'inverse, dans le système technique préindustriel, « le

2. Gille n'est ainsi pas gêné de mesurer (comme il le souligne lui-même, à la manière de ses contemporains), « le développement technique à la quantité d'énergie utilisée » (Gille, 1978, p. 398-399).

développement du machinisme était limité [...] par une énergie abondante certes dans son ensemble [...] mais dispersée en petites unités de production de faible ampleur, soumise aux aléas de la nature, nécessairement très localisée » (Gille, 1978, p. 693).

À la faveur de la crise économique des années 1970-1980, des historiens français se sont plus spécifiquement intéressés à l'histoire de l'énergie, avec une approche économique. Ces travaux se rattachent à la création, en 1980, à la Sorbonne, du Centre de recherche en histoire de l'innovation, et, en 1982, par Marcel Boiteux (PDG d'EDF), de l'Association pour l'histoire de l'électricité, financée par EDF (Fressoz et Jarrige, 2013, p. 72-73). Au sein de ces institutions, une histoire économique des techniques, dont François Caron est une figure de proue, reprend une approche systémique et doit beaucoup aux travaux de Bertrand Gille, mais aussi à ceux de Thomas P. Hughes sur les *Large technological systems* (Cohen et Pestre, 1998). Elle se focalise davantage encore sur « l'entreprise et sa capacité à innover » (Fressoz et Jarrige, 2013, p. 72). Dans ce cadre, des groupes d'historiens se sont intéressés à l'histoire de l'énergie en France, et ont réalisé d'importantes monographies, telles que la monumentale *Histoire de l'électricité en France* sur la période (1880-1990) en trois volumes, la parution des *Annales pour l'histoire de l'électricité* ou encore les actes du séminaire tenu de 2002 à 2006 sur l'État et l'énergie aux XIX^e^ siècle et XX^e^ siècles (Comité pour l'histoire économique et financière de la France, 2009). Centrés sur des données quantitatives macroéconomiques et sur l'innovation au sein des entreprises, ces historiens et témoins [3] se sont surtout intéressés à l'électricité et aux sources d'énergie devenues dominantes dans le bilan énergétique français : charbon, pétrole, gaz, hydraulique, nucléaire. De ce fait, ils ont laissé de côté d'autres sources d'énergie, mis à part certains cas spécifiques d'innovation dans les grandes entreprises : un chapitre est ainsi consacré aux travaux d'EDF sur les énergies nouvelles sur la période (1940-1970) (usines marémotrices et maréthermiques, centrales éoliennes) dans le troisième tome de l'*Histoire de l'électricité en France* (Banal, 1996).

En 1986, les travaux de Debeir, Deléage et Hémery, (2013) *et al* proposent une fresque mondiale de l'histoire de l'énergie. Adoptant également une approche économiste et systémique, cette histoire de l'énergie se démarque des travaux de la même période par une volonté de ne pas se « cantonne[r] à des points de vue partiels » sur l'énergie mais, au contraire, d'étudier les « structures énergétiques » dans leur « totalité », condition nécessaire selon les auteurs à la compréhension qu'ils souhaitent apporter de la « crise énergétique » (Debeir, Deléage et Hémery, 2013, p. 14-15). Ils portent ainsi une attention accrue au caractère politique et environnemental des « systèmes énergétiques ». Cette notion, découlant directement de la notion de « système technique » de Gille, vise ainsi à rendre compte des « caractéristiques écologiques et technologiques des filières (évolution

3. Des acteurs des institutions ont également contribué à ces travaux, tels que Marcel Boiteux lui-même, ou encore Michel Banal, qui était ingénieur chez EDF.

des sources, des convertisseurs et de leurs rendements) et, d'autre part, les structures sociales d'appropriation et de gestion de ces sources et de ces convertisseurs » (Debeir, Deléage et Hémery, 2013, p. 25). Ces auteurs donnent ainsi une place centrale aux « convertisseurs », techniques (de nature biologique ou artificielle) qui « transform[ent] économiquement l'énergie brute en des formes utilisables », plutôt qu'aux sources d'énergie, considérant le système énergétique comme une chaîne de convertisseurs. Cette approche plus soucieuse des enjeux politiques du système énergétique reste cependant trop globale, et toujours focalisée sur les bilans énergétiques, pour prendre en considération une histoire des énergies renouvelables à l'âge industriel. Ainsi, de la même manière que Gille associe à une civilisation un système technique, Debeir *et al* associent à une société des filières ou le cas échéant un système énergétique dominant. Le système énergétique industriel, aussi qualifié de « capitaliste », succède, d'abord en Europe, et à l'issue d'une longue « transition énergétique », au système « proto-industriel ». Il voit l'apparition de « vastes réseaux centralisés, dont l'extension spatiale tendit non seulement à délocaliser l'offre d'énergie à l'échelle mondiale, mais aussi à inverser le rapport entre la demande et l'offre ». Il se base sur le « triomphe de l'énergie fossile » sur les énergies éolienne et animale ; l'énergie hydraulique fait exception car elle fut modernisée par le transport électrique : en effet, dans ce système, « le développement des autres formes d'énergie qui apparurent par la suite dépendit de leur capacité à être transportées » (Debeir, Deléage et Hémery, 2013, p. 215). Dans la dernière réédition de cette histoire de l'énergie, les travaux mondiaux, et plus spécifiquement français, sur les énergies renouvelables cités (et critiqués) sont ceux que déploient, depuis la fin des années 2000, les grandes entreprises historiques détentrices des filières énergétiques dominantes (EDF, Total, Areva) en tant qu'« accessoires rentables » : parcs éoliens, centrales solaires (Debeir, Deléage et Hémery, 2013, p. 508-515).

Ainsi, en raison de la place laissée aux seules sources d'énergie devenues majoritaires dans le bilan énergétique, ou aux seuls acteurs moteurs de la construction de ce système énergétique, l'histoire de l'énergie en France entre la fin du XIX^e^ siècle et celle du XX^e^ siècle par les approches économistes s'apparente au récit d'une progression inéluctable de l'exploitation des sources d'énergie fossiles puis nucléaire. Un récit générique (et forcément simplificateur) de l'histoire des énergies renouvelables en France du long XX^e^ siècle qu'on pourrait en tirer ressemblerait au suivant : à l'exception de l'hydraulique classique (chutes d'eau et rivières), les énergies renouvelables auraient été délaissées avant de retrouver une place, au moins dans les discours, dans les années 1970, à la suite des chocs pétroliers et de l'institutionnalisation de l'écologie politique. Supplantés à partir du milieu du XIX^e^ siècle par la machine à vapeur et les autres moteurs utilisant des carburants fossiles, les moulins à vent et à marées développés au Moyen-âge auraient été délaissés petit à petit, avant que, dans les années 1970, ces convertisseurs, ou du moins les formes d'énergie qu'ils

transformaient, ainsi que d'autres sources d'énergie renouvelables, ne suscitent l'intérêt d'une civilisation devenue consciente des « limites de la croissance » et de la nécessité de protéger son environnement.

Cette thèse vise au contraire à présenter, d'une manière synthétique, les multiples tentatives pour l'exploitation des énergies renouvelables en France sur la période 1880-1990.

## Propositions pour une histoire « désorientée » de l'énergie

L'approche de l'histoire de l'énergie décrite ci-dessus est critiquée par certains auteurs qui en appellent à une histoire « désorientée » de l'énergie et, dans ce programme, cherchent à donner une place nouvelle aux énergies renouvelables. En France, à la suite de Gras (Gras, 2003, Gras, 2007), des auteurs comme Jean-Baptiste Fressoz (Fressoz, 2013), François Jarrige , Christophe Bonneuil, Céline Pessis et Sezin Topçu (Bonneuil, Pessis et Topçu, 2015) lui reprochent une vision déterministe, naturalisante (c'est-à-dire présentant comme un « donné » naturel l'énergie, en éludant le caractère historiquement situé de ce concept et tout l'imaginaire qu'il véhicule), partisane de l'histoire de l'énergie. Cette critique est adressée de manière plus large à l'histoire des techniques, et plus précisément à celle de la « révolution industrielle » qui, renouvelée et dominée dans l'après-guerre par l'approche économiste, s'inscrit elle-même dans la dynamique de modernisation du pays, avec un manque de réflexivité sur l'adhésion à ce projet (Fressoz et Jarrige, 2013). Elle adopte ainsi la rhétorique d'un progrès universel triomphant, rendu possible par les sciences et les techniques, et plus précisément l'innovation, et dont la croissance (économique) serait à la fois une conséquence positive, un but et un indicateur. Face à une histoire déterministe de l'énergie, focalisée sur les bilans énergétiques, qui décrit la progression nécessaire de l'utilisation de sources thermiques d'énergie de plus en plus concentrées, ces auteurs proposent d'y substituer une histoire de « trajectoires » technologiques, fruits de la « précipitation, à un certain moment, de devenirs multiples et variés » (Gras, 2007, p. 76). D'autres trajectoires technologiques se sont ainsi présentées depuis la fin du XIX$^{e}$ s, et, si celles-ci ne sont finalement pas développées, elles questionnent le caractère inéluctable de l'avènement de cette civilisation thermo-industrielle.

Pour une histoire désorientée de l'énergie, plusieurs approches sont possibles et, récemment, un colloque organisé par Alexis Vrignon et François Jarrige sur l'histoire des énergies « alternatives » montre la richesse de ce champ en constitution en France [4]. Elle peut ainsi prendre la forme d'une histoire des usages, gommés par les grandes tendances

4. Ce colloque s'est tenu à l'Université de Bourgogne les 22 et 23 mars 2018 et s'intitulait « Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives et renouvelables à l'âge industriel ».

globales, en raison de leur minorité en termes de quantités d'énergie consommée, ou, justement, de leur caractère « traditionnel » qui en font des objets secondaires d'une histoire focalisée sur l'innovation : c'est le cas des moulins à vent ou des moulins à chevaux comme moteurs industriels [5], et les travaux récents montrent à quel point l'arbitrage entre ces moteurs et les moteurs thermiques est longtemps resté en faveur des premiers au cours de ce siècle d'industrialisation. On peut aussi désorienter l'histoire de l'énergie en adoptant de nouvelles manières de comptabiliser les consommations d'énergie, qui relativisent l'importance des énergies fossiles dans les usages et favorisent ainsi l'idée de futurs possibles non advenus [6]. L'étude de groupes sociaux en lutte contre la mise en place d'aménagements énergétiques, et dont l'histoire a ensuite été invisibilisée, met également en évidence les rapports de force et la trajectoire cahoteuse du système énergétique actuel : les travaux de Sezin Topçu sur les luttes françaises contre l'énergie nucléaire en sont un bon exemple (Topçu, 2013).

Une autre manière d'éclairer sous un nouveau jour l'histoire de l'énergie est de faire celle de convertisseurs novateurs, permettant l'exploitation de sources d'énergie jusqu'alors inusitées pour les usages qui en sont envisagés, et qui n'ont pas connu la prospérité des machines thermiques ou des combustibles fossiles. C'est le cas, à l'ère industrielle, de nombreuses machines exploitant les énergies dites aujourd'hui renouvelables, dont certains cas français sont aujourd'hui assez largement connus, tels que le moteur solaire d'Augustin Mouchot (fin XIX$^{e}$ siècle), ou la station maréthermique de Georges Claude et Paul Boucherot (entre-deux-guerres). Plusieurs études historiques ont été effectuées sur le sujet (entre autres, Barbier, 2000 ; Ramunni, 1985 ; Jarrige, 2010).

## Histoires des énergies renouvelables

À la faveur d'un engouement général pour les énergies renouvelables ces dernières années, des histoires en existent dores et déjà. Plusieurs moments de l'histoire des énergies renouvelables en France ont ainsi été étudiés par des auteurs, historiens ou anciens acteurs, qui se sont majoritairement penchés sur une source d'énergie et une sous-période de l'intervalle [1880-1980]. Comme cette thèse porte sur l'ensemble du XX$^{e}$ siècle et sur toutes les énergies renouvelables, elle intègre ces travaux de manière synthétique. Le bilan

5. Sur ce sujet, Didier Terrier étudie le cas des moulins à vent pour la région lilloise au XIX$^{e}$ siècle. François Jarrige et Mohamed Kasdi ont présenté une communication à propos des moulins à chevaux sur la période 1800-1830.

6. Dans sa communication au colloque de mars 2018 sur les énergies alternatives, Fressoz compare ainsi l'usage du charbon à celui des huiles végétales pour l'éclairage au XIX$^{e}$ siècle. Au lieu de comparer les quantité d'énergie correspondant au combustible effectivement consommé pour ces usages, il compare les quantités de « lumière » effectivement délivrées au final à partir de chacune de ces sources d'énergie. Le très mauvais rendement de la production du gaz d'éclairage relativise la place prise par le charbon dans l'usage qui en est fait pour l'éclairage.

historiographique qui suit présente d'abord les histoires de l'énergie solaire, puis celles de l'énergie des marées, de l'énergie éolienne et, enfin, de l'énergie thermique des mers. Quant à l'énergie des vagues, je n'ai pas connaissance d'études historiques sur la France à ce sujet.

L'histoire de l'énergie solaire a été particulièrement étudiée en France. Notamment, deux thèses ont été récemment soutenues à ce sujet. Marion Chauvin-Michel a soutenu en 2012 une thèse sur les politiques en faveur de l'architecture solaire dans les années 1970-1980. Sophie Pehlivanian en a repris les conclusions, par ailleurs utilement résumées dans un article des *Annales historiques de l'électricité* (Chauvin-Michel, 2013). Pehlivanian a réalisé un travail de thèse conséquent sur l'histoire et le patrimoine de l'énergie solaire en France après la seconde guerre mondiale (Pehlivanian, 2014). Cette thèse, revendiquant une approche patrimoniale, compile des informations issues d'un important travail d'archives (écrites et orales) sur les institutions d'après guerre qui ont eu pour objet d'étude l'énergie solaire (Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Institut de l'énergie solaire d'Alger puis de Marseille, COMES puis AFME, etc.), sur l'histoire industrielle de certaines installations (héliodyne de la Bouzaréah, centrale solaire Thémis, centrale solaire de Vignola...) et sur l'imaginaire populaire de l'énergie solaire. Les nombreux récits d'institutions, d'acteurs et d'objets techniques qu'elle propose ont été largement mis à contribution dans cette thèse.

Avant cela, des ouvrages collectifs et numéros de revues thématiques ont été consacrés au sujet, ainsi que quelques articles et chapitres d'ouvrages ponctuels. Ainsi, en 1995, un ouvrage, mêlant travaux d'historiens et récits de témoins, est paru à l'issue d'un colloque sur l'histoire de l'énergie solaire organisé en 1993 pour le 118$^{e}$ Congrès national des sociétés historiques et scientifiques à Pau (Herléa, 1995). Ces récits proposent, sur différentes échelles de temps, des histoires de l'énergie solaire en France, qui se focalisent généralement sur un type de convertisseur (pompes, fours, panneaux photovoltaïques...), voire sur une installation particulière (four solaire d'Odeillo). Au CNRS, depuis les années 2000, plusieurs historiens ont travaillé sur l'histoire de l'énergie solaire au sein de l'institution, dans le cadre du Comité pour l'histoire du CNRS, et ont recueilli des témoignages d'acteurs (Ramunni et Deflandre, 2001), et retracé l'histoire de programmes (Guthleben, 2007), d'installations, publiés dans la *Revue pour l'histoire du CNRS*. En 2011, à la faveur d'un « Programme interdisciplinaire énergie » cherchant à mettre en avant le patrimoine du Centre dans le domaine de l'énergie solaire, des historiens du Comité ont en outre entrepris la valorisation des archives institutionnelles du Centre et poursuivent le recueil des témoignages d'acteurs, dont certains sont publiés dans les *Cahiers pour l'histoire du CNRS* (Claverie, 2011). Plus récemment, un numéro des *Annales historiques de l'électricité* était consacré au sujet des politiques publiques de l'énergie solaire en France, et regroupe un ensemble de contributions d'historiens, de géographes et de professionnels,

issues d'une journée d'études organisée en juin 2013 par l'Université de Savoie (Bouvier et Pehlivanian, 2013). Outre un article dans ce numéro (Teissier, 2013), Pierre Teissier est l'auteur d'une contribution à un ouvrage collectif d'histoire des sciences sur l'objet solaire, à propos des convertisseurs expérimentés à Odeillo par des chercheurs du CNRS dans les années 1950-1980 (Teissier, 2015). Enfin, François Jarrige a revisité l'histoire bien connue du moteur solaire d'Augustin Mouchot à la fin du XIX^e^ siècle, en mettant en avant le contexte politique, économique et institutionnel de ce projet (Jarrige, 2010).

L'énergie des marées, une des rares source d'énergie renouvelable dont un convertisseur (l'usine marémotrice de la Rance) ait été construit sur la période étudiée dans cette thèse et qui soit toujours opérationnel aujourd'hui, a fait l'objet de plusieurs études historiques, par des historiens et des acteurs de cette filière. Paul Naegel, historien des techniques et acteur de la maintenance de cette usine [7], a revisité l'histoire de l'usine marémotrice de la Rance, en montrant l'importance, pour les acteurs locaux, du rôle de pont joué par l'usine, et le fait que l'usine a bien failli ne pas être construite pour des raisons financières (Naegel, 2014). L'historienne Dominique Guillé a en outre effectué un mémoire de master, une communication, et amorcé une thèse, sur l'histoire de l'énergie marémotrice en France au XX^e^ siècle. Dans ce cadre, elle a étudié l'histoire, peu connue, de la Commission de la houille bleue du ministère des Travaux publics (1919-1940) et d'un projet d'usine marémotrice avorté à l'Aber Wrac'h dans l'entre-deux-guerres (Guillé, 2008). L'économiste Frédéric Marty a par ailleurs comparé les trajectoires françaises des énergie marémotrice et maréthermique dans l'entre-deux-guerres et dans l'immédiat après-guerre dans le *Bulletin d'histoire de l'électricité* (Marty, 2000). Enfin, deux ingénieurs des Études et recherches d'EDF, René Bonnefille et Michel Banal, ont mis en valeur les travaux d'EDF sur l'énergie marémotrice dans les années 1950-1960, et ont notamment raconté l'histoire de l'usine marémotrice de la Rance et du projet (récurrent entre les années 1920 et les années 1970) d'une usine marémotrice au Mont-Saint-Michel (Bonnefille, 1976b ; Banal, 1996 ; Banal, 1997).

De rares études ont été consacrées à l'histoire de l'énergie éolienne en France. Au début des années 2000, Étienne Rogier a publié plusieurs articles de vulgarisation sur l'histoire, en France, entre la fin du XIX^e^ et la seconde guerre mondiale, des éoliennes de pompage, de l'électricité éolienne et d'un ingénieur inventeur des années 1920-1930, Louis Constantin (Rogier, 2000a, Rogier, 2000b, Rogier, 2002). En 1976, alors qu'EDF ne considère plus l'énergie éolienne comme une possibilité pour alimenter le réseau électrique français mais que les « énergies nouvelles » sont en vogue, Bonnefille a cherché à mettre en valeur

7. Alors qu'il était ingénieur (spécialiste de l'électrotechnique), Paul Naegel a eu la chance de participer à la réparation d'un des groupes bulbe de l'usine. Il est pour ce faire entré dans le groupe bulbe et peut témoigner du fait que, contrairement à ce qu'affirme Gilbert Simondon, les turbines ne sont pas refroidies par de l'huile mais par de l'air. Si tel était le cas, Paul ne serait pas parmi nous mais mort dans un bain d'huile !

les travaux antérieurs de l'entreprise publique sur le sujet, en publiant dans *La houille blanche* un article sur les grands aérogénérateurs expérimentés par EDF dans les années 1950-1960 (Bonnefille, 1976a). Banal a également synthétisé ces travaux d'EDF dans le troisième volume de l'*Histoire de l'électricité en France* (Banal, 1997). Dans un ouvrage sur l'énergie éolienne, son passé, son présent et son avenir, Marc Rapin et Jean-Marc Noël, deux ingénieurs du domaine, ont écrit une partie introductive sur l'histoire de l'énergie éolienne en France depuis la fin du XIX^e^ siècle, à partir d'un travail archivistique (Rapin et Noël, 2014). Enfin, l'Association des amis de l'éolienne Bollée a effectué un intéressant travail patrimonial sur cette machine française commercialisée entre la fin du XIX^e^ siècle et les années 1940, et a notamment réalisé un recensement de toutes ces machines en France (Pestel, 2010).

L'énergie thermique des mers a été peu étudiée par les historiens, mais a fait l'objet de nombreux historiques par des acteurs de la filière, à la fois fiers de cette invention bien française et désireux de faire un état de l'art de la technique. C'est ainsi que les travaux de Georges Claude sont bien connus, ce qui est moins le cas des projets d'usine maréthermique à Abidjan dans les années 1940-1960 ainsi que celui d'une autre usine, à Tahiti, par le Centre national pour l'exploitation des océans (CNEXO) dans les années 1970-1980. Ainsi, deux historiens se sont penchés sur ce sujet : Girolammo Ramunni, qui retrace le projet de Georges Claude (Ramunni, 1985), et Paul Barbier, qui retrace trois projets échoués, celui de Georges Claude dans l'entre-deux-guerres, celui de la société L'énergie des mers dans les années 1940-1960 et celui du CNEXO dans les années 1970-1980 (Barbier, 2000). Des acteurs de la filière ont donc réalisé de nombreux historiques, comme Philippe Marchand, à la tête du programme Énergies marines du CNEXO dans les années 1970-1980, qui a par ailleurs accepté de témoigner dans le cadre de cette thèse, ou encore Michel Gauthier, responsable du programme Énergie thermique des mers à l'antenne CNEXO de Brest (Gauthier, 2005).

Enfin, le politiste Aurélien Évrard a effectué la seule étude historique sur l'ensemble des énergies renouvelables en France au XX^e^ siècle, en comparant les politiques publiques des énergies renouvelables en France, au Danemark et en Allemagne sur le temps court, entre les années 1970 et 2010 (Évrard, 2013). Plus précisément, Évrard a examiné les énergies renouvelables en tant qu'alternative au secteur électrique, et étudié le rôle de différents acteurs ainsi que leurs conflits dans la construction de politiques publiques des énergies renouvelables. Évrard conclut que le secteur électrique, et ses acteurs, ont absorbé le contenu politique des militants des années 1970, en faisant des énergies renouvelables des sources d'énergie comme les autres, intégrées au système énergétique dominant. J'ai mobilisé ce remarquable travail pour la période 1970-1980, mais, avec l'approche historique du long terme, je raccroche cette histoire qui débute dans les années 1970 au reste du siècle — ne pouvant, comme Évrard, considérer les années 1970 comme pionnières, mais plutôt

comme un moment singulier de l'histoire des énergies renouvelables.

Beaucoup d'études historiques ont donc été réalisées sur les énergies renouvelables en France au XX^e^ siècle, mais morcelées par différentes approches : par source d'énergie, par type de convertisseur, par projet, par acteur (institution ou personne), par sous-période du XX^e^ siècle. Tout l'enjeu de cette thèse est de mettre à contribution ces travaux dans une approche synthétique. Sans ambition d'exhaustivité, évidemment inatteignable, certaines données de ces travaux sont ainsi resituées dans le temps long, et dans une perspective plus large d'histoire des énergies renouvelables.

## Positionnement historiographique

Cette thèse met à contribution les apports de l'histoire des techniques de Gille et de l'histoire économique de l'énergie, tout en partageant le constat des partisans d'une histoire désorientée de l'énergie sur leurs limites. Dans cette section, je précise d'abord trois notions sur lesquelles je me suis beaucoup appuyée, celles de système technique, d'inertie (Gille, 1978, Hughes, 1989, Gras, 1997) et de système énergétique (Debeir, Deléage et Hémery, 2013). Je précise ensuite ce que j'emprunte à l'histoire économique, et dans quelle mesure je réponds au projet d'une histoire désorientée de l'énergie.

### Système technique, système énergétique, inertie

Les notions de système technique et de système énergétique me semblent toujours pertinentes pour saisir les inerties, la « dépendance au chemin suivi » (David, 1985) qui ont été des freins ou des moteurs du développement de l'utilisation des énergies renouvelables. De manière plus générale, elles permettent de considérer les projets techniques comme un enchevêtrement de paramètres certes économiques et techniques, mais aussi politiques, sociaux et culturels.

La notion de système technique présente des variantes selon les auteurs qui l'ont théorisée : la définition de Gille a en effet été reprise et affinée. Au sens de Gille, comme on l'a vu plus haut, c'est l'ensemble des techniques interconnectées, ou, plus précisément, « l'ensemble des techniques mises en œuvre à une même époque » en « compatibilité dynamique » (Cohen et Pestre, 1998). Celles-ci sont en interaction avec les systèmes économique, social, culturel, paramètres qui sont donc externes au système technique et qu'on peut se permettre d'écarter dans une étude internaliste des techniques. Cette approche n'est pas celle de cette thèse : celle-ci postule que les acteurs associés au système sont inextricablement liés aux artefacts techniques (au sens de composants non humains) du système, et que ces acteurs sont enchevêtrés dans des enjeux économiques mais aussi

politiques et sociaux, et imprégnés par des conceptions qui forgent leur imaginaire technicien. Par exemple, si l'on considère le cas typique en histoire de l'énergie d'un ingénieur travaillant dans une entreprise, les inerties sont liées autant à l'imaginaire de ces techniciens qui sont formés dans une certaine vision de la technique qu'aux possibilités purement matérielles que les technologies disponibles permettent. L'économie fait quant à elle partie intégrante de ces organisations, plus qu'elle ne les croise.

Suivant ces considérations, l'historien des techniques américain Thomas P. Hughes et, à sa suite, l'anthropologue Alain Gras, ont remanié la notion, en accordant une très grande importance aux paramètres politiques, sociaux et culturels des techniques qu'ils incluent au sein des systèmes techniques. Ces deux auteurs ne parlent en outre pas d'un seul système technique, caractéristique d'une époque, mais de plusieurs systèmes techniques, comprenant des sous-systèmes et en interaction les uns avec les autres. Un degré de précision est donc apporté dans l'interdépendance relative entre chaque élément (organisations humaines et artefacts) du système. Comme Gille, Hughes et Gras ont appliqué la notion aux techniques de l'énergie, qui sont centrales dans leurs travaux. Ainsi, l'ouvrage fondateur de Hughes s'intitule *Networks of power*, titre délibérément ambigu qui désigne à la fois les réseaux d'artefacts énergétiques et les rapports de pouvoirs en œuvre dans les systèmes techniques.

Pour Hughes, les systèmes techniques « à la fois sont construits socialement, et modèlent la société ». Il « contiennent des composants désordonnés, complexes et capables de résoudre des problèmes » : « des artefacts matériels tels que, dans le système de lumière et d'énergie électrique, des turbogénérateurs, des transformateurs et des lignes de distribution », mais aussi « des organisations, comme les firmes manufacturières, les sociétés de services, les banques d'investissement[...], des composant généralement qualifiés de scientifiques, comme les livres, les articles, et les programmes d'enseignement et de recherche universitaire », ou encore des « éléments législatifs, comme les lois de régulation » (Hughes, 1989, p. 51) » [8]. Ils constituent ainsi des « tissus sans couture » (« *seamless web* ») techniques, politiques, sociaux, culturels. Selon Hughes, en grandissant, ces systèmes acquièrent une inertie : ils ont « une quantité importante (ou « massive » : « *a mass of* ») d'éléments techniques et organisationnels », « avancent dans une direction ou vers un but », et « présentent une croissance qui évoque la vitesse » (Hughes, 1989, p. 76-77) [9]. Les *large technological systems* sont ceux qui ont acquis la plus grande inertie. Par

8. Traduit de l'anglais.
Dans une publication ultérieure, Hughes fait une différence entre systèmes techniques, qui sont, comme pour Gille, formés de « composants artificiels » interdépendants, mais ceux-ci sont inclus dans des « systèmes socio-techniques » « qui comportent à la fois des composants artificiels et des composants organisationnels » que seuls étudie l'historien intéressé par la « construction sociale des systèmes techniques » (Hughes, 1998). On peut assimiler, dans la pensée de Hughes, ces systèmes socio-techniques aux systèmes techniques préalablement définis dans la publication citée ci-dessus.

9. Traduit de l'anglais.

la notion d'inertie, Hughes cherche à relativiser l'impression d'autonomie donnée par ces *large technological systems*. L'analogie avec la mécanique permet également de parler de « trajectoire » technologique, et d'appréhender l'évolution des systèmes techniques. Les acteurs humains (inventeurs, ingénieurs, politiciens...) et organisationnels (sociétés, services, institutions d'enseignement et de recherche, publics et privés...) sont pour Hughes les principaux responsables du maintien et de l'agrandissement des systèmes techniques, qui sont ainsi le fruit des intérêts dont ils ont été investis.

Gras s'est inspiré des travaux de Hughes sur les « *large technological systems* » et a forgé l'expression de « macro-système technique » (Gras, 1997 ; Gras, 2003). Ces systèmes sont des « ensembles d'objets techniques liés entre eux par des réseaux d'échanges », et se composent d'« un objet industriel au sens large, telle la centrale électro-nucléaire », d'« une organisation de la distribution des flux, pour continuer le même exemple le réseau électrique » et « d'une entreprise de gestion commerciale pour relier l'offre et la demande, EDF dans le cas français » (Gras, 1997, p. 4). Le macro-système technique est différent du *Large technological system* ou « grand système technique » en ce qu'il l'intègre en son sein, avec d'autres grands systèmes techniques : pour Gras, le « système nucléaire » est un grand système technique et le système électrique est un macro-système technique, qui intègre le premier. Ce qui m'intéresse ici est moins la nuance apportée à la notion de système technique que l'importance accordée à ses dimensions politiques et imaginaires : politiques, car, à l'instar d'Hughes, Gras considère ces systèmes comme le jeu de rapports de pouvoirs, dont les citoyens sont dépossédés et dont l'auteur souhaite qu'ils se les réapproprient [10] ; imaginaires, car il cherche à montrer la singularité historique de l'existence de ces macro-systèmes techniques, inhérente à la civilisation industrielle (ou « thermo-industrielle » comme l'auteur la désignera dans ses écrits ultérieurs). Or, la « généalogie » de ces macro-systèmes est pour Gras tout autant matérielle qu'imaginaire , et l'auteur entend mener ses recherches sur ce deuxième aspect, c'est-à-dire dans le sens d'« une interrogation sur l'imaginaire des peuples et sur la créativité sociale » (Gras, 1997, p. 21). Dans cet imaginaire, celui de la puissance est fondamental, ou plutôt, celui d'une « volonté de puissance sur l'environnement naturel » . En particulier, le « nouvel ordre sociotechnique » auquel appartiennent les macro-systèmes techniques repose sur une « nouvelle représentation de la puissance », un « trépied imaginaire où mobilité et rapidité se combinent » à savoir : « extraire, stocker, transférer l'énergie », ce que permettent les énergies fossiles et l'électricité (Gras, 1997, p. 25 ; 43). Gras reprend également la notion d'inertie ou de *momentum* associée au système technique, et y voit à la fois « la puissance acquise » et l'« instant temporel où peut se réaliser l'insertion du phénomène dans le monde social »

10. Le but de sa recherche est la « mise en scène de la grandeur technologique et de la dépendance qu'elle peut entraîner pour le citoyen d'une démocratie contemporaine » afin que celui-ci se réapproprie les questions scientifiques et techniques qui, « mises à l'écart de la discussion entraînent nécessairement des choix politiques, économiques, éthiques qui peuvent se retourner contre la volonté de l'homme » (Gras, 1997, p. 5).

(Gras, 1997, p. 57). Il parle aussi de « trajectoire » des objets et des systèmes techniques, comme définie plus haut.

Il est aussi question de « système énergétique », d'après la conception qu'en ont Debeir, Deléage et Hémery, (2013). Ces auteurs insistent, comme Hughes et Gras, sur l'aspect politique de ces systèmes techniques particuliers, ainsi que sur leurs caractéristiques écologiques et géographiques. Selon ces auteurs, un système énergétique est la « combinaison originale de diverses filières de convertisseurs qui se caractérisent par la mise en œuvre de sources d'énergie déterminées et par leur interdépendance, à l'initiative et sous le contrôle de classes ou de groupes sociaux, lesquels se développent et se contrôlent » (Debeir, Deléage et Hémery, 2013, p. 25). Pour eux, « les premiers éléments de la définition d'un système énergétique sont ses caractéristiques écologiques et techniques, à savoir : aire et techniques de l'approvisionnement de l'énergie primaire, modes de sa collecte ou de son extraction, de son transport et de son stockage, types de convertisseurs et formes de l'énergie finale, enfin et surtout, rapports mouvants de concurrence et de complémentarité entre les diverses filières » (Debeir, Deléage et Hémery, 2013, p. 26). En outre, « une deuxième série d'éléments, indissociables des précédents [sont] les formes d'appropriation, qui commandent elles-mêmes l'agencement des convertisseurs et les modes de consommation de l'énergie ». Le système énergétique peut donc être considéré comme un sous-système du système technique et comme un ensemble de systèmes et de filières techniques (un macro-système technique selon Gras), tels que le système électrique et la filière pétrolière .

Le système technique au sens de Gille, les systèmes techniques définis par Hughes et Gras, et le système énergétique de Debeir, Deléage et Hémery, (2013) sont donc des cadres conceptuels pertinents pour une histoire des énergies renouvelables à plusieurs niveaux. Ils permettent en effet de considérer les tentatives pour concevoir, mettre au point, commercialiser, des convertisseurs non seulement innovants, mais exploitant des sources d'énergie qui répondent moins aux exigences de l'imaginaire technicien de la civilisation thermo-industrielle que les énergies fossiles, dans un contexte plus large que le seul contexte économique ou technique. Laurence Raineau a déjà montré la pertinence de la notion de macro-système technique pour l'analyse de l'innovation dans le domaine des énergies renouvelables, et montré l'importance de l'imaginaire de l'énergie dans un système qui s'est « constitué autour, et pour, des énergies fossiles » (Raineau, 2009). L'existence de systèmes techniques dans toutes leurs dimensions induit une certaine détermination, cette inertie qui s'exerce sur la manière dont des acteurs conçoivent, construisent, diffusent, choisissent d'utiliser (ou non), ces techniques novatrices. Ces notions permettent d'identifier, dans les projets d'exploitation des énergies renouvelables étudiés, la nature (technique, imaginaire, économique, sociale, politique) et l'intensité de cette inertie.

Du système technique de Gille, c'est donc l'idée d'une interconnexion dynamique et plus ou moins lâche entre les différentes techniques mises en œuvre à un moment donné dans une société donnée qui est retenue dans cette thèse. En revanche, ce système technique (au singulier), qui sera désigné ainsi tout au long de ce travail, est considéré, comme les systèmes techniques de Hughes et Gras, comme l'ensemble des techniques, mais aussi des acteurs et organisations (humains) qui les gèrent. Les aspects techniques, économiques, sociaux, politiques et culturels sont considérés comme des « tissus sans coutures ». Les définitions de systèmes techniques de Hughes et Gras sont reprises telles quelles, c'est-à-dire, pour synthétiser, comme des ensembles d'organisations et d'artefacts interdépendants. Ils sont des sous-éléments du système technique, et eux-mêmes plus ou moins interdépendants. Je ne fais en général pas la distinction entre « grand »-, « macro »- et systèmes techniques. Pour les différencier du système technique, ils sont caractérisés par un adjectif comme pour « système électrique » ou « système nucléaire » (qui sont respectivement un « macro-système technique » et « grand système technique » selon Gras). De même, je reprends la définition de système énergétique de Debeir, Deléage et Hémery, (2013).

Toutes ces nuances sont utiles pour situer les projets d'utilisation des énergies renouvelables. Certains d'entre eux sont des tentatives pour faire entrer un nouveau convertisseur dans le système énergétique ; d'autres pour créer de nouveaux systèmes techniques ; d'autres, se font de manière relativement indépendante du système énergétique et ne s'insèrent que dans le système technique général.

### Une histoire de l'innovation hors du bilan énergétique

Je tire profit des apports des historiens de l'économie sur l'histoire technique, économique et institutionnelle de l'énergie, particulièrement utiles pour situer mon objet d'un point de vue global. Le contexte énergétique général, macro-économique, français, est en effet éclairant pour comprendre les tentatives qui auraient été faites pour utiliser des sources d'énergie « alternatives » (minoritaires ou inusitées) grâce à des convertisseurs novateurs. Je me situe en outre, comme beaucoup de ces auteurs, dans le cadre d'une histoire de l'innovation : je me focalise sur des convertisseurs novateurs et sur leurs inventeurs/constructeurs/promoteurs, qui sont très souvent des acteurs courants dans ce type d'histoire des techniques (inventeurs, ingénieurs, entreprises, institutions publiques). Cette thèse exhume donc des projets majoritairement peu connus voire oubliés, mais émanant pour beaucoup de types d'acteurs connus, plus qu'elle ne donne sa voix à des « oubliés de l'histoire ».

À la suite des partisans d'une histoire « désorientée » de l'énergie, je suis très attentive à ne pas faire une histoire téléologique et enthousiaste du progrès technique, et je refuse la focalisation sur le couple innovation/entrepreneurs. Il s'agit par ailleurs d'une

histoire de l'énergie hors du bilan énergétique. Il n'est certes pas question de mettre en doute la construction d'une civilisation thermo-industrielle. Le constat *a posteriori* d'une croissance énergétique mondiale exponentielle depuis le XIX^e^ siècle, basée au départ sur le couple charbon/machine à vapeur, est en effet sans appel, même si de fortes disparités spatiales et temporelles sur les sources et la quantité d'énergie utilisées se sont présentées, entre nations, mais aussi au sein des nations. Il est également indéniable que, ces dernières années, par la mise en place de politiques publiques et l'implication d'industriels, les énergies renouvelables ont pris une place sans précédent dans la civilisation thermo-industrielle, que ce soit en termes de quantités d'énergie consommée, d'argent public et privé qui y est consacré, de consensus sur les bienfaits de leur utilisation, et ce malgré des antagonismes sur la meilleure manière de les utiliser. Il s'agit cependant, au sein de cette tendance globale, d'éclairer les tentatives, récurrentes, pour exploiter les énergies renouvelables grâce à des convertisseurs novateurs (en tout cas, considérés comme tels), et ce depuis la fin du XIX^e^ siècle. Cette démarche donne une place à des projets qui ont ouvert des brèches dans l'histoire des sources d'énergie qui se sont affirmées (ou qui sont devenues ensuite) dominantes dans ce bilan. Elle questionne les conditions de naissance de ces projets, ainsi que le cheminement qui a fait de la majorité des convertisseurs étudiés des éléments marginaux du système technique thermo-industriel. Cette thèse mène en outre une étude réflexive du discours et de l'imaginaire des porteurs de projets techniques novateurs. Je ne prends pas pour nécessaires les exigences de la société thermo-industrielle (telles que celle de la croissance énergétique des nations, le primat de l'efficacité et du rendement des machines, l'impératif pour un couple machine/énergie de répondre au trio extraction/stockage/délocalisation, etc.) mais comme une construction sociale à identifier à la fois comme résultat et comme moteur de l'action de ces personnes ou de ces organisations. Enfin, les acteurs identifiés ne sont pas toujours ceux de l'histoire des énergies classiques.

Il est maintenant temps de préciser l'objet de cette thèse et la méthode employée pour l'étudier.

## Méthodologie : objet, cadrage spatio-temporel

Cette thèse propose une histoire des énergies renouvelables en France au XX^e^ siècle. Plus précisément, il s'agit d'une histoire d'initiatives en faveur de convertisseurs innovants permettant d'exploiter des sources d'énergie dites aujourd'hui renouvelables, dans la France coloniale et post-coloniale, et pour la période (1880-1990). Cette problématique circonscrit l'objet (les initiatives en faveur de convertisseurs innovants exploitant les énergies renouvelables) et le domaine spatio-temporel (la France coloniale et post-coloniale

des années 1880 aux années 1980). Ces projets sont examinés selon le prisme suivant : acteurs impliqués, techniques employées. Cette grille permet d'adopter une perspective techno-politique. C'est sur l'articulation de l'ensemble « acteurs-convertisseurs » et son évolution en fonction de contextes économiques, politiques, sociaux et culturels qu'est construite cette thèse. La périodisation est effectuée en fonction de changements jugés marquants dans cet ensemble. Cette thèse est donc construite de manière chronologique, et quatre grandes périodes ont été identifiées.

Cette section précise chacun des éléments de la problématique : d'abord, l'objet, puis la période, et enfin le territoire et les acteurs.

## L'objet : des convertisseurs innovants transformant des énergies renouvelables

### Les convertisseurs comme nœuds techno-politiques

À l'instar de Debeir, Deléage et Hémery, (2013), cette thèse propose une histoire de convertisseurs, et non une histoire de sources d'énergie. Ces convertisseurs sont des objets techniques [11] qui transforment une énergie sous une certaines forme en énergie utilisable (ou « utile ») à une (ou plusieurs) fin(s). Ainsi, les convertisseurs sont un type particulier de machine : on peut en effet considérer que toutes les machines sont des objets techniques qui, mus par une source d'énergie, produisent un effet désiré. Les convertisseurs ont cette caractéristique que l'effet escompté est une certaine forme d'énergie, elle-même destinée à être utilisée à d'autres fins. Selon cette considération, les convertisseurs sont donc des machines qui ont pour effet utile de l'énergie sous une certaine forme. Une dynamo (énergie mécanique → énergie électrique), une pile à combustible (énergie chimique -→ énergie électrique), un moteur à combustion interne (chaleur -→ énergie mécanique) ou un réacteur nucléaire (énergie atomique -→ chaleur) sont par exemple des convertisseurs. Dans cette thèse, les convertisseurs traités sont ceux qui transforment une forme d'énergie dite « primaire » en énergie dite « secondaire » dans le vocabulaire courant du système énergétique industriel. Selon cette conception, une énergie primaire est une énergie sous forme « brute » ou « naturelle », qui n'a pas déjà été transformée par un convertisseur (les piles à combustible, innovation récurrente du XX$^{e}$ siècle, ne rentrent donc pas dans le cadre de cette étude car elles supposent déjà une conversion préalable). Parmi ce type particulier de

11. Ne seront pas différenciées, dans ce travail, la « technique » de la « technologie » ni même de la « technoscience », trois notions qui, selon Bourg, (1999), sont associées à trois périodes de l'histoire caractérisées par un certain rapport de l'homme à la nature. L'objet technique est ici entendu dans le sens restreint d'objet fabriqué par l'homme dans un (ou plusieurs) but(s) précis et de façon reproductible (ce qui se rapprocherait de la définition de Marcel Mauss de l'acte technique comme « acte traditionnel efficace » dans son texte « Les techniques du corps » (1934)).

convertisseurs, sont pris en considération ceux qui transforment un certain type d'énergie primaire : des sources d'énergie désignées pour l'instant par « énergies renouvelables », et qui seront caractérisées dans la suite de cette introduction. La majorité du temps, ces convertisseurs sont en fait des chaînes de convertisseurs. Elles sont nommées « moteur », « appareil », « machine », « usine » ou « centrale », et constituent un convertisseur dans la mesure où elles ont été conçues comme une entité technique prenant pour entrée une source d'énergie primaire et donnant en sortie une énergie utile bien déterminée.

Pourquoi faire une histoire des convertisseurs et non des sources d'énergie ? Une réponse triviale serait que, prise au sens littéral, une histoire des sources d'énergie serait davantage une entreprise de sciences de la nature qu'une entreprise historienne — celle-ci semblerait alors infinie et quelque part absurde : il faudrait lister l'ensemble des sources d'énergie qu'on peut qualifier de renouvelables et en raconter l'histoire... En effet, si le concept même d'énergie permet « d'assimiler l'univers à un vaste réservoir de force » (Gras, 2003), synonyme, selon les lois de la thermodynamique, de travail potentiellement productif, alors une quantité infinie de phénomènes et de matériaux naturels, autres que les sources d'énergies déjà connues, sont assimilables à des « ressources énergétiques ».

Cependant, faire l'histoire d'une source d'énergie signifie couramment faire l'histoire de son utilisation dans les sociétés humaines. Or, dans ce sens, une histoire des énergies renouvelables naturalise d'une certaine façon cette catégorie de la pensée moderne occidentale. Parler de phénomènes naturels comme d'énergie (renouvelable ou non) induit qu'ils seraient, en soi, des ressources, que les sociétés auraient choisi ou non d'utiliser. Un convertisseur s'est déjà glissé entre ce phénomène et un usage escompté, et la nature a été « mise en ressource ». En outre, à nouveau, l'entreprise apparaît infinie.

La focalisation sur des convertisseurs, qu'il n'aient été qu'imaginés ou qu'ils aient eu une réalité matérielle, et non sur les énergies renouvelables en tant que ressource, prend d'abord acte que ces dernières n'ont pas d'essence en dehors de l'imaginaire de l'ingénieur qui cherche à les exploiter. Elle permet, d'une part, de circonscrire l'étude aux phénomènes naturels qui ont été considérés par certains acteurs comme des sources d'énergie, particulières (comme on le verra dans la suite de cette introduction), et d'autre part, de mener une étude réflexive des catégories de pensée en œuvre dans l'histoire (idéelle et matérielle) du système énergétique. C'est, enfin, une manière de saisir l'histoire des projets d'exploitation des énergies renouvelables dans leurs aspects matériels et politiques.
Ainsi, faire une histoire des énergies renouvelables en entrant par les convertisseurs, suppose, certes, d'accepter le concept d'énergie, éminemment lié à la société thermo-industrielle et à son idéologie productiviste, mais, cela permet d'éviter son essentialisation. En effet, c'est l'existence, virtuelle ou matérielle, de ce convertisseur, qui permet aux acteurs de concevoir un phénomène naturel comme source d'énergie. En outre, ces conver-

tisseurs cristallisent les contraintes techniques liées à la nature du phénomène considéré comme source d'énergie (matérialité qu'on ne saurait nier) et à l'infrastructure matérielle en œuvre et disponible à une période donnée, mais aussi les savoirs et l'imaginaire technique de leurs concepteurs/promoteurs/utilisateurs, ainsi que l'inclusion de ces derniers dans des enjeux politiques et sociaux. La forme donnée aux convertisseurs et les qualités associées au couple machine/énergie ainsi constitué induisent tout autant qu'elles ne découlent des considérations sur la qualité de la ressource, sur la manière idoine de l'exploiter, sur l'utilité sociale conférée au convertisseur . Selon les protagonistes du projet de convertisseur et ses usagers destinataires (qui peuvent être les protagonistes eux-mêmes ou non), cette utilité sociale, alors couramment appelée « besoin » ou « demande », peut être exprimée par ces usagers potentiels, mais aussi (plus souvent comme on le verra) supposée ou imposée par ses concepteurs ou promoteurs au nom de valeurs et d'intérêts.

Ainsi considérés, les convertisseurs d'énergies renouvelables constituent donc des nœuds techno-politiques. La Figure 1 schématise cet aspect nodal des convertisseurs. Leur étude permet en effet d'envisager l'articulation des projets d'exploitation des énergies renouvelables, portés par certains acteurs (concepteurs/promoteurs) avec le système technique et le système énergétique, leur infrastructure matérielle et leur organisation. Les porteurs de projets, et les acteurs du système énergétique, ont leurs propres connaissances et imaginaire scientifique et technique, mais aussi leurs savoirs, leurs valeurs, leurs intérêts et leurs moyens d'action. Ils supposent ou imposent un besoin ou une utilité sociale qui justifie l'utilité de l'énergie produite. L'étude de cette articulation entre projets et systèmes techniques et énergétiques permet d'évaluer l'inertie exercée par ces systèmes sur l'utilisation des énergies renouvelables. On verra, par exemple, que les convertisseurs étudiés ne proviennent pas forcément du système énergétique, de même qu'ils n'ont, paradoxalement, pas toujours pour vocation première d'y rentrer (ou d'y proposer des alternatives).

Les acteurs font appel à leur imaginaire technicien pour façonner ou promouvoir des convertisseurs qui s'inscrivent dans un système technique. La forme des convertisseurs en projet en est le reflet. Certains critères se sont révélés significatifs pour saisir l'évolution de l'imaginaire technicien des énergies renouvelables. En fonction de ces critères, les acteurs destinent les convertisseurs à différents territoires, et leur accordent différentes valeurs. Ils ont ainsi eu tendance à hiérarchiser les convertisseurs selon une dualité archaïsme/modernité en fonction de ces paramètres. J'ai identifié les critères suivants : mode de conversion, caractère novateur d'un ou de plusieurs sous-convertisseurs, puissance et régularité de l'énergie utile. Les modes de conversion sont fonction de la nature de la source d'énergie (entrée) et de l'énergie utile (sortie). Une conversion est directe lorsque l'énergie utile est de même nature que l'énergie en entrée. Un moulin à vent qui est actionné par une source d'énergie mécanique et qui délivre (aux meules, aux pistons, aux foulons...) de la force motrice est un convertisseur direct. Une éolienne électrique, qu'elle injecte de

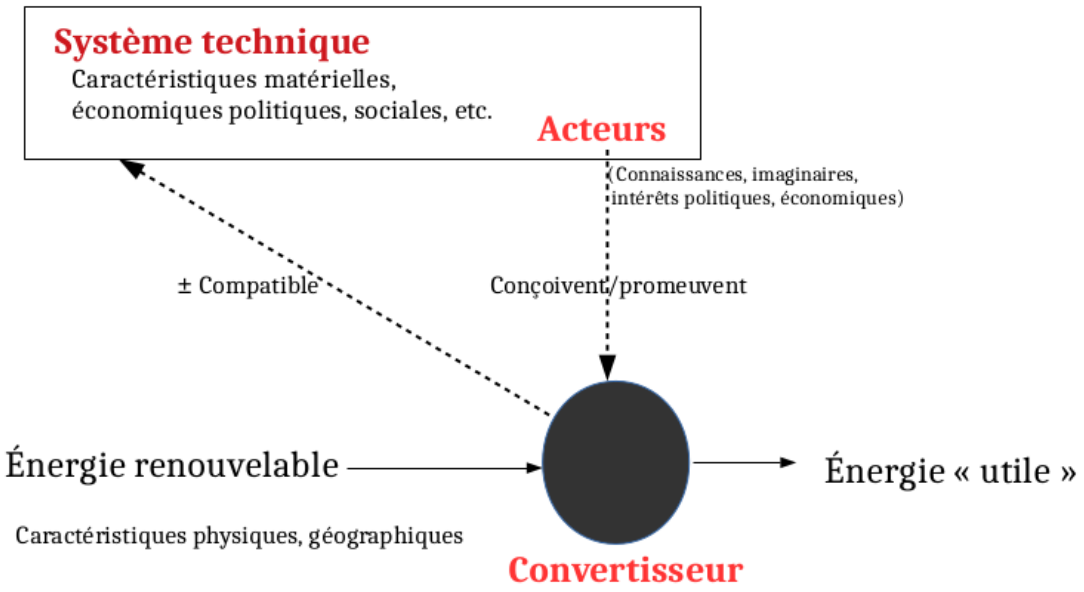



FIGURE 1 – Le convertisseur d'énergies renouvelables comme nœud techno-politique

l'électricité dans un réseau électrique ou dans un accumulateur est un convertisseur indirect. Elle comprend non seulement un convertisseur (ou une chaîne de convertisseurs) de type (mécanique → mécanique), mais aussi un convertisseur de type (mécanique → électrique), et induit, pour l'utilisation finale, une dernière conversion (électrique → énergie utile (chaleur, mécanique, chimique...)). En fonction des périodes, ces sous-convertisseurs sont plus ou moins novateurs. Par exemple, à la fin du XIX$^{e}$ siècle, la conversion électrique, quelle que soit sa forme (avec accumulateur ou réseau), fait d'un convertisseur un convertisseur moderne. Dans les années 1950, la conversion photoélectrique amène un degré de sophistication aux convertisseurs solaires électriques que constituent les photopiles. Enfin, la puissance et la régularité des convertisseurs sont des caractéristiques globalement valorisées sur la période (1880-1990) mais de manière différenciée en fonction des territoires et des sous-périodes.

La notion de convertisseur a été définie, et le type de convertisseur dont il est question dans cette thèse indiqué : ce sont des convertisseurs innovants qui transforment des énergies renouvelables. L'intérêt et la signification d'une histoire des énergies renouvelables par le prisme de ces convertisseurs, qui permet une analyse techno-politique, ont été présentés. Avant de donner des précisions sur l'expression d'énergies renouvelables, un développement sur le terme « innovant » s'impose. Cette mise au point permet d'éclaircir le type d'acteurs et de projets étudiés.

**Une histoire d'innovations**

Pour reprendre David Edgerton, et sans répondre à son souhait, cette thèse adopte l'approche d'une « histoire des innovations », et non d'une « histoire des usages » (Edgerton et Pestre, 1998). Innovation désigne couramment une technique (objet ou dispositif) passée du stade de l' « invention » à celui d'une diffusion plus ou moins importante. Elle est aussi utilisée pour désigner ce processus même allant de la conception de l'invention à sa diffusion. Dans le langage économique classique, d'où elle a été le plus largement importée après les écrits de Joseph Schumpeter, l'innovation signifie ainsi le processus qui amène l'invention au marché (Flichy, 2003). Pour Gille et Hughes, l'innovation est l'invention qui s'insère dans le système technique et qui peut, ainsi, le déséquilibrer ou non : l'innovation est au cœur du changement (ou du « bâtissage », pour Hughes) des systèmes techniques (Gille, 1978 ; Hughes, 1989, p. 64-66). L'entrepreneur-innovateur est le moteur de ces changements.

Plusieurs problèmes se posent à considérer la novation technique d'après la conception de Schumpeter : d'abord, elle suppose une différence entre le concepteur et l'utilisateur final. Cela est lié à la focalisation de cet auteur, et ce fut aussi le cas des historiens des techniques et de l'économie qui l'ont suivi dont Gille et Hughes, sur l'entrepreneur-innovateur (Fressoz et Jarrige, 2013, p. 72). En outre, cette vision suppose de situer l'invention par rapport à une économie de marché, ce qui exclut des situations économiques et sociales où le marché n'intervient pas. Enfin, les approches systémiques, par leur volonté d'appréhender des structures dans leur globalité, ont eu tendance à gommer des projets qui n'ont pas trouvé leur place au sein du système technique — ainsi, de ce point de vue, « chaque innovation réverbérant dans tout le système technique, les bifurcations possibles, les contingences, les possibles non advenus [sont] difficiles à repérer » (Fressoz et Jarrige, 2013, p. 73).

J'utiliserai la notion d'innovation comme un processus qui va de l'invention d'un objet technique (ici, un convertisseur d'énergies renouvelables) à son utilisation effective. Cette utilisation peut être unique ou multipliée et, dans ce cas, ne passe pas forcément par le marché (même si ce sera la majorité des cas étudiés). En outre, l'utilisateur final peut être le concepteur. Enfin, au sein du processus d'innovation, les projets qui n'ont pas connu de matérialisation, c'est-à-dire de mise en place matérielle (et *a fortiori* d'utilisation), ne sont pas exclus de cette étude. Sont donc pris en considération des projets techniques à tous leurs stades, qu'on pourrait schématiser comme allant de la conception idéelle (l'invention) à l'utilisation (unique ou multiple), en passant par une matérialisation, c'est-à-dire la construction de composants du convertisseur, de modèles réduits, d'une machine en grandeur réelle ou d'un « prototype » dans le cas d'une insertion dans l'économie de marché. La Figure 2 représente le processus d'innovation ainsi défini.

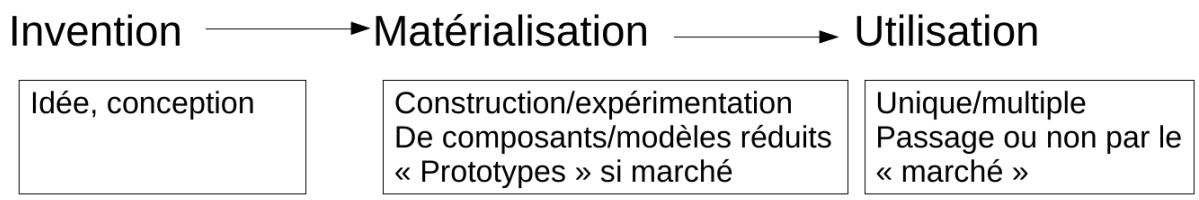



FIGURE 2 – Le processus d'innovation

J'adopterai la définition de l'invention selon Anne-Françoise Schmid, selon laquelle « il y a invention lorsque l'on met en évidence de nouvelles connexions d'images, de connaissances et de techniques participant de séries différentes, que l'on rapporte à l'identité d'un projet défini — qu'il soit scientifique, technique ou technologique » (SCHMID, 1999). En effet, elle convient dans le cadre d'une histoire des convertisseurs : il s'agit d'un objet technique issu de l'assemblage inédit de techniques déjà existantes. La question du caractère inédit de l'assemblage se pose, mais ce problème est résolu (ou contourné) de deux manières : d'une part, du fait que les acteurs étudiés aient revendiqué un caractère novateur pour le convertisseur qu'ils promeuvent (c'est donc le recours aux discours qui est utilisé). Cette conception de l'invention reprend l'idée, exprimée par Judith Schlanger, qu'elle est à la fois « rebrassage du sens et décrochement relaté », ce qui met en avant le rattachement aux connaissances et représentations collectives sous-jacent à l'invention, et le caractère construit de son aspect novateur (ainsi que celui la figure de l'inventeur) (HILAIRE-PEREZ, 2003, p. 10-11).

D'autre part, les convertisseurs étudiés sont, par essence, novateurs, dans la mesure où ils transforment des sources d'énergie encore jamais exploitées pour l'usage envisagé. Cette précision est importante car elle circonscrit le type de convertisseurs étudiés, et qu'elle induit leur caractère innovant. Rentrent donc dans le cadre de cette étude les machines qui transforment des sources d'énergie encore jamais exploitées via des convertisseurs comme définis dans cette introduction : ainsi, selon les périodes, du rayonnement solaire, des vagues, de l'énergie thermique des mers, etc ; mais aussi celles qui convertissent une source d'énergie pour un usage final nouveau, comme, selon les périodes, la production d'électricité par le vent et les marées, qui avaient auparavant déjà été largement exploités dans des moulins à marées. Ces convertisseurs constituent des inventions en ce que, dans l'un ou l'autre des cas, l'adaptation de convertisseurs, voire de techniques hors du système énergétique, à une source d'énergie nouvelle par rapport au couple (machine ; usage) ou à un usage nouveau par rapport au couple (source d'énergie ; machine) induit une reconfiguration plus ou moins importante de techniques elles-mêmes plus ou moins maîtrisées. Il n'est donc, par exemple, pas question d'étudier un usage du vent qui n'a pas cessé depuis des siècles, celui de la marine à voile.

Enfin, une subtilité dans les types de convertisseurs étudiés est la prise en considération de certains d'entre eux dont l'usage a été revendiqué, par plusieurs acteurs autres que l'inventeur ou l'entrepreneur, comme nouveau, comme ce fut le cas des éoliennes de pompage des années 1880 aux années 1940, ou du bois combustible ou de la petite hydraulique dans les années 1980. C'est l'étude des représentations et de l'imaginaire des acteurs, ainsi que des catégories qu'ils ont formées dans la considération des sources d'énergie, qui permettra de préciser ce point (cf dernière section de cette partie introductive sur l'objet de la thèse).

Un dernier point important pour situer l'histoire de l'innovation (et de l'invention) dont il est ici question doit préciser les acteurs étudiés autour de ces convertisseurs. Ce sont, trivialement, les acteurs impliqués dans le processus d'innovation comme décrit ci-dessus. Ils apparaissent aux différents stades de ce processus : inventeurs, ingénieurs, entrepreneurs, militants, etc., ou collectifs : organisations publiques (ministères, communes, universités, entreprises, ONG...) ou privées (entreprises, associations, partis...). J'ai ainsi identifié des grands types d'acteurs, ainsi que leurs intérêts et moyens d'action, et le stade atteint par le processus d'innovation pour les projets de convertisseurs auxquels ils ont participé.

À ce niveau d'explication apparaît un problème : l'exhaustivité. Toutes les initiatives pour des convertisseurs innovants permettant l'exploitation des énergies renouvelables n'ont évidemment pu être identifiées et relatées dans ce travail. Rien qu'au stade de l'invention, un nombre indéfini de propositions ont été formulées, si l'on considère les seuls brevets qui n'en sont pourtant qu'un échantillon. C'est là qu'intervient un choix méthodologique qui biaise cette étude à vocation globale. Il est lié à la fois à un présupposé sur les acteurs et aux sources mobilisées. Ainsi, ce travail focalisé sur l'innovation a prioritairement cherché des traces dans les sources émanant d'acteurs classiques de l'innovation : ingénieurs et scientifiques, surtout pour les sous-périodes les moins travaillées de cette histoire des énergies renouvelables (1880-1940). Cependant, ces acteurs constituent un point d'entrée pour l'étude des projets, et, grâce au caractère nodal des convertisseurs (techno-politique), en suivant leur cheminement le long du processus d'innovation, ces recherches permettent d'identifier des nuées d'acteurs dont la classification est un moyen de dresser de grandes catégories d'acteurs en fonction du temps.

Pour terminer la définition de l'objet de cette thèse, il est temps d'expliciter ce qui est entendu par « énergies renouvelables » dans ce travail .

### Quelles sources d'énergie ?

« Énergies renouvelables » est un terme anachronique sur la période étudiée. Le choix des sources d'énergie prises en considération découle de catégories utilisées par les acteurs

eux-mêmes, qui ont été identifiées par l'analyse de leurs discours. Étant donné le choix des acteurs, il s'agit généralement de discours de promotion de l'utilisation des énergies renouvelables : inventeurs, journalistes, chroniqueurs, entrepreneurs, responsables de l'administration publique, etc., qui s'expriment dans des brevets, articles, brochures, conférences de sociétés savantes, correspondances administratives, etc. L'identification et l'utilisation de ces sources seront développés dans la suite de cette introduction. Ce qui est recherché, dans ces discours, est la présence, non nécessaire *a priori*, de grandes catégories de sources d'énergie qui engloberaient un ensemble similaire (ou présentant des analogies) avec celle d'« énergies renouvelables ».

On voit d'emblée la première difficulté de cette tâche : « énergies renouvelables » n'est pas une catégorie figée, ni d'un point de vue synchronique ni d'un point de vue diachronique. Cette expression s'est répandue à partir des années 1970, alors concurrente de l'expression « énergies nouvelles » plus largement utilisée, et certains auteurs ont déjà souligné les enjeux politiques contenus dans ces choix sémantiques, variables en fonction des auteurs des discours : l'énergie nucléaire fait-elle partie de cet ensemble ? Et l'énergie hydroélectrique (Liébard, 2015) ? La période contemporaine n'étant pas incluse dans cette thèse, l'étude socio-sémantique des usages actuels d'« énergies renouvelables » que nécessiterait son analyse discursive ne sera pas effectuée. Trois définitions à caractère officiel suffiront comme point de départ de l'enquête discursive historienne, tout en gardant à l'esprit que ces définitions ne sont pas neutres : celle d'un dictionnaire, le *Petit Robert*, celle de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), organisme public chargé de la définition et de la mise en place des politiques en faveur des énergies renouvelables en France, et celle du Syndicat des énergies renouvelables, organisme privé rassemblant les principaux industriels français du secteur des énergies renouvelables.

Selon le *Petit Robert*, les énergies renouvelables sont les énergies « provenant de sources naturelles qui ne s'épuisent pas (soleil, vent, marées) » (Le Petit Robert, 1993, p. 2165). Selon l'ADEME, « on appelle énergies renouvelables, les énergies issues de sources non fossiles renouvelables. [...] Les principales énergies renouvelables sont : l'énergie hydroélectrique ; l'énergie éolienne ; l'énergie de biomasse ; l'énergie solaire ; la géothermie ; les énergies marines. Ces énergies sont théoriquement inépuisables puisque renouvelables. Toutefois, elles présentent des potentiels variables selon la localisation géographique, les facteurs climatiques, etc. Elles n'ont que peu d'impacts négatifs sur l'environnement. En particulier, leur exploitation ne donne pas lieu à des émissions de gaz à effet de serre [12] . » Enfin, le Syndicat des énergies renouvelables ne donne pas (en tout cas, sur son site officiel) de définition explicite des énergies renouvelables, mais il y rassemble les « bioénergies » (déchets et « biomasse »), les énergies éolienne, solaire, géothermique, l'hydroélectricité

12. Site de l'ADEME : http ://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/quoi-parle-t [Consulté le 11/05/2018].

et les énergie marines renouvelables (éolien offshore, hydrolien, vagues, énergie thermique des mers) [13].
La synthèse de ces définitions donnerait la suivante : ce sont des sources d'énergie inépuisables et en cela opposées aux énergies fossiles ; leur utilisation présente un faible impact négatif sur l'environnement, et, en particulier, elles permettent de lutter contre le réchauffement climatique ; elles sont variables dans le temps et l'espace. L'intersection des ensembles désignés regroupe les sources d'énergie suivantes : soleil, vent, marées. À ces dernières, l'ADEME et le Syndicat des énergies renouvelables ajoutent les vagues, l'énergie thermique des mers, les chutes d'eau (qu'on peut considérer toutes trois comme provenant de l'énergie solaire), l'hydrolien (courants marins, qu'on peut considérer comme provenant des marées) et la géothermie (seule différence fondamentale avec la définition du *Petit Robert*).
Retenons donc, comme l'ensemble élargi désigné par énergies renouvelables, les sources d'énergie suivantes : soleil, vent, marées, vagues, courants marins, géothermie, chutes d'eau, biomasse. Des caractéristiques données plus haut, on retiendra leur aspect contextuel : l'épuisement des énergies fossiles, et la lutte contre le réchauffement climatique, sont des enjeux ancrés dans les problématiques environnementales, dont rien ne dit qu'ils aient été associés à l'utilisation de ces sources d'énergie sur la période étudiée.

Au départ de cette thèse, se posaient donc les deux questions suivantes : sur la période et le territoire étudiés, ces sources d'énergie ont-elles fait l'objet de projets de convertisseurs innovants ? Ont-elles été classifiées dans un ensemble qui présenterait des similarités avec celui d'énergies renouvelables (dans les sources désignées et dans leurs caractéristiques) ? Si tel n'était pas le cas, une histoire des énergies renouvelables aurait eu un caractère artificiel, anachronique voire absurde. Une telle démarche serait revenue à naturaliser la catégorie, actuelle et mouvante, d'énergies renouvelables. C'est pourquoi l'analyse discursive a pris une place importante dans cette thèse, surtout pour la période (1880-1970) où l'existence de telles catégories n'avait jamais été étudiée pour la France. Cette analyse a été faite, en particulier, grâce à l'examen systématique, dans deux revues scientifiques et techniques (*La Nature* et *Le Génie civil*, présentée dans la suite de cette introduction), des articles sur l'utilisation de ces sources d'énergie. L'existence de telles catégories a pu être montrée sur l'ensemble de la période, bien que de façon plus ou moins nette selon les sous-périodes identifiées. Parfois, une expression se dégage clairement dans les discours (telle « forces naturelles » pour la période (1880-1940)), parfois c'est un ensemble de caractéristiques accordé de façon récurrente à plusieurs sources d'énergie telles que l'intermittence, la gratuité, la dispersion, l'inépuisabilité.

Les sources d'énergie dont il est question dans cette thèse sont donc celles que contiennent les catégories identifiées dans cette analyse discursive. Elles sont variables en fonction du

13. Site internet du Syndicat : www.enr.fr [Consulté le 11/05/2018].

temps et des acteurs, de même que les convertisseurs associés. Le couple machine-énergie (renouvelable) trouve ainsi des expressions différentes selon les contextes, et certaines « modes » ont pu être identifiées. Comme, aujourd'hui, les « énergies marines » ont « le vent en poupe » (selon un jeu de mots fréquent dans la presse actuelle), ce fut le cas des marées sur la période (1880-1970) et du soleil sur la période (1940-1980). La pratique de l'inventaire des ressources est particulièrement révélatrice de ces tendances, et une attention spéciale a été apportée à la réalisation de cartographies des énergies renouvelables en tant que ressources énergétiques, qui sont une forme emblématique de mise en ressource de la nature, et produisent des représentations à la fois informatives et performatives. En outre, dans l'ensemble des couples énergie/convertisseur promus au sein d'une même période, les mêmes caractéristiques ne sont pas toutes données à ces couples, et une certaine tendance à les hiérarchiser en fonction de qualités provenant de l'imaginaire technicien associé au système énergétique est palpable. Par exemple, la possibilité de produire de grandes puissance électriques régulières, non nécessaire dans les discours de la période (1880-1918), devient rédhibitoire dans l'entre-deux-guerres. L'affirmation de la construction du système électrique et de ses centrales puissantes, interconnectées et gérées d'une manière de plus en plus centralisée, pénalise les petits aéromoteurs comme les petits aérogénérateurs, mais elle favorise les usines marémotrices.

L'analyse des discours sur l'exploitation des énergies renouvelables a ainsi été cruciale pour circonscrire l'objet de cette thèse, et examiner l'imaginaire technicien associé à ces sources d'énergie au cours du temps et son articulation avec les systèmes technique et énergétique. Une dernière précision s'impose : parmi les énergies renouvelables telles que listées plus haut, trois d'entre elles font exception dans cette étude. Il s'agit d'abord de l'énergie des chutes d'eau, qui s'est retrouvée de manière récurrente (bien que non systématique) dans les ensembles désignés par les acteurs. Cette source d'énergie n'a été mentionnée que pour mémoire dans chacune des parties de cette thèse. En effet, d'une part, elle a déjà été très largement travaillée par certains historiens, notamment Serge Benoît pour ce qui concerne le cas de la France, et ses travaux ont été mis à contribution sur ce sujet. D'autre part, bien qu'innovantes au début de la période, les usines hydroélectriques sont ensuite devenues des sources d'énergie « classiques » du système énergétique, et ne correspondent plus au critère d'un convertisseur innovant, même dans les discours des acteurs. L'énergie des chutes d'eau n'est ainsi étudiée au même titre que les autres sources d'énergie (et ce, de manière succincte) que pour la dernière période de cette thèse (1970-1980). Elle ne présente pas alors de nouveauté technique à proprement parler, mais l'utilisation des petites chutes d'eau prend une nouvelle figure dans les discours de certains acteurs. La deuxième source d'énergie est le bois. Bien qu'ayant été utilisé de manière ininterrompue comme combustible pendant toute la période, il prend, de la même manière que les petites chutes d'eau, une figure particulière dans certains discours des années (1970-1980), où il devient

une cible privilégiée de la politique des « énergies nouvelles ». Ainsi, il n'a été examiné que pour cette période. Enfin, les courants marins, qui font partie des énergies marines renouvelables les plus étudiées actuellement avec la mise en œuvre d'hydroliennes, ont été si peu étudiés comme source d'énergie en France sur la période considérée qu'ils sont absents de cette thèse.

En résumé, cette thèse étudie l'histoire des initiatives en faveur de convertisseurs innovants exploitant des énergies dites aujourd'hui renouvelables, et considérées dans des catégories similaires par les acteurs eux-mêmes (marées, vent, soleil, vagues, énergie thermique des mers, géothermie) et, exceptionnellement, de convertisseurs dont la novation tient plus aux discours de certains acteurs qu'à leur caractère proprement innovant (petites chutes d'eau, bois : années 1970-1980). Les convertisseurs sont considérés comme nœuds dans ces projets : entre les porteurs du projet et le phénomène naturel devenu source d'énergie grâce à ce convertisseur (depuis son existence virtuelle) ; entre les différents porteurs du projet, qui investissent différents intérêts dans ce convertisseur ; entre les porteurs du projet et les systèmes technique et énergétique, d'où est issu, par fragments, ce convertisseur, et où les porteurs du projet cherchent à l'intégrer. C'est à ce titre que ces convertisseurs sont considérés comme des « nœuds techno-politiques ». Les projets sont pris en considération quelle que soit l'étape atteinte du processus d'innovation, et donc, dès leur premier stade, celui de l'invention. Ce travail non exhaustif dresse, à partir des cas étudiés, de grandes tendances dans les types d'acteurs impliqués, dans l'imaginaire technicien et les motivations qui les animent. L'imaginaire technicien se traduit par les caractéristiques techniques des convertisseurs en projet et la valeur que les acteurs leur accordent. Les études systématiques de *La Nature* et *Le Génie civil* apportent une dimension méthodique à l'analyse de cet imaginaire. La périodisation est effectuée à partir de changements jugés marquants dans le type d'acteurs et leur imaginaire technicien. Avant de présenter le découpage chronologique ainsi obtenu, la section suivante de cette introduction présente le cadrage spatio-temporel de cette thèse.

## La période : 1880-1990. Cohérence et éléments de contexte global

Le cadrage temporel correspond à la période (1880-1980). Dans cette section, le choix des deux bornes est explicité, ainsi que quelques traits globaux de l'histoire de cette période qui ont eu une importance dans l'histoire des énergies renouvelables telle qu'étudiée dans cette thèse, à savoir la construction d'une société productiviste, un optimisme technophile prédominant, des alertes sur l'épuisement des ressources fossiles, et l'existence des États-nations. Les éléments de contexte propres à la France seront donnés avec la présentation du cadrage spatial : l'histoire technique et politique de la France coloniale et post-coloniale est déterminante dans la périodisation obtenue pour cette thèse.

L'enquête débute dans les années 1880. Deux raisons principales justifient ce choix.
La première, banale en histoire de l'énergie, tient compte de ce que certains historiens des techniques ont appelé « deuxième révolution industrielle » (par exemple, Caron, (1997)). Celle-ci est notamment marquée par la diffusion de nouvelles applications de l'électricité, qui rend possible le transport à distance de la force motrice. Elle a alors changé les conditions d'utilisation de l'énergie hydraulique, qui commence à être électrifiée, avec l'apparition et la multiplications des usines hydroélectriques de montagne (Benoît, 1991a). Une hypothèse de départ était qu'elle a également changé les conditions d'utilisation des autres énergies renouvelables, ce qui est vérifié dans une certaine mesure (première partie).
La deuxième raison tient à l'histoire coloniale de la France. Les années 1880 sont incluses dans une étape cruciale de l'histoire de l'empire français, où la III^e^ République accélère l'expansion coloniale avec la conquête de plusieurs territoires [14] (Pervillé, 1993). Cette conquête est importante pour la genèse de certains projets d'exploitation de l'énergie solaire. Tout le long de la période (1880-1990), j'ai constaté une dialectique entre les projets d'exploitation des énergies renouvelables en métropole et dans les pays colonisés puis ex-colonisés, ce qui donne une pertinence au fait de débuter cette étude aux années 1880.

L'enquête termine, de manière tout aussi classique dans l'histoire de l'énergie, à la fin des années 1980, à la fin d'un cycle commencé dans les années 1970 et qui a vu un engouement sans précédent pour des énergies dites « nouvelles ». Les institutions créées pour encourager l'exploitation des énergies renouvelables (en particulier, l'Agence française pour la maîtrise de l'énergie (AFME)) sont affaiblies et beaucoup de projets abandonnés dans un contexte économique défavorable. Les années 1990 qui suivent sont le moment d'un nouveau cycle où la question du changement climatique devient un problème international, et impacte les politiques françaises des énergies renouvelables (Évrard, 2013). J'ai décidé de mettre cette période de côté, déjà bien étudiée par Aurélien Évrard sur le plan des politiques publiques en comparaison avec d'autres pays, et, plus prosaïquement, à cause de la complexité du sujet à cette période, liée à la fois à son aspect contemporain, et à la multiplication des acteurs, des projets et des réalisations dont elle est encore la scène. Ma thèse s'inscrit dans cette dynamique, de par son sujet, mais aussi d'un point de vue institutionnel. Elle interroge ainsi le passé à l'aune d'une thématique éminemment actuelle, et est une manifestation de l'ancrage de l'historien dans son temps. Elle doit en outre beaucoup à un acteur très impliqué dans le domaine des énergies renouvelables dans les années 2010, la Région Pays de la Loire, qui m'a financée pendant trois ans.

La période (1880-1990) est marquée par la poursuite de la construction d'une société productiviste et d'un optimisme technophile, associé à une foi dans le progrès scientifique.

14. La Tunisie devient un protectorat français en 1881 ; plusieurs gouvernements généraux sont fondés en Afrique noire : Afrique occidentale française, 1895 ; Madagascar et Comores, 1895 ; Afrique équatoriale française, 1908. La conquête asiatique mène à la création du Gouvernement général d'Indochine.

Au XIX^e siècle, la place croissante de la machine à vapeur dans le système technique, l'apparition de la science thermodynamique et l'augmentation de la consommation d'énergie (en premier lieu, de charbon) sont ainsi consubstantielles d'un « nouvel imaginaire productiviste du travail » (Fureix et Jarrige, 2015, p. 60). Cet imaginaire induit une conception particulière de la nature et des techniques, et ces dernières sont « redéfinies comme des instruments d'exploitation d'une nature considérée comme infinie, comme une pure ressource, dont il reviendrait aux hommes d'extraire le maximum d'énergie (Fureix et Jarrige, 2015, p. 60-61) ». L'affirmation de l'idée de progrès est quant à elle construite sur une nouvelle conception du temps historique. Progrès rime désormais avec progrès scientifiques et techniques, alors que la science se renforce en tant qu'« autorité épistémique et politique » (Bonneuil et Pestre, 2015, p. 9). Le progrès se matérialise par une « variété de plus en plus importante de marchandises industrielles fournies aux gens du commun », et la nouvelle « foi inaliénable en [c]e progrès » fonde quant à elle l'idée de modernité (Raj et Sibum, 2015, p. 15-16). Outre la mise à disposition de plus en plus importante (en variété comme en quantité) de produits de consommation, la maîtrise du temps et de l'espace en sont deux manifestations : nouveaux moyens de transport (chemins de fer, navires à vapeur, automobile ...), nouveaux réseaux de communication (télégraphie, radio...) (Charle, 2012, p. 359). Le changement technique est ainsi conçu comme expression et moteur du progrès, et l'inventeur et l'ingénieur, au moyen de la « recherche délibérée de l'innovation », (Picon, 1991, p. 301-303), en deviennent les héros (Galvez Behar, 2008). Le XIX^e siècle est aussi celui de la constitution de législations nationales puis internationales en termes de propriété intellectuelle, avec l'apparition des brevets, dont le nombre ne cesse d'augmenter à partir de 1800 (Galvez Behar, 2016). Si cet optimisme techno-scientifique est émaillé de mises en doute et de multiples oppositions, à commencer par le tout début de la période étudiée en raison de la « grande dépression » (années 1880), qui se caractérise par une « crise » agricole et industrielle (Charle, 2012, p. 359), il s'affirme au XX^e siècle qui constitue « le siècle des rêves et espoirs technologiques », des « idéologies scientistes », comme celui de la « démiurgie productive et de la consommation de masse » (Bonneuil et Pestre, 2015, p. 13-14).

Par ailleurs, tout au long de cette période, la croissance exponentielle mondiale de la consommation d'énergie, mais aussi les alertes récurrentes sur l'épuisement des énergies fossiles, sont à souligner dans une perspective d'histoire des énergies renouvelables. En effet, dès les années 1860, en Angleterre, mais aussi en France, géologues et économistes s'inquiètent du fait que les réserves de charbon ne se renouvellent pas, et que l'énergie manque à l'industrie devenue essentielle dans la puissance des nations (Madureira, 2012 ;Missemer, 2017 ; Jarrige, 2010). Johnson, (2014) a analysé l'idéologie cornucopienne, forme d'optimisme technophile qui croit à la capacité de l'innovation à répondre à

tous les besoins de l'humanité, et montré qu'elle aurait, à chacune de ces alertes, prévalu [15]. Jarrige, (2010) a déjà montré comment le physicien Augustin Mouchot avait intégré cet argument pour promouvoir le moteur solaire qu'il avait inventé et construit dans la France coloniale de la fin du XIX^e siècle. L'histoire d'autres convertisseurs innovants dressée ici confirme l'omniprésence, chez les acteurs étudiés, de cet imaginaire cornucopien.

Enfin, cette période est celle de la constitution des États-nations comme acteurs centraux des sociétés occidentales puis mondiales. Ces États deviennent la « figure qui unit le groupe national » et « s'assure de sa mobilisation », les nations, en compétition militaire mais aussi économique et idéologique, « se définissant par leur aptitude à tout mobiliser pour leur maintien ou leur expansion » (Pestre, 2003, p. 42-43). Les États se constituent ainsi comme « porte-paroles légitimes » et garants de l'intérêt public national, « incarnation du social en action ». De ce fait, ils deviennent « entrepreneurs » de science et d'innovation technologique, les deux, inextricablement liées en une « technoscience », devenant des outils essentiels de l'économie et de la guerre. L'État-nation, « est un État scientifique préoccupé de technique et d'innovation pour le bien supérieur du pays, un État guerrier préparant la défense des intérêts économiques, politiques et impériaux grâce à la science, un État providence qui vise à maîtriser les "classes dangereuses", et un État régulateur qui entend maîtriser la croissance économique de la Nation grâce à la science, à ses théories et aux indicateurs qu'elle construits » (Pestre, 2003, p. 40-41). À partir des années 1930, les sciences économiques livrent à ces États-nations des outils qui deviennent centraux dans leurs modes de gouvernement et dans la mesure de leur puissance : statistiques et indices, comme le Produit intérieur brut (PIB), s'érigent en éléments d'une comptabilité et d'une planification nationales (Bonneuil et Pestre, 2015, p. 22-23). Les États-nations en compétition jaugent leur position internationale grâce à ces indicateurs [16]. L'énergie y tient une place essentielle.

Ces trois éléments de contexte général donnent à la période étudiée une cohérence et une pertinence pour une histoire de convertisseurs innovants exploitant les énergies renouvelables : productivisme et optimisme technophile, alertes sur l'épuisement des ressources fossiles, présence des États-nations comme entrepreneurs de sciences et de techniques, en compétition les uns avec les autres sur des données économiques dont l'énergie fait partie intégrante. En effet, selon l'idéologie cornucopienne et l'imaginaire technicien de l'énergie déjà cité plus haut, tout phénomène naturel associé à une source potentielle d'énergie est convertible en énergie utilisable grâce à la technique facteur de maîtrise de la nature. Les alertes sur l'épuisement des énergies fossiles sont un argument pour des initiatives dans ce sens. L'État-nation, soucieux de son industrie et de ses ressources en énergie, a pu charger

15. Merci à Christophe Bonneuil de m'avoir indiqué cet article.

16. Selon Michel Foucault, les trois bases des nouveaux États-nations sont le mercantilisme, la police intérieure et l'armée. Le mercantilisme amène une mesure de la puissance d'un État sur la quantité de marchandises produites, la concurrence entre États et la recherche d'une indépendance économique.

certaines de ses institutions de mettre en place de tels projets.

L'existence de ces États-nations justifie en outre le cadrage spatial de cette thèse, dont il est maintenant question.

## Territoires et acteurs : de la France coloniale à la France nucléaire

### Les territoires métropolitains et coloniaux

Le territoire étudié est celui de la France coloniale puis post-coloniale. Mais une délimitation spatiale précise de ce travail est délicate et sa construction revêt une certaine complexité. En effet, ce territoire est lié de façon circulaire aux acteurs choisis et aux sources consultées. En outre, sa définition est davantage politico-administrative que strictement géographique, et il est mouvant dans le temps. Dans cette dernière section introductive sur la caractérisation de l'objet, ce cadrage spatial est raffiné et sa pertinence explicitée.

Deux questions se posent sur la définition du territoire dont il est ici question : qu'est-il entendu par « France coloniale et post-coloniale » ? En quoi ce territoire constitue-t-il une limite de cette étude ou, autrement dit, quel est le caractère français des projets étudiés dans cette thèse ? Je réponds successivement à ces deux questions.

Le cadrage spatial correspond au territoire prérogative de l'État français, mais aussi, plus largement, avant qu'elles ne disparaissent lors des décolonisations, des structures juridico-administratives constituant l'empire colonial français. Selon Max Weber, l'État est une « institution politique ayant une « Constitution » écrite, un droit rationnellement établi et une administration orientée par des règles traditionnelles ou « lois », des fonctionnaires compétents » (Thénault, 2013, p. 215). L'État français sur la période 1880-1980 est un État-nation comme décrit plus haut, c'est-à-dire un acteur social « qui unit le groupe national, qui s'assure de sa mobilisation, qui le coordonne de l'intérieur comme pour ses actions à l'extérieur » (Pestre, 2003, p. 42). Quant aux empires coloniaux, ce sont des « formations politiques hiérarchisées qui, par le biais des conquêtes militaires et de formes d'allégeance plus ou moins contraignantes, agrègent des populations et des territoires divers au profit du centre » ; ils se distinguent des autres empires par « leur dimension ultramarine » induisant « de fortes discontinuités territoriales et administratives » et par leur composition en « sociétés coloniales constituées par des groupes sociaux en situation de contacts contraints et asymétriques » (Singaravelou, 2013, p. 14-15). Les empires coloniaux sont structurés par un ensemble d'entités institutionnelles et juridiques, où, suivant le modèle hiérarchisé centre-périphérie, l'on peut distinguer l'État métropolitain et l'appareil institutionnel et juridique dont il dispose dans ses territoires ultramarins, appareil que certains auteurs appellent États coloniaux (Thénault, 2013).

Les seconds, se distinguent des premiers par la faiblesse de leur administration (petits effectifs, dispersion, manque de légitimité, et, finalement, difficultés de maintien de l'ordre), la grande latitude des acteurs de l'administration malgré la dépendance au centre métropolitain et l'exercice d'une forte coercition ; ils prennent en outre des formes variées et ne composent pas une entité homogène. Le territoire étudié dans cette thèse est donc mouvant, et induit des situations politiques, économiques et sociales très diverses dans le temps.

Le territoire défini par l'État-nation est pertinent pour cette thèse dans la mesure où ce dernier s'est affirmé, au cours de la période, comme l'incarnation de l'intérêt général, c'est-à-dire son représentant légitime, mais aussi celui qui le définit et met en place des moyens d'action pour y répondre (Pestre, 2003). Étant donné la place de l'énergie dans les sociétés industrielles, les questions énergétiques ont été progressivement intégrées dans les institutions étatiques. L'énergie a été érigée à la fois comme un besoin et une prérogative nationaux. Comme le souligne Williot, (2009, p. 37), ce fut particulièrement le cas en France, où « [q]uand bien même les gouvernements proclameraient des principes libéraux, l'État [...] surveille son secteur énergétique et contrôle les entreprises qui contribuent à son essor ». En France, toutes les sources d'énergie devenues des enjeux nationaux (charbon, électricité, énergie hydraulique, pétrole, gaz, uranium) ont ainsi été progressivement institutionnalisées et, entre le XIX$^{e}$ et le XX$^{e}$ siècles, se sont mues en prérogatives de l'État et de ses experts. Ainsi, par exemple, dès le XIX$^{e}$ siècle, une direction des Mines s'est constituée, dont les experts, membres du Corps des Mines, sont chargés « de l'élaboration et de l'application de la législation minière », qui concerne, entre autres, les mines de charbon puis les hydrocarbures ; l'énergie hydraulique est dotée d'une législation spécifique par la loi du 16 octobre 1919, qui en confie la responsabilité à un service du ministère des Travaux publics, dont les experts appartiennent en majorité au Corps des Ponts et chaussées ; après la seconde guerre mondiale, tous les secteurs énergétiques sont nationalisés (Vuillet, 2009). Cette forte présence de l'État français dans le secteur énergétique (l'énergie devenant un élément essentiel de l'économie nationale) laisse certains auteurs parler de « modèle énergétique » français, qui serait lié, à la fois, à une tradition française de « colbertisme industriel » et à un déficit chronique en ressources énergétiques, en premier lieu, le charbon (Williot, 2009, p. 39). En tout cas, l'existence de ces institutions, fortement liées aux entreprises industrielles (privées ou publiques selon les périodes) donne forme à l'idée d'un système énergétique national, et confère une pertinence à l'étude historique de l'énergie sur le territoire de l'État français. De ce point de vue, une histoire des énergies renouvelables interroge la place de ces sources d'énergie dans les discours et dans l'action des institutions de cet État-nation. En présence de ces institutions chargées de l'énergie et représentant en cela l'intérêt public, en présence également de discours récurrents sur le manque de ressources françaises en énergie, l'implication de ces acteurs

dans l'exploitation des énergies renouvelables pose question tout au long de la période.

Le territoire colonial a semblé pertinent pour une histoire des énergies renouvelables, d'abord pour la raison que les États coloniaux étaient, sinon une partie, du moins une ramification de l'État-nation. Il n'y avait donc pas de raisons de limiter l'objet d'étude au seul territoire métropolitain, alors que ce dernier était l'élément d'un ensemble certes très hétérogène mais présentant certaines cohérences politico-administratives. En outre, les enjeux politiques et économiques des empires coloniaux se sont avérés déterminants dans la périodisation de cette thèse, que ce soit du point de vue des acteurs impliqués ou de l'imaginaire technicien déployé. L'empire colonial a ainsi, au cours de la période (1880-1960), été investi de différentes ambitions de la part du pouvoir central, et on verra que certains projets d'exploitation des énergies renouvelables ont été modelés par ces enjeux, présentés ou considérés comme des outils servant ces ambitions. Ainsi, les conquêtes coloniales de la période (1870-1880) avaient parmi leurs principaux objectifs la grandeur de la patrie et le prestige de la nation après la défaite de 1871 contre la Prusse (Pervillé, 1993, p. 45), et l'énergie solaire a pu être montrée comme l'outil d'une « conquête pacifique ». Dans l'entre-deux-guerres, c'est la « mise en valeur » économique des colonies qui dirige la volonté des institutions coloniales, et les énergies renouvelables ont été considérées à la fois comme des ressources à exploiter et comme des moyens d'exploiter des ressources par certains acteurs. Enfin, l'arrêt ou le prolongement de projets d'exploitation des énergies renouvelables après les décolonisations révèlent certaines continuités et certaines reconfigurations dans les jeux de pouvoir internationaux, lorsque la France perd son empire, et que les nouveaux États acquièrent une nouvelle autonomie politique. Gabrielle Hecht a montré comment le développement sans pareil mondialement de l'énergie nucléaire en France était lié à la volonté politique de reconquérir le prestige perdu avec les décolonisations (Hecht, 2014). Les projets d'exploitation des énergies renouvelables ont été impactés à la fois par ces décolonisations et par un de leurs effets qui fut cette politique nucléaire.
Par ailleurs, l'étude de projets s'appliquant à des territoires aux situations géographiques, politiques et sociales différents, est intéressante car elle permet de mettre en évidence des variations en fonction de ces paramètres.

Comment ce cadrage spatial a-t-il été pris en compte ? Dans ces projets (où des acteurs et institutions français sont impliqués), peuvent apparaître des acteurs non français (inventeur, entreprise, ONG...). En outre, les discours des acteurs français sur des projets non français sont éclairants sur les interactions internationales en termes d'imaginaire technicien, d'influence des projets et discours étrangers sur les projets et discours français. Enfin, les acteurs et institutions français se sont impliqués dans des projets hors du territoire national, ce qui est également intéressant dans une perspective de mise en évidence de relations internationales. C'est pourquoi le territoire couvert par cette thèse dépasse le

cadre national, et c'est avant tout le lieu de production des discours utilisés comme source qui a délimité géographiquement cette thèse. Ainsi, la majorité des revues étudiées et des brevets consultés sont français, les archives consultées (ou constituées pour les archives orales) sont celles d'acteurs rattachés à des institutions françaises. Cependant, dans ces revues, ces archives, et ces brevets, des acteurs non français peuvent surgir : discours provenant d'acteurs français sur des projets étrangers (qui peuvent avoir pour lieu d'application le territoire français), ou discours d'acteurs non français transmis ou reproduits tels quels dans ces espaces, et qui renseignent sur la manière dont ils y sont perçus. Le rôle d'acteurs non français (inventeurs, entreprises, institutions internationales : ONG, associations, Union européenne...) dans des projets en partie français a également été décrit.

Je n'ai examiné les territoires coloniaux que de façon ponctuelle, et ce du point de vue des acteurs coloniaux : institutions métropolitaines et coloniales, colons. Ainsi, le point de vue des « autochtones » n'a pas été pris en considération, et ce travail ne comporte pas de réflexions sur les échanges colonisateur-colonisé sur terrain, ni sur le rôle de ces derniers dans les projets étudiés. Les discours des colons montrent une vision déformée (exagérée) du pouvoir des États coloniaux et de leurs administrateurs (Singaravelou, 2013 ; Thénault, 2013). Ces discours ne sont cependant pas pris ici en tant que descriptions des rapports de pouvoir réels dans la mise en œuvre des projets, mais comme indicateurs de l'imaginaire des acteurs de projets de convertisseurs d'énergies renouvelables, de la manière dont il s'est inscrit dans ces territoires aux contextes sociaux, politiques, économiques et environnementaux variés, et, inversement, dont l'histoire coloniale de la France a influencé la forme de ces projets. Cette influence a été durable et, selon moi, l'imaginaire techno-politique et certaines réalités économiques des convertisseurs d'énergies renouvelables de la période coloniale ont connu des ramifications dans la France post-coloniale.

### Les acteurs

Cette thèse vise à proposer un point de vue synthétique sur les acteurs et institutions (étatiques ou non) français impliqués dans des projets de convertisseurs innovants exploitant les énergies renouvelables, ainsi que sur l'imaginaire de ces acteurs. En termes d'acteurs, le découpage spatio-temporel se traduit par la prise en compte des institutions étatiques chargées des questions d'énergie, ainsi qu'une variété d'autres acteurs individuels ou collectifs. Je les présente ici successivement.

Le premier type d'acteurs évoqué dans cette section est l'ensemble des institutions étatiques chargées des questions d'énergie. Associés à des acteurs privés (en particulier, industriels), ceux-ci sont devenus des éléments du système énergétique construit au fur et à mesure de la période. De manière non exhaustive, on y trouve, en fonction des sources

d'énergie, et des contextes techniques, politiques et économiques, certains directions et services (Mines, Ponts, Hydraulique, Gaz...) ministériels (Équipement, Agriculture, Travaux publics, Industrie...) et leurs divisions territoriales (département), établissements à caractère public et industriel (Commissariat à l'énergie atomique (CEA), Agence des Économies d'énergie (AEE), Commissariat à l'énergie solaire (COMES)...), leurs partenaires territoriaux (municipalités, régions...) et industriels (entreprises gazières, du secteur électrique (de la production, hydraulique et thermique, au transport et à la distribution), charbonnier). Dans les colonies, la construction d'un système énergétique prend des formes variées en fonction du temps et des territoires [17]. La question du rôle (absence ou présence motrice ou inhibitrice) de ces acteurs du système énergétique dans des projets d'exploitation des énergies renouvelables sera posée.

En raison du caractère marginal des énergies renouvelables dans le système énergétique, des projets de convertisseurs innovants ont été portés par d'autres acteurs, individuels ou collectifs, rattachés ou non à des institutions étatiques. Des individus, inventeurs, ingénieurs, militaires, entrepreneurs, chercheurs universitaires ou industriels, ont formulé des propositions, effectué des expériences, monté des projets, construit des prototypes. Les institutions de recherche constituées au fur et à mesure du XX$^{e}$ siècle (Offices des inventions [18], Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Délégation générale à la recherche scientifique et technique (DGRST), ministère de la Recherche, etc.), poussées par leur mission de soutien à la novation technique considérée comme moteur de l'économie nationale, ont soutenu, initié, coordonné, mené des projets. C'est aussi le cas d'institutions coloniales (ministère des Colonies, gouvernements généraux) voyant dans ces convertisseurs des moyens de conquérir, mettre en valeur ou garantir la légitimité de leur présence sur certains territoires, ou internationales (ONG, institutions supra-étatiques, associations...), cherchant dans ces projets les moyens d'une coopération entre pays « du Nord » et d'une « aide au développement » pour les pays du Sud, avec tout ce que ces aspects impliquent d'enjeux économiques, politiques, idéologiques.

Ainsi, en fonction des contextes historiques, des convertisseurs innovants exploitant les énergies renouvelables ont été investis d'ambitions diverses provenant d'acteurs variés, et la convergence de leurs intérêts et de leurs moyens a parfois permis certaines réalisations. Dans la France coloniale et post-coloniale, de grandes tendances sont observables dans ces types d'acteurs et dans les enjeux associés aux convertisseurs. Ceux-ci prennent une forme adaptée à ces enjeux et à ces contextes politiques, sociaux, économiques, environnementaux, qu'ils incarnent d'une certaine façon. La périodisation est construite à partir

17. Comme le montre le cas des systèmes électriques dans l'empire français, développé dans le numéro 89 de la revue *Outre-mer*.

18. Direction des inventions pendant la première guerre mondiale, Direction scientifique et industrielle des Inventions (DRSII) puis Office national des recherches scientifiques et industrielles et des inventions (ONRSI) pendant l'entre-deux-guerres.

de changements marquants dans ces tendances. C'est de l'identification de ces tendances et de ces ruptures qu'il est maintenant question.

## Périodisation - Plan

La périodisation est construite sur l'identification d'un ensemble de types d'acteurs et de convertisseurs, et de changements significatifs dans cet ensemble. De cet ensemble dérive une série d'éléments liés, eux aussi caractéristiques de chaque période, à savoir : sources utilisées, techniques employées, intégration ou non dans le système énergétique, destination de l'énergie utile et enjeux de cette production, caractéristiques associées au couple machine/énergie, réalisations. Les ruptures rencontrées sont induites par des changements sociaux, politiques, économiques et techniques, dont j'ai mis en valeur l'importance relative. Quatre périodes ont ainsi été distinguées : (1880-1918), (1919-1939), (1940-1970), (1970-1990).

La période (1880-1918) est caractérisée par une forte activité inventive, émanant d'acteurs de profils variés : souvent ingénieurs de différentes spécialités, mais également scientifiques, médecins, ou sans profession identifiée. Les sources d'énergie qu'ils souhaitent voir exploiter sont régulièrement appelées « forces naturelles », catégorie qui comprend, outre l'énergie hydraulique, les marées, le vent, le soleil, les vagues, les gradients de température (entre le jour et la nuit, entre le sol et l'air, entre les couches océaniques...). Ces sources d'énergie sont caractérisées par leur aspect inépuisable, national, abondant, dispersé, variable, intermittent, en miroir avec le charbon devenu le « pain de l'industrie ». Les inventeurs entendent contribuer à l'approvisionnement énergétique de la France dépourvue de charbon, et trouvent une audience dans les revues scientifiques et techniques, dans les cercles savants et industriels, obtiennent des brevets, mais ne sont pas soutenus par des institutions ou entreprises du secteur énergétique, ni par l'État en général. Les convertisseurs, qui n'ont pour la plupart pas été construits, prennent des formes variées, bien qu'elles soient toujours le reflet de l'imaginaire thermo-industriel associé au charbon, selon lequel la meilleure énergie utile est non seulement saisissable, mais aussi stockable et transportable. Alors que le réseau électrique est en construction, l'électricité n'est pas hégémonique dans l'imaginaire technicien, bien qu'elle stimule l'activité inventive par les possibilités qu'elle laisse entrevoir grâce aux premières usines hydroélectriques. De ce fait, le vent et les marées, eux aussi auparavant largement utilisés via des moulins, sont particulièrement convoités. Mais beaucoup de convertisseurs sont pensés pour une utilisation directe, ou au moyen d'autres vecteurs comme l'air comprimé ou le stockage hydraulique. Les usages envisagés sont eux aussi variés : éclairage domestique, des lieux publics ou industriel, actionnement de machines domestiques, agricoles ou industrielles, direct ou

*via* des moteurs électriques ou à air comprimé, production de glace pour les ports ou les colonies ensoleillées, actionnement de moteurs pour les bateaux, etc. Les projets trouvent différentes traductions territoriales en fonction des conditions politiques et environnementales, et ces disparités sont internes et externes à la métropole : par exemple, le pompage éolien de l'eau est envisagé (et réalisé) pour des usages agricoles dans les campagnes françaises encore peuplées, le pompage solaire de l'eau doit permettre de fertiliser les terres incultes et stériles du Sahara, objet de convoitise d'une France impérialiste qu'elle conquerrait ainsi.

La Première Guerre mondiale amène une première rupture dans l'ensemble acteurs-convertisseurs. Des changements dans les conditions économiques, politiques et techniques ont pour conséquence la présence de nouveaux acteurs (ministère des Travaux publics, entreprises du secteur de l'énergie, nouvelles entreprises, gouvernements généraux des territoires d'Afrique du nord, ONRSI), et une pénétration significative de l'électricité dans l'imaginaire technicien, caractéristiques de la période (1919-1939). La catégorie de « forces naturelles » reste globalement inchangée, dans les sources d'énergie qu'elle contient (s'y ajoute la géothermie) et dans les caractéristiques qui leur sont associées. Mais elles sont fortement associées à l'énergie hydraulique ou « houille blanche » dont elles pourraient être complémentaires grâce au réseau électrique, et sont parfois appelées « houilles colorées ». Les marées, appelées « houille bleue », sont cartographiées en tant que ressource énergétique. La pénurie énergétique, et de nouveaux discours sur les colonies en tant que ressources économiques qu'il faudrait mettre en valeur, ont pour conséquence une multiplication des acteurs et des projets. En effet, la pénurie pousse l'État à prendre en main certaines parties du système énergétique, et, en particulier, l'énergie hydraulique et le système électrique, qui se structure et se ramifie pendant l'entre-deux-guerres. De manière plus générale, l'État recherche une indépendance énergétique que pourrait aussi permettre l'exploitation des forces naturelles. En outre, ces dernières sont pensées comme ressource coloniale à exploiter, mais aussi comme moyen d'exploiter les ressources coloniales. Des acteurs variés proposent ou soutiennent des projets de convertisseurs : aux inventeurs présents dans la période précédente et agissant de manière similaire, s'ajoutent des institutions de l'État comme le ministère des Travaux publics, qui s'approprie l'énergie des marées en tant que ressource hydraulique, l'ONRSI qui soutient certains projets de convertisseurs éoliens et solaires, le résident général de France en Tunisie qui s'intéresse à la distillation solaire. Des entreprises du secteur électrique participent en outre à des projets de centrales (Compagnie électro-mécanique et aérogénérateurs ; Rateau et centrale d'énergie thermique des mers avec Georges Claude ; Escher-Wyss et turbines à marées...) dans l'idée de les intégrer au système électrique. Enfin, des entreprises sont créées spécifiquement pour mettre au point des générateurs houlomoteurs. Les convertisseurs imaginés sont de types toujours variés, mais le passage par l'électricité, produite localement ou

alimentant un réseau, devient prépondérant dans les propositions. Plusieurs réalisations sont effectuées dont aucune ne connaît de pérennité, comme un début de centrale marémotrice à l'Aber Wrac'h, plusieurs aérogénérateurs dans les locaux de la Compagnie électro-mécanique, des distillateurs solaires dans plusieurs colonies, un bateau éolien vite éclipsé par un navire éolien allemand, une pompe houlomotrice qui, alimentant l'aquarium du Musée océanographique de Monaco jusqu'au moins 1940, a connu la plus grande longévité.

La Seconde Guerre mondiale introduit une nouvelle période (1940-1970) qui voit l'affirmation du mouvement d'institutionnalisation des « nouvelles sources d'énergie », « énergies naturelles » ou « énergies sauvages », et d'électrification de l'imaginaire technicien. De nouveaux acteurs (universités, institutions internationales) apparaissent, mais le nombre de projets se resserre. Ces sources d'énergie sont identiques aux forces naturelles de la période précédente, sauf l'énergie hydraulique qui est domptée depuis longtemps et ne laisse plus de perspectives d'avenir. Leurs caractéristiques restent identiques. À nouveau, les conditions économiques, politiques et techniques sont déterminantes : au niveau du système énergétique, nouvelle pénurie, prise en main de tout le secteur par l'État, apparition de la comptabilité et de la planification nationales qui stimulent une politique de l'offre, achèvement de la structuration du système électrique comme réseau centralisé, maillé par des unités productrices de grande puissance, monopolisé par une entreprise publique ; sursaut impérialiste puis décolonisations, menant à la recherche de moyens de légitimer la présence française outre mer, puis d'asseoir une nouvelle forme de domination, non plus politique mais technico-économique. Plus que jamais, l'énergie est érigée comme impératif de modernité et de prestige international. En métropole, les grandes structures de recherche et d'énergie mènent des recherches sur des centrales marémotrices, éoliennes, solaires. EDF et ses partenaires industriels se font l'arbitre et le maître d'ouvrage exclusif des projets d'exploitation des marées et du vent qui, sauf dans des cas très particuliers comme l'éclairage des phares et balises, doivent mettre en œuvre des centrales électriques puissantes pour le réseau interconnecté. Le vent est cartographié en France et une complémentarité spatio-temporelle se dessine avec les marées et l'hydraulique. Le CNRS, avec quelques universités métropolitaines et coloniales (avant la dislocation de l'empire), ainsi qu'avec des institutions internationales, travaille sur l'énergie solaire pour toutes ses applications possibles, et, pour la métropole, les centrales solaires sont étudiées. Les autres applications (pompage, production de petites puissances motrices, distillation...) sont réservées aux colonies puis ex-colonies et aux pays du « Sud ». Pour ces derniers, les acteurs impliqués, comme les types de convertisseurs, restent plus variés : administration coloniale, ONG, petites et grandes entreprises, universités, pour des convertisseurs allant des chauffe-eau et pompes solaires ou éoliens aux aérogénérateurs et centrales maréthermiques. L'impératif de modernité ne s'applique pas de la même manière pour des

populations jugées « sous-développées », et à des degrés divers, et que les nations se disant « développées » se donnent comme mission d'aider au développement. D'une manière générale, les projets sont tous abandonnés à la fin des années 1960 à cause du bas prix international du pétrole et, pour certains projets, des décolonisations. Les seuls d'entre eux à avoir connu une réalisation durable sont l'usine marémotrice de la Rance et les petits aérogénérateurs équipant certains phares et balises.

La dernière période (1970-1990) est initiée par un changement économique, politique, social et culturel : les chocs pétroliers, l'orientation du système énergétique vers le nucléaire, l'apparition de contestations contre la politique nucléaire, issues du mouvement contre-culturel et écologiste, et la volonté de gouverner cette critique. Le type d'acteurs s'élargit, toutes les « énergies nouvelles » sont institutionnalisées. Les convertisseurs prônés pour la nation française sont d'un type inverse à la période précédente Les « énergies nouvelles » correspondent aux « énergies naturelles » de la période précédente, mais les marées ne s'y trouvent plus, et la « biomasse » apparaît. Les mêmes caractéristiques leur sont associées, mais une dimension écologique leur est également conférée. L'énergie solaire est au devant de toutes les énergies nouvelles. Les nouveaux acteurs sont d'abord les militants anti-nucléaire, puis, pour y répondre ainsi qu'au choc pétrolier, les institutions dédiées aux énergies nouvelles : Délégation aux énergies nouvelles, Comité puis Commissariat à l'énergie solaire (COMES), Agence française pour la maîtrise de l'énergie (AFME). Ces différentes agences se chargent de l'ensemble des énergies nouvelles, sauf les énergies marines (vagues et énergie thermique des mers) qui sont prises en charge par le Centre national d'exploitation des océans (CNEXO). Un vaste ensemble d'acteurs régionaux (AFME régionales et régions), académiques (Universités, CNRS, centres nationaux comme le Centre national des Études spatiales (CNES) ou l'Institut national de la recherche agronomique (INRA)), industriels (associés au système énergétique ou non), associations, se dessine. En raison du choix de l'option nucléaire, et des types de convertisseurs défendus par les écologistes, les applications métropolitaines mises en place sont celles de chauffage direct, solaire, géothermique et de « biomasse », dans les secteurs résidentiel et tertiaire, sans passage par le réseau électrique. Il n'est plus question de construire, en France, de grandes centrales électriques autres que nucléaires. Les convertisseurs électriques sont en revanche destinés au marché international : aérogénérateurs de petites et moyennes puissances, centrales maréthermiques, centrales solaires. La période s'arrête au moment du contre-choc pétrolier et de la fin du programme nucléaire, qui voit un nouvel abandon de la majorité des projets. La plupart des réalisations métropolitaines de la période (installations solaires et géothermiques), alors marginales dans le bilan national, sont abandonnées petit à petit.

Cette chronologie dicte le plan. Dans chaque partie, une section introductive présente les éléments de contexte déterminants de la période considérée : conjecture énergétique,

mais aussi économique, politique, culturelle. Chaque chapitre présente ensuite une analyse sémantique, un panorama des acteurs et institutions impliqués, et plusieurs études de cas jugées significatives.

## Corpus

Cette thèse s'appuie sur quatre types de sources : publications à caractère scientifique et technique (revues, actes et comptes rendus de sociétés savantes, ouvrages, brevets...), publications non spécifiquement scientifiques et techniques (périodiques généralistes, nationaux ou locaux, rapports d'institutions, dictionnaires...), archives institutionnelles, archives orales. En fonction des périodes, une partie de ces types de sources a été mobilisée, ce qui relève de choix méthodologiques, mais révèle également l'évolution des acteurs étudiés dans cette thèse. La Figure 3 résume le type de sources étudiées en fonction des périodes, ainsi que les apports respectifs de chacun de ces types de sources, en termes d'analyse des discours, d'informations scientifiques et techniques sur les convertisseurs et de dynamiques d'acteurs, qui seront explicités dans cette présentation du corpus.

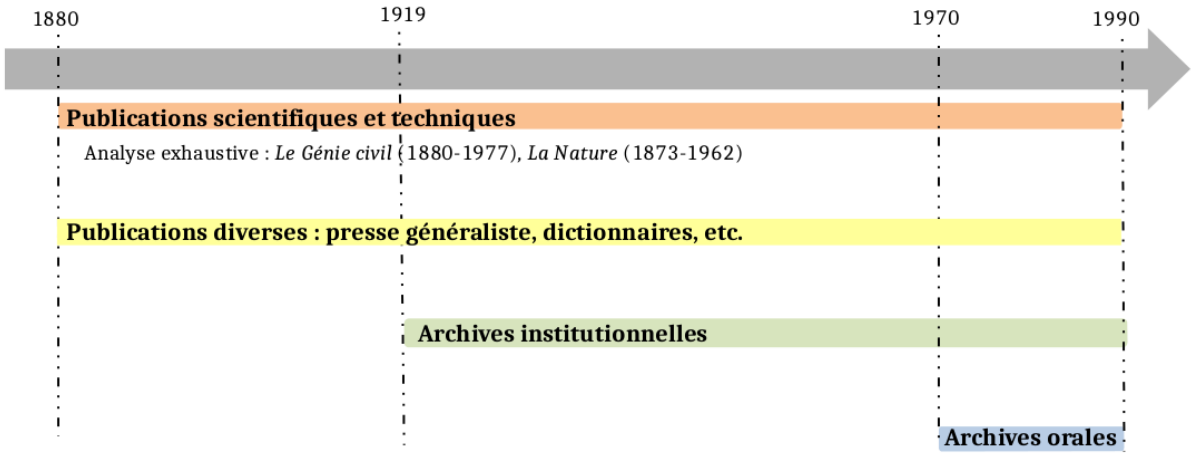



FIGURE 3 – Sources étudiées en fonction des périodes.

Premièrement, j'ai examiné des écrits d'inventeurs et enthousiastes du progrès technique. À la fin du XIX^e siècle, la presse scientifique et technique connaît un essor, et les revues se multiplient pour tous types de lecteurs, des spécialistes au grand public (CARDOT, 1991b ;BENSAUDE-VINCENT, 1993). J'y ai relevé et étudié des articles ou occurrences (courrier de lecteurs, publicités...). Ces discours renseignent sur l'imaginaire technicien de ces acteurs vis-à-vis de l'exploitation des énergies renouvelables, et sur d'éventuelles mises en œuvre et dynamiques d'acteurs engagés dans les projets. En outre, certaines institutions scientifiques publient un périodique informant sur leur activité, tels que le Musée

océanographique de Monaco(*Bulletin de l'Institut océanographique de Monaco)*, ou encore la DRSII puis l'ONRSI (Bulletin de la DRSII puis *Recherches et inventions*). Ces périodiques sont des sources utiles à propos de l'implication d'acteurs et du déroulement des projets.
Parmi les revues scientifiques et techniques, deux ont été sélectionnées pour une analyse systématique : *La Nature, revue des sciences et de leurs applications à l'industrie* (disponible en intégralité sur le CNUM, bibliothèque numérique du Conservatoire national des Arts et métiers (CNAM)), et *Le génie civil, revue générale des industries françaises et étrangères* (disponible en intégralité à la bibliothèque de l'École centrale de Nantes). Ces deux revues, parues respectivement sur les périodes (1873-1962) et (1880-1977), couvrent en effet la presque totalité de la période (1880-1980). La table des matières de chacune de ces revues a été dépouillée et tous les articles ou occurrences sur des convertisseurs innovants d'énergies renouvelables relevés. Pour chaque revue, l'ensemble des articles relevés constituent un corpus cohérent qui a ensuite été analysé de manière qualitative (source d'énergie étudiée, dénomination, idées associées, convertisseur imaginé, éventuelles réalisations) et quantitative (fréquence d'apparition et récurrences de ces expressions et thèmes).

Deuxièmement, l'étude ponctuelle de publications non scientifiques m'a permis d'examiner des discours extérieurs aux cercles scientifiques et techniques, ainsi que la présence d'éventuels autres acteurs : quotidiens généralistes nationaux (*Le Monde*, *La France nouvelle*, *Le Figaro), etc.*, quotidiens/hebdomadaires généralistes locaux (*Ouest-France*, *L'écho d'Alger*, *Journal général de l'Algérie et de la Tunisie*, etc.).

Troisièmement, j'ai mobilisé des archives institutionnelles. En raison de la multiplicité des acteurs étudiés et du choix d'une étude au niveau national, l'utilisation d'archives s'est concentrée sur les institutions nationales : ministères (services, comités techniques : Travaux publics, Industrie, Colonies), agences et centres nationaux (AFME, CNEXO), entreprise publique (EDF). J'ai consulté les archives des sites de Pierrefitte-sur-Seine (Archives nationales), de Blois (EDF) et d'Aix-en-provence (Archives nationales d'Outremer). Je n'ai pas eu recours aux archives départementales, municipales, d'entreprises privées, qui auraient certainement apporté des compléments intéressants aux sources ici utilisées. Les informations contenues dans les archives nationales, couplées avec la presse, nationale ou locale, et les publications scientifiques et techniques ont été suffisantes pour saisir une dynamique globale d'acteurs.

Quatrièmement, j'ai eu la chance de pouvoir interroger des acteurs de la période (1970-1990), dont quatre témoignages ont été ici mis à profit : Alain Clément (École centrale de Nantes), Philippe Marchand (CNEXO), Philippe Chartier (AFME) et Jean-Louis Bal (Philips). Ma grille de questions portait sur l'implication personnelle de chacun de ces acteurs dans les projets portés par leurs institutions respectives (motivations, avis sur

les projets mis en œuvre), sur la place de ces institutions dans la dynamique nationale pour le développement des énergies nouvelles, sur le contenu des projets. Ces sources sont particulièrement riches pour saisir les dynamiques d'acteurs ainsi que leurs discours.

Pour la période (1880-1918), seuls les deux premiers types de sources ont été utilisées, majoritairement grâce à des publications reproduites dans Gallica, la bibliothèque numérique de la Bibliothèque nationale de France. L'absence de résultats avec des mots clés bien choisis (parmi les expressions couramment utilisées par les acteurs) dans les moteurs de recherche des archives nationales et les publications consultées convergent vers une absence de soutien institutionnel pour des projets de convertisseurs innovants exploitant les énergies renouvelables. La consultation d'archives départementales ou municipales, dans les lieux où des expérimentations ont été tentées, pourrait être un complément intéressant sur leur déroulement et pour une analyse plus fine des dynamiques institutionnelles.
Pour l'entre-deux-guerres, l'implication du ministère des Travaux publics, avec la création d'une Commission de la houille bleue, chargée d'étudier les projets d'exploitation des marées et des vagues en France, amène les premières archives utilisées dans cette thèse. Elles contiennent des correspondances entre cette Commission, d'autres institutions nationales mais aussi des entreprises et des inventeurs. L'analyse systématique de *La Nature* et du *Génie civil* est en outre poursuivie ainsi que le recours à d'autres publications.
Pour la période (1940-1970), j'ai utilisé, de même, des publications et des archives écrites. Concernant la guerre, j'ai ainsi consulté les archives de services du gouvernement de Vichy impliqués dans des projets éoliens, marémoteurs, solaires, et maréthermiques (ministère de la Production industrielle, Service des phares et balises, secrétariat d'État aux colonies). Pour l'après-guerre, j'ai utilisé celles d'EDF (service des Études et recherches), du service des Phares et balises et du ministère de l'Industrie (Comité technique de l'énergie des mers, Comité technique de l'énergie des vents), du gouvernement général d'Algérie (service de la Colonisation et de l'hydraulique) : projets d'aérogénérateurs et d'aéromoteurs, d'usines marémotrices autres que celle de la Rance (suffisamment connue pour ne pas nécessiter davantage d'investigations dans le cadre de cette thèse), d'utilisation de l'énergie solaire, en lien avec des inventeurs, entreprises, institutions internationales.
La dernière période voit une double rupture au niveau des sources mobilisées : utilisation moindre des publications scientifiques et techniques, et recours à des archives orales. J'ai à nouveau mobilisé des archives institutionnelles (CNEXO, Comité géothermie). L'abondance de ces dernières, un nombre plus important de sources secondaires, et la présence des archives orales rendait en effet à la fois moins nécessaire et plus délicat l'utilisation systématique de publications.

# Première partie

# Les « forces naturelles », sources de nouvelles conquêtes pour la nation française (1880-1918)

# Introduction

Cette partie montre la place respective d'un ensemble de sources d'énergie désigné par « forces naturelles » (chutes d'eau, marées, vent, soleil, vagues, gradients naturels de température) dans les discours scientifiques et techniciens ainsi que les rares matérialisations qui ont été effectuées alors que le charbon est devenu dominant dans le bilan énergétique français et que l'énergie hydraulique connaît un regain d'utilisation grâce au transport par l'électricité.

Elle met en évidence que les forces naturelles, autres que les chutes de montagne et de cours d'eau, ont fait l'objet d'une importante activité inventive entre 1880 et la Première Guerre mondiale. Celle-ci émane d'inventeurs, ingénieurs ou savants, non nécessairement spécialisés dans le domaine énergétique. Leurs conceptions sont diffusées dans les périodiques scientifiques et techniques de vulgarisation, florissants sur la période considérée (Cardot, 1991b ; Bensaude-Vincent, 1993). Elles ne donnent cependant majoritairement pas de résultats pratiques.

Elle relativise en outre l'abandon des moulins à vent, ainsi que le caractère archaïque que leur auraient affecté leurs contemporains. De nouveaux moulins à vent s'installent en effet dans les campagnes françaises, à l'initiative de particuliers ou de communes, et les constructeurs qui les proposent travaillent sur le perfectionnement de leur fonctionnement. Ces machines sont exhibées lors des expositions universelles, et, de même que pour les autres convertisseurs de forces naturelles, les périodiques scientifiques et techniques en font part avec enthousiasme, ainsi que certains ingénieurs ou scientifiques dans les bulletins de sociétés savantes et associations professionnelles.

Pour commencer, l'introduction rappelle des éléments du contexte énergétique tel que les présente l'historiographie actuelle de l'énergie. Le premier est la présence écrasante du charbon dans le bilan énergétique français et le recours dès lors manifeste du charbon étranger. Le deuxième est la mise en place des premières usines hydroélectriques de « houille blanche » (chutes d'eau de montagne) et de « houille verte » (rivières et cours d'eau). Le troisième est la place marginale, dès les années 1880, des convertisseurs éoliens et marémoteurs. Elle montre ensuite en quoi ce constat est à nuancer, puis expose les élé-

ments de contexte favorables à des projets de convertisseurs innovants pour l'exploitation des énergies renouvelables. Enfin, elle présente le corpus mobilisé et le plan de la partie.

## L'ère du « charbon-roi »

Les années 1880 ont été relevées, en histoire des techniques et de l'économie, comme une date particulière dans l'histoire énergétique de la France. En effet, comme les autres nations qui entrent dans l'ère de la civilisation thermo-industrielle, la France a progressivement accru sa consommation d'énergie au XIX$^{e}$ siècle. Dans son bilan énergétique, la part de charbon (ou « houille ») croît et devient majoritaire à la fin du siècle. La consommation d'énergie primaire passe ainsi d'environ 18 MTEC [19] à 43 MTEC entre (1835-1844) et (1885-1894), et la part du charbon dans ce bilan d'un quart à quatre cinquièmes (Benoît, 1985, p. 14) (voir Tableau 1). Ses usages sont multiples (« universels » selon Benoît, (1985)) et il fournit l'énergie sous forme mécanique, calorifique et lumineuse à l'industrie et, pour ces deux dernières, aux ménages. Pour une utilisation finale sous forme mécanique, la puissance installée en machines à vapeur dans l'industrie dépasse ainsi celle des moteurs hydrauliques, qui était jusqu'alors majoritaire pour cet usage. Ces derniers avaient effectivement largement participé à la mécanisation de la France aux XVIIIe et XIXe s (Benoît, 1991b, p. 118-127), mais leur puissance installée totale s'était maintenue à partir de 1860 [20], tandis que de plus en plus de machines à vapeur fixes étaient mises en place dans tous les secteurs de l'industrie.

## Nouvelles applications de l'électricité et modernisation de la « houille blanche »...

Les années 1880 sont un moment où les nouvelles applications de l'électricité en font un véritable « phénomène de société »(Beltran et Patrice A Carré, 2000, p. 92). Les premières dynamo réversibles sont construites à la fin des années 1870, et rendent d'une part possible la transformation de forces motrices importantes en électricité, mais également leur transport à distance (Moïse et Daumas, 1978, p. 357). À partir de cette force motrice, elle permet d'obtenir l'énergie sous plusieurs formes : mécanique, mais aussi

19. Méga-tonne d'équivalent charbon (unité de mesure de l'énergie).

20. Cette constance résultait de deux mouvement : le « déclin du parc d'origine ancienne » et de petite puissance et « l'équipement de chutes entièrement nouvelles de grandes puissance », si bien que la puissance moyenne du parc des machines hydrauliques avait tendance à s'élever. Pour différencier petite et grande puissance, Benoît utilise un critère de la fin du XIX$^{e}$s et du début du XX$^{e}$s : les usines de petite puissance sont celles dont la puissance installée est inférieure à 200 ch (150 kW) et les usines de grande puissance sont les autres.

lumineuse, chimique. L'électricité possède de plus l'avantage, par rapport à l'utilisation directe de l'énergie mécanique, d'une souplesse d'utilisation grâce à sa divisibilité et la possibilité qu'elle offre d'actionner simultanément, à partir d'une seule génératrice, plusieurs machines simultanément et indépendamment. Certains contemporains voient dans la création de stations centrales associées à des réseaux de transport et de distribution de l'énergie un moyen de les pallier les bouleversements sociaux et environnementaux induits par l'organisation de l'activité productive autour de la machine à vapeur. Ils s'inquiètent des fumées mais aussi du mouvement de centralisation de la main d'œuvre généré par son utilisation dans les usines, considéré comme un facteur de délitement des familles et de corruption des mœurs. L'électricité ne produit pas de fumée sur le lieu de l'utilisation finale, et, distribuée à domicile, elle pourrait actionner de petits moteurs domestiques pour l'artisanat et désamorcer ce phénomène de centralisation (Benoît, 1991b, p. 166-183) ; (Beltran et Patrice Alexandre Carré, 1991, p. 115-116). Symbole de modernité, l'électricité détrône symboliquement la machine à vapeur que, malgré son caractère central dans le monde industriel, il n'est alors pas rare de voir qualifier d' « agent barbare et grossier de la vieille industrie », comme le fit le romancier Albert Robida en 1882 (Beltran et Patrice A Carré, 2000, p. 92) [21].

C'est au début des années 1880 que les premiers réseaux électriques véritablement capables de transporter des puissances importantes et sur de longues distances sont mis en place (Lanthier, 1991, p. 674). L'exposition universelle de 1881 à Paris montre les multiples possibilités désormais offertes par l'électricité. Ces réalisations font beaucoup de bruit et soulèvent de nombreux espoirs comme moyen de délocaliser la production et la consommation d'énergie, en particulier l'énergie hydraulique pour laquelle un nouvel avenir est entrevu (Benoît, 1991b, p. 118-127). Les premières usines hydroélectriques françaises apparaissent à partir de 1883 dans les Alpes (Morsel, 1991a, p. 520), sur de hautes chutes à haut débit et grande puissance dont la force est convertie dans des turbines [22], et apportent à cette ressource énergétique un caractère moderne. L'énergie fournie par les chutes d'eau est désormais appelée « houille blanche », « par opposition au combustible minéral et de couleur noire, la houille » (Puyo, 2009, p. 49). Attribué à l'ingénieur Artistide Bergès, bien connu pour avoir mis en place plusieurs des premières installations françaises de haute chute dans les Alpes, l'emploi de ce terme se généralise dans les années 1890. Au sens restreint, houille blanche ne désigne que les chutes d'eau de montagne, converties en électricité dans des turbines puissantes, mais au sens large, il

21. Les auteurs citent Albert Robida, *Le vingtième siècle*, 1883, p. 47.

22. L'usage des turbines, qui avaient été inventées dans la première moitié du siècle, était resté jusqu'alors marginal. Selon Benoît, « c'est durant les trois et surtout les deux dernières décennies du textscxix$^{e}$ siècle que le mouvement de substitution de la turbine aux différents types de roues en usage, y compris aux roues verticales perfectionnées développées jusqu'aux années 1860, a pris toute son ampleur, alors que vers 1870, les turbines ne devaient guère représenter que 3 à 4 % au plus du parc français de moteurs hydrauliques et certainement moins de 10 % de la puissance installée totale (Benoît, 1985, p. 26). »

désigne l'ensemble des cours d'eau nourris plus ou moins directement par les glaciers.

Les promoteurs de la houille blanche vantent son abondance sur le territoire français. En effet, la France est dans une situation de dépendance vis-à-vis de sa consommation de charbon, qu'elle importe massivement de l'étranger. Les rares houillères françaises présentent un charbon difficile à extraire et sont mal réparties sur le territoire : elles sont très rapidement insuffisantes pour la consommation nationale. Entre 1880 et 1910, la consommation totale de charbon est doublée, et le tiers provient ainsi d'importations d'Angleterre, de Belgique et d'Allemagne (Morsel, 1991a, p. 118-127). Les responsables politiques et les industriels sont « conscients du préjudice immense que caus[e] à l'économie nationale l'inutilisation de potentiels hydrauliques considérables - les plus importants du continent européen - constitués par les fleuves et les torrents de haute montagne, alors que les difficultés d'approvisionnement du pays en combustible [se sont] particulièrement fait sentir au cours des années 1870 ». La possibilité d'étendre l'exploitation de l'énergie hydraulique revêt donc un intérêt particulier pour l'économie nationale, et, associée à l'électricité, la houille blanche devient également un symbole de modernité : « la houille noire a fait l'industrie moderne, la houille blanche la transformera » est-il ainsi inscrit sur la première page des premiers numéros de *La Houille blanche*, revue technique spécialisée dans l'énergie hydraulique et fondée en 1902. C'est pourquoi, à la demande de propriétaires de forces hydrauliques lors du premier Congrès de la houille blanche qui a lieu en 1902, organisé par des industriels et des responsables politiques, un service des grandes forces hydrauliques est créé en 1903 au sein du ministère de l'Agriculture pour les Alpes, suivi d'un autre pour les Pyrénées. Confiés à deux ingénieurs des Ponts et chaussées, ceux-ci doivent dresser un inventaire des forces hydrauliques françaises (Morsel, 1991a, p. 518).

## ...Et de la « houille verte »

Une autre source d'énergie hydraulique, la « houille verte », attire également l'attention des pouvoirs publics dans la première décennie du XX$^{e}$ s par son abondance nationale et les possibilités de la moderniser grâce à l'électricité. À l'instar de la houille blanche, la houille verte, dont le terme est inventé par Henri Bresson, son « propagandiste le plus zélé » (Beltran et Patrice Alexandre Carré, 1991, p. 124-126), « évoqu[e] les ressources plus modestes, mais bien plus largement répandues, des rivières de plaine et de plateaux entretenues par le couvert végétal des forêts et des herbages » (Benoît, 1985, p. 6). Géographiquement complémentaire de la houille blanche et tout aussi abondante, la houille verte possède l'avantage de ne pas nécessiter de nouveaux aménagements pour la production d'électricité. Elle permettrait à la France de pallier son manque de charbon et de préparer l'épuisement à venir de ce combustible puisque d'anciens sites hydrauliques aban-

donnés ou encore utilisés sous forme mécanique peuvent être reconvertis par l'ajout de petites installations électriques. Elle répond en outre de manière plus évidente au souhait de décentralisation de la production industrielle. Transformer la houille verte en électricité est ainsi considéré par ses protagonistes comme une « reconquête des anciens moulins tombés en désuétude » (Berthonnet, 2003, p. 397) ainsi que comme une réhabilitation des petites industries locales. Henri Bresson est ainsi chargé par la direction de l'Hydraulique et des améliorations agricoles du ministère de l'Agriculture d'effectuer un inventaire national des ressources en houille verte et de l'étude de leur potentiel électrique pour la lumière et la force. Le ministère de l'Agriculture entend ainsi favoriser l'équipement de telles chutes d'eau pour la production d'électricité.

Jusqu'à la fin des années 1880, les premières installations hydro-électriques industrielles représentent surtout un appoint, pour la lumière, à des installations hydromécaniques qui continuent d'être utilisées. Au tournant du siècle, elle concerne majoritairement l'industrie électrochimique et électrométallurgique de montagne, qui représentent les puissances unitaires les plus importantes. Mais on y trouve également des sociétés de distribution d'électricité, fondées sur de nouvelles installations ou, pour un nombre important d'entre elles, issues de la reconversion d'anciens sites hydromécaniques de petites puissance [23]. Jusqu'aux années 1910, les centrales commerciales de distribution d'électricité d'origine hydraulique de petite et de grande puissance se multiplient ainsi en parallèle, avant que les centrales de grande puissance ne connaissent une croissance accélérée, minimisant la part des centrales de petite puissance qui continuent cependant de se développer (Benoît, 1985, p. 18). La logique de développement globale devient donc celle d'une concentration vers des centrales hydrauliques de plus grande puissance. Il devient, en effet, possible de transporter l'électricité plus loin et à moindre frais grâce à des techniques d'élévation de la tension et au courant alternatif polyphasé. La loi du 15 juin 1906 donne aux réseaux électriques un statut juridique précis, et favorise l'implantation de nouvelles installations, tout en donnant aux collectivités locales et à l'État un contrôle sur le développement de ces réseaux. Elle marque la prise en considération par les pouvoirs publics de l'électricité comme un service public [24]. La production hydroélectrique française augmente plus rapidement à partir de cette date (Morsel, 1991a, p. 507).

Cependant, avant la première guerre mondiale, l'importance de l'électricité dans la société française est toute relative : sa consommation ne représente qu'une part infime de la consommation totale d'énergie, même si elle concerne la majorité de la population [25]. Ses

23. En 1899, sur les 388 usines hydroélectriques à vocation commerciale, 261 usines ont une puissance installée inférieure à 201 chevaux (Benoît, 1985, p. 14).

24. Dans les textes législatifs qui ont préparé la loi du 15 juin 1906, il était question de l'air comprimé, mais celui-ci disparaît dans cette loi (Beltran, 1987).

25. Selon Maurice Lévy-Leboyer, en 1920, l'électricité ne représente que 3% de la consommation totale en France (Lévy-Leboyer, 1994a, p. 14), et, en 1918, seules 20% des communes françaises sont raccordées à un réseau électrique, mais elles représentent 58% de la population (Beltran et Patrice Alexandre

usages sont avant tout urbains, avec l'électrification de l'éclairage et des tramways. Par ailleurs, « le transport de l'électricité est resté limité à d'assez courtes distances, en sorte que sa production conserv[e] un caractère essentiellement ponctuel et localisé » (Benoît, 1985, p. 8), et que le rêve d'alimenter des régions entières en électricité grâce à la houille blanche délocalisée est loin de s'être accompli. En outre, si la puissance installée des usines hydro-électriques de grande puissance a eu tendance à minimiser le poids des petites installations hydrauliques, mécaniques ou électriques, les premières sont restées nombreuses, bien qu'en diminution, sur le territoire français jusqu'à l'entre-deux-guerres [26].

En outre, alors que l'électricité ne fait qu'ouvrir cette possibilité, d'autres moyens techniques existent pour transporter et distribuer la force à partir d'une production centrale. L'air comprimé est ainsi appliqué à l'exploitation de la houille blanche, dans les années 1850, pour le percement des tunnels de montagne : il était alors distribué via des tuyaux métalliques de plusieurs kilomètres. Dans les années 1880, associé à des machines à vapeur, il alimente des réseaux de distribution urbaine de force motrice jusqu'à une dizaine de kilomètres. Il actionne également les moteurs de locomotives de tramways, stocké dans des réservoirs qui sont approvisionnés grâce à un réseau de recharge. Des réseaux de distribution d'air raréfié apparaissent à la même période. De même, l'eau sous pression est utilisée pour la distribution de la force motrice dans les ports à partir des années 1840 et dans les villes anglaises, italiennes et suisses dans les années 1870. Mais ces deux techniques ne furent pas appliquées au transport de forces naturelles (Benoît, 1991b, p. 166-163).

Avant la première guerre mondiale, sans avoir un poids important dans le bilan énergétique global, l'utilisation industrielle de la houille blanche sous forme électrique a donc été mise en application, et elle est porteuse d'espoirs pour les partisans de la poursuite d'un développement industriel. La houille verte a également connu un certain regain d'intérêt entre 1890 et 1910, avant de perdre de l'importance vis-à-vis des centrales de grande puissance.

## Le relatif déclin des moulins à vent et à marées

Les autres sources d'énergie qui étaient utilisées depuis des siècles (vent, bois, énergies humaine et animales) deviennent quant à elles marginales dans le bilan énergétique français. Selon Serge Benoît, malgré l'absence de statistiques précises, « il est permis de considérer que l'énergie éolienne a massivement cessé d'être employée à la fin du [XIX$^{e}$ siècle] »,

Carré, 1991, p. 217)

26. En 1931, sur les 3 796 713 chevaux de puissance installée hydraulique, 3 277 776 étaient des installations électriques de plus de 201 chevaux (Beltran, 1987, p. 18). Mais il y avait encore 43 374 usines de petite puissance en usage en 1906, et 27 445 en 1933, parmi lesquelles seulement 4286 avaient été électrifiées (Morsel, 1991a, p. 520)

à tel point que son utilisation devient négligeable par rapport aux autres sources d'énergie. En effet, même en considérant un usage constant entre (1835-1844) et (1885-1894), « sa valeur en TEC n'eut plus été, à ce moment qu'inférieure à 0,2% de la consommation globale, et n'aurait donc eu aucune influence réelle sur l'estimation de celle-ci » (Benoît, 1991b, p. 117). Claude Rivals décrit l'« inéluctable déclin », à partir du XIX$^{e}$ siècle, des moulins à vent, et celui du métier de meunier, au profit des minoteries, véritables usines « de structure industrielle et capitaliste », dont les moulins à cylindre sont actionnés par du charbon ou, de plus en plus à la fin du XIX$^{e}$ siècle, du pétrole, du gaz, puis de l'électricité (Rivals, 2000, p. 210 ; p. 22-230). En ce siècle d'industrialisation, la plus grande productivité de ces usines, mais également une pression de la part des industriels pour une législation défavorable à la meunerie, contribuent à cette déchéance du moulin à vent traditionnel. De plus, l'usage relatif du bois comme combustible s'abaisse sensiblement au cours du XIX$^{e}$ siècle [27].

La Table 1 est issue du bilan dressé par Benoît, (1991b, p. 119) et montre la part occupée par chaque source d'énergie dans le bilan énergétique global en 1885-1894.

Table 1 – Bilan énergétique français en 1885-1894 d'après Benoît, (1991b, p. 119)

| Source d'énergie | Quantité (MTEC) | % |
|---|---|---|
| Bois | 7.45 | 17.24% |
| Houille | 34.11 | 79.09% |
| Tourbe | 0.08 | 0.18% |
| Pétrole | 0.29 | 0.67% |
| Hydraulique | 1.2 | 2.78% |
| Eolienne | - | - |

Cet état des lieux tend à rendre rétrospectivement générale et irrévocable une diminution de l'utilisation de l'énergie éolienne. Mais les bilans nationaux sont à analyser avec précautions. D'abord, ils lissent les particularités régionales et prennent en compte des secteurs de l'activité économique dont les consommations énergétiques sont de nature et d'ordres de grandeur divers. Ensuite, ils ne prennent pas en compte, au sein de ces secteurs même, certains moteurs dont l'usage est jugé marginal, comme les « moteurs animés » que représentent les hommes et les animaux. On retrouve en effet dans ces bilan le transport et l'industrie, qui ont été largement pourvus en machines à vapeur [28], mais aussi

27. Selon Debeir *et al*, l'usage thermique du bois n'aurait commencé à régresser en valeur absolue que dans les années 1930, alors que pour Benoît il aurait déjà diminué d'un tiers entre (1835-1844) et (1885-1894), substitué par le charbon (Debeir, Deléage et Hémery, 2013, p. 243-245)

28. En 1881, la puissance installée en machines à vapeur s'élève à 2 674 209 ch pour les transports par chemins de fer, 533 832 ch pour l'industrie, et 42 592 ch pour l'agriculture (Woronoff, 1994, p. 237 ; Benoît, 1991b, p. 126)

l'agriculture, qui l'a été moins, et où par exemple la traction animale reste prépondérante jusqu'au milieu du XX^e siècle (Debeir, Deléage et Hémery, 2013, p. 244), et qui n'a pas encore abandonné l'usage du vent.

Or, au XIX^e siècle, la grande majorité de la population vit encore en zone rurale (c'est-à-dire dans des communes de moins de 2000 habitants), et c'est encore le cas au début du XX^e siècle (Mayaud, 1999, p. 13). En ce qui concerne l'énergie éolienne, les chiffres officiels du ministère de l'Agriculture montrent une quantité d'énergie encore significative dans le milieu rural à la fin du XIX^e siècle. Les statistiques officielles chiffrent pour l'année 1892 une puissance « disponible » de 16 500 chevaux (12 MW), contre, toujours dans le secteur de l'agriculture, 57 200 chevaux pour les moteurs hydrauliques et 55200 chevaux pour les moteurs à vapeur (Ministère de l'Agriculture, 1897, p. 256). La traction animale reste quant à elle majoritaire dans la locomotion urbaine où, à partir de 1900, elle chute dans les grandes villes mais continue d'augmenter dans les villes de moins de 10 000 habitants. Le nombre de chevaux en France reste ainsi le même entre 1830 et 1940 (Mom, 2009, p. 23). Pour ce qui concerne l'énergie éolienne, on verra que, loin de la rhétorique de désuétude et de l'abandon des moteurs éoliens, la période (1880-1918) voit la multiplication dans les campagnes d'aéromoteurs dits « modernes » par des partisans du progrès scientifique et technique. En raison de leur faible puissance relative, ils n'ont pas pu être comptés dans les bilans énergétiques nationaux de l'histoire des énergies classiques.

Cet état des lieux laisse par ailleurs de côté des tentatives pour l'utilisation d'autres sources d'énergie. Il s'avère pourtant que la période (1880-1918) est propice à l'utilisation des énergies renouvelables. C'est ce que développe la suite de cette introduction.

## Une période propice à l'utilisation des forces naturelles

Plusieurs éléments de contexte sont favorables à des projets d'exploitation d'un ensemble de source d'énergie appelé « forces naturelles ». Celui-ci regroupe non seulement la houille blanche et la houille verte, mais aussi l'énergie du vent, des marées, des vagues, du soleil et des gradients naturels de température. Les éléments de contexte favorables à ces projets sont les suivants : outre la dépendance française au charbon étranger, des discours scientifiques et économiques sur l'épuisement en énergies fossiles, ainsi qu'une forte activité inventive et un optimisme technophile, et, enfin, l'expansion coloniale.

Sur la période (188-1918), et depuis quelques années, des débats mondiaux sur une potentielle pénurie de charbon trouvent un écho sur la scène publique française. Une crainte de la disparition du charbon s'est manifestée en premier lieu en Angleterre, où l'économiste William Stanley Jevons prédit, en 1865, dans l'ouvrage *The Coal question*,

un épuisement inéluctable des mines de charbon anglaises. Des études géologiques sur les réserves nationales et même mondiales sont commandées par le gouvernement anglais dès 1866, conférant dès l'origine à cette question un aspect international. S'en sont suivis des débats entre d'un côté les tenants de Jevons, postulant des « besoins toujours croissants, des ressources en quantités finies dans la nature et d'irréversibles mécanismes de marché », et de l'autre des géologues « conservationnistes », considérant plutôt pour l'avenir des besoins stabilisés, une diversification des ressources exploitées et une capacité d'adaptation pro-active de l'homme (Madureira, 2012). Quel que soit le positionnement vis-à-vis d'une pénurie d'énergie à venir, sa prise en considération stimule les partisans d'une poursuite de l'industrialisation à rechercher des moyens d'exploiter d'autres sources d'énergie.

Par ailleurs, la fin du XIX^e^ siècle est le siège d'une forte activité inventive [29], et l'ingénieur, dont le profil et les domaines d'action se sont multipliés au cours des décennies précédentes [30], apparaît comme figure de héros du progrès scientifique et technique, au service de la nation (Galvez Behar, 2008). Porteur d'une « volonté de faire constamment du neuf », il se veut « l'incarnation d'un progrès indéfini et organique de la société », au moyen de la « recherche délibérée de l'innovation » (Picon, 1991, p. 801-803). Or, ce siècle est celui de l'apparition de la thermodynamique, qui voit aussi s'épanouir un « projet intellectuel de mise en équivalence généralisée de toute forme de travail [...] et faisant l'hypothèse d'une substituabilité générale des sources d'énergie » (Bonneuil et Fressoz, 2013, p. 121). Alors que l'électricité a « modernisé » la houille blanche et la houille verte, des acteurs imaginent de nouveaux convertisseurs pour les autres forces naturelles, et souhaitent ainsi régler les deux problèmes de dépendance à l'étranger et d'épuisement des ressources mondiales.

Enfin, l'accélération de l'expansion coloniale dans les deux dernières décennies du XIX^e^ siècle (Pervillé, 1993, p. 39) stimule des projets d'exploitation de l'énergie solaire. François Jarrige a mis en lumière le projet porté par Augustin Mouchot entre la fin des années 1850 et le début des années 1880, d'une machine solaire à destination des colonies, dans une période de crainte mondiale de pénurie de charbon, puis, dans les années 1870, d'affirmation d'une politique impérialiste française, en particulier en Algérie (Jarrige, 2010). Soutenu à plusieurs reprises par les pouvoirs publics et le monde savant et industriel, il arrête son projet dans les années 1880, selon Jarrige à cause de la concurrence nouvelle

29. Un indicateur (imparfait) de l'activité inventive est le nombre de brevets annuels délivrés. Selon Bruno Jacomy, il passe de 750 sur la période (1831-1841) à 10 000 à la fin du XIX^e^ siècle (**Jacomy1990**)

30. Les ingénieurs civils viennent, dans les années 1830-1840, s'ajouter aux ingénieurs du Corps de l'État. Alors que, depuis le XVII^e^ siècle ces derniers avaient en charge l'exécution des projets d'aménagement du territoire, le contrôle des exploitations minières ou des manufactures de l'État, les ingénieurs civils des Mines « vendaient leurs conseils à des entrepreneurs privés et occasionnellement à l'État », « dont la compétence s'étendait aussi à bien des secteurs autres que la mécanique, tout particulièrement aux travaux publics et à l'équipement industriel » (Caron, 2010, p. 60-63).

du pétrole et des moteurs à combustion interne, et de l'apparition de nouveaux procédés d'extraction du charbon. L'énergie solaire aurait dès lors été « rejetée de l'espace savant et industriel ». On verra que, pourtant, Charles Tellier a formulé un projet de « conquête pacifique de l'Afrique occidentale par le soleil » et construit une machine de son invention en région parisienne.

## Corpus - Plan

Cette partie se base tout particulièrement sur l'étude des publications scientifiques et techniques. Il s'agit de revues de vulgarisation, comme *La Nature* ou *L'année scientifique et industrielle*, ou professionnelles comme *Le Génie civil*, revue généraliste, *La Lumière électrique*, consacrée à l'électricité, ou encore *La houille blanche* , spécialisée dans l'hydraulique. Des bulletins de sociétés savantes et associations professionnelles ont également été mis à profit : Académie des sciences, Association française pour l'avancement des sciences (AFAS)) [31], Société d'encouragement pour l'industrie nationale (SEIN) [32], Société des ingénieurs civils de France, montrant l'intérêt porté au sujet dans les cercles scientifiques et industriels. On en trouve aussi parfois des traces dans d'autre types de périodiques telle que la presse généraliste nationale (*Le Temps* ; *Le Figaro*).

Les publications étudiées sont de différents types : l'auteur peut être l'inventeur d'un procédé qu'il présente, présenter l'invention de quelqu'un d'autre (français ou étranger), ou tout simplement des idées générales sur l'utilisation des forces naturelles. Certains de ces auteurs sont ainsi davantage des propagandistes que des inventeurs ou porteurs de projets, qui cherchent par exemple des débouchés à l'électricité plutôt qu'ils ne cherchent des moyens d'exploiter les forces naturelles. Les profils de ces auteurs sont en outre divers : électricien, mécanicien, hydraulicien, chimiste, médecin, ou indéfini.

Les occurrences de l'apparition de ce sujet n'ont naturellement pas été relevées de façon exhaustive. L'étude systématique de *La Nature* et du *Génie civil* sur l'ensemble de la période permet d'obtenir une lecture continue des discours sur les projets d'exploitation des forces naturelles, sur d'éventuelles réalisations et les acteurs impliqués.

31. L'AFAS, a été créée en 1872, au lendemain de la défaite française contre la Prusse, pour la « rénovation du pays ». Guidée par le mot d'ordre « par la science, pour la patrie », « cette tâche mobilise tout à la fois le monde académique et le monde industriel, commercial et bancaire, ce qui devient un projet politique pour l'association privée qu'est l'AFAS » (Gispert, 2002).

32. Cette association, reconnue d'utilité publique, se donnait pour but, par le biais de ses cinq comités spécialisés, d'encourager l'innovation technique sur des sujets intéressant l'industrie. Composée d'industriels et ingénieurs réputés, d'universitaires et de hauts fonctionnaires, elle jouait le rôle d'une expertise technique quasi officielle. Son bulletin est devenu un instrument important d'information technique, reflet des préoccupations des pouvoirs publics et des industriels (Benoît, Emptoz et Woronoff, 2006). Il doit donc constituer une source d'informations sur le point de vue d'industriels importants quant au potentiel de l'utilisation des forces naturelles.

*La Nature*, revue généraliste de vulgarisation, hebdomadaire puis bimensuelle en 1927, a été fondée en 1873 par le célèbre vulgarisateur Gaston Tissandier, dans le but de « rendre la science amusante » (Tissandier, 1873), prêtant tout au long de sa publication une grande attention à la facilité de lecture et à l'attractivité de ses pages (La Nature, 1926a). Elle entend « suivre le mouvement des idées, les progrès de la recherche scientifique, les perfectionnements techniques et les transformations économiques qu'ils provoquent » (Tissandier, 1873). Vendue à un « prix abordable mais déjà conséquent », elle s'adresse à une « bourgeoisie moyenne et aisée » [33]. Ce périodique doit donc illustrer l'écho qu'ont pu avoir les projets d'exploitation des forces naturelles auprès d'un public relativement large et friand des dernières nouveautés du progrès technique.

*Le Génie civil*, revue généraliste professionnelle, fait paraître son premier numéro en novembre 1880, et se donne pour vocation de « renseign[er] l'industrie à l'heure propice sur tout ce qui touche à ses intérêts vitaux, sur ce qu'elle peut à chaque instant obtenir de l'union féconde de la Science et de la pratique » (Conseil d'administration du Génie civil, 1880). Conçue à la base par des ingénieurs de l'École centrale des arts et manufactures pour ces mêmes ingénieurs, cette revue, hebdomadaire à partir de novembre 1883, s'adresse à un public averti. Promouvant également le progrès technique et industriel, elle représente le point de vue que des ingénieurs ont voulu partager avec leurs pairs sur le sujet qui m'intéresse.

Cette partie se décline en trois chapitres. Le chapitre 1 justifie l'existence du champ des forces naturelles et expose les caractéristiques qui lui sont associées, en comparaison avec le charbon : disponibilité, inépuisabilité, abondance, gratuité, considérées comme des qualités, et à l'inverse, dispersion, intermittence, présentées comme inconvénients. Le chapitre 2 étudie en quoi et dans quelle mesure des convertisseurs de forces naturelles ont été jugés innovants ou, plus précisément, « modernes ». Il montre que les critères de modernité d'un convertisseur de forces naturelles sont basés sur l'imaginaire de la machine à vapeur, présente les types de convertisseurs les plus souvent proposés, et relativise le caractère archaïque associé aux moulins à vent par les partisans du progrès technique, ainsi que l'abandon de ces convertisseurs, à la fin du XIX$^{e}$ siècle. Le chapitre 3 examine les discours et projets de convertisseurs innovants pour exploiter quatre forces naturelles qui ont eu le plus de succès pendant cette période, à savoir le vent, les marées, la houle et le soleil. Pour chaque source d'énergie, il relate un projet de convertisseur dont l'usage ne s'est pas diffusé : celui du duc de Feltre pour la production d'électricité éolienne, celui de Paul Decœur pour la production de force motrice par les marées, celui d'Édouard Bouchaud-Praceiq pour l'énergie de la houle et celui de Charles Tellier pour l'énergie

33. Un volume semestriel de *La Nature* coûte 10 francs, alors qu'une publication de vulgarisation comme *L'année scientifique et industrielle*, coûte 3.50 francs, comme certains livres « destinés à une plus large audience » (Cardot, 1991b, p. 239-240).

solaire.

# Chapitre 1

# Les forces naturelles : caractérisation d'un champ

Il convient d'abord de justifier l'existence et de caractériser le champ de « forces naturelles », qui a désigné l'ensemble des sources d'énergies suivantes : énergie des chutes d'eau, des vagues et de la houle, du vent, du soleil et des gradients naturels de température.

Dans un premier temps, ce chapitre expose une synthèse chronologique de l'intérêt porté à ces sources d'énergie. Il justifie ensuite l'usage de l'expression de « forces naturelles » ainsi que de variantes proches comme « forces motrices naturelles » ou « énergies naturelles ». Il montre enfin que les auteurs étudiés considèrent ces sources d'énergie, en opposition à la houille, comme abondantes et inépuisables, propres à résoudre les problèmes de l'approvisionnement national et de l'épuisement des mines de charbon, mais aussi comme dispersées et intermittentes.

## 1.1 Chronologie de l'intérêt porté aux forces naturelles

Cette section donne un aperçu de l'intérêt apporté aux forces naturelles, de manière globale et par source d'énergie, dans les discours scientifiques et techniciens au cours de la période (1880-1918). Le reste du chapitre précisera les éléments explicatifs de ces tendances.

Les Figures 1.1 et 1.2 représentent le nombre annuel d'occurrences sur les forces naturelles relevés dans *La Nature* et du *Génie civil* sur l'ensemble de la période. Pour le *Génie civil*, au niveau de l'analyse aussi bien qualitative que quantitative, les quatre premières années de parution de cette revue ne sont pas révélatrices de tendances globales, étant donné que le nombre de numéros double de 1883 à 1884, et que le public s'élargit.

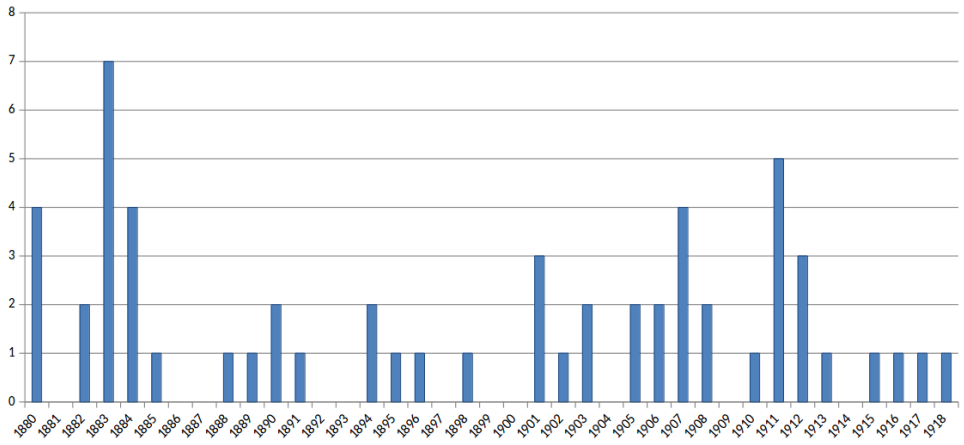



FIGURE 1.1 – Nombre d'articles et notes sur les forces naturelles dans *La Nature* entre 1880 et 1914

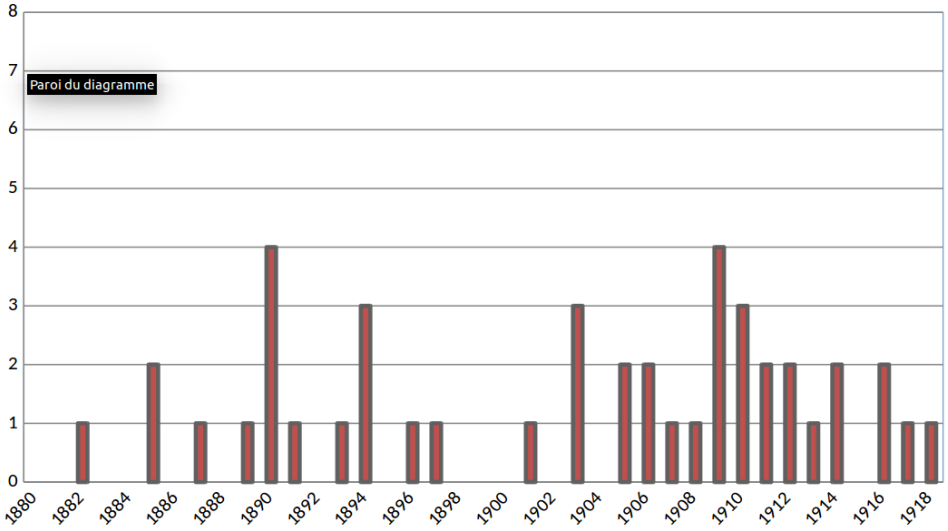



FIGURE 1.2 – Nombre d'articles et notes sur les forces naturelles dans *Le Génie civil* entre 1880 et 1918

Globalement, on constate une présence régulière d'occurrences tout le long de la période, avec dans *La Nature*, un pic d'occurrences au début de la décennie 1880 et une plus grande densité autour de 1910 dans les deux revues. Le premier pic est corrélatif aux débuts de l'électrification de la houille blanche et à une forte activité inventive en vue d'exploiter le vent et les marées de la même manière (cf sous-section 2.1). Le second est lié à des projets étrangers (USA, Allemagne, Angleterre, Danemark) sur l'exploitation du vent et du soleil relatés dans ces revues (cf 2.2).

La majorité des occurrences traite des convertisseurs d'énergie éolienne, marémotrice et solaire. Les Figures 1.1 et 1.2 montrent la répartition obtenue pour chacune des forces naturelles dans *La Nature* et *Le Génie civil*. Les autres publications vont dans le sens de ce constat.

TABLE 1.1 – Répartition du traitement des forces naturelles dans les articles du *Génie civil* (1880-1918)

| Articles | Vent | Marées | Soleil | Vagues | DDT | Chal. int | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nb | 21 | 8 | 8 | 3 | 2 | 1 | 44 [a] |
| % | 48% | 18% | 18% | 7% | 5% | 2% | |

*a.* Certains articles traitent plusieurs forces naturelles, ce qui explique que le nombre total d'articles est plus faible que la somme des articles dans lesquels chaque source d'énergie est traitée.

TABLE 1.2 – Répartition du traitement des forces naturelles dans les articles de *La Nature* (1880-1918)

| Articles | Vent | Marées | Soleil | Vagues | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| Nb | 26 | 11 | 18 | 1 | 58 |
| % | 45% | 19% | 31% | 2% | |

Le nombre d'articles sur les marées est plus important autour de 1880 et s'explique par les projets de conversion électrique inspirés par le modèle de la houille blanche (cf 2.1). Ils sont majoritairement français . Le nombre d'articles sur les moulins à vent a été plutôt constant, et concerne pour beaucoup des projets étrangers d'aéromoteurs utilisant ou non l'électricité. Les articles sur l'énergie solaire sont plus importants autour des années 1910 et concernent, de même, des projets étrangers (cf 2.2).

## 1.2 Un champ aux appellations multiples

La Table 1.3 synthétise les occurrences pour l'utilisation de « forces naturelles » sur la période (1880-1918) obtenues par la lecture exhaustive de *La Nature* et *Le Génie civil*[1]. Ces occurrences sont concentrées majoritairement dans les années 1880.

TABLE 1.3 – Occurrences de l'expression « forces naturelles » dans *La Nature* et *Le Génie civil* entre 1880 et 1918

| Revue | Occurrences | Sources d'énergie désignées |
|---|---|---|
| *La Nature* | 8 | Vent ; Marées ; Vagues ; Chutes d'eau ; Soleil ; Gradients de température ; |
| *Le Génie Civil* | 7 | Vent ; Marées ; Chutes d'eau ; Soleil ; Gradients de température ; Chaleur interne |

Dans les deux publications, l'expression « forces naturelles » a été utilisée à plusieurs reprises pour désigner le vent, les marées, les vagues et les chutes d'eau (houille blanche

1. Pour chaque occurrence, l'expression peut désigner une ou plusieurs des forces naturelles listées.

et houille verte), la chaleur solaire et les gradients naturels de température [2]. Elle n'a par ailleurs pas, ou pas explicitement, été utilisée pour désigner les énergies fossiles (houille noire et pétrole) [3], ce qui semble en faire une catégorie excluant ce type d'énergie. D'autres expressions proches ont également été relevées pour désigner cet ensemble de sources d'énergie (Table 1.4).

TABLE 1.4 – Variantes pour désigner les forces naturelles dans *La Nature* et *Le Génie civil* entre 1880 et 1918

| Revue | Autres termes | Occurrences | Sources d'énergie désignées |
|---|---|---|---|
| *La Nature* | Forces motrices naturelles / Forces de la nature | 2 | Vent ; Chaleur interne |
| *Le Génie civil* | Force(s) motrice(s) naturelle(s)/Forces de la nature/ source d'énergie naturelle | 3 | Vent ; Marées ; Chutes d'eau ; Gradients de température ; Chaleur interne |

Ces expressions « forces motrices naturelles », « forces de la nature » ou encore « sources d'énergie naturelles » ont été utilisées moins fréquemment mais ont globalement désigné les mêmes sources d'énergie.

L'étude des autres périodiques et ouvrages identifiés va dans le sens de cet examen, même sans permettre de donner une caractérisation du champ des « forces naturelles ». Ainsi, en 1883, Marcel Deprez, alors célèbre pour ses expériences sur le transport de la force par l'électricité, décrit, dans *La Lumière électrique*, l'ensemble des forces naturelles comme suit : « la chaleur solaire, les chutes d'eau, le vent, les marées » et ajoute qu'« [o]n pourrait y joindre la chaleur centrale qui se manifeste par les phénomènes volcaniques, les geysers et les sources thermales » (DEPREZ, 1883, p. 145). En 1881, Gustave Le Bon, médecin et écrivain iconoclaste, scientifique amateur, propose, dans *La Revue scientifique de la France et de l'étranger*, l'utilisation de forces naturelles inexploitées : les différences de température entre le jour et la nuit, pour remonter automatiquement une horloge. Répondant à cet article [4], Arsène d'Arsonval étend le panel des forces naturelles que représentent les gradients de température : il y ajoute l'eau des puits artésien de Grenelle comme source chaude et l'eau de la Seine comme source froide, ou encore, à l'équateur, l'eau de surface comme source chaude et l'eau de profondeur comme source froide — ce qu'on appellera plus tard l'énergie thermique des mers [5]. En 1907, dans un ouvrage sur les

2. Il s'agit dans les deux cas d'articles sur la pompe solaire de Charles Tellier installée chez lui à Auteuil : l'auteur considère la chaleur atmosphérique et le froid relatif de l'eau puisée comme des forces naturelles (TELLIER, 1885) ; (LE GÉNIE CIVIL, 1885)

3. « Énergies fossiles » était déjà également utilisée à l'époque.

4. Merci à Christophe Bonneuil de m'avoir signalé cet échange.

5. Aujourd'hui, et de manière récurrente depuis les expériences de Georges Claude de l'entre-deux-

moteurs électriques, le vulgarisateur Henri de Graffigny classe parmi les forces naturelles ou « puissances naturelles », « la chaleur solaire ; L'électricité libre, atmosphérique ou souterraine ; Le vent ; Le courant des rivières, les chutes d'eau, le mouvement des marées, etc. » (De Graffigny, 1907, p. 96-97).

Les auteurs signalent fréquemment que la majorité des sources d'énergie terrestres proviennent de la chaleur solaire. Pour Deprez, elle « engendre toutes les autres [forces naturelles] » (Deprez, 1883, p. 145). Selon l'ingénieur et entrepreneur germano-britannique Carl-Wilhem Siemens, dans un article traduit dans la *Revue scientifique* en 1881, est la « source universelle de toute force », sauf l'énergie des marées (Siemens, 1881, p. 308) [6]. Pour De Graffigny, « il est bien certain que la seule et unique source du mouvement sur la planète terrestre, la seule cause de la Vie, le véritable moteur du monde, est le Soleil, qui verse des torrents de lumière, de chaleur et de magnétisme sur le sol, élève les eaux dans les hauteurs de l'atmosphère pour assurer la circulation aqueuse d'un pôle à l'autre, et crée le vent qui brasse celle atmosphère et repartit l'humidité et la chaleur dans les divers climats et aux différentes latitudes du globe. » (De Graffigny, 1907, p. 96-97). Cette vision du cosmos montre celle d'une « nature-moteur » dont le principe fondamental est le soleil.

« Forces naturelles », comme « force motrice naturelle » ou les expressions apparentées, contiennent toutes la même idée d'une force disponible dans la nature. La majorité des auteurs ont dressé une nette distinction entre le charbon et ce qu'ils ont désigné par forces naturelles. On peut se demander pourquoi ces sources d'énergie ont été considérées comme « naturelles » à l'inverse des énergies fossiles, qui sont elles aussi des sources d'énergie qu'on prélève de la nature et issues de l'énergie solaire. En 1880, Édouard Hospitalier, professeur d'électricité à l'École supérieure de physique et de chimie industrielle de Paris, directeur de la revue *La lumière électrique*, donne un élément d'explication à cette distinction, en définissant ainsi les forces naturelles :

> Bien que toutes les forces que nous mettons à notre profit soient en réalité des forces naturelles, on désigne plus spécialement sous ce nom celles qui peuvent produire directement du travail sans passer par une transformation intermédiaire, à l'aide d'un organe unique qu'on nomme récepteur. Ces forces naturelles sont au nombre de trois : les chutes et les cours d'eau [...], les marées

guerres, d'Arsonval est régulièrement considéré comme l'inventeur de l'énergie thermique des mers, précisément en raison de cet article qu'il écrit en réponse à Le Bon. Un liquide possédant une forte tension de vapeur à basse température comme l'acide sulfureux, évaporé par la source chaude puis condensé par la source froide pourrait servir de fluide moteur dans une machine à vapeur à basse pression. Il souligne cependant que cette proposition n'est pas sérieuse et qu'il ne veut pas pas « empiéter sur le terrain de Jules Verne » (D'Arsonval, 1881a, p. 370-372).

6. Cet article est la traduction d'une conférence de Siemens. L'assemblée en question est très probablement constituée de personnalités du monde scientifique et industriel.

[...], les vents (HOSPITALIER, 1880b, p. 354).

Les forces naturelles sont donc les sources d'énergie mécaniques disponibles sous cette forme dans la nature. À l'inverse, la force mécanique obtenue à partir du charbon serait artificielle, car elle est produite à partir de la tranformations d'une énergie chimique en énergie mécanique. L'écrivain Louis Bourdeau, dans un ouvrage décrivant l'histoire de l'humanité comme une « suite de conquêtes » des « forces disponibles de ce monde », effectue une distinction similaire entre « forces naturelles » et « forces artificielles » : les premières, qu'il appelle plus généralement « moteurs naturels », sont représentées par l'eau et le vent, et les secondes (aussi appelés « moteurs artificiels ») sont les explosifs et la vapeur, produits à partir de combustibles.

Pourtant, on l'a vu, l'expression de forces naturelles a désigné un spectre plus large que les sources d'énergie mécaniques disponibles sous cette forme dans la nature (vent, marées, houle : forces naturelles au sens strict) puisque la chaleur solaire, les gradients de température ou encore la chaleur interne en font également partie pour nombre d'auteurs. C'est aussi leurs caractéristiques physiques et géographiques qui en ont fait une catégorie cohérente, à savoir l'aspect abondant, inépuisable, « gratuit » à l'utilisation, mais aussi irrégulier et dispersé contrairement au charbon.

## 1.3 Des sources d'énergie disponibles, abondantes, gratuites et inépuisables

Une idée récurrente dans les publications sur les forces naturelles est qu'elles sont abondantes, voire omniprésentes, dans la nature. Marcel Deprez, désormais célèbre pour ses expériences sur le transport de la force par l'électricité, dit ainsi, dans *La Lumière électrique*, des forces naturelles qu'elles sont d'« immenses sources d'énergie que la nature met à notre disposition »(DEPREZ, 1883, p. 145). Dans *La Nature* et *Le Génie civil*, d'autres expressions signifiant cette idée d'abondance ont été relevées (Tables 1.5 et 1.6).

En les opposant parfois explicitement au charbon, certains auteurs vantent aussi le caractère inépuisable des forces naturelles. Grâce à de nouveaux moyens pour les exploiter, elles seraient propres à résoudre le problème d'une inéluctable disette de charbon. Au tournant du XX$^{e}$ siècle, cette question est en effet encore relayée dans la presse française de façon plus ou moins optimiste. Par exemple, dans *Le Génie civil*, Gérard Lavergne, ingénieur civil des Mines, estime la consommation anglaise possible à 800 ans en 1890 (LAVERGNE, 1890), Ed. Lozé à 50 ans en 1901 (LOZÉ, 1900). En 1904, Eugène Caustier, professeur de sciences naturelles, affirme l'inéluctabilité de l'épuisement du charbon, et le considère de toute façon condamné à la désuétude, la houille blanche étant suffisante

TABLE 1.5 – Termes utilisés dans le *Génie civil* (1880-1918)

| *Dénomination* | Occurrences | Désigne |
|---|---|---|
| Prodigieuse réserve d'énergie/énormes forces perdues/puissance considérable | 4 | Vagues ; Marées ; Vent |
| Énergie calorifique que peuvent fournir indéfiniment le milieu ambiant, l'atmosphère, ou les eaux thermales qui jaillissent du sol | 1 | Gradients de température |
| Milliers de chevaux-vapeur qui sortent à chaque seconde des vannes de nos barrages | 1 | Marées |

TABLE 1.6 – Termes utilisés dans *La Nature* (1880-1918)

| *Dénomination* | Occurrences | Désigne |
|---|---|---|
| Immense réservoir de force motrice/- de chaleur et de force motrice/Réserves d'énergie réellement gigantesques | 3 | Vent, marées, cours d'eau, soleil |

en France pour « attendre en toute quiétude les découvertes que la science nous réserve, comme l'utilisation du mouvement des marées ou de l'énergie solaire » (CAUSTIER, 1904, p. 290-293). En 1881, c'est avec inquiétude que Le Bon évoque l'avenir de l'Europe, qui doit selon lui trouver des moyens de remplacer la houille faute de quoi « l'axe de la civilisation devra[it] fatalement se déplacer vers l'Asie qui, au dire des géologues, possèdent d'immenses réservoirs de combustible », tandis que l'Angleterre serait vouée à devenir une « île aussi sauvage qu'elle ne le fut à l'époque de Guillaume le Conquérant » (LE BON, 1881a, p. 469) [7]. Le Bon, adepte d'une anthropologie évolutionniste, déterministe et raciste (BERNARDINI, 1997), croit cependant en la capacité de la civilisation européenne de résoudre ce problème et, pour lui, la solution réside dans l'emploi des forces naturelles. Arsène d'Arsonval considère également que l'usage à venir des forces naturelles permet de « brûler en toute sécurité [le] dernier bloc de houille » (D'ARSONVAL, 1881a, p. 370). En 1894, dans une conférence où il imagine « la science et l'industrie en l'an 2000 », le chimiste Charles Berthelot livre sa vision de l'avenir énergétique de l'humanité : pour lui, « [l]e problème fondamental de l'industrie consiste à découvrir des sources d'énergie inépuisables et se renouvelant presque sans travail » et, comme le charbon « doit être extrait péniblement du sein de la terre » et que « la proportion en diminue sans cesse », « le principe de cette invention est facile à concevoir : il faut utiliser la chaleur solaire, il faut utiliser la chaleur centrale de notre globe. » (BERTHELOT, 1894, p. 467)

À nouveau, le relevé exhaustif des articles de *La Nature* et *Le Génie civil* sur les forces naturelles a permis d'identifier des expressions qui témoignent de la fréquence à laquelle cet aspect inépuisable a été conféré aux forces naturelles (Tableaux 1.7 et 1.8).

7. Passage qui m'a été indiqué par Christophe Bonneuil.

TABLE 1.7 – Termes utilisés dans le *Génie civil* (1880-1918)

| *Dénomination* | Occurrences | Désigne |
|---|---|---|
| Réservoir inépuisable des forces naturelles/force inépuisable | 3 | Marées ; Gradients de température |
| Énergie calorifique que peuvent fournir indéfiniment le milieu ambiant, l'atmosphère, ou les eaux thermales qui jaillissent du sol | 1 | Gradients de température |
| Force motrice économique et inépuisable | 1 | Marées |

TABLE 1.8 – Termes utilisés dans *La Nature* (1880-1918)

| *Dénomination* | Occurrences | Désigne |
|---|---|---|
| Force des plus puissantes, presque illimitée pour ainsi dire | 1 | Marées |
| Force gratuite et inépuisable | 1 | Vent, marées, soleil, chutes d'eau |

Une autre qualité des forces naturelles apparaît également dans les Tableaux 1.7 et 1.8 : leur gratuité, qui a également été soulignée en opposition à la cherté de la houille. Celle-ci, qui doit être payée, comme tout combustible, au fur-et-à-mesure de son utilisation dans les machines, est d'autant plus chère qu'elle est importée. Elle est cependant perçue comme indispensable à la richesse d'une nation. « Tant vaut la quantité de houille extraite ou consommée par un pays, tant vaut ce pays lui-même » affirme ainsi Louis Simonin, ingénieur des Mines, en 1865 (SIMONIN, 1865). L'ingénieur Maurice Leblanc, spécialiste de l'électricité et de l'hydraulique, affirme de même en 1883 que

> « sous le règne de la vapeur, le véritable organe industriel, et la source de toute puissance matérielle, c'est le charbon, et [...] nous [les Français] n'en [possédons] pas la quantité nécessaire pour les besoins d'une industrie suffisamment développée. [...] Qu'en résulte-t-il aujourd'hui ? Un malaise général, signe d'une diminution de la fortune publique dans ces dernières années. Quelles qu'en soient les causes apparentes, la véritable réside pour nous dans ce fait brutal qu'en France le charbon coûte plus cher que dans les pays voisins.[...] Nous croyons donc pouvoir dire : l'emploi du charbon dans l'industrie, s'il a augmenté la richesse absolue de notre pays au début, a diminué sa richesse relative, et désormais ne saurait que nous conduire à une situation financière de plus en plus critique. ». Il ajoute que « le seul remède efficace à cette fâcheuse situation consiste à abandonner l'emploi du charbon pour celui des autres forces naturelles [chutes d'eau et marées] qui sont en abondance dans notre pays. » (LEBLANC, 1883, p. 430)

TABLE 1.9 – Termes utilisés dans le *Génie civil* (1880-1918)

| *Dénomination* | Occurrences | Désigne |
|---|---|---|
| Force naturelle très importante dont on peut disposer gratuitement/Force motrice qui ne coûte rien et que l'on trouve partout/ Agents, qui en principe ne coûtent rien | 2 | Vent |
| Forces naturelles gratuites | 1 | Gradient de température (eau de puits ; atmosphère) |
| Force motrice économique et inépuisable | 1 | Marées |

Ici, le coût du charbon lié aux importations est mis en avant, et c'est l'utilisation de la houille blanche, mais aussi des marées, considérées comme abondantes sur le territoire, qui sont envisagées solutions de substitution. En 1884, Ch. Street, dans *La lumière électrique*, va dans le même sens : pour lui, « [l]a situation de la France, au point de vue des richesses houillères, est d'une infériorité notoire si l'on compare cette situation à celle de l'Angleterre, de l'Allemagne et de la Belgique », alors qu'en ce qui concerne « l'utilisation des forces naturelles, la France se trouve dans des conditions admirables, tant par le nombre considérable des chutes d'eau que par le grand développement des côtes de l'Océan, permettant l'utilisation des forces développées par les marées » (STREET, 1884, p. 363). Pour de Graffigny, toutes les forces naturelles sont susceptibles de pallier la cherté du charbon, et « la solution la plus économique du problème de la production de l'énergie consiste à capter les puissances sans cesse en action dans la nature pour les appliquer aux besoins de l'industrie » : il faut utiliser la chaleur solaire, l'électricité naturelle, le vent, les chutes d'eau et les marées qui sont des « puissances gratuites ».

Pour certains, l'absence d'emploi de ces ressources naturelles s'apparente même parfois à un « gaspillage ». L. Baclé, dans *La Nature*, déplore par exemple l'inutilisation du mouvement de la mer, « immense réservoir de force motrice, le plus grand peut-être, dont l'énergie est inutilement dépensée [...] sans profit, à polir les cailloux roulés sur les grèves » (BACLÉ, 1882, p. 363). Louis Bourdeau souligne que, « liquides ou aériens, les courants déploient en stériles effets mille fois plus de puissance que nos industries n'auront jamais besoin d'en appliquer » et appelle à « faire/meilleur usage de cette énergie qui ne coûte rien ». (BOURDEAU, 1884, p. 140).

Dans *La Nature* et *Le Génie civil*, des expressions témoignent de la fréquence à laquelle ces aspects inépuisable, abondant, gratuit et disponibles ont été conférés aux forces naturelles (Tables 1.9 et 1.10).

Les forces naturelles se présentent donc pour les auteurs étudiés comme avantageuses

TABLE 1.10 – Termes utilisés dans *La Nature* (1880-1918)

| *Dénomination* Dénomination | Occurrences | Désigne |
|---|---|---|
| Très importante source d'énergie à bon marché | 1 | Chaleur interne |
| Force gratuite/-pour ainsi dire gratuite/-qui s'offre d'elle-même et pour ainsi dire toute gratuite/-que la nature déploie spontanément et dont elle fait tous les frais | 4 | Vent, marées, cours d'eau, soleil |
| Force gratuite et inépuisable | 1 | Vent, marées, soleil, chutes d'eau |

par rapport au charbon : leur exploitation permettrait de ne plus dépenser d'argent pour un combustible cher, acheté à l'étranger et voué à disparaître, tout en poursuivant le développement industriel. Cependant, des inconvénients leur sont également reprochés précisément à cause de cette comparaison au charbon, utilisé dans la machine à vapeur, et dont les principaux avantages sont la concentration de la puissance et la régularité à l'utilisation.

## 1.4 Des sources d'énergie dispersées et intermittentes

L'irrégularité, la dispersion et la forme de flux et non de stock des forces naturelles sont décrites par certains auteurs comme des défauts par comparaison, explicite ou implicite, au charbon. Cette infériorité découle d'une hiérarchisation des couples source d'énergie/convertisseur basée sur la machine à vapeur, et en fonction de laquelle l'énergie utile délivrée à la sortie du convertisseur doit être la plus puissante, la plus régulière et sous une forme transportable. Ces critères sont ceux d'un convertisseur moderne.

Ainsi, en 1881, Le Bon souligne que

> « ce n'est pas, certes, la force qui manque dans le monde. Grâce au soleil, il y en a partout ; mais celle qui se présente à nous est répartie sur de vastes surfaces ; et pour le service de nos machines, elle a besoin, au contraire, d'être accumulée sous des volumes minimes. Or, la houille seule nous présente la force à l'état condensé. » (LE BON, 1881a, p. 469)

Le Bon met ainsi en évidence la densité énergétique de la houille, et la dispersion des forces naturelles. En 1865, l'ingénieur des Mines Louis Simonin soulignait aussi cet attribut du charbon, qu'il qualifiait de « soleil en cave » (SIMONIN, 1865, p. 271) car il est, comme toutes les énergies fossiles, le produit de l'emmagasinement sur de très longues

périodes géologiques de l'énergie solaire. Selon le même auteur, « on ne saurait opposer à la machine à vapeur rien de plus simple et de plus complet ». Bourdeau dit également des forces naturelles (cours d'eau et vent), que « ce sont des forces irrégulières, inégales, souvent gênantes, quelquefois funestes » qui « répondent mal aux désirs d'une activité qui aurait besoin d'être permanente, facultative et pleine de sécurité », contrairement aux moteurs à vapeur « à la fois puissants et souples, partout et toujours disponibles, aisés à diriger et à régler, capables en un mot de produire des effets utiles où nous voulons, quand nous voulons, et comme nous voulons (Bourdeau, 1884). »

Malgré la rhétorique de désuétude dont certains chargent la machine à vapeur à la fin du XIX^e siècle, les caractéristiques de la houille devenue prépondérante dans le système énergétique industriel constituent ainsi les critères de qualité d'une source d'énergie. Ces avantages reconnus sont ceux de contenir de l'énergie sous forme de stock (et donc, d'être transportable et utilisable à n'importe-quel moment) et de posséder une forte densité énergétique. Convertie dans la machine à a vapeur, la houille délivre une puissance importante et régulière. Avec la mise en équivalence généralisée de toutes les formes d'énergie issue de la thermodynamique, ces critères deviennent un facteur de comparaison des sources d'énergie et des convertisseurs énergétiques au profit du charbon et de la machine à vapeur. La grandeur la plus usitée pour décrire la performance des convertisseurs énergétiques devient en effet la puissance, qui valorise la régularité et l'intensité de la force délivrée par le convertisseur et est adaptée pour une source d'énergie de stock comme le charbon,

Or, sans transformations intermédiaires, les forces naturelles contraignent à une utilisation intermittente, locale, de puissance limitée, et bornent la production au flux que les machines peuvent capturer instantanément. La mesure de la puissance instantanée dévalorise une force irrégulière comme celle du vent [8], et la prépondérance croissante de la mesure de cette grandeur pour évaluer la performance d'un convertisseur est un facteur de dépréciation des moteurs à régime variable.

La hiérarchisation des couples source d'énergie/convertisseur se perçoit dans certains récits de l'histoire de l'humanité qui racontent la conquête progressive de l'homme sur les forces de la nature grâce à la science et à la technique, dont l'utilisation des énergies fossiles seraient le stade le plus avancé. Siemens écrit ainsi que

> « Ce n'est pas au développement plus grand de sa force physique que l'homme doit sa supériorité sur le reste de la création et le pouvoir qu'il exerce

8. On peut par exemple constater que, dans les années 1880, les caractéristiques techniques fournies par les constructeurs de moulins à vent et les revues qui en font la promotion, pour une vitesse de vent donnée, sont à la fois la puissance en chevaux, et le débit quotidien d'eau pompée en fonction de la hauteur de levage. La deuxième donnée est beaucoup plus adaptée à l'usage principal qui était fait de ces moulins, à savoir le pompage de l'eau pour l'irrigation et les usages domestiques.

> sur tous les êtres animés et inanimés [...] c'est l'intelligence qui le met à même de faire servir à ses desseins toutes les forces de la nature. L'homme primitif exerce déjà sa supériorité intellectuelle lorsqu'à l'aide d'un arc ou d'une flèche, il sait atteindre sa proie, lorsqu'il utilise l'animal qui traîne sa charrue [...]. Plus tard, il utilise aussi les forces inanimées de la nature. Le courant des rivières devient la force motrice qui fait tourner ses moulins. Le souffle du vent conduit ses bateaux, et suivant pas-à-pas tous les progrès de la civilisation, nous en arrivons à une époque où l'homme, utilisant la force de la vapeur, traverse les continents et les mers, plus rapide que le cerf dans sa course ou que l'aigle dans son vol. Aussi n'est-il pas téméraire d'affirmer que c'est dans la faculté de subordonner à sa volonté toutes les forces de la nature que l'homme puise son véritable pouvoir, et l'on peut ajouter que la civilisation croît en raison directe de cette domination. » (Siemens, 1881, p. 307).

Pour Siemens, c'est ainsi que « l'utilisation des forces naturelles a été remplacée par l'utilisation des forces artificielles »(Siemens, 1881, p. 310).

Bourdeau hiérarchise explicitement les périodes de l'humanité en fonction des sources d'énergie utilisées : « Il convient de distinguer quatre sortes de forces motrices dont la mise en oeuvre caractérise des phases de progrès :

1. Les forces humaines, seules disponibles durant l'état de nature et l'état sauvage ;
2. Les forces animales, soumises et disciplinées pendant la phase pastorale ;
3. Les moteurs naturels, c'est-à-dire les cours d'eau et les vent ;
4. Enfin les moteurs artificiels, représentés par les explosifs et la vapeur, d'acquisition plus récente. » (Bourdeau, 1884, p. 8)

Pour Bourdeau, l'infériorité des forces naturelles, qu'il appelle aussi « forces brutes de la nature », par rapport aux forces artificielles, proviendrait du fait qu'elles ne sont pas un produit maîtrisé de la technique moderne, contrairement à la vapeur produite par le charbon.

Par l'association effectuée, avec un certain mépris pour les populations qui les utilisent encore largement, entre moulins à eau, à vent, à marées et période « pré-industrielle », ces usages classiques se voient ainsi couplés à l'idée d'archaïsme. Pour Siemens, le régime de l'énergie solaire, source de la plupart des forces naturelles, « pourrait bien satisfaire un nègre d'Afrique ou un cultivateur de l'Europe méridionale qui ne vit que des produits de son champ, mais il paraîtrait tout-à-fait insuffisant à une assemblée » comme celle qui se trouve en face de lui (Siemens, 1881, p. 308-310). En revanche, les forces naturelles sont également des sources d'énergie d'avenir parce qu'elles n'ont pas encore été « domptées » par la science moderne : une exploitation industrielle comparable à celle du charbon par

la machine à vapeur suppose la mise au point de nouveaux procédés. Ceux-ci pourraient même rendre le charbon et la machine à vapeur obsolètes : aussi, pour Siemens,

> « il ne faut pourtant pas craindre que l'utilisation des forces naturelles nous ramène au temps où le moulin à vent et la roue hydraulique primitive servaient de force motrice à des ateliers peu nombreux. Nous saurons alors accumuler, transporter, et surtout utiliser ces forces d'une manière proportionnée à l'accroissement de nos besoins, et qui peut dire si nos descendants de la troisième ou de la quatrième génération ne regarderont pas notre emploi exclusif de la houille avec les mêmes sentiments que nous inspire la vue des outils de pierre et de bronze de nos ancêtres ? » (Siemens, 1881, p. 310)

Le Bon, plus affirmatif, « espère bien qu'avant vingt ans, le dernier exemplaire de ce grossier appareil aura été rejoindre dans les musées la hache de pierre de nos primitifs aïeux », et aura laissé place à de nouveaux procédés d'utilisation des forces naturelles (Le Bon, 1881a, p. 470) .

La hiérarchisation des couples machines/énergie issue de la comparaison avec la machine à vapeur amène en retour une hiérarchisation interne aux forces naturelles. Les sources d'énergie par leur nature les plus facilement exploitables par un convertisseur comparable à la machine à vapeur sont ainsi valorisés. Le chapitre 2 qui suit traite des différents convertisseurs promus par les acteurs étudiés.

## 1.5 Synthèse Chapitre 1

Sur la période (1880-1918), l'imaginaire de la machine à vapeur dicte les critères de modernité d'un couple machine/énergie. Alors que la houille noire est devenue le symbole de la puissance industrielle, la houille blanche accède à cette modernité par le transport électrique, et est valorisée pour son caractère national et illimité. Leur affectant les mêmes avantages qu'à la houille blanche, certains auteurs visent les autres forces naturelles pour de nouvelles formes d'utilisation. Selon une vision de l'histoire de l'humanité conforme à celle de l'anthropologie évolutionniste de la fin du XIX$^{e}$ siècle (Bernardini, 1997), ils hiérarchisent les couples source d'énergie/convertisseur selon un dualisme archaïsme/modernité.

C'est pourquoi, certains auteurs proposent des les régulariser, de les stocker, de les transporter de leur source à leurs lieux d'utilisation, pour les utiliser de façon « moderne », c'est-à-dire à l'image du charbon dans la machine à vapeur, « ce magnifique agent de la civilisation et de l'industrie modernes » (D'Arsonval, 1881b, p. 550). Les deux premières

questions permettent de résoudre le problème de l'intermittence, les deux derniers celui de la contrainte d'une utilisation locale. C'est ce dont il est question dans le prochain chapitre.

# Chapitre 2

# Les convertisseurs : plusieurs chemins pour la modernité

Ce chapitre étudie les types de convertisseurs présentés comme nouveaux ou encore « modernes », par les auteurs de publications scientifiques et techniques. Les « moteurs naturels » dont l'utilisation en Europe s'est répandue lors des siècles précédents grâce aux moulins à eau, à vent et, en moindre mesure, à marées, se voient, à la fin du XIX$^{e}$ siècle, associées à un usage du passé, archaïque. Selon certains auteurs, de nouveaux convertisseurs pourraient cependant permettre une utilisation moderne des forces naturelles. Ils sont en cela motivés par de multiples propositions et réalisations étrangères, relatées dans les revues scientifiques et techniques. Ils préconisent plusieurs moyens de conversion : transport électrique par câble, pompage et accumulation de l'eau, emmagasinement et transport dans des accumulateurs électriques, compression de gaz, qui permettent de stocker et/ou transporter et/ou régulariser l'énergie. Ils répondent ainsi à l'idéal de la modernité hérité du XIX$^{e}$ siècle, dont les « deux manifestations principales » sont « maîtriser le temps et maîtriser l'espace » (Charle, 2012, p. 359). Parmi ces convertisseurs, des moulins à vent récemment importés d'Amérique, ainsi que de multiples modèles proposés par des constructeurs et inventeurs, sont également valorisés comme novateurs, et diffusés dans les campagnes françaises, ce qui relativise à la fois l'archaïsme dont ces convertisseurs auraient été taxés, et d'autre part leur inéluctable abandon à la fin du XIX$^{e}$ siècle.

Dans un premier temps, les moyens de stockage, de régulation et de transport les plus fréquemment envisagés seront présentés. Il sera mis en évidence que l'électricité a été un stimulant de l'activité inventive mais qu'elle partage l'imaginaire technicien avec d'autres vecteurs et, en premier lieu, l'air comprimé. Il sera ensuite montré qu'une partie importante d'articles traitent de projets étrangers érigés en exemple à suivre pour l'avenir de la France. Enfin, le cas des nouveaux modèles de moulins à vent inspirés des machines américaines sera exposé. Des éléments globaux sur la diffusion de ces machines dans les

campagnes françaises seront exposés, à partir de statistiques agricoles et de quelques documents trouvés aux archives nationales [1]

## 2.1 Les forces artificielles comme idéal de modernité

### « Mettre les forces naturelles en bouteille » : stocker, régulariser, transporter

En 1881, Le Bon affirme, citant le physicien anglais William Thomson, que « convertir la force en une forme capable d'être conservée et mise en réserve, l'entasser dans un magasin, de façon à s'en servir au moment voulu est un des problèmes les plus intéressants et les plus importants » – il permettrait notamment de parer à l'épuisement des mines de houille (Le Bon, 1881b, p. 269). Dès 1865, Simonin propose de même, comme solution à la disparition du charbon, ce « soleil en cave », la recherche scientifique de moyens de « condenser l'immense chaleur perdue du soleil, en un mot à mettre le soleil en bouteilles » (Simonin, 1865, p. 271) [2]. Le concours lancé par le Comité des arts mécaniques de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale (SEIN) en 1880 témoigne de l'intérêt du milieu de l'industrie pour le transport et le stockage des forces naturelles. En 1880, la SEIN propose ainsi un prix de trois mille francs pour la mise au point de procédés qui pourraient transformer une chute d'eau, et, plus largement, les « forces mécaniques naturelles que leur position actuelle ne permet pas d'utiliser immédiatement », en « effets physiques, qui l'emmagasineraient, pour ainsi dire, et permettraient de la transporter là où on pourrait le mieux l'utiliser » (Société d'encouragement pour l'industrie nationale, 1892) [3].

Au début des années 1880, certaines techniques sont opérationnelles et effectivement employées pour appliquer ces trois fonctions à l'exploitation de la houille blanche. Des moyens existent en effet pour la régulariser, la stocker et la distribuer, permettant d'obtenir de grandes puissances avec une seule installation. L'accumulation hydraulique est employée depuis plusieurs siècles dans les moulins à eau pour créer des chutes et régulariser le débit [4], mais à la fin du siècle, de plus en plus de « grands barrages » [5] sont construits sur

1. Cette diffusion mériterait une étude détaillée à partir d'archives locales : municipales et départementales.

2. Comme l'a relevé Jarrige, (2010), Simonin proposait de « mettre le soleil en bouteille » pour faire du soleil le « combustible de l'avenir ».

3. Le prix fut accordé en 1892 à un industriel de l'Isère qui mit en place une installation hydroélectrique d'une puissance installée de deux 200 ch, transportant l'électricité sur une longueur de 5 km.

4. Sur les rivières et cours d'eau, des écluses ou barrages remplissaient cette fonction : ils combinaient l'alimentation des moulins à eau à d'autres finalités (navigation, irrigation, alimentation en eau...). Ce type d'installations s'est multiplié à partir des années 1850 (Bordes, 2010, p. 71-76).

5. Les « grands barrages » sont, selon une convention établie dans les années 1930, les barrages de

les rivières ou au niveau des lacs de montagne (Bordes, 2010, p. 71-76 ;Morsel, 1991b, p. 595). Ceux-ci permettent de davantage régulariser les débits, voire de stocker l'énergie, mais aussi d'appliquer cette régulation à des débits plus importants. Ils répondent donc tout-à-fait à la logique d'une concentration et d'une régulation de la puissance - et sont le facteur d'augmentation de la puissance unitaire moyenne des installations hydrauliques françaises au début du XX$^{e}$ siècle. Au début des années 1880, la houille blanche est aussi la seule force naturelle à avoir connu une application de délocalisation de l'énergie, avec l'air comprimé, et ce avant que l'électricité ne le permette.

La pratique de l'accumulation hydraulique et sa transformation dans des convertisseurs adaptés rend donc possible l'utilisation de grandes puissances hydrauliques régularisées, et cette caractéristique de l'énergie hydraulique, la facilité à l'accumuler, a été un facteur de la démarcation de la houille blanche par rapport aux autres forces naturelles, ainsi que de son rapprochement de la houille noire. La section 3.2 développera le cas de l'énergie des marées, source d'énergie hydraulique qui fut l'objet d'une importante activité inventive dans ce sens. La comparaison entre houille noire et houille blanche que dresse l'économiste Charles Gide en 1901 illustre ainsi le parallèle qui a pu être fait entre houille noire et houille blanche :

> « de même que la mine de houille noire est une sorte de grand accumulateur de forces, de la lumière et de la chaleur du soleil des âges très lointains qui a fait pousser les forêts paléontologiques et que nous revivifions aujourd'hui en faisant brûler sous nos chaudières, de même le glacier est aussi un accumulateur de la chaleur du soleil contemporain qui a pompé l'eau des océans pour l'emmagasiner au sommet des montagnes dans ces grands châteaux d'eau suspendus sur nos têtes. »

En somme, la houille noire et la houille blanche sont deux formes d'énergie solaire concentrée et stockée. La houille blanche est en outre délocalisable grâce à l'électricité, et accède de ce fait à la modernité. Comme l'affirme Gide en 1900, « de même que pour utiliser la houille noire, il a fallu au préalable inventer la machine à vapeur, de même, pour utiliser la houille blanche, il a fallu attendre l'invention de la dynamo. »(Gide, 1902).

Cette comparaison entre la houille noire et la houille blanche est transposée à l'ensemble des forces naturelles, et les auteurs identifiés hiérarchisent les forces naturelles entre elles en fonction de la capacité des convertisseurs existants à effectuer une opération de régularisation, de stockage et de transport des forces naturelles. C'est pourquoi l'énergie des marées, du vent et des vagues ont été particulièrement visées par l'activité inventive pendant la période (1880-1918) (cf Tables 1.1 et 1.2). En effet, les deux premières

plus de 15 m de haut (Bordes, 2010, p.71).

ont déjà été exploitées par le passé *via* des convertisseurs similaires aux convertisseurs hydrauliques, et de nombreux inventeurs espèrent moderniser ces convertisseurs comme les roues hydrauliques ont été modernisées, par les turbines puis par l'électricité. De plus, les vagues et les marées sont des sources d'énergie hydraulique comme les chutes d'eau, et elles sont rapidement assimilées à la houille blanche pour cette raison. Le vent est, au contraire, souvent qualifié de « capricieux », car très irrégulier, imprévisible et difficile à capturer selon des techniques connues.

À la fin du XIX[e] siècle, les moulins à vent et à marées, qui utilisent deux autres forces naturelles, sont toujours utilisés localement, et ne connaissent que certains moyens de régulation ; ils délivrent des puissances d'une dizaine de chevaux au maximum, et en général de quelques chevaux[6]. La Table 2.1 résume les convertisseurs utilisés pour l'exploitation des forces naturelles au début des années 1880 et l'existence ou non de moyens de régulation, de stockage et de transport.

TABLE 2.1 – Convertisseurs de forces naturelles existant au début des années 1880 et moyens de régulation, stockage, transport

| Source | Convertisseur existant | Régulation | Stockage | Transport |
|---|---|---|---|---|
| Chutes et cours d'eau | Roues, turbines | Oui : grands et petits barrages | Oui : Idem + Air comprimé | Oui : Air comprimé |
| Marées | Roues | Oui : petits barrages | Oui : petits barrages | Non |
| Vent | Moulins à vent | Oui : réglage surface voilure | Oui : réservoirs d'eau (petit volume) | Non |
| Chaleur solaire | -[8] | - | - | - |
| Gradients de température | - | - | - | - |
| Chaleur terrestre | - | - | - | - |
| Elec. atmosphérique | - | - | - | - |

Dans les moulins à vent, des moyens automatiques de régulation par ouverture et fermeture de la surface exposée au vent et par orientation des pales existent mais ils ne permettent qu'une régulation relative de l'énergie qui est elle-même très intermittente : la

6. Dans les statistiques décennale du ministère de l'Agriculture de 1892, la puissance moyenne des moulins à vent utilisés était d'environ 3 chevaux (MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, 1897, p. 256).

8. Des prototypes de moteurs solaire à concentration ont été construits : Mouchot et Pifre (voir paragraphe 3.4).

vitesse du vent est variable et la puissance l'est d'autant plus puisqu'elle est proportionnelle au cube de cette vitesse. L'accumulation hydraulique, qui est une forme de stockage, existe également puisque, comme il le sera développé dans le paragraphe 2.3, les éoliennes de pompage sont de plus en plus utilisées pour élever de l'eau dans des réservoirs en hauteur à des fins d'alimentation humaine et animale et/ou d'irrigation dans les campagnes françaises dans les années 1880. Il s'agit cependant là d'un usage très précis de la force motrice, et pour de petites puissances. Le fonctionnement des moulins à marées est quant à lui basé sur le principe de l'accumulation : une retenue permet de maintenir l'eau montée pendant le flux et de la libérer progressivement au niveau d'une roue lors du reflux. Mais ces installations ne délivrent pas pour autant un débit régulier et il n'y a pas eu de moulins de puissances comparables à celles des grandes installations hydrauliques de montagnes et de rivières.

## Le transport électrique, stimulant de l'activité inventive

Le transport à distance par câbles électriques, avec les expériences prometteuses de Deprez, a stimulé l'activité inventive concernant l'utilisation des forces naturelles, grâce à la possibilité de délocaliser l'utilisation de l'énergie par rapport à sa source. Dans un article sur l'exposition internationale d'électricité, le célèbre vulgarisateur Louis Figuier dit ainsi que « cette curieuse application de l'électricité a [...] produit la plus vive impression sur l'esprit des savants, des ingénieurs et des amateurs de sciences, qui y ont vu, à tort ou à raison, toute une révolution industrielle, en ce sens que des forces naturelles aujourd'hui perdues pourraient être utilisées à une distance plus ou moins grande (Figuier, 1882, p. 459-460). »

Le recours à l'électricité est particulièrement préconisé dans les années 1880. Parlant des différents types de moteurs imaginés pour utiliser la force des marées et des vagues, G. Pelissier affirme en 1892, dans *Lumière électrique* qu'« il est curieux de constater le brusque accroissement qu'a pris la valeur de ces appareils, aux yeux des inventeurs, à l'apparition des procédés électriques de transport de la force à distance » : le nombre de moteurs « proposés en 1882, juste après l'exposition d'électricité, en 1881, et au moment où les théories de M Marcel Deprez soulevaient un enthousiasme à peu près général, était double de celui des années précédentes ; en 1889, lors de l'Exposition universelle, la proportion était encore plus considérable » (Pelissier, 1892b, p. 19). Le nombre d'articles sur les forces naturelles dans *La Nature* est particulièrement élevé en 1883 (voir Figure 1.1), et dans cinq de ces sept articles, il est question de transformation de la force en électricité. Entre 1880 et 1882, huit articles sur onze suggèrent la conversion électrique.

Les promesses puis la réussite de la production hydroélectrique sont allées dans le sens

de ces espoirs : si l'on était capable de transformer la houille blanche et la houille verte en électricité, pourquoi pas les autres forces naturelles ? En 1907, de Graffigny, rappelant le caractère localisé de l'utilisation classique des « puissances naturelles » (eau et vent), affirme qu'« il a fallu que l'électricité prit un développement suffisant pour donner le moyen de tourner la difficulté » et considère que toutes les forces naturelles pourraient à l'avenir être utilisées de cette façon (De Graffigny, 1907, p. 96-97). Le développement des premières stations centrales électriques thermiques commence ainsi dans les années 1880, et hydroélectriques dans les années 1890, gérées par de multiples entreprises concessionnaires, avec autant de caractéristiques techniques. Avec la construction du système électrique, certains auteurs ne considèrent plus l'électricité comme une solution, parmi d'autres, pour l'exploitation des forces naturelles, mais les forces naturelles comme un moyen de produire l'électricité que l'industrie exploite de plus en plus. Paul Razous dit ainsi en 1908 que « dans un nombre plus en plus grand d'opérations industrielles, les quantités d'électricité mises en jeu sont considérables ; comme la question du prix de revient est prépondérante, les ingénieurs et les savants cherchent à produire l'énergie électrique par l'emploi de diverses forces naturelles » (Razous, 1908, p. 195) ; (Razous, 1910).

Cependant, le nombre de propositions françaises pour l'exploitation des forces naturelles baisse à partir des années 1890 (cf 2.2), ainsi que, parmi elles, la proportion de convertisseurs électriques. Plusieurs raisons peuvent l'expliquer : d'abord, l'effet de nouveauté qui s'estompe avec la multiplication des réseaux électriques. De plus, à partir des années 1890, l'utilisation du courant alternatif tend à supplanter celui du courant continu, car il résout le problème des pertes en ligne et permet donc d'allonger les réseaux. Il empêche cependant la régularisation de la force, puisqu'il n'est pas possible d'utiliser des accumulateurs avec ce type de courant (Caron, 1991, p. 397-398). L'exploitation électrique l'énergie de chutes d'eau puissantes et régularisées en amont par des retenues d'eau et son transport à grande distance sont ainsi réussis, mais on ne trouve pas de tels exemples pour les marées, le vent, le soleil, les vagues ou les gradients de température. Enfin, les plusieurs tentatives effectuées à l'international pour transformer la force du vent en électricité autour des années 1890 se sont soldées par des échecs (cf 3.1).

Le transport électrique n'est pas la seule solution envisagée pour asservir les forces naturelles. En effet, d'une part, d'autres moyens opérationnels de régulation, de stockage et de transport de l'énergie sont imaginés pour leur utilisation : air comprimé, mais aussi eau sous pression. En outre, comme toutes ces forces naturelles n'ont pas la même nature (mécanique, calorifique, électrique), les procédés imaginés pour les transformer, et éventuellement les stocker et les transporter n'ont pas connu la même fréquence en fonction du type de source d'énergie. Les Tables 2.2 et 2.3 montrent les modes de conversion décrits dans *La Nature* et *Le génie civil* en fonction des sources d'énergie.

10. Gradients naturels de température (Différences de température : DDT)/

TABLE 2.2 – Mode de conversion envisagé pour chaque force naturelle dans *Le génie civil* (1880-1914)

| Type source | Source | Élévation de l'eau | Autre utilisation directe | Électricité | Air comprimé | Eau sous pression | Nb total articles |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mécanique | Vent | 65% | 0% | 40% | 0% | 0% | 3 |
| | Marées | 0% | 57% | 57% | 14% | 14% | 20 |
| | Vagues | 50% | 0% | 0% | 50% | 0% | 7 |
| Thermique | Soleil | 33% | 67% | 0% | 0% | 0% | 2 |
| | DDT [10] | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% | 1 |
| | Chal. int. | 0% | 0% | 100% | 0% | 0% | 1 |

TABLE 2.3 – Mode de conversion envisagé pour chaque force naturelle dans *La Nature* (1880-1914)

| Type source | Source | Élévation de l'eau | Autre utilisation directe | Électricité | Air comprimé | Eau sous pression | Nb total articles |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Mécanique | Vent | 46% | 19% | 42% | 4% | 0% | 12 |
| | Marées | 0% | 20% | 60% | 30% | 0% | 10 |
| | Vagues | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% | 1 |
| Thermique | Soleil | 53% | 36% | 6% | 0% | 0% | 1 |
| | Chal. int. | 0% | 33% | 100% | 0% | 0% | 3 |

On voit que pour les deux revues, l'électricité concerne majoritairement l'exploitation du vent et des marées, c'est-à-dire les forces naturelles au sens restreint, qui se présentent, comme la houille blanche et la houille verte, sous une forme mécanique. D'autres moyens ont été fréquemment envisagés : pour le vent, et, majoritairement, pour les vagues, les gradients de température et le soleil, l'élévation de l'eau ; pour les marées et le vent, l'utilisation directe sous forme de force motrice ; enfin, pour le vent et les marées, la production d'air comprimé , et pour les marées, l'utilisation d'eau sous pression. Toutes ces transformations donnent la possibilité de réguler le flux d'énergie incident, et certaines d'entre elles permettent même de stocker l'énergie et de la distribuer à distance.

## Stockage et transport : accumulateurs pneumatiques, électriques

En 1901, on peut lire dans le *Génie civil*, à propos du moteur solaire de Shuman, un entrepreneur américain, en Égypte, que

> « [l'énergie solaire] est d'une grande irrégularité et elle ne pourra être exploitée que le jour où on aura découvert un accumulateur économique, susceptible d'emmagasiner cette énergie pour la restituer dans les périodes où la chaleur fait défaut. La solution du problème est donc liée aussi intimement à la découverte de cet accumulateur d'énergie qu'à celle du moteur solaire proprement dit. » (Le Génie civil, 1901-09-07)

Plusieurs possibilités sont imaginées pour le stockage des forces naturelles, grâce à des accumulateurs existant utilisés comme convertisseurs pour d'autres usages. En 1880, Hospitalier compare les différents types d'accumulateurs remplissant la fonction de régularisation et/ou de stockage, envisageables pour exploiter les chutes et cours d'eau, les marées et le vent : mécanique (ressorts [11] et poids), hydrauliques (eau sous pression), pneumatiques (air comprimé) et électriques (accumulateur Planté) (Hospitalier, 1880c). Ces accumulateurs permettent une utilisation locale d'énergie ainsi concentrée et stockée. Hospitalier propose en outre deux manières de transporter l'énergie stockée dans les réservoirs de forces : le transport direct des réservoirs du lieu de conditionnement au lieu de consommation ; se pose alors le problème du poids de ces accumulateurs qui nécessitent un surplus d'énergie pour leur transport. Ou le transport via des réseaux de distribution reliant physiquement ces deux lieux – tuyaux pour l'air comprimé, câbles électriques pour l'électricité – est alors invoqué l'inconvénient des pertes en ligne.

L'accumulation hydraulique existe déjà avec les barrages hydrauliques, mais aussi avec moulins à vent qui pompent l'eau dans des réservoirs en hauteur (cf 2.3). Certains auteurs mentionnent l'idée d'utiliser la force motrice de l'eau ainsi emmagasinée mais cette solution restée, à ma connaissance, théorique (G Geutch, 1904, p. 627). Pour ce type d'accumulateur, il n'est évidemment pas question de transporter le réservoir de force.

Les accumulateurs électriques ou « piles secondaires » sont apparus dans les années 1860 à partir des travaux de Gaston Planté. Ils stockent l'énergie sous forme chimique pour la restituer sous forme électrique (Moïse et Daumas, 1978, p. 316-318). Ils permettent ainsi, selon Hospitalier, de « mettre l'électricité en bouteille », pour la « dépenser ensuite d'une façon proportionnée aux besoins jusqu'à complet épuisement du récipient qui la contient » (Hospitalier, 1880a, p. 305). Quant à l'air comprimé, il est utilisé, après avoir été stocké dans des réservoirs, pour actionner des moteurs de locomotives.

L'idée de distribuer les réservoirs de force reprend l'image du transport du combustible de la mine à la machine à vapeur, mais semble n'avoir connu aucune application pratique

11. Certains inventeurs auraient ainsi imaginé « faire marcher un tramway à l'aide de ressorts qu'on remonterait à chaque bout de la ligne par une petite machine à gaz ou à vapeur pendant les temps d'arrêt » ! L'auteur souligne que ce type d'accumulateur mécanique est utilisable pour de petites puissances (montres, tournebroches) mais que pour des quantités d'énergie stockée supérieures à 30 kilogrammètres (294 J) son poids et son prix empêcherait son utilisation.

ni expérimentation, que ce soit avec les accumulateurs électriques ou les réservoirs d'air comprimé . Cette image est concurrencée par le modèle des réseaux de distribution reliant physiquement une production centrale au lieu d'utilisation, sur le modèle des réseaux de distribution de gaz comprimé dans les mines et de gaz dans les villes qui ont, selon Benoît, balisé le chemin aux premiers réseaux de distribution de l'électricité (Benoît, 1991a, p. 182-183). En tout cas, Hospitalier, et d'autres auteurs, ont imaginé le transport des réservoirs de force avec autant de sérieux que les réseaux de distribution par tuyaux et câbles.

Dès 1839, l'ingénieur Antoine Andraud entrevoyait la production d'air comprimé sous haute pression et faible volume « au moyen d'appareils de compression mus par des forces naturelles réputées gratuites du vent et surtout de l'eau ». Il imagine des clients venant chacun quotidiennement « avec son vase vide, puiser de la force, moyennement une faible rétribution, comme nous voyons dans Paris les porteurs d'eau emplir leurs fontaines publiques ». La force créée « gratuitement » et « sans fumée qui offusque et salit » est susceptible d'applications universelles (usines, navigation, locomotion, agriculture et « autres grandes industries inconnues auxquelles ce moteur donnera naissance ») (Andraud, 1839, p. 6). En 1869, Ferdinand Tommasi conçoit un usage similaire des marées sur les côtes, où de l'air pourrait être comprimé, distribué aux industriels par des tuyaux, « à peu près comme pour le gaz », et stocké dans des cloches de réserve en cas de besoin d'une force constante (Tommasi, 1869).

En 1880, selon Hospitalier, ce sont les accumulateurs électriques qui ont le plus d'avenir pour le stockage des forces naturelles et sa propre invention, un « conjoncteur disjoncteur automatique », permet justement d'empêcher leur déchargement dans les moteurs lorsque ceux-ci ne tournent plus assez rapidement. Il considère que la capacité de ces accumulateurs est vouée à être augmentée, leur poids diminué, et leur usage ainsi démultiplié. Le poids et le volume de ces accumulateurs, constitués d'une solution d'acide sulfurique et d'électrodes de plomb dont la surface détermine la capacité de stockage, est effectivement un inconvénient de ces appareils (Hospitalier, 1880a, p. 305).

Lorsque Charles de Goyon, duc de Feltre et ancien député des Côtes du Nord, décide en 1886 de financer la construction d'un moulin électrique au cap de la Hève, c'est cet inconvénient qui lui fait modifier son projet initial. Il souhaite effectivement vendre la force emmagasinée dans des accumulateurs électriques en louant ces derniers, que des agriculteurs et « petits propriétaires » seraient venus chercher pleins, et auraient « transporté[s] dans leurs exploitations, dans la proportion nécessaire à leurs besoins » de lumière et de force motrice, les « rapportant vides, après un certain laps de temps » (De l'Angle Beaumanoir, 1889, p. 455). À cause du poids mais aussi de la fragilité de ces réservoirs de force, le duc de Feltre choisit plutôt d'utiliser sur place l'électricité chargée pour l'éclai-

rage du phare de la Hève. Cet usage des accumulateurs électrique se répand en effet à la même période, alors que de nombreuses installations d'éclairage électrique individuelles françaises (habitations, lieux publics, magasins, usines) s'équipent au cours des années 1880-90, des piles associés à des dynamos chargeant la journée des accumulateurs, déchargés dans des lampes le soir (Caron, 1991, p. 395). On peut noter que cette installation est alors comparée par Léon Vigreux, professeur à l'École centrale des Arts et manufactures et protagoniste du projet, à l'usage répandu du stockage de l'eau dans les réservoirs en hauteur : « comme la vitesse de rotation et la puissance du moulin varient avec la vitesse du vent, la machine élévatoire qu'il actionne élève l'eau à une hauteur constante, mais elle en élève un volume variant avec la puissance du moulin » ; de même, la dynamo fournit « un courant dont la différence de potentiel, mesurée aux bornes, est constante, mais dont l'intensité varie avec la vitesse des machines »(Vigreux, 1887) .

En réaction à l'article de Siemens sur le transport des forces naturelles par l'électricité (Siemens, 1881), Le Bon énonce en 1881 une proposition comparable à celle d'Andraud pour « emmagasiner sans dépense dans un récipient aussi facilement transportable qu'un tonneau de vin, une somme très grande de force motrice empruntée aux forces naturelles » (Le Bon, 1881b, p. 269). Plutôt que de transporter l'énergie sous forme électrique grâce à des câbles comme le suggère Siemens, solution qu'il juge coûteuse et encore peu pratique, à cause du poids des accumulateurs électriques (selon lui au moins 75 fois moins dense énergétiquement que la houille) et du mauvais rendement des dynamos, il propose de « comprimer de l'air dans des réservoirs portatifs », qui est une solution déjà éprouvée et exploitée dans certaines locomotives. Il imagine ainsi « sur les montagnes, les fleuves, les rives de l'océan, des milliers de mécanismes fonctionnant comme le moulin à vent de nos pères, sans qu'on eût à s'occuper d'eux et travaillant à comprimer de l'air dans des réservoirs qu'on expédierait ensuite de tous côtés, comme une marchandise quelconque. » Cet article donne suite, au travers de quatre autres articles, à un échange entre Le Bon et d'Arsonval, qui se disputent sur le meilleur moyen d'exploiter les forces naturelles.

D'Arsonval, médecin, préparateur au Collège de France et chef de file de l'électrophysiologie française (C. Blondel, 2010), est fortement impliqué dans le développement des applications de l'électricité à la fin du XIX$^{e}$ siècle [12]. Pour lui, c'est évidemment « cette bonne et merveilleuse fée », l'électricité, et son transport à distance par des câbles conducteurs, qui seule permettra d'exploiter les forces naturelles et d'avoir à « disposition force, chaleur, lumière, et cela sans charbon, sans combustion, sans fumée, et même, sans matière grossière qui tombe sous le sens ». Cet échange avec Le Bon est pour lui l'occasion de vanter les avantages de ce vecteur énergétique et de démontrer théoriquement la fai-

12. Lui-même inventeur de plusieurs appareils, dont un accumulateur électrique (Hospitalier, 1880a), il est également le fondateur de la revue *La lumière électrique*, organisateur d'une section d'électricité médicale à l'Exposition de 1881, membre fondateur de la Société internationale des électriciens (Cardot, 1991a, p. 29 ; 48).

sabilité immédiate du transport à distance par câbles conducteurs, notamment à partir des travaux théoriques et expérimentaux de Deprez. Le seul argument qu'il oppose à la solution de l'air comprimé dans des réservoirs, c'est la supériorité du gaz de houille pour les mêmes usages. En réponse à cet article, Le Bon, au lieu de défendre à nouveau le stockage de l'air comprimé dans des récipients transportables, considère en fait cette solution coûteuse à cause du poids des réservoirs d'air comprimé. Il préfère finalement la solution d'une production centrale d'air comprimé à partir des forces naturelles et sa distribution par des tubes de grand diamètre (pour réduire les pertes de charge) sur des centaines de kilomètres, par extrapolation des techniques déjà existantes dans les mines avec des tubes de 30 cm de diamètre et 10 km de long. Pour lui, cette solution est préférable à celle que préconise d'Arsonval, tout simplement parce qu'elle est « applicable immédiatement, alors que la seconde ne l'est pas », mais ce seraient là « deux méthodes qui ne s'excluent pas et qui se partageront peut-être l'avenir » (Le Bon, 1881a, p. 472). D'Arsonval tourne en dérision cette proposition, considérant que la réalisation de canalisations immenses sur de très longues distances coûterait extrêmement cher, qu'il y aurait des pertes importantes par fuite d'air comprimé, et surtout, que l'air comprimé ne répond pas aux multiples applications de l'électricité : force, chaleur, lumière, électrolyse, fusion des métaux... L'air comprimé ne permettrait que le transport de la force, et en cas de disparition de la houille, on pourrait certes profiter de « l'air pur venant de la Suisse, par exemple, tout imprégné de suaves parfums et n'ayant pas encore servi comme cet air affreux de Paris », mais on serait « trop bien ventilé » puisque « dans l'impossibilité de [se] chauffer ». Ce à quoi Le Bon rappelle qu'« avec une force quelconque rien n'est plus facile que d'obtenir les autres » et qu'il est aussi possible d'actionner une dynamo avec de l'air comprimé et d'obtenir ainsi tous les usages possibles de l'électricité. Il rappelle aussi que les pertes en ligne sont également problématiques dans le transport électrique par câbles conducteurs.

Cet échange et les différents articles cités plus haut montrent l'importance du problème du stockage et du transport pour moderniser les forces naturelles, avec le modèle de la houille, « soleil en cave », très ancré dans l'imaginaire des ingénieurs et techniciens. Il montre aussi que l'électricité telle qu'elle s'est ensuite développée, sous forme de réseaux de distribution filaire, n'est pas, dans les années 1880, le seul moyen pensé pour exploiter les forces naturelles de façon moderne. D'une part, le transport des accumulateurs électriques a également été proposé. D'autre part, l'air comprimé est un sérieux concurrent, et ce même pendant le développement des réseaux de distribution de l'électricité à la fin du XIX$^{e}$ siècle. En 1904, G Geutch, dans le *Bulletin de la SEIN*, effectue ainsi, d'après une source américaine, l'évaluation technico-économique d'une installation de production d'air comprimé par un moulin à vent de 1 cheval, et, avec le même moteur, d'une station de production d'électricité emmagasinée dans des accumulateurs. Les coûts seraient sensiblement les mêmes : la première coûterait 1800 dollars, la seconde 1715 dollars – l'auteur

ne conclut pas à la supériorité de l'une sur l'autre. Il faut aussi souligner qu'il n'imagine pas les mêmes usages pour les deux vecteurs énergétiques : pour le premier, il s'agirait de fournir de la force motrice aux industriels ; pour le second, d'alimenter des ampoules à incandescence pour l'éclairage (G Geutch, 1904) [13]

Il y a donc une multitude de propositions pour asservir les forces naturelles de manière à les rendre homogènes aux forces artificielles, ou, plus précisément, pour donner aux convertisseurs de forces naturelles les qualités du couple charbon/machine à vapeur. L'activité inventive française est plus importante au début des années 1880, après quoi les publications étudiées relatent essentiellement des projets menés dans d'autres pays industrialisés. Ceux-ci sont tout de même érigés en exemples à suivre pour l'avenir de la France.

## 2.2 L'étranger, un modèle à suivre

Dans *La Nature* et *Le Génie civil*, les occurrences relevées pour les années 1880 concernent majoritairement des travaux français. Il en va tout-à-fait autrement du reste de la période (Table 2.4).

Table 2.4 – Proportion d'articles et notes sur les travaux étrangers dans *La Nature* et *Le Génie civil* (1880-1918)

| | [1880-1890] | [1890-1918] |
|---|---|---|
| *Le Génie civil* | 20% | 79% |
| *La Nature* | 17% | 46% |

Ils reflètent un sentiment de dynamisme des travaux étrangers sur les forces naturelles, et par contraste d'une moindre importance des réalisations françaises à partir des années 1890. En 1908, Jules Séverin affirme ainsi, dans un ouvrage où il fait la promotion de l'utilisation de l'énergie des marées, qu' « il importe de ne pas nous laisser devancer par l'étranger, qui est déjà beaucoup plus développé que [la France] pour l'utilisation des forces naturelles » (Séverin, 1908, p. 710).

Ce sont, en particulier, les usages, études et projets étrangers sur l'énergie éolienne qui trouvent un écho dans les revues françaises, où les auteurs déplorent la désaffection de cette force naturelle. Six millions de moulins à vent sont en effet en usage aux États-Unis

13. Geutch imaginait une roue de 6 m de diamètre et d'une puissance de 1 cheval, et
— pour la solution à l'air comprimé : trois réservoirs en acier de 1,5 m de diamètre par 7,5 m de longueur, un compresseur d'air, un moteur à air comprimé, une pompe à eau et ses accessoires
— pour la solution à l'électricité : une dynamo, une batterie pour alimenter 16 lampes pendant 5 heures, 20 lampes, une pompe et ses accessoires.

à la fin du XIX^e siècle. À partir des années 1860, les migrations vers les vastes plaines semi-arides de l'Ouest encouragées par le gouvernement américain ont été rendues possibles par l'utilisation massive de moulins à vent qui pompaient l'eau souterraine. D'abord implantés le long des chemins de fer où ils alimentaient en eau les wagons à vapeur, ils ont permis l'irrigation et l'alimentation en eau domestique des nouvelles exploitations agricoles (HILLS, 1996, p. 22-26 ; RIGHTER, 1996, p. 236-237). Les historiens de l'énergie éolienne soulignent l'aspect crucial de ce moteur dans la conquête de l'Ouest américain. L'historien Walter Prescott Webb a ainsi affirmé en 1931 que les trois facteurs décisifs de cette conquête ont été le pistolet à six coups, le fil barbelé et le moulin à vent (HILLS, 1996, p. 22-26 ; RIGHTER, 1996, p. 236-237 ; ROGIER, 2002, p. 11). Les auteurs français des publications étudiées connaissent l'importance de ces machines Outre-Atlantique et en vantent les avantages. Comme Max de Nansouty, ingénieur des Arts et manufactures et membre du Comité de rédaction du *Génie civil*, ils regrettent qu'on se soit « peut-être un peu trop désintéressé » des moulins à vent en France (DE NANSOUTY, 1893, p. 133), et considèrent qu'« il est temps que l'Europe se mette à suivre ce que font, dans ce sens, les États-Unis » (R GENTILINI, 1890, p. 199).

La construction d'installations éoliennes pour la production d'électricité par Blyth, en Écosse, et Brush aux États-Unis (FORIS, 1891), puis par le professeur danois Poul La Cour sont aussi largement relayés (PELISSIER, 1892a ; G, 1893). De même, les études théoriques et pratiques des Américains Alfred R Wolff [14] et Edward-Charles Murphy [15] pour évaluer et améliorer le rendement de différents modèles de moulins à vent, de La Cour, pour la production d'électricité éolienne, sont régulièrement cités et ce jusqu'au milieu du XX^e siècle (MOLLIN, 1908). On trouve également mention des événements comme les concours de construction de moulins à vent organisés en Hollande en 1894 par l'Association néerlandaise pour les progres de l'industrie, et en Angleterre en 1903 par la Société royale d'Angleterre (SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE, 1903a), ou encore l'Exposition internationale de 1893 à Chicago où de nombreux modèles de moteurs éoliens sont exposés [16], comme le montre l'illustration 2.1, issue du *Génie civil* (DE NANSOUTY, 1893).

Plusieurs projets américains visant à exploiter les marées, et surtout l'énergie solaire trouvent un écho dans la presse française, et celui de l'ingénieur Shuman, créateur de la Sun Power Company, a été le plus suivi. Il aboutit en 1913 à une installation développant cinquante chevaux grâce à l'énergie solaire en Égypte pour l'irrigation [17]. En ce qui

14. L'ouvrage de cet auteur est régulièrement cité : *The windmill as a prime mover*, New York, 1885. Par exemple : R GENTILINI, (1890) ; PELISSIER, (1892b) ; G. RICHARD, (1894)

15. SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE, 1903b ; RATEAU, 1898 ; G. RICHARD, 1894

16. (DE NANSOUTY, 1893) ; (G. RICHARD, 1894) ; (RAMAKERS, 1905)

17. GRADENWITZ, 1908 ; SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE, 1892 ; LA NATURE, 1912 ; LA NATURE, 1913 ; LE GÉNIE CIVIL, 1914.

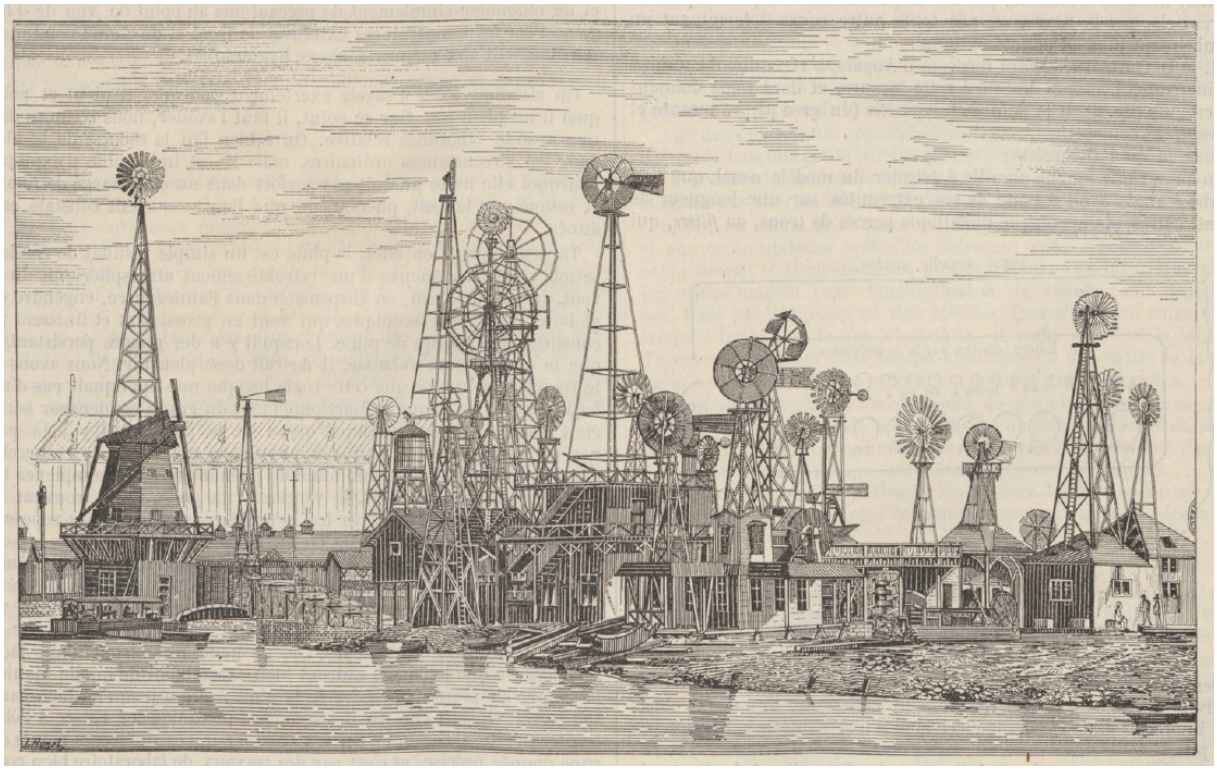


FIGURE 2.1 – « Les moulins à vent et les turbines atmosphériques à l'Exposition de Chicago (1893) » dans *Le Génie civil*

concerne la force des marées, des projets américains (à Rockland en 1907 : LA NATURE, 1907, à Mamaroneck en 1909 : LE GÉNIE CIVIL, 1912), anglais (projet de Horsnail dans la Manche, en 1909-1910 : LE GÉNIE CIVIL, 1909 ; LE GÉNIE CIVIL, 1910) et allemand (Pein à Husumf en 1912 : DE NANSOUTY, 1894d) sont signalés sans plus de commentaires dans les deux revues. D'autres études étrangères sont citées dans les différentes publications : Max de Nansouty, ingénieur de l'École centrale des Art et manufactures, commente par exemple trois projets formulés par l'Anglais Saunders dans son ouvrage *Actualités scientifiques* en 1907 (DE NANSOUTY, 1894a). Il ajoute que « [c]e qui est proposé par M Saunders pour des points bien choisis du littoral anglais, s'appliquera tout aussi heureusement à des points également bien choisis du littoral français », là précisément où la houille blanche manque. Il affirme de plus, comme le fera *Le Génie civil* à propos du projet de Pein, que l'ingénieur reprend le « cycle Decœur », dont il est question en 3.2. Enfin, l'utilisation de la vapeur des soffioni en Toscane par la Société Boracifera di Larderello, à partir de 1913, pour la production d'électricité servant à la fabrication d'acide borique, ainsi que certaines installations utilisant la force motrice fournie par des puits artésiens aux États-Unis, sont décrites dans les deux revues, à titre indicatif puisque ces procédés ne sont applicables que là où les particularités géologiques rendent possibles l'existence de cette « eau jaillissante » (ESPITALLIER, 1890).

La présence importante d'occurrences sur des projets étrangers sur la période (1890-

1910) amène aux constats suivants : alors qu'il y a moins d'initiatives françaises pendant cette période que dans la décennie 1880, les publications scientifiques et techniques continuent de relayer, majoritairement avec enthousiasme, des projets étrangers. On y décèle une conception nationaliste de la technique et d'engagement dans une compétition industrielle et/ou technologique entre nations, avec la crainte que la technologie étrangère devance la technologie française. De ce point de vue, les convertisseurs dont il est question sont considérés comme des facteurs de modernité. Les moulins à vent américains, qui ne recourent pas à des moyens de stockage comme l'air comprimé ou l'électricité, et qui induisent une utilisation locale de l'énergie, sont ainsi considérés comme modernes par certains auteurs, même sans passage par des vecteurs comme l'air comprimé ou l'électricité, ce qui relativise le caractère archaïque qui leur est conféré. C'est de ces moteurs dont il est maintenant question.

## 2.3 La « modernité de la tradition » : les moulins à vent

Dans les publications étudiées, le vent est souvent présenté comme la force naturelle la plus abondante et la plus capricieuse : disponible partout, mais très variable dans le temps en direction et en intensité (la puissance du vent est proportionnelle au carré de sa vitesse, ce qui est connu dans les années 1880) et imprévisible, il serait encore inutilisable de manière « industrielle ». En 1890, un article du *Génie civil* rappelle, comme le feront beaucoup d'autres, que « le vent est une force naturelle dont on peut disposer gratuitement », mais déplore que ces moulins « ne peuvent encore être utilisés au point de vue industriel, à cause de leur faible puissance et de l'irrégularité de leur emploi » (R. Gentilini, 1890). Selon certains auteurs de la période, au cours des années 1880, leur utilisation pour la mouture des graines céréalières et oléagineuses, qui représentait plus grand emploi de ces moteurs [18], est déjà quasiment abandonnée au profit des roues et turbines hydrauliques et de machines à vapeur (R Gentilini, 1890, p. 200 ; R. Gentilini, 1890, p. 199 ; Monod, 1890, p. 362-363) [19].

Cependant, de nouveaux moteurs éoliens [20] inspirés des modèles américains pour le

18. Au XIX^e^ siècle, les moulins à vent ont également servi à scier le bois et à assécher des polders (Rivals, 2000).

19. Dans les faits, ce constat est à nuancer d'après une intervention de Didier Terrier le 20 mars 2018 au colloque sur l'histoire des énergies alternatives organisé par l'Université de Bourgogne. Selon cet historien, des séries de moulins à vent de quelques chevaux, aussi appelés « tordoirs », étaient encore en activité autour de Lille dans les années 1880, et, support de l'industrialisation de cette région, servaient à la mouture du grain pour la production industrielle d'huile.

20. Le terme de « moteur éolien » est couramment utilisé comme synonyme de « moulin à vent ». Cette dernière expression se rattache à l'usage traditionnel des moteurs éoliens bien qu'il soit devenu un terme générique, aussi j'utilise de préférence « moteur éolien », ou « aéromoteur », étymologiquement moins spécifiques. Mais, comme le fait remarquer Claude Rivals, les multiples applications que les moulins à vent avaient auparavant connu (en particulier, production d'huile, sciage, assèchement des polders) n'en

pompage de l'eau se diffusent dans les campagnes françaises et sont décrits avec enthousiasme dans les publications scientifiques et techniques comme des machines modernes, adaptées, en contexte rural, au pompage de l'eau pour l'irrigation, l'élevage, l'alimentation humaine en eau. Elles ne constituent ainsi pas des moteurs pour l'industrie, mais des moyen d'obtenir, dans la France encore majoritairement rurale de la période (1880-1918), production agricole et hygiène. Cette section présente d'abord les modèles dont il est question et leur aspect innovant. Elle expose ensuite les expériences de quelques savants et ingénieurs renommés pour comprendre le comportement et améliorer le rendement de ces machines.

## De nouveaux moteurs éoliens inspirés des modèles américains

À l'instar des États-Unis, de nouveaux modèles de moteurs éoliens apparaissent à la fin du XIX^e^ siècle, et sont valorisées dans les publications scientifiques et techniques. Ainsi, à propos de l'Exposition universelle de 1889 où plusieurs moulins à vent « modernes » sont exposés, Émile Monod affirme-t-il en 1890 que « [t]out le monde sait que les moulins à vent ont été employés depuis des siècles à la mouture du blé, mais qu'ils tendent à disparaître et à être remplacés par un outillage très perfectionné ». En revanche, « [l]es machines de l'Exposition n'avaient pas en vue cette destination, elles étaient construites pour des applications agricoles, notamment pour l'élévation des eaux destinées aux irrigations » (Monod, 1890, p. 362-363). Ils servent ainsi pour l'irrigation, mais aussi pour l'alimentation en eau de communes, de riches particuliers et de gares de chemins de fer. Ces usages s'accommodent de l'irrégularité du vent puisqu'il est possible de stocker l'eau pompée lors des périodes venteuses, moyennant l'emploi d'un réservoir et d'une pompe dimensionnés de manière à subvenir aux besoins en eau lors des plus longues périodes de calme.

À partir des années 1870, des constructeurs français, spécialistes de machines hydrauliques ou, plus généralement, agricoles (pompes, charrues, locomobiles...) proposent ainsi des appareils qui diffèrent des moulins à vent en usage pendant les décennies précédentes. La majorité sont inspirés de modèles américains, dont l'utilisation Outre-Atlantique pour le pompage de l'eau est régulièrement vantée (cf section 2.2). D'après Ringelmann, ces modèles auraient été introduits par des constructeurs américains lors de l'Exposition universelle de Paris en 1878 (Ringelmann, 1901, p. 9). Ces machines sont présentées comme « modernes » par rapport aux moulins à vent traditionnels, aussi dits « hollandais » ou « européens », dont le rôle principal était de moudre le grain. Plus puissants, ces derniers,

avaient pas changé l'appellation : le mot moulin « n'évoque donc plus les meules mais le fait que ces machines « tournent » soit avec l'eau, soit avec le vent » (Rivals, 2000, p. 67). Certaines expressions se rapportent à un type spécifique d'aéromoteurs : « moulin à vent hollandais », « moulin à vent américains », « turbine atmosphérique », « éoliennes », « panémones » ou encore « pananémones ».

lourds et massifs, possèdent quatre ailes de grandes dimensions (9 à 13 m de long et 1,80 à 2 m de large). Ils ne démarrent que par vent de 4 m/s, et sont souvent dépourvus d'organes de régulation dans la transmission de la force du vent, qui compliquent leur emploi et leur entretien. Ils sont donc la plupart du temps inactifs, car une bonne mouture ne peut se faire que pour des vents moyens de 4 à 8 m/s. En outre, ils nécessitent une surveillance constante pour arrêter le moulin en cas de vent trop fort, et pour l'orienter dans la direction la plus favorable (R. Gentilini, 1890, p. 201). Essentiellement destinés au pompage, les nouveaux moteurs à vent peuvent fonctionner avec des gammes de vitesse plus importantes. Ils sont plus légers, orientés automatiquement, disposent d'organes de régulation, et s'effacent automatiquement en cas de tempête. Ils ont par conséquent un meilleur rendement annuel, un fonctionnement plus régulier, ne nécessitent pas de surveillance. En ce qui concerne les moulins américains, ils sont formés d'une roue munie d'un grand nombre de petites ailes disposées en persiennes (La Nature, 1884b ; R. Gentilini, 1890, p. 201 ; Monod, 1890).

De nombreux articles de périodiques scientifiques et techniques ou agricoles présentent ces différents types de moulins à vent et en louent le caractère moderne. Vantant l'intérêt économique et pratique de ces moteurs, ils en promeuvent l'utilisation en donnant leurs caractéristiques et le nom de leurs constructeurs. Max de Nansouty tente ainsi d'encourager leur utilisation en publiant, entre 1893 et 1894, trois articles dans *Le Génie civil* sur les différents modèles disponibles en France (De Nansouty, 1894c ; De Nansouty, 1893 ; De Nansouty, 1894b). Également témoins de l'intérêt porté aux moulins à vent dans les milieux techniciens, certains d'entre eux sont exposés lors de manifestations telles les concours agricoles ou les Exposition universelles dans les sections de mécanique et/ou de mécanique agricole, et ensuite présentés dans les périodiques scientifiques et techniques. Il s'agit de modèles américains et français effectivement commercialisés, mais également de prototypes opérationnels dont l'usage ne s'est diffusé par la suite, témoins de l'activité inventive visant à utiliser le vent. Alors qu'à l'exposition de 1878, seuls quatre constructeurs français présentent des moteurs éoliens [21] , ils sont douze à l'Exposition universelle de Paris en 1889 , et six en 1900 (Ministère du commerce, de l'industrie, des postes et des télégraphes, 1892, p. 81), montrant l'intérêt accru des constructeurs français et des organisateurs des Expositions pour ces machines dans les années 1880.

Deux types de moulins américains ont en particulier eu du succès auprès des constructeurs de machines agricoles français et de leurs clients : les moulins de type Halladay et les moulins de type Corcoran. Les moulins Halladay sont les premiers de ce type à avoir été commercialisés aux États-Unis, à partir de 1857, pour la conquête des territoires de l'Ouest (Righter, 1996, p. 24). Ils disposent d'un système de contrepoids qui ouvre et

21. On y trouve Henry Lepeaute fils (Paris), Jacquart (Paris), Oriolle (Nantes) et Touzelin (Argenteuil) (Exposition universelle de Paris, 1878, p. 1-4).

ferme la voilure en fonction de la vitesse du vent, avec pour effet de présenter au vent une surface utile proportionnelle à sa puissance, et d'avoir ainsi, entre les vitesses minimales et maximales de fonctionnement, une marche régulière. Avec des diamètres de 2 à 12 m, les Halladay commercialisés en France ont une puissance de 0,5 à 12 ch (0,4 à 8 kW) (G. Richard, 1893, p. 463-464). Les seconds, pourvus d'une voile rigide, sont de construction plus simple et, grâce à une vanne régulatrice, s'effacent en partie en cas de grands vents et complètement en cas de tempête (R. Gentilini, 1890, p. 201). Certains constructeurs les fournissent sous licence américaine [22]. D'autres vendent des modèles américains auxquels ils apportent quelques modifications [23].

Certains constructeurs proposent des modèles originaux : les établissements Auguste Bollée, fondeurs de cloches et constructeurs de matériel hydraulique au Mans, puis à Paimboeuf [25], fabriquent, depuis 1874, des turbines aériennes très particulières, qu'ils appellent « éoliennes » [26]. Comme les autres turbines atmosphériques, elles reprennent en effet les principes des turbines hydrauliques, types de roues qui ont modernisé l'utilisation des chutes d'eau. Elles disposent ainsi de deux couronnes d'aubages, l'une fixe, le distributeur, qui dirige perpendiculairement le courant aérien sur les aubages de l'autre, mobile, afin d'augmenter l'effet utile du vent. On en trouve encore les vestiges dans de nombreuses communes françaises [27]. A. Dumont vend, au moins dans les années 1880 [28] , des aéromoteurs qu'il nommait également « turbines atmosphériques », constituées d'une

22. La société Araou (Narbonne) construisait entre autres des Halladay et des « Éclipse » (type Corcoran) dans les années 1880-1900, avant de proposer ses propres modèles, jusqu'à son arrêt en 1956 (Rogier, 2002, p. 15-17). Plissonnier à Lyon vendait des moulins « Aermotor » et « Ideal-Éclipse » à partir des années 1880 et au moins jusqu'en 1920, et la société Pilter des moulins « Samson »(Ringelmann, 1901, p. 9-13 ; E.-H. Lémonon, 1920, p. 19 ; 53 ; 68-69). E-H Lémonon a beaucoup écrit pour diffuser des connaissances sur le « bricolage » et le faire-soi-même domestique : rédacteur en chef de la revue *Travaux de l'amateur*, revue mensuelle qui visait à « vulgaris[er] tous les travaux manuels et les mettant à la portée de tous les bricoleurs aimant leur foyer », il a également publié plusieurs ouvrages poursuivant le même but.

23. C'est le cas de la société Schabaver, à Castres, constructeur de moulins à vent Halladay, ou de Bompard et Grégoire, tous deux constructeurs de machines agricoles, entre 1880 et au moins 1914 (E.-H. Lémonon, 1920, p. 19 ; 53 ; 68-69)). Pieper à Mers sur Rhin (G. Geutch, 1904, p. 296), Pécard frères à Nevers (R Gentilini, 1890, p. 246), proposaient également des Halladay. Les moulins Eclipse ont été commercialisés en particulier par la maison Beaume [24]. Henri David (Orléans), Durey-Sohy (Paris) et David (Loiret) vendaient également des Eclipse (Walter et Régis, 2002-2015 ; Ringelmann, 1901, p. 9-13).

25. Ils ont changé de propriétaires à plusieurs reprises entre 1898 et 1931, mais ont toujours été les seuls à proposer ce modèle (Pestel, 2010) ; (Walter et Régis, 2002-2015)

26. C'est, à ma connaissance, la première occurrence de ce mot en français pour désigner un aéromoteur.

27. Association des amis de l'éolienne Bollée a entrepris un recencement collaboratif des éoliennes Bollée installées en France entre 1871 et 1931. A ce jour, plus de 300 sites ont été recensés et certaines éoliennes sont encore visibles, en plus ou moins bon état. J'ai eu le plaisir de visiter l'éolienne d'Esvres-sur-Indre grâce aux bénévoles de cette association que je remercie à nouveau. Ceux-ci ont mené un très louable travail de restauration : l'éolienne, construite en 1898 et arrêtée en 1946, est redevenue opérationnelle en 2005. Elle actionne maintenant la pompe d'une petite fontaine, après avoir alimenté, au siècle dernier, le château d'eau qui desservait le château et les jardins du domaine.

28. Ce constructeur n'est pas mentionné dans la liste que Lémonon donne, en 1920, des constructeurs de moulins à vent qui en commercialisaient juste avant la première guerre mondiale (E.-H. Lémonon, 1920, p. 1925-126). Il est donc probable que Dumont ait cessé cette activité avant.

grande voilure hélicoïdale (La Nature, 1884c ; La Nature, 1884a). Dumont a probablement donné ce nom à son invention pour la démarquer des autres moteurs à vent et lui associer un aspect moderne, bien qu'elle n'ait pas, comme l'éolienne Bollée, de similitudes particulières avec les turbines hydrauliques.

On peut citer, parmi les moteurs originaux qui sont probablement restés au stade de prototype, le « panémone » de Lequesne et Lefebvre, moulin à vent à axe horizontal constitué de multiples palettes disposées en cylindre. Cette disposition lui permet, comme les autres aéromoteurs nommés panémones, d'être actionné par des vents venant de toutes directions. Un modèle en est construit à Grand-Quevilly au début des années 1880, pour le pompage de l'eau. Ses inventeurs imaginent la multiplication des roues sur le même arbre et l'assemblage de plusieurs de ces roues en un « moulin multiple, de force et de puissance illimitées », « comme on recueille sur une même pile un courant puissant issu des différents éléments de la pile » (Lequesne et Lefebvre, 1883). Cette invention montre une volonté de concentrer l'énergie selon l'imaginaire de la civilisation thermo-industrielle, sans dispositif de stockage ni de transport.

## La diffusion de moteurs éoliens dans les zones rurales

Selon Étienne Rogier, il y a eu un « boom » des nouveaux modèles de moteurs éoliens (cf section 2.3) en France à la fin du XIX$^{e}$ siècle, et une restriction du marché ne serait survenue que dans les années 1920-1930, contraignant « la plupart » des constructeurs à cesser leur activité (Rogier, 2002, p. 18) [29]. L'auteur ne donne toutefois pas de sources ni de chiffres pour ces deux périodes, ni, enfin, de raisons à un déclin dans l'entre-deux-guerres. Quelques données qualitatives et quantitatives que j'ai trouvés vont dans le sens du constat de Rogier.

D'un point de vue qualitatif, les nouveaux moteurs à vent sont, donc, essentiellement destinés au pompage dans les zones rurales, à fins agricoles, mais également domestiques. Ces installations comprennent un moteur à vent actionnant une pompe, qui élève l'eau d'un puits dans un réservoir en hauteur alimentant à son tour différents points d'eau. Le choix des moteurs éoliens résulte d'un arbitrage avec les moteurs concurrents. En 1889, le Conseil général du Maine et Loire choisit ainsi d'équiper le puits de la Ferme-école du Prieuré, établissement d'enseignement agricole, par une éolienne de pompage Bollée. Après avoir commandité une étude de prix comparative à l'architecte départemental, celui-ci conclut, pour l'élévation à 40 m de hauteur d'un volume journalier moyen de 7500 L, à la supériorité du moteur à vent sur les moteurs à vapeur fixes ou mobiles,

29. Les moulins à vent proposés par le constructeur Araou (Narbonne, Aude) entre 1886 et 1955 auraient ainsi connu une large diffusion au tout début du siècle, puis, dans les années 1930, l'entreprise ne se serait plus consacrée qu'à une activité de maintenance.

sur les chevaux, les ânes, et la force humaine, et ce selon des considérations techniques (possibilité ou non de multiplier les usages du moteur) et économiques (investissement, dépenses annuelles). Les résultats, donnés dans la Figure 2.2 , montrent un investissement supérieur, mais des dépenses annuelles largement inférieures pour le moteur à vent, qui concernent essentiellement le graissage du mécanisme (Maine et Loire, 1889).

| MOTEURS | FRAIS de 1er établissement | DÉPENSES ANNUELLES | OBSERVATIONS |
|---|---|---|---|
| ***Moteurs animés*** | | | |
| A bras . . . . . | » | » | Ce moteur est insuffisant. |
| A cheval . . . . . | 1.300 fr. | 1.600 fr. | Ce moteur donne un travail régulier, laisse la possibilité d'utiliser un peu le cheval à un autre usage. |
| A âne . . . . . | » | » | Ce moteur est insuffisant. |
| ***Moteurs à vapeur*** | | | |
| Fixe . . . . . | 7.800 | 750 | Donne un travail régulier mais appliqué au service d'eau seulement. |
| Locomobile . . . . . | 7.500 | 800 | Donne un travail régulier mais offre en outre l'avantage de pouvoir utiliser la machine à des services multiples. |
| ***Moteur à vent*** . . . | 8.700 | 100 | Donne un travail irrégulier dont le produit peut être régularisé au moyen des réserves d'eau indiquées. |

Figure 2.2 – Comparaison du coût de différents moteurs par le CG de Maine et Loire

Certaines exploitations agricoles font également le choix de s'équiper en moteurs éoliens pour leurs besoins d'irrigation (champs, vignes) et d'alimentation en eau du bétail. Par exemple une turbine atmosphérique Dumont est installée en 1884 dans l'exploitation agricole de Combault(Seine-et-Oise) (Leblond, 1885). Sept fermes fermes et plusieurs dizaines de propriétaires de domaines choisissent l'éolienne Bollée pour irriguer leurs exploitations (voir tableau 2.9). Enfin, un article de 1899, dans le *Panthéon de l'industrie*, affirme, de manière sûrement quelque peu exagérée, que « presque toutes les grandes exploitations [viticoles] du Midi, dans le Gard et dans l'Hérault, ont adopté [le moulin « Steel Queen de Bompard et Grégoire] », que le domaine de Capette (Gard) est en train de faire installer des aéromoteurs pour « submerger tous les plants d'un vignoble de 200 hectares », et que le constructeur « a plus de 30 entreprises du même genre en cours d'exécution » (Le panthéon de l'industrie, 1899).

Par ailleurs, pour répondre aux exigences de l'hygiénisme, de nombreuses communes mettent en place, à partir de la fin du XIX^e siècle, des infrastructures d'adduction d'eau potable pour alimenter des bornes-fontaines publiques et des lavoirs (GOUBERT, 1986), et certaines d'entre elles font le choix d'un moteur éolien pour assurer ce service. D'après René Champly, c'est le cas au moins jusqu'aux années 1930, car « l'État français donne aux communes qui veulent faire une adduction d'eau, une subvention pour l'installation des machines et canalisations, mais aucune somme pour payer le combustible, ou l'électricité, qui fera tourner ces machines » (CHAMPLY, 1933, p. VI). De riches particuliers équipent de même leurs châteaux ou domaines afin de pomper l'eau des puits pour leurs usages domestiques, mais également pour leurs éventuels élevages ou cultures (voir Figure 2.3). Ici, usages domestiques et agricoles vont de pair. Deux turbines atmosphériques Dumont sont aussi installées en 1888 par la ville d'Orgelet (Jura) pour la distribution d'eau municipale, et une autre par la Compagnie des chemins de fers vicinaux d'Anvers (Belgique) pour l'alimentation des réservoirs d'eau des locomotives(R GENTILINI, 1890, p. 247-248). Un moulin à vent du constructeur Rossin (Orange) sert de même à pomper de l'eau à la halte de Valenton près de la gare de Villeneuve-Saint-Georges dans les années 1880 (MONOD, 1890, p. 363-365). Enfin, quelques gares installent des moulins à vent pour alimenter des réservoir d'eau utilisée ensuite dans les locomotives à vapeur (voir Figure 2.3, qui représente un moulin à vent Rossin installé à la gare de Villeneuve-Saint-Georges )(G. RICHARD, 1893).

D'un point de vue statistique, certains chiffres confirment, d'abord, la diminution globale de l'utilisation des moteurs à vent à des fins agricoles. Ils ne donnent pas d'indications sur la diffusion de nouveaux moteurs, mais sont tout de même intéressants car ils tendent à relativiser la rapidité du déclin de l'usage des moulins à vent dans les campagnes. Cette thèse ne traite pas l'histoire des usages, mais il m'a semblé intéressant de mentionner ces statistiques, étant donné la rareté de tels chiffres dans l'historiographie de l'énergie en France à partir de 1880. La Table 2.5 montre une série issue de l'enquête décennale sur les statistiques agricoles françaises orchestrée à partir de 1882 par le ministère de l'Agriculture tout juste créé. Elle représente le nombre et la puissance cumulée des moulins à vent en tant que « machines agricoles » en France (MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE, 1897, p. 408 ; 422 ; 256).

TABLE 2.5 – Nombre de moulins à vent utilisés comme machines agricoles en 1882 et 1892

| 1882 | | 1892 | |
|---|---|---|---|
| Nb moteurs à vent | Puissance (ch) | Nb moteurs à vent | Puissance (ch) |
| 9428 | 27438 | 6167 | 16424 |

Ces statistiques traduisent une diminution l'usage agricole des moteurs à vent entre

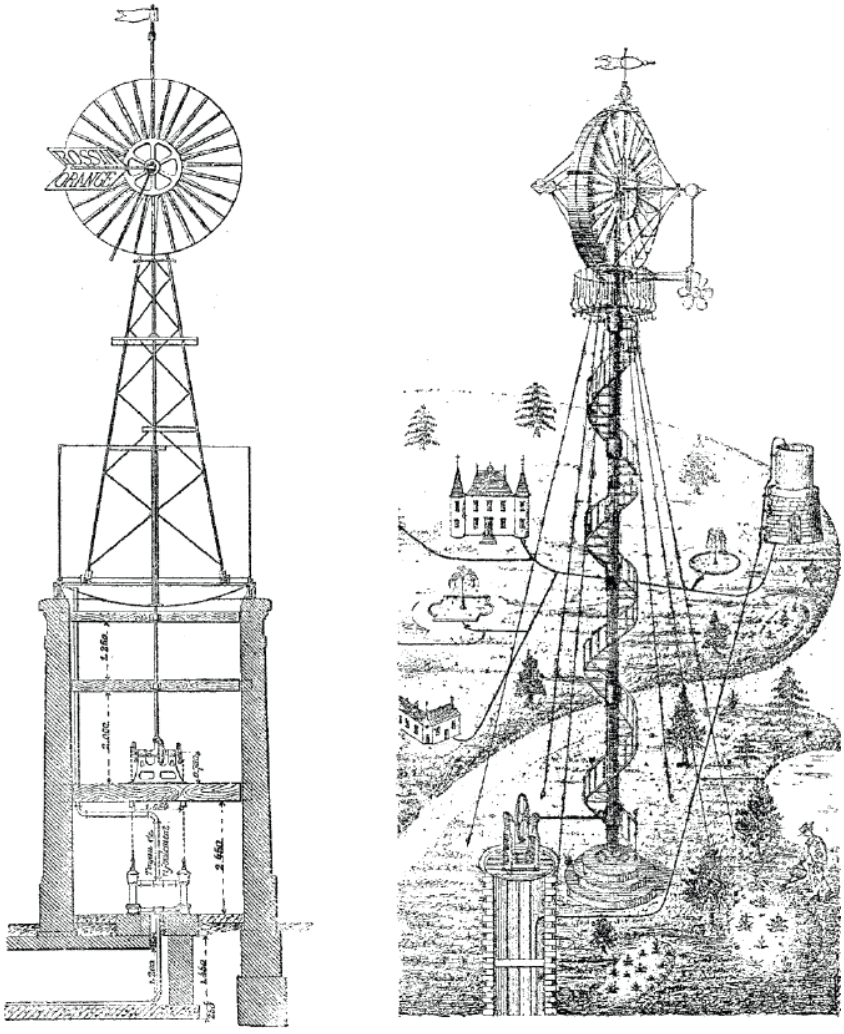



FIGURE 2.3 – Moulin à vent Rossin dans la gare de Villeuneuve-Saint-Georges et Eolienne Bollée dans un domaine (Richard, 1893)

1882 et 1892 [30]. Selon Ringelmann, elle concerne essentiellement, pour 1882, « la mouture et le concassage des grains » (RINGELMANN, 1898a). De ce point de vue, on peut considérer que le déclin de l'exploitation du vent constaté par cette enquête est lié à une substitution de certains moteurs à vent par des moteurs à vapeur pour la mouture du grain. Selon Ringelmann, le nombre d'exploitations agricoles munies d'une machine à vapeur aurait effectivement plus que doublé entre 1877 et 1887. Cependant, on peut constater qu'en 1892 encore, l'utilisation des moulins à vent comme machines agricoles est loin d'être négligeable devant celui des autres moteurs, comme le montre la Table 2.6, indiquant le nombre de machines et la puissance installée par source d'énergie (MINISTÈRE DE

30. Si on la combine avec les chiffres donnés par Benoît sur le nombre de moulins à vent « déclarés » en 1860-61 qui se serait élevé à 11332 pour une puissance de 39569 chevaux, il y aurait alors une chute plus importante entre 1882 et 1892 qu'entre 1860 et 1882, si l'on suppose qu'ils ne concernent que l'agriculture. Benoît ne précise cependant pas les usages pris en compte, aussi, si cette hypothèse est fausse, c'est-à-dire si la minoterie est également comptabilisée dans les statistiques de 1862, cela accentue la décroissance de l'utilisation des moulins à vent dans le seul secteur agricole entre 1860 et 1882.

l'Agriculture, 1897, p. 256) [31].

Je n'ai pas trouvé de statistiques comparables pour les décennies suivantes. En revanche, une nouvelle enquête du ministère de l'Agriculture pour l'année 1929 indique qu'il n'y avait alors plus que 2772 moulins à vent utilisés comme « moteurs de culture mécanique », ce qui traduit un très net recul à cette date des moteurs à vent par rapport aux autres types de moteurs agricoles, comme le montre la Table 2.7 (Ministère de l'Agriculture, 1936). Le nombre de moteurs hydrauliques diminue également, au profit des machines à vapeur, mais surtout des moteurs à combustion interne et des moteurs électriques.

Table 2.6 – Répartition du nombre de moteurs par type dans le secteur de l'agriculture en 1892

| Moulins hydrauliques | | Moulins à vapeur | | Moulins à vent | | Total | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Nombre | Puissance (ch) | Nombre | Puissance (ch) | Nombre | Puissance (ch) | Nombre | Puissance (ch) |
| 11591 | 55115 | 12037 | 55215 | 6167 | 16424 | 29795 | 128754 |

Table 2.7 – Répartition du nombre de moteurs par type dans le secteur de l'agriculture en 1892

| | Moulins/turbines hydrauliques | Moulins à vent | Machines à vapeur | Moteurs à combustion interne | Moteurs électriques |
|---|---|---|---|---|---|
| Nombre de moteurs | 5928 | 2772 | 21842 | 150586 | 159491 |

Ces chiffres montrent une diminution globale de l'utilisation des moteurs à vent entre 1880 et 1920, mais ne permet d'affirmer la diminution du marché des moulins à vent au cours de cette période, puisqu'on ne sait pas quelle est la part, dans les installations comptabilisées, d'anciennes et de nouvelles installations. Des statistiques globales sur l'utilisation des moulins à vent, tous usages compris, en France, permettraient de préciser ces informations. Dans le *Bulletin de la SEIN*, l'ingénieur EPCI Paul Renaud s'appuie sur des données qu'il ne mentionne pas pour représenter la « puissance en chevaux, fournie par le vent en France » (Table 2.8) (Renaud, 1899, p. 16).

Table 2.8 – Nombre de moulins à vent en France en 1882 et 1892 selon Paul Renaud

| 1882 | | 1892 | |
|---|---|---|---|
| Nb moteurs à vent | Puissance (ch) | Nb moteurs à vent | Puissance (ch) |
| - | 27438 | - | 39017 |

31. Une grande disparité se dessine aussi selon les départements : par exemple, le Pas-de-Calais dispose d'une puissance installée en moulins à vent quasi équivalente à celle de ses machines à vapeur, et supérieure à celle de ses roues hydrauliques, tandis que l'Indre ne possède qu'un moulin à vent, et un équipement en moulins hydrauliques et machines à vapeur quasi équivalents .

Il est étonnant de voir qu'elle s'accorde avec les statistiques décennales pour la date de 1882, mais pas pour celle de 1892. L'auteur est assez flou sur les usages considérés, mais il semble prendre en compte l'ensemble des moulins à vent installés en France. On pourrait expliquer le chiffre qu'il fournit par l'augmentation de l'utilisation des moulins à vent pour les usages non agricoles. Dans ce cas, cela corrobore une augmentation de la puissance installée en nouveaux moteurs éoliens en France, qui correspondrait au « boom » suggéré par ROGIER, (2000a).

Plusieurs autres élément quantitatifs permettent de soutenir qu'entre la fin du XIX^e^ siècleet le début du XX^e^ siècle, les nouveaux moteurs, associés à leurs nouveaux usages, ont connu un certain succès.

L'évolution des ventes de moulins à vent par certains constructeurs vont ainsi globalement dans le sens de ce constat. La société Schabaver, l'un des principaux fournisseurs de ces machines entre les années 1880 et le premier quart du XX^e^ siècle(E.-H. LÉMONON, 1920, p. 36-37), en aurait vendu plus de 20 000 en France entre 1880 et 1904 selon un auteur du *Bulletin de la SEIN* (G. GEUTCH, 1904, p. 284) - des données comparatives pour les décennies suivantes, et des informations sur les usages auxquelles ces machines étaient consacrées permettraient de préciser l'évolution de l'achat de ces appareils. En tout cas, ceux-ci ont servi à alimenter « plusieurs communes du département de l'Aude, ayant une population qui variait de 300 à 1500 habitants, et donc le budget était trop modeste pour avoir recours à des moteurs à vapeur » (R GENTILINI, 1890), mais également d'autres localités du Sud de la France, comme les communes de Muret, Bages, Roquefort, Mazamet (G. RICHARD, 1893, p. 450). Les constructeurs des éoliennes Bollée, qui proposaient un modèle original commercialisé à partir de 1874, ont vendu, selon une liste de références de 1941, 468 modèles entre 1874 et 1941, répartis comme suit par décennie et par type d'usager [32].

On constate que plus de la moitié des éoliennes vendues l'ont effectivement été à la fin du XIX^e^ siècle, et ce, surtout à des propriétaires de châteaux ou domaines. Entre 1890 et 1914, un nombre quasi constant et une part croissante de communes se sont ensuite équipées de ces éoliennes pour le réseau de distribution d'eau municipal. Jusqu'à 1914, quelques gares et fermes ont eu recours à ce moteur. On constate ensuite clairement une baisse des ventes sur la période comprise entre le début de la première guerre mondiale et 1927, où la société a essentiellement effectué des réparations (WALTER et RÉGIS, 2002-2015), mais une nouvelle augmentation des ventes à partir de 1927, avec une clientèle composée à part quasi égale de communes et de particuliers. Ceci met en doute l'hypothèse

32. 18 des références données pour cette période ne donnent pas la machine dont il s'agit : elles peuvent tout aussi bien être des pompes, des turbines, des moteurs ou des moulins à vent. Elles ne sont pas comptabilisées dans ce tableau.
AN 1977 0614/3, 1941.

TABLE 2.9 – Nombre d'éoliennes Bollée vendues entre 1874 et 1938

| Usager | Communes | | Particuliers [a]) | | Gares | | Fermes | | Autres [b] | | Nb total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Nb | % | Nb | % | Nb | % | Nb | % | Nb | % | |
| [1874-1879] | 2 | 6% | 24 | 73% | 1 | 3% | 1 | 3% | 5 | 15% | 33 |
| [1880-1889] | 4 | 3% | 146 | 91% | 1 | 1% | 1 | 1% | 8 | 5% | 160 |
| [1890-1899] | 20 | 17% | 75 | 65% | 3 | 3% | 1 | 1% | 16 | 14% | 115 |
| [1900-1909] | 22 | 33% | 33 | 50% | 1 | 2% | 2 | 4% | 7 | 11% | 66 |
| [1910-1914] | 19 | 76% | 3 | 12% | 1 | 4% | 1 | 4% | 0 | 0% | 25 |
| [1915-1926] | 1 | 33% | 2 | 67% | 0 | 0% | 0 | 0% | 0 | 0% | 3 |
| [1927-1938] | 29 | 46% | 32 | 50% | 0 | 0% | 1 | 2% | 1 | 0% | 63 |

*a.* Surtout châteaux/domaines

*b.* Parmi ces autres usagers, on trouve : 3 distillateurs (1888 ; 1891, 1902) ; 1 tanneur (1895) ; 2 négociants (1880, 1897) ; 2 compagnies minières (pas de date de construction) ; 1 fonderie (1884) ; 2 meuniers (1899 ; 1900) ; 1 ferme-école (1889) ; 1 arsenal (1911) ; 3 communautés religieuses (1875, 1888, 1893) ; 1 hospice -hôpital (1877) ; 3 asiles (1897 ; 1902) ; 1 orphelinat (1928) ; 1 sanatorium (1907)

d'une restriction globale du marché dans l'entre-deux-guerres sans toutefois l'écarter. Ce renouveau dans l'activité correspond en effet à un changement de propriétaire qui peut être la cause d'un dynamisme accru. Par ailleurs, l'alimentation des gares est peu représentée. Mais on peut souligner que ce cas de constructeur est particulier dans la mesure où les éoliennes Bollée ont été décrites comme comparativement coûteuses, ce qui peut expliquer l'importance d'une clientèle aisée (R GENTILINI, 1890, p. 247 ; (PESTEL, 2010, p. 234)).

Un marché a également existé pour la mise en marche de machines, à des fins agricoles, hygiéniques et commerciales dans les colonies et protectorats français, dans un contexte de manque de combustible plus important encore qu'en métropole. Les constructeurs des éoliennes Bollée ont ainsi vendu, entre 1891 et 1912, cinq éoliennes de pompage dans les colonies françaises (AN197706141941) [33]. Il y a, à Tunis, trois représentants français de constructeurs américains en 1904 [34], et selon R. Gagey, directeur de l'École coloniale d'Agriculture de Tunis, ce genre de moteurs, « avec installation de pompe, scie et concasseur », « se répand de plus en plus en Tunisie » ; selon le même auteur, il y aurait dans ce protectorat, la même année, trois petites minoteries munies d'un Aermotor (GAGEY, 1904, p. 93). En 1920, un auteur de *La Nature* affirme qu'en Tunisie, « la question des moteurs à vent a été très étudiée » et que « de nombreux perfectionnements ont été apportés aux moulins de nos pères » (WEISS, 1920). Selon CHAMPLY, (1933, p. VI), en 1933, « des milliers d'aéromoteurs sont en Algérie, en Tunisie et au Maroc pour puiser l'eau » à des fins agricoles. La même année, Pierre Jacquinot, Ingénieur des Ponts et Chaussées au

33. 1891, Tunisie, Hôpital (Tunis) ; 1901, Guinée, Compagnie de Mossamédès (Mossamédès) ; 1904, Niger ; 1906, Cochinchine (Province du Cantho) ; 1912, Dahomey, Compagnie des chemins de fer du Dahomey.

34. Leclercq commercialisait des Aermotor de l'Aermotor Cie de Chicago ; Pilter vendait des Ideal et des Samson de la Stower manufacturing Cie d'Illinois, et Blanc des Star de Flint et Walling-Indiana (GAGEY, 1904, p. 93).

service des Travaux Publics des Colonies affirme aussi qu'en Afrique du Nord, « il existe pour puiser l'eau des milliers d'aéromoteurs » (Jacquinot, 1933, p. 337). Cette information ne dit rien sur l'évolution du nombre d'aéromoteurs utilisés dans ces pays depuis 1880 mais elle montre que des éoliennes de pompage s'y sont multipliées entre 1880 et 1933.

Toutes ces données relativisent donc l'abandon de l'énergie éolienne en France à partir des années 1880 : d'une part, l'usage des moulins à vent traditionnels n'est pas négligeable devant celui des autres moteurs dans les exploitations agricoles jusqu'à l'entre-deux-guerres. D'autre part, des moteurs à vent modernes, utilisés pour pomper l'eau à des fins agricoles, domestiques et de service, se multiplient lors de cette période. S'ils ne trouvent pas de place dans le monde de l'industrie, ils s'imposent dans certaines campagnes françaises, où ils servent au pompage de l'eau pour l'irrigation et à l'alimentation en eau domestique de communes et de riches particuliers. Dans les colonies, ils sont probablement utilisés pour des usages plus variés.

## Quelques travaux théoriques et expérimentaux sur les moulins à vent

L'intérêt qu'ont porté certains ingénieurs renommés, spécialistes de la mécanique, au perfectionnement de ces moteurs à la fin du siècle dernier montre que leur absence du monde industriel ne les fait pas tomber en désuétude au yeux de certains membres de l'élite scientifique et technicienne. Ainsi, malgré le fait que l'aérodynamique soit, jusqu'au début du XX$^{e}$ s, « un domaine de connaissances presque inexploré tant sur le plan théorique que sur le plan expérimental » (Fontanon, 1998, p. 59), ces ingénieurs essaient d'évaluer les performances des moulins à vent en fonction de leur profil, de manière théorique et/ou expérimentale, afin d'améliorer leur rendement, ou rapportent des contributions d'auteurs étrangers allant dans ce sens.

Plusieurs ingénieurs des Mines et spécialistes de la mécanique se penchent sur la théorie des moulins à vent dans leurs cours et articles, jugeant donc le sujet digne d'intérêt et reprochant, parfois, le manque de travaux dans ce sens. En 1889, Haton de la Goupillère, ingénieur des Mines, directeur de l'École des mines de Paris et de la SEIN, membre de l'Académie des sciences, consacre ainsi un chapitre de son cours sur la théorie des machines aux moulins à vent, où il expose des calculs visant à évaluer le travail des moteurs éoliens en fonction de la surface de leurs ailes, de la vitesse du vent et d'un coefficient à déterminer expérimentalement (De la Goupillière, 1889, p. 554-586). En 1894, le *Bulletin de la SEIN* publie un rapport de Gustave Richard, ingénieur des Mines et membre du comité de mécanique de la SEIN, sur les moulins à vent présentés à l'Exposition de Chicago.

Outre les différents modèles et leurs systèmes de régulation exposés, Richard y montre les résultats des travaux de l'Américain Arthur Wolff pour évaluer la performance de ces machines. Il souligne la difficulté d'appliquer la théorie des moulins à vent à la pratique, et le caractère approximatif des formules donnant leur travail utile (G. Richard, 1894, p. 638-678) . Quelques années plus tard, il rend compte des résultats expérimentaux de l'ingénieur américain Murphy sur des modèles américains (G. Richard, 1898). La même année, Auguste Rateau, lui aussi ingénieur des Mines et professeur à l'École des mines de Saint-Étienne, écrit un article sur les « turbo-machines », sujet dont il est spécialiste, dans la *Revue de mécanique*. Il tente d'affiner les formules exprimant le travail utile des moulins à vent, dont « l'importance encore assez respectable » justifie qu'il lui consacre plusieurs pages. Il considère en effet que cette théorie « est encore à faire », et, contrairement à Haton de la Goupillère, il prend en compte la forme des moulins à vent et leur influence sur l'écoulement de l'air, ce qui lui permet de montrer par la théorie que le rendement des moulins à vent américains est plus important que celui de leur aïeux hollandais. Il compare en outre ses résultats théoriques aux résultats pratiques de E-C Murphy, et exprime son étonnement devant la « pauvreté d'essais sur les moulins à vent en général » (Rateau, 1898).

Dans le domaine agronomique, deux ingénieurs et professeurs d'Écoles agronomiques ont quant à eux effectué des travaux expérimentaux pour déterminer et améliorer le rendement des moteurs à vent. Ils entendent ainsi moderniser la production agricole, ce qui montre que les aéromoteurs ont été perçus par des élites techniques comme facteurs de progrès.

Le premier d'entre eux est Maximilien Ringelmann, ingénieur agronome, professeur de mécanique à l'École nationale d'agriculture de Grignon et directeur de la Station d'essai des machines du ministère de l'Agriculture. Dans les années 1890, il répond partiellement au souhait de Rateau d'étudier expérimentalement le comportement des aéromoteurs. La Station d'essai des machines est créée en 1888 par le ministère de l'Agriculture, dans le but de « moderniser » le secteur agricole et de rationaliser la construction et l'utilisation des machines-outils (Griset, 2011, p. 16-17). Cet établissement est muni d'un outillage spécifique visant à tester les différentes machines agricoles soumises par les constructeurs selon un mode « uniforme, méthodique, basé sur des principes exacts » (Ringelmann, 1901, p. 211-219). Sa mission est de suppléer aux différents concours agricoles qui jouent un rôle important dans le choix des machines par les agriculteurs, et qui selon Ringelmann ne permettent qu'un jugement « expéditif » sur leur valeur. Il doit aussi permettre aux constructeurs d'apporter des améliorations à leurs machines. Ceux-ci peuvent ainsi choisir de soumettre leurs machines à des tests approfondis sur leurs rendement, leur travail utile, leurs frais de fonctionnement, leur construction et leur usure. Ils reçoivent ensuite des conseils ainsi qu'un document officiel attestant des résultats constatés. Ringelmann

a été toute sa vie un personnage central de cette institution, et fut considéré à ce titre comme le spécialiste français des machines agricoles [35]. Cette spécialité l'a poussé, dans les années 1890-1900, à s'intéresser aux moulins à vent. Le constructeur Beaume choisit en effet en 1890 de livrer un Éclipse de 3,60 m de diamètre aux tests de la Station [36]. Ceux-ci durent presque deux ans, à l'issue desquels Ringelmann considère ces moulins à vent « très recommandables pour l'élévation des eaux destinées aux exploitations agricoles, comme aux agglomérations rurales » (Ringelmann, 1904). Les travaux étrangers, ainsi qu'une mission à l'Exposition de Chicago de 1893, au cours de laquelle il constate l'importance des moulins à vent aux États-Unis et la performance des modèles américains, le convainquent de l'intérêt de diffuser ces machines dans les campagnes françaises (Ringelmann, 1895b). Il donne les résultats de ses expériences (en particulier, travail fourni et volume d'eau élevé en fonction de la vitesse du vent) dans plusieurs publications à caractère scientifique et technique [37], mais également dans le *Journal d'agriculture pratique*, destiné plus spécifiquement aux populations rurales et à visées pratiques (Ringelmann, 1898b, p. 688-689 ; Ringelmann, 1904). Il cherche ainsi à encourager et faciliter l'installation de moteurs à vent modernes dans le milieu rural [38].

Le deuxième d'entre eux est R. Gagey, professeur à l'École coloniale d'Agriculture de Tunis. Quelques années plus tard, il mène à son tour des expériences similaires sur un moulin à vent Aermotor de 4.20 m de diamètre monté sur un pylône de 21 m, afin de déterminer le travail que ce type d'appareil serait susceptible de produire en Tunisie (Gagey, 1904). De la même manière que Beaume avait procédé avec Ringelmann, Leclercq, un représentant de la société américaine Aermotor confie [39] à l'École « un moulin rotatif complet avec installation de pompe, scie et concasseur ». Probablement peu avant 1904 [40], Gagey teste cette machine pour élever de l'eau et concasser du grain et conclut que ce moulin peut « rendre de grands services, même dans une ferme où le bétail est nombreux ». Il considère que le « moulin à vent a toute sa place à la ferme » sur le littoral tunisien où « le vent règne d'une façon continue », mais que les renseignements sur leur utilisation pratique restent très incomplets. Il envisage d'effectuer de nouvelles expériences et appelle à la mise en place, par toutes les stations météorologiques de la Régence, d'anémomètres

35. (Simon, 1998)

36. En 1895, Ringelmann mentionne également des essais échelonnés entre mai et juillet 1895. Dans des publications ultérieures, il indique des expériences qui ont duré plus de deux ans.

37. *Bulletin de la SEIN*, *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*, comptes-rendus des expositions universelles.

38. Dans le *Journal d'agriculture pratique*, il répond à plusieurs reprises aux questionnements de personnes intéressées par l'installation d'un moulin à vent pour l'élévation de l'eau et l'actionnement de machines, par des conseils pratiques – et à au moins deux reprises, il recommande explicitement les moulins à vent Beaume (Ringelmann, 1892 ; Ringelmann, 1895a).

39. Dans son article, Gagey dit que Leclercq en a « fait cadeau » à l'École, mais on peut supposer qu'il attendait une expertise similaire à celle que propose la Station d'essais des machines (Gagey, 1904, p. 93).

40. Date de la publication.

enregistreurs pour obtenir des statistiques mensuelles et annuelles sur la vitesse du vent. Il espère ainsi pouvoir donner des indications précises aux agriculteurs installés en Tunisie et encourager l'utilisation des moulins à vent. La même année et dans la même revue, Gagey encourage l'installation en Tunisie de petites minoteries à proximité des villes pour « produire tantôt de la semoule pour l'indigène, tantôt de la farine panifiable pour les Européens ». Il préconise de « toujours employer la force motrice la plus économique possible » et recommande en priorité la mise en place de moteurs hydraulique auprès des oueds et de moteurs éoliens ailleurs .

Ces ingénieurs, tous spécialistes de la mécanique, ont donc porté de l'intérêt aux nouveaux moteurs à vent, à leur compréhension et à leurs perfectionnements possibles, au point de les intégrer dans leurs cours et d'écrire des articles dans le but de sensibiliser les théoriciens et le monde agricole à ce sujet. Pour deux ingénieurs agricoles, ils sont facteurs de progrès. Ce constat nuance le fait que les moteurs à vent aient été associés à des usages archaïques, même sans passage par des vecteurs comme l'électricité ou l'air comprimé.

## 2.4 Synthèse Chapitre 2

De multiples possibilités sont envisagées pour exploiter les forces naturelles avec des convertisseurs innovants. L'électricité et l'air comprimé rendent possibles le stockage et le transport de la force, et l'imaginaire technicien de certains auteurs, tournés vers le modèle du couple charbon machine à vapeur, y voient le moyen idéal d'exploiter les forces naturelles de façon moderne. Au début des années 1880, deux modèles s'affrontent pour ces deux solutions : le transport par réservoirs de force accumulée ou par câbles ou canalisations. Au fur et à mesure de la construction du système électrique, l'idée de transporter des accumulateurs n'est plus émise. Si l'électricité est le moyen proposé de façon majoritaire, cela dépend des sources d'énergie, et d'autres procédés sont imaginés. La conversion électrique concerne ainsi surtout le vent et les marées, qui sont aussi les sources les plus discutées dans les publications étudiées. D'autres moyens de conversion sont présentés comme modernes, et l'accumulation de l'eau dans des réservoirs de petite taille, forme de stockage et non de transport, et pour de petites puissances, n'est pas discréditée comme archaïque. En témoigne le succès des moteurs à vent inspirés des modèles américains, stimulé par les réalisations étrangères et en particulier états-uniennes, auprès d'utilisateurs des zones rurales, mais aussi de chroniqueurs des revues scientifiques et techniques et de certains membres de l'élite scientifique et technique.

# Chapitre 3

# Projets français : vent, marées, vagues et soleil

Parmi les acteurs identifiés, les inventeurs ont joué le rôle le plus dynamique sur cette période. Majoritairement ingénieurs, ils prennent des brevets, et certains diffusent leurs conceptions dans les revues scientifiques et techniques ou dans des ouvrages ainsi qu'auprès de sociétés savantes. Quelques-uns seulement arrivent à des réalisations pratiques. Le cas des moteurs à vent est unique, puisque ceux-ci ont été commercialisés et effectivement utilisés pendant des décennies dans certaines régions rurales, où certains communes et quelques particuliers font le choix de ce moteur pour le pompage de l'eau.

Ce chapitre examine, pour les forces naturelles les plus souvent discutées dans les publications étudiées (vent, marées, vagues et soleil), un projet particulier. Ces projets font partie des plus aboutis dans le processus d'innovation au cours de la période. L'analyse de l'imaginaire technicien des forces naturelles du chapitre 2 est ainsi complétée avec des exemples précis par source d'énergie, qui montrent différentes dynamiques d'acteurs et l'inscription dans plusieurs contextes sociaux et politiques.

Le premier projet met en scène un riche citoyen, Charles de Goyon, et son ami ingénieur des Arts et manufacture, Raoul de l'Angle Beaumanoir, cherchant à produire de l'électricité au moyen du vent. Comme d'autre ingénieurs dans les pays industrialisés, ils souhaitent substituer une force naturelle aux énergies fossiles dans un usage répandu de l'électricité, l'éclairage avec accumulateurs. Il s'agit donc d'une volonté d'intégrer le vent au système électrique en construction, les accumulateurs permettant de stocker la force irrégulière du vent. Ils ont les connaissances techniques (avec De l'Angle-Beaumanoir), sont intégrés dans un réseau d'acteurs propice à ce type de projet (Connaissance de Léon Vigreux, légitimité de de l'Angle-Beaumanoir auprès du service des Phares et balises en tant qu'ingénieur), et les moyens financiers (fortune du duc de Feltre) pour inscrire leur idée

dans un projet concret, l'éclairage du phare de la Hève. Ils font appel à des constructeurs étrangers pour la majorité des éléments de leur installation. Celle-ci est mise en œuvre mais rapidement endommagée et non réparée, en raison du coût que cela représenterait.

Le second émane d'un ingénieur, Paul Decœur, appartenant au corps des Ponts et chaussées, ce Corps d'ingénieurs de l'État devenus les acteurs principaux de l'aménagement routier, ferroviaire, et surtout hydraulique de la France (Grelon, 1994). Ces ingénieurs sont ainsi spécialistes des ouvrages hydrauliques : canaux, ouvrages portuaires, barrages, y compris barrages hydroélectriques. Decœur transpose ces connaissances à l'utilisation des marées, forme d'énergie hydraulique, pour la production d'électricité. Il inscrit ce projet au sein d'un projet d'aménagement précis, celui du port du Havre, en 1890. Il a la légitimité, les moyens d'action et de diffusion pour faire reconnaître son projet comme sérieux. Celui-ci ne dépasse cependant pas le stade du papier.

Le troisième est porté par un personnage difficile à catégoriser, Édouard Bouchaud-Praceiq. Il est *a priori* peu intégré dans des sociétés savantes, des communautés d'ingénieurs ou d'industriels. C'est un « inventeur » qui a à son actif plusieurs brevets et met en place une installation houlomotrice dans les années 1910 en Gironde. Celle-ci produit directement de la force motrice. J'ai très peu de renseignements sur cette installation, qui, si les sources disent vrai, c'est-à-dire si elle a été opérationnelle pendant plusieurs années, serait alors la plus avancée dans le processus d'innovation de tous les projets étudiés dans cette partie.

Le dernier est un projet d'exploitation de l'énergie solaire par un ingénieur, également connu pour être l'inventeur d'une machine frigorifique. Il conçoit un convertisseur solaire fonctionnant sur le même principe thermodynamique. Il inscrit ce convertisseur dans un projet de conquête coloniale, celui d'une « conquête pacifique du Sahara occidental par le soleil » (Tellier, 1890), mais l'installation qu'il met en place dans sa maison d'Auteuil autour de 1890, et qui alimente un poulailler, est le seul exemplaire de cette machine à avoir jamais été construit. Reconnu comme ingénieur-inventeur dans les cercles scientifiques et techniciens, il voit ses conceptions diffusées dans certaines revues et à l'Académie des sciences.

## 3.1 Le vent et la production d'électricité. L'expérience du duc de Feltre

Comme on l'a vu, l'électricité a été considérée, dès le début des années 1880, comme un facteur de modernisation des forces naturelles, et en particulier du vent et des marées. En ce qui concerne le vent, son application semble alors si imminente que, sans qu'il y ait eu

de réalisations, les constructeurs de moulins à vent Schabaver et Beaume ont affiché, dans leurs prospectus publicitaires, cette possibilité pour leurs machines (De l'Angle Beaumanoir, 1889, p. 455). À la fin de la décennie, les expériences se multiplient dans le monde pour produire de l'électricité éolienne via des dynamos, stockée dans des accumulateurs. En France, celle qui est entreprise par Charles de Goyon, duc de Feltre, ancien député des Côtes du Nord, entre 1886 et 1889, est à peu près simultanée avec celles de l'ingénieur écossais James Blyth et de l'ingénieur et entrepreneur américain Charles Brush, en 1887, et précède de peu celles du professeur suédois Poul La Cour dans les années 1890. Elle est, comme les autres, très médiatisée en son temps, et aujourd'hui encore beaucoup se plaisent à tenir le duc de Feltre pour un « pionnier » de l'électricité éolienne. Cette expérience est aussi relativement isolée en France, tandis que, dans les années 1890, aux USA, certaines compagnies proposent de l'électricité d'origine éolienne et que, avec l'encouragement du gouvernement danois, La Cour met en œuvre des installations de distribution d'électricité éolienne dans des villages entiers (Righter, 1996).

En 1886, de Goyon décide de mettre en pratique le chargement accumulateurs électriques grâce à l'énergie éolienne, afin d'obtenir « le cheval-heure à meilleur marché dans un certain nombre de circonstances que le cheval-heure obtenu dans les mêmes circonstances par la vapeur » (De l'Angle Beaumanoir, 1889, p. 455). Il s'adjoint les services d'un ami, ingénieur des Arts et manufactures et noble lui aussi, Raoul de l'Angle-Beaumanoir. Ce dernier a en fait été le principal acteur des expérimentations, de Goyon pourvoyant les fonds nécessaires à ce projet. L'idée initiale du duc est de mettre en location des accumulateurs que des utilisateurs viendraient charger au gré de leurs besoins, répondant ainsi aux aspirations de stockage et de délocalisation d'une force naturelle (cf section 2.1). Constatant les difficultés de cette disposition, à cause de la lourdeur et de la fragilité des accumulateurs électriques, de l'Angle-Beaumanoir et de Goyon choisissent d'opter pour un usage localisé : l'éclairage, qui est alors la principale utilisation de l'électricité.

De l'Angle Beaumanoir multiplie les voyages en France pour étudier le régime du vent et identifier les emplacements favorables, choisir l'aéromoteur et les dynamos les plus adéquats. Il se rend également à plusieurs reprises en Angleterre pour y examiner les dynamos que proposent les constructeurs. Avec de Goyon, il profite de l'annonce d'une « exposition maritime et électrique » organisée au Havre en 1887 pour proposer au service des Phares et balises de réaliser leur expérimentation sur la lampe à arc d'un des phares électriques du Cap de la Hève, à Sainte-Adresse, près du Havre. Ils assurent que leur procédé est en mesure d'emmagasiner l'électricité nécessaire à deux nuits de fonctionnement, ce qui, grâce à un régime du vent favorable, serait suffisant pour que le phare fonctionne dans les conditions optimales. Cette demande est accueillie favorablement par Bourdelles, l'ingénieur en chef de ce Service, car celui-ci voit un grand intérêt à ce système qui permettrait d'éclairer les côtes à peu de frais. Ce choix est tout-à-fait symbolique puisque le phare de

la Hève est l'un des premiers en France à avoir été électrifié. En janvier 1887, Bourdelles charge les ingénieurs du Service maritime de Seine inférieure de prêter leur concours aux deux innovateurs pour la mise en place de l'installation, et de suivre leurs expériences [1] .

De l'Angle-Beaumanoir choisit un moulin à vent Halladay de douze mètres de diamètre (Pelissier, 1892a), importé des États-Unis par Schabaver qui y apporte quelques modifications. Il opte pour deux dynamos Brush, construites spécialement par l'antenne londonienne de la société américaine (Vigreux, 1887), productrice de matériel d'éclairage électrique (dynamos, batteries, lampes à arc). Rien ne prouve que de l'Angle-Beaumanoir ait été en contact avec Brush, il est en tout cas remarquable que Brush entreprenne parallèlement une expérience similaire à Cleveland. Les deux dynamos, à marche lente, sont adaptées à la vitesse de rotation du moulin à vent, et doivent chacune fonctionner automatiquement pour une plage de régime de vent donnée. L'ingénieur s'adjoint les services de Léon Vigreux, professeur à l'École centrale des arts et manufactures, chef du service Mécanique et électricité de l'Exposition universelle de 1889, pour éprouver, au Havre, en septembre et octobre 1887, le fonctionnement du couple de dynamos avec une machine à vapeur sous différents régimes. Ce test est jugé concluant. En avril 1889, le système est entièrement monté sur le phare (voir Figure 3.1) et, selon de l'Angle-Beaumanoir, les expériences en cours augurent « un succès complet de l'expérience ». Cependant, il est très sceptique sur les possibilités de multiplier ce type d'installations : ses mesures du régime du vent « dans la plupart des contrées industrielles » montrent que « les jours de chômage, même sur les sites les mieux situés, sont en nombre beaucoup plus considérable qu'on ne se l'imagine », et que « par suite, de telles installations exigeraient, pour des services réguliers, un nombre non moins considérable d'accumulateurs ». Ces accumulateurs sont encore trop coûteux. De l'Angle Beaumanoir conclut en affirmant que l'électricité éolienne ne deviendra envisageable que lorsque le prix des accumulateurs aura suffisamment baissé (De l'Angle Beaumanoir, 1889, p. 463).

L'installation est endommagée peu de temps après, suite à plusieurs accidents, et l'expérience est interrompue à cause du coût des réparations. Les ingénieurs du service des Phares et balises en concluent que l'éclairage des phares par l'électricité est impossible en raison du coût des accumulateurs [2].

Par la suite, le jugement se répand d'une trop grande cherté de cette solution pour l'éclairage électrique à cause du prix des accumulateurs. G. Pelissier, secrétaire de rédaction de le revue *L'éclairage électrique*, écrit ainsi en 1892 dans *La lumière électrique*, à propos de ce projet, mais aussi de ceux de Brush et de Blyth, que « ces sortes d'installations

1. AN F14 20832, p.d., Rapport de Bourdelles sur « L'utilisation du vent comme moteur pour la production d'éclairage électrique », 11/01/1887.

2. ANF1888, Rapport pour l'ingénieur en chef du service des Phares et balises « Moulin à vent à réglage automatique de M Huré », 22/08/1888.

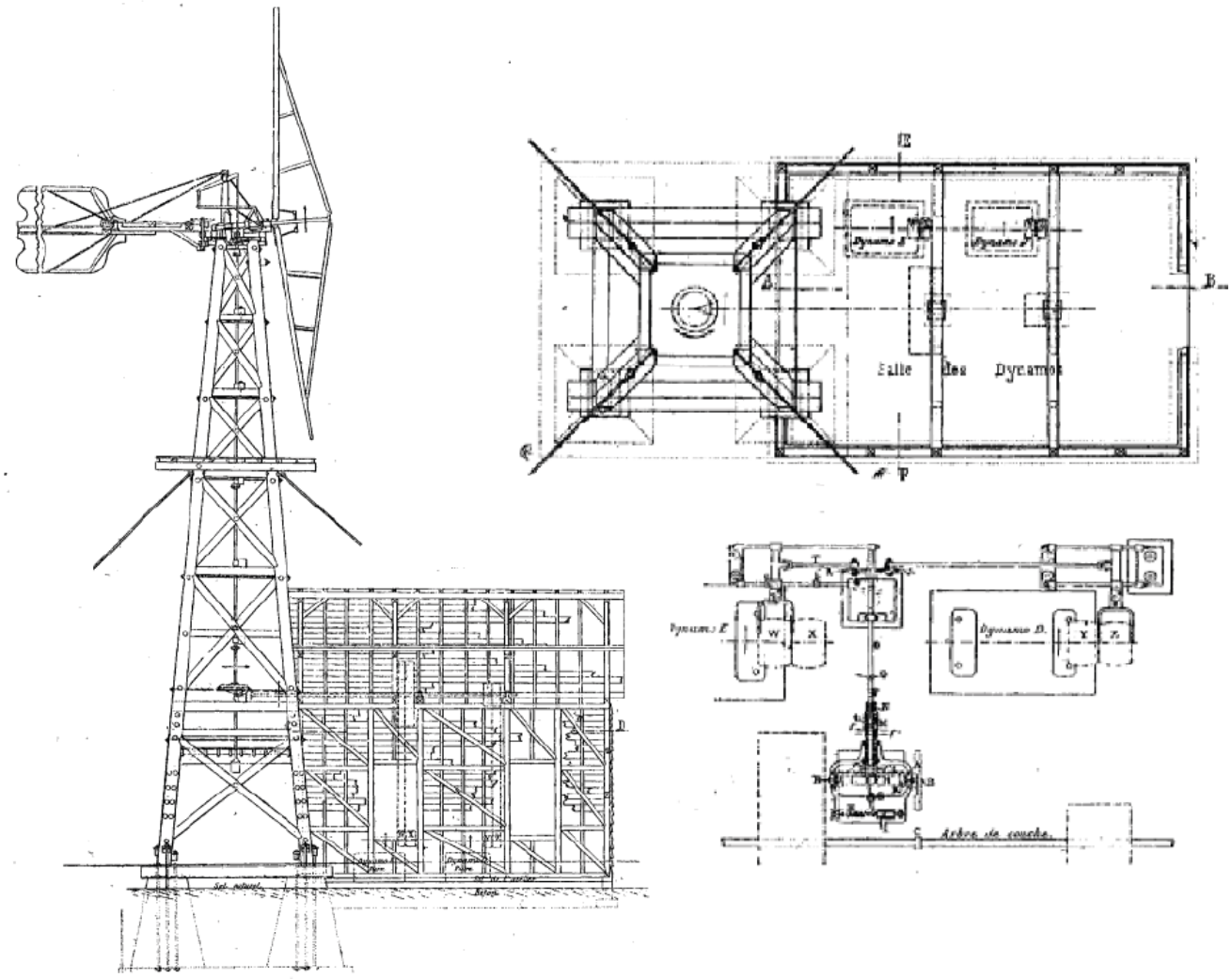



FIGURE 3.1 – Moulin à vent électrique du phare de la Hève

ne sont que des expériences très intéressantes, à coup sûr, mais que seuls peuvent tenter de riches particuliers et non des industriels » (PELISSIER, 1892a). Les revues font part des travaux étrangers, en considérant que cette technique pourrait, pourtant, alimenter en électricité les habitations et petites usines, isolées du réseau électrique en développement, pour l'éclairage et la force motrice (MOLLIN, 1908 ;DEBRÉ, 1911).

Cette tentative de mise en œuvre d'un convertisseur de forces naturelles produisant de l'électricité est intéressante à plusieurs niveaux. Elle illustre d'abord le fait que, à la fin des années 1880, si l'électricité est envisagée pour convertir l'énergie éolienne, le transport par fils électriques n'est pas une solution envisagée en raison de l'irrégularité du vent. Les ingénieurs choisissent l'accumulation électrique, et pensent pouvoir transporter la force motrice en déplaçant ces réservoirs de force. Le problème du poids de ces accumulateurs se pose et ne sera jamais résolu dans les années suivantes, contraignant à une utilisation locale de l'électricité produite, même si la force est emmagasinée. L'imaginaire de la société thermo-industrielle (extraire, stocker, transférer) n'est ici pas entièrement satisfait.

Il est aussi remarquable que toutes les composantes de l'expérience de De Feltre et De l'Angle Beaumanoir sont américaines. Plutôt que de questionner, à l'instar de EDGERTON et PESTRE, (1998), la pertinence d'une histoire nationale des techniques, on peut retenir les influences internationales réciproques, et, en particulier, le modèle américain, dans la diffusion des techniques (cf section 2.2).
Enfin, l'arrêt de l'expérience et les doutes quant à la pérennité de la solution proposée sont liés au prix et non à une impossibilité technique. Jusqu'aux années 1920, les installations françaises de production d'électricité éolienne sont très rares mais pas inexistantes. Elles sont réservées à une clientèle très aisée [3], encore plus que, d'une part, l'éclairage électrique par des moteurs à énergies fossiles individuels ou d'entreprises distributrices dont l'usage se répand, et d'autre part les moulins à vent eux-mêmes, coûteux à l'installation.

## 3.2 Les marées : une ressource proche de la houille blanche

De même que les chutes et les cours d'eau, les énergies marines que représentent les vagues, la houle et les marées sont des sources d'énergie hydraulique. Mais à l'inverse des vagues, les marées ont également été utilisées en France au moins depuis le XII^e^ siècle dans des moulins pour la mouture du grain ou le sciage du bois. Quelques dizaines de moulins à marées de petite puissance, munis de roues, sont encore utilisés à la fin du XIX^e^ siècle sur les côtes françaises - en particulier en Bretagne où l'amplitude des marées est importante et où les reliefs naturels sont propices à ce type d'aménagement (RIVALS, 2000, p. 45-49). Ces moulins sont installés dans des anfractuosités de côtes, où un barrage est établi pour constituer un réservoir rempli lors de la marée montante, et se vidant à marée descendante en actionnant une roue motrice. Cependant, de même que les moulins à vent dits traditionnels, ces installations sont, dans les publications scientifiques et techniques étudiées, chargées d'une rhétorique de désuétude, à cause de leur puissance relativement faible (ils ne dépassent pas quelques chevaux), des contraintes de leur localisation et de l'intermittence de leur fonctionnement.

En 1883, un ingénieur de l'École centrale, identifié comme C. de T., après avoir étudié un ensemble de moulins à marées dans le cadre de ses fonctions, conclut que

> « dans presque tous les cas, l'homme a peu aidé la nature. Les barrages sont mal construits et de peu d'étendue [...]. On comprend que le moteur doit être

3. La maison Chêne, a ainsi installé un moteur Hercule près de Corbeil, pour l'éclairage d'une villa et l'actionnement d'une motopompe électrique, de 1911 à 1919 ; le constructeur Hamm a mis en place un moulin à vent électrique au château de Lattainville (Oise), en 1912, arrêté pendant la guerre ; en 1920, l'installation du Comte de la Barre alimente quatre-vingt lampes depuis 1910 (E.-H. LÉMONON, 1920) .

> inactif pendant la dernière période de flux, et aussi pendant la première période de reflux [...]. De toutes ces causes, il résulte un chômage de quatre à six heures à chaque marée, soit de quatre à six mois par an. [...] J'ai déjà signalé la construction défectueuse des barrages, celle des moteurs est plus déplorable encore. C'est à peine si l'effet utile atteint 30 pour 100 et on comprend en les voyant que ces installations primitives n'étaient destinées qu'à suffire à une consommation locale d'autant moins exigeante que la communication la rendait plus restreinte (C De T, 1883). »

Or, les cours et des chutes d'eau ont, dans les années 1880, trouvé leur place comme source d'énergie de l'industrie, d'abord sous forme mécanique directe, puis, à la fin de la décennie, sous forme électrique. Aussi les discours des ingénieurs sur la modernisation de l'utilisation de l'énergie des marées sont-ils, à la fin du XIX^e^ siècle, très optimistes, particulièrement dans les années 1880. Dans un long article de synthèse sur tous les dispositifs d'utilisation des énergies marines inventés depuis les années 1860, un auteur de *La Lumière électrique* affirme ainsi que « le nombre de moteurs [marins] proposés en 1882, juste après l'Exposition d'électricité, en 1881, et au moment où les théories de M Marcel Deprez soulevaient un enthousiasme à peu près général, était double de celui des années précédentes » et qu'« en 1889, lors de l'Exposition universelle, la proportion était encore plus considérable » (Pelissier, 1892b, p. 301). Des inventeurs imaginent ainsi différents systèmes de barrages, plus importants que ceux des moulins à marées existants et qui, par le jeu de réservoirs alternativement remplis et vidés selon des cycles divers, permettent de produire une puissance plus régulière.

Entre 1882 et 1883, cinq articles et lettres se répondant les uns aux autres sont ainsi publiés dans *La Nature*, proposant des améliorations aux moulins à marées existants pour régulariser leur production, ou de nouveaux procédés d'utilisation de l'énergie des marées partiellement ou entièrement régularisées. L'énergie produite serait employée directement sur place comme force motrice dans les ports, pour produire de l'électricité pour l'éclairage des phares ou des docks, utilisée pour comprimer de l'air dans des réservoirs pour la manutention dans les ports, ou transportée via l'électricité dans les grandes villes les plus proches (Gobin, 1882 ; H, 1883 ; C. De T, 1883 ; D, 1883).

En 1890, deux ingénieurs des Ponts et chaussées, Diamant et Paul Decœur, voient leur projet de construction de barrages marémoteurs exposés dans le *Génie civil* (Richou, 1890 ; Paul Decoeur, 1890). Ils décrivent tous deux des systèmes de bassins se remplissant et se vidant en actionnant des turbines similaires à celles qui son utilisées pour la houille blanche. L'ambitieux projet de Paul Decœur, qui a également été présenté à l'Académie des sciences (P. Decoeur, 1890) et pour lequel il a pris un brevet, présente un caractère concret, malgré son absence de mise en pratique, puisqu'il s'inscrit

théoriquement dans les travaux d'endiguement de l'embouchure de la Seine planifiés par l'administration des Ponts et chaussées. Il envisage de profiter des réservoirs d'environ mille hectares formés entre la côte et les nouvelles digues pour mettre en place un système fonctionnant selon un cycle de son invention, connu par la suite sous le nom de « cycle Decœur ». Un barrage muni de turbines est construit transversalement à chaque nouveau réservoir, formant deux bassins contigus, dont l'un se remplit à marée montante, et l'autre se vide à marée descendante, actionnant à chaque fois des turbines dans un sens et dans l'autre. Decœur invente un modèle de turbine, dérivé des turbines de type Fourneyron communément utilisées les chutes d'eau, mais adapté au débit important des marées. Avec vingt turbines, son installation permet d'obtenir une puissance moyenne de six mille chevaux [4], utilisée directement sur place sous forme de force mécanique pour des industries comme la meunerie ou le traitement des minerais, ou sous forme d'électricité pour l'électrométallurgie, à l'instar des usines de montagne (cf Annexe A, qui reproduit le plan général du projet de Decœur, l'illustration du cycle et la turbine). Il vante l'intérêt économique se son projet, qui n'engagerait qu'une dépense supplémentaire de 1 800 000 francs aux 7 000 000 de francs projetés pour les digues, et permettant au Havre de devenir une « grande ville industrielle ». Comme tous les autres projets de ce type, cette idée est restée au stade théorique.

On voit donc que, comme pour le vent, l'électricité a été à la fin du XIXe s un stimulant pour l'activité inventive en ce qui concerne l'utilisation des marées, qui avait elle aussi été réalisée traditionnellement pour certaines activités manufacturières. Sa qualité d'énergie hydraulique régulière dans son intermittence en fait cependant une source d'énergie exploitable à l'instar de la houille blanche, contrairement au vent, mais aussi aux vagues et à la houle. C'est de ces dernières qu'il est maintenant question.

## 3.3 Les vagues : une ressource plus difficile à dompter que les marées

De nombreuses inventions visant à exploiter les vagues ont été également été proposées au XIXe s. Il s'agit de systèmes de flotteurs utilisant le mouvement vertical de l'eau (la houle), ou le mouvement horizontal de l'eau (vagues et courants) pour actionner des roues ou des palettes. Comme pour l'énergie éolienne, l'usage imaginé concerne surtout l'élévation de l'eau, mais aussi la production d'air comprimé pour l'éclairage des phares ou l'actionnement des sirènes, et enfin l'utilisation directe de la force motrice (Pelissier, 1892b). Effectivement, c'est du vent que ces mouvements sont issus, et les auteurs étudiés

4. À titre comparatif, une des premières grandes installations hydroélectriques au monde, celle du Niagara, achevée en 1895, avait une puissance d'environ 15 000 ch (Viollet, 2005, p. 147).

soulignent leur caractère irrégulier, imprévisible et « capricieux », expliquant la préférence des transformations sous forme de stockage. Dans les années 1880, plusieurs installations réussies aux États-Unis pour élever d'importants volumes d'eau par l'utilisation des vagues et courants marins sont relatées dans la presse scientifique et technique française. [5]

À part quelques expériences, rares ont été les applications pratiques de l'énergie des vagues et de la houle en France avant la première guerre mondiale [6]. Le seul exemple que j'en ai trouvé est celui d'un ingénieur, Édouard Bouchaud-Praceiq, qui aurait mis en place, par ses propres moyens, à l'embouchure de la Gironde, un système utilisant les vagues dans une colonne ascendante pour comprimer de l'air utilisé dans un aéromoteur actionnant une dynamo (voir Figure 3.2). Cet inventeur a pris trois brevets différents pour des systèmes utilisant des mouvements de masses d'eau, et semble avoir été un inventeur très prolifique, au vu du nombre de brevets que l'on trouve à son nom entre 1898 et 1924 : plus de soixante-dix en français, en anglais, en allemand et en danois, et sur des sujets aussi variés qu'un nouveau carburateur automobile, un produit antibuée pour pare-brise ou encore un « système d'avertisseur-protecteur contre les explosions spontanées des explosifs nitrés ». Certains périodiques décrivent son installation en 1910 et sont optimistes sur la faisabilité de ce système (La Revue scientifique, 1910 ; De Nansouty, 1910).

On parlera à nouveau dans la presse de ce prototype, toujours en fonctionnement, en 1921, dans une période d'intérêt accru pour les forces naturelles.

## 3.4 L'énergie solaire et l'« orientalisme technologique » aux colonies

Dans les années 1880, la chaleur solaire est couramment perçue comme la source de toutes les forces terrestres, naturelles et artificielles. Il était dès lors tentant de chercher à la capturer à la source pour suppléer à l'utilisation du charbon. À fin du XIX$^{e}$ s, plusieurs idées de nouvelles machines sont formulées en France pour son utilisation dans les pays

5. Par exemple, à Ocean Grove aux USA, une installation utilisant le mouvement du courant marin pour mouvoir des palettes plongées verticalement dans l'eau pour actionner une pompe élevant à 13 m de hauteur 181 720 L d'eau par jour pour le nettoyage des rues. Elle est relayée avec enthousiasme dans *La Lumière électrique* pour son faible coût comparativement à celui d'une machine à vapeur – mais avec un certain scepticisme vis-à-vis du caractère hygiénique de l'eau salée comme agent de nettoyage (La lumière électrique, 1889 ; La Nature, 1889).
Dans le même numéro de *La lumière électrique*, il est aussi question de l 'installation de M. Steet à San Francisco entre 1886 et 1889 élevant 340 000 L d'eau par jour à plus de 100 m de haut.
Un inventeur à New York aurait même choisi d'installer, pour sa propriété, un système de ce type, qui aurait été quatre fois moins coûteux à établir qu'un moulin à vent.
Voir aussi : De Nansouty, (1894d) ; Le Génie civil, (1897) ; Baclé, (1882).

6. D'après G. Pelissier, Le Dantec aurait mené dans les années 1880 des expériences visant à calculer le travail utile d'un flotteur pour l'élévation de l'eau (Pelissier, 1892b)

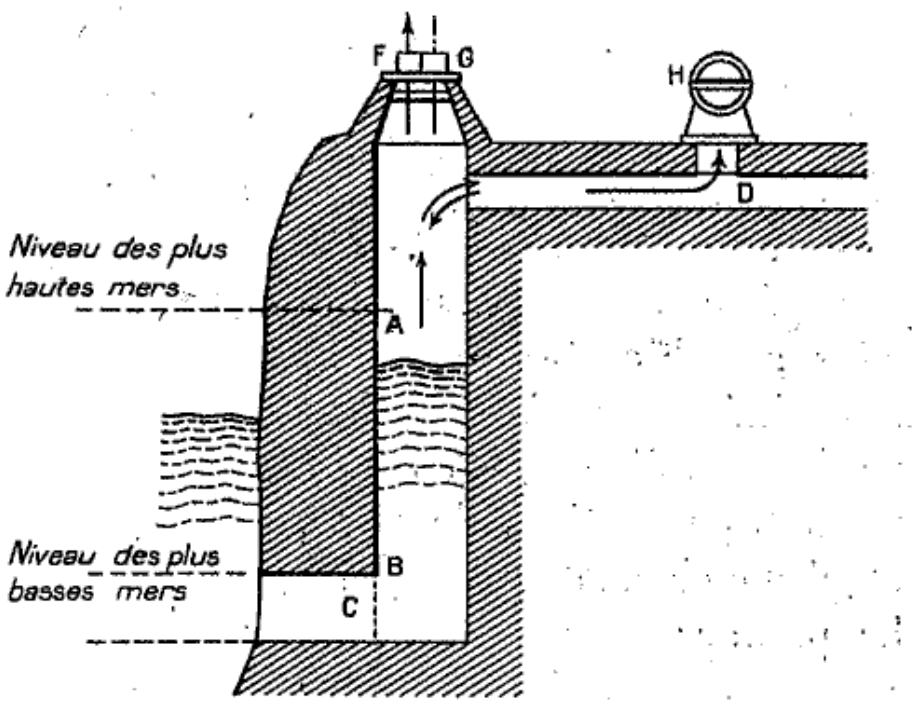



FIGURE 3.2 – Machine houlomotrice d'Édouard Bouchaud-Praceiq (1910-1921)

chauds, et en particulier, dans une période d'accélération de l'expansion coloniale, dans les colonies françaises d'Afrique où le soleil est abondant et le charbon encore plus rare qu'en métropole. Ces machines à vapeur utilisant, non pas le charbon, mais directement le soleil comme combustible, sont perçues comme les moteurs d'avenir de l'industrie des pays chauds et d'exploitation des colonies. Elles sont ainsi au cœur de « grandioses projets vis[a]nt à dominer et remodeler la nature », plusieurs fois relevés par des historiens, de chemin de fer transsaharien, récurrent pendant toutes la colonisation française d'Afrique, et de mer intérieure au Sahara à la fin du XIX$^{e}$ siècle( FREDJ et DE SUREMAIN, 2013, p. 270). Cependant, après les expériences prometteuses mais arrêtées en 1882 d'Augustin Mouchot, relayé par son associé Abel Pifre, peu de nouvelles mises en pratique ont été effectuées.

François Jarrige a décrit les étapes du projet de construction et de diffusion d'un appareil solaire par Mouchot, professeur de mathématiques, et son associé Abel Pifre, entre la fin des années 1850 et 1882 (JARRIGE, 2010). Sa machine est composée d'un miroir conique concentrant les rayons solaires sur une chaudière contenant l'eau à vaporiser. En période de crainte internationale d'une pénurie de charbon, puis, dans les années 1870, d'affirmation d'une politique impérialiste française, en particulier en Algérie, Mouchot est soutenu à plusieurs reprises par les pouvoirs publics [7] et le monde savant et industriel [8] sous

7. Atelier impérial de Meudon, Conseil Général d'Indre et Loire, ministère de l'Instruction publique.

8. Sociétés savantes : Académie des sciences, AFAS, Société des ingénieurs civils de France, SEIN ; ; organisation de l'Exposition universelle de 1878 ; revues scientifiques et techniques : *La Nature*, *Le Génie*

forme d'aide matérielle à l'expérimentation, de diffusion de ses idées ou de subventions. Le projet est arrêté dans les années 1880, selon Jarrige à cause de la concurrence nouvelle du pétrole et des moteurs à combustion interne, et de l'apparition de nouveaux procédés d'extraction du charbon. Après un avis négatif de deux commissions de l'énergie solaire établies à Montpellier et à Constantine, créées par le ministre des Travaux publics pour évaluer les possibilités industrielles de la machine solaire, l'énergie solaire aurait ainsi été « rejetée de l'espace savant et industriel ». Cette conclusion est cependant à nuancer, car, si les membres deux Commissions de l'énergie solaire formée par le ministre des Travaux publics ont en effet conclu que le procédé ne pouvait pas être appliqué de manière industrielle dans les pays tempérés, il ne se prononce pas sur sa valeur dans les pays chauds. De plus, si le soutien à l'énergie solaire est, à l'issue de l'aventure de Mouchot et Pifre, sans commune mesure avec celui que ces deux ingénieurs ont reçu, les machines solaires ne disparaissent pas totalement du monde savant et industriel.

De rares inventeurs conçoivent en effet d'autres moteurs solaires, reconnaissant la difficulté de construire de coûteux moteurs à concentration, et trouvent un relais pour leurs idées dans les revues scientifiques et techniques. Ils argumentent toujours sur l'utilité de leurs invention dans un esprit de valorisation des colonies : le soleil pourrait permettre la production de force motrice pour l'irrigation, les transports, et le refroidissement dans les régions arides. Il pourrait même fertiliser le désert, et justifier sa conquête pour y faire un nouveau foyer de civilisation.

En 1885, l'ingénieur Charles Tellier, réputé pour être l'inventeur d'un procédé frigorifique qui a connu d'importants débouchés industriels, envoie ainsi à l'Académie des sciences deux notes à propos d'une autre de ses inventions qu'il a expérimentée chez lui, à Auteuil (CRAS, 1885a ; CRAS, 1885b). La première note, qui donne le principe de l'appareil et les premiers résultats de l'expérience, est résumée dans les *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* et reproduite dans *La Nature* et *Le Génie civil* (Le Génie civil, 1885, Tellier, 1885). Il s'agit d'une machine solaire basée sur le même principe que sa machine frigorifique, à savoir sur la mise à profit de la basse température de vaporisation de certains fluides, en l'occurrence l'ammoniaque. Une solution de ce fluide est chauffée par le soleil dans des réservoirs plats constitués de deux feuilles de tôles rivetées, et la pression de la vapeur ainsi produite utilisée dans une pompe pour élever de l'eau, certainement en provenance d'un puits. Le cycle est bouclé par le refroidissement, grâce à l'eau pompée, de la solution d'ammoniaque qui se condense et revient à son point de départ. Dans la machine qu'il a construite par ses propres moyens, dix plaques de tôle de 4 $m^2$ sont placées sur le toit d'un poulailler (voir Figure 3.3), et élèvent, selon ce qu'affirme Tellier, en moyenne 1200 L d'eau par heure [9]. Cette machine semble avoir

*industriel, Revue des sociétés savantes de la France et de l'étranger...*

9. La seconde note aux *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* précise que le 10

fonctionné au moins d'août à novembre, peut-être de manière intermittente.

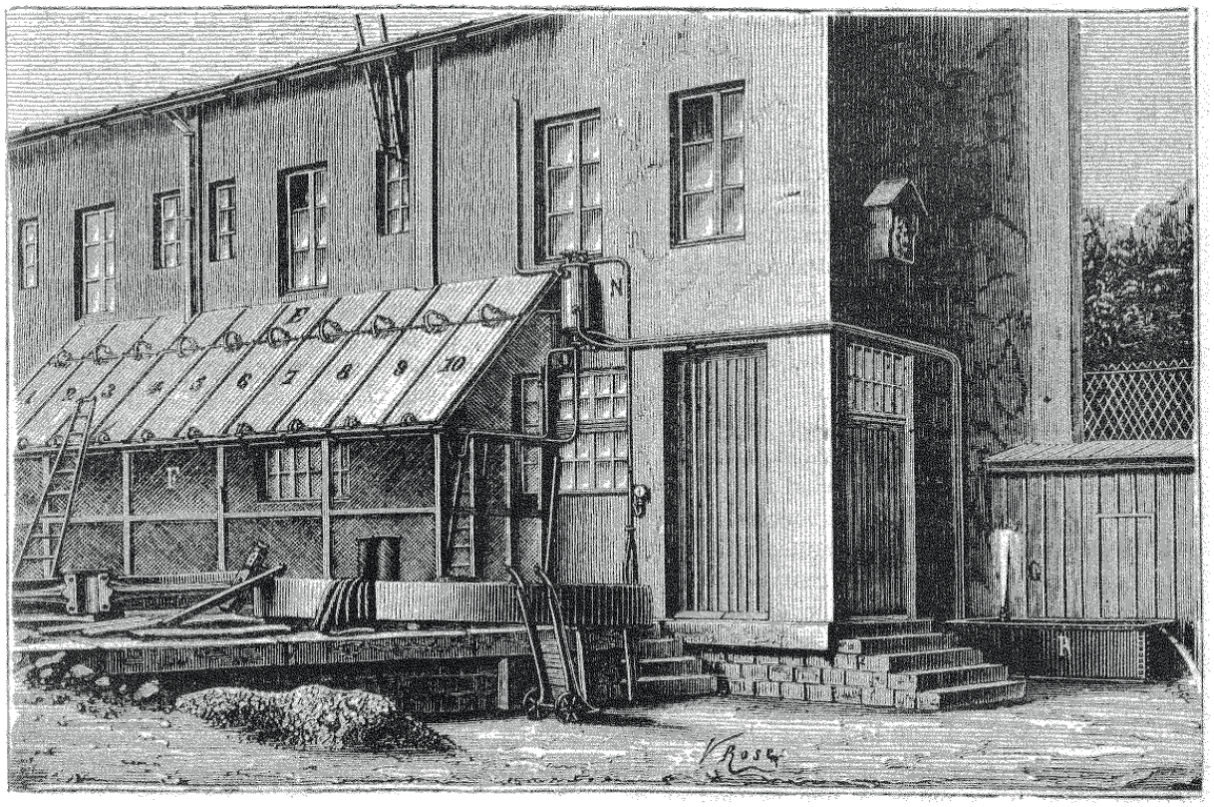


FIGURE 3.3 – Machine solaire de Tellier à Auteuil (1890)

Tellier considère avoir ainsi contourné le problème de la cherté et de la fragilité des miroirs paraboliques employés par Mouchot. En 1890, il expose son idée grandiose d'une « conquête pacifique de l'Afrique occidentale par le soleil » (TELLIER, 1890). Sa machine solaire permettrait de pomper l'eau du sous-sol dans les régions les plus arides pour l'alimentation domestique et la mise en culture d'espaces stériles, y compris au Sahara, désert ainsi « arrosé par le soleil » (TELLIER, 1890, p. 84). La « chaleur solaire emmagasinée » fournirait de la force motrice gratuitement pour de nouvelles infrastructures de transports de marchandises : dans les bateaux, mais aussi dans les locomotives du futur train transsaharien. Toutes les richesses, importées ou exportées, transiteraient par la force de ce nouveau moteur. Grâce à l'éclairage électrique solaire, « ce sera le soleil du jour, qui éclairera la nuit du désert ». L'Afrique occidentale deviendrait un espace de production de matières brutes qui seraient rapatriées en métropole pour y être transformées, mais aussi un espace de consommation des produits métropolitains en mal de marchés. Comme celui de Mouchot, le projet de Tellier s'inscrit donc clairement dans le projet colonial français, dont les protagonistes souhaitent que les colonies deviennent un lieu de production de matières premières et d'écoulement des produits manufacturés métropolitains (PERVILLÉ, 1993, p. 41). Le chemin de fer transsaharien, dont le projet, émanant des pouvoirs

novembre, la machine aurait élevé 2500 L d'eau à une hauteur de 6 m.

publics et d'entreprises, resurgit à de nombreuses reprises en France à partir des années 1870 et pendant toute sa période coloniale, doit en effet contribuer à mettre en valeur les colonies françaises d'Afrique (Lakroum, 1989). La machine solaire est donc présentée par Tellier comme élément de tout un système, dont le but est de conquérir et d'exploiter au maximum des territoires africains pour faire de la France une puissance économique à même de concurrencer les autres nations impérialistes.

Cependant, malgré l'appel de Tellier à la création, par des entrepreneurs, d'une « Société française du Centre occidental africain », « agent qui mettra l'Afrique occidentale en valeur » par la réalisation du vaste projet présenté par l'ingénieur, sa machine solaire ne connaît pas plus de mise en pratique en Afrique que le chemin de fer transsaharien lui-même.

À part cette initiative de Charles Tellier, on relève très peu de projets français sur la période 1880-1918 dans les revues scientifiques et techniques. En 1881, d'Arsonval expérimente depuis plus d'un an une machine thermique utilisant le même principe que celle de Tellier mais avec pour fluide caloporteur l'acide sulfureux à la place de l'ammoniaque (D'Arsonval, 1881b). En 1893, un certain Bonnet fait une communication à la SEIN, résumée dans *Le Génie civil*, sur un moteur solaire qu'il a breveté dix ans plus tôt et qui, au lieu d'un miroir conique comme celui de Mouchot, utilise, pour la concentration des rayons, un miroir paraboloïdique, qui serait plus efficace car cette forme a pour propriété de concentrer les rayons incidents en un seul point (Bulletin de la SEIN, 1893). Il en imagine également l'utilisation dans les « pays chauds ». En 1908, Jean Kuntziger, ingénieur électricien belge, conçoit une « machine à vapeur froide », dont le coût de fonctionnement est lié non pas à la source chaude mais à la source froide, obtenue grâce à un cycle thermodynamique alimenté par la chaleur solaire. Son idée est reproduite dans le *Bulletin de la société des ingénieurs civils de France* en 1906 et *La Houille blanche* en 1908 comme intéressante vu le développement en cours de la production industrielle du nitrate d'ammonium (Kuntziger, 1908). La même année, Hyppolyte Dessoliers, ingénieur des Arts et manufactures et viticulteur en Algérie, prend un brevet pour son système, qu'il nomme « îlot pluvigène », et qui vise à utiliser le rayonnement solaire pour provoquer des pluies dans les zones désertiques d'Afrique (Dessoliers, 1908). L'idée de Dessoliers consiste ainsi à fertiliser l'ensemble des colonies françaises d'Afrique pour permettre la culture, et par là l'occupation et l'exploitation de ces terres.

Les travaux effectués en Amérique sont quant à eux largement diffusés et commentés favorablement pour les économies de charbon que les machines solaires permettraient [10]. Celui de l'ingénieur Frank Shuman, créateur de la Sun Power Company, a été le plus

10. Selon Frank T. Kryza, Ericsson et Shuman ont d'ailleurs été influencés par les expériences de Mouchot, Pifre et Tellier - de la même manière que Tellier a lu avec attention les études de Mouchot, Pifre et Ericsson (Kryza, 2003, p. 147 ; 228).

suivi : il aboutit en 1913 à une installation de pompage élevant à 10 m près de 23 000 L d'eau/min [11]. En 1912, *La Nature*, conclut des expériences de Shuman qu'« il semble [...] qu'il puisse y avoir pour le moteur solaire un avenir intéressant » et qu'« [o]n ne saurait que se réjouir de voir triompher ainsi, aux pays du Soleil, des moteurs sans fumées ». Ceux-ci pourraient en outre « bien accessoirement rafraîchir un peu les tropiques : ce dont nul en somme ne se plaindrait » (La Nature, 1911a). John Ericsson, Américain d'origine suédoise, a également beaucoup d'écho dans la presse française. Il expérimente plusieurs moteurs solaires à concentration de 1869 à 1889, dont un qui fournit de l'électricité pour l'éclairage pendant douze ans [12].

Comme l'a relevé Sophie Pehlivanian (Pehlivanian, 2014, p. 571-578), l'imaginaire associé à l'énergie solaire en France a dépassé les cercles scientifiques et techniques dans les années 1880, puisqu'on y trouve trois romans d'anticipation consacrés à l'exploitation industrielle de l'énergie solaire. Le premier, intitulé *Roman d'un roman de soleil* (Mallat de Basillan, 1885), raconte l'histoire de Samuel Gérard, un ouvrier qui devient ingénieur. Formé par un ingénieur des Arts et manufactures passionné de machines solaires, il finit par fonder une « ville solaire » sur l'île de Porquerolles. Dans cette « colonie solaire », la seule source d'énergie utilisée est la chaleur solaire, qui permet de s'affranchir de la houille en voie d'épuisement. Le soleil sert à actionner les moteurs des usines, à irriguer des champs et jardins, grâce à des machines semblables à celle de Mouchot et Pifre, mais aussi à toutes les activités quotidiennes comme la cuisine ou le chauffage de l'eau.
Le second, intitulé *La Babylone électrique* (Bleunard, 1888), est plus explicitement porté par un imaginaire colonisateur. Il y est question d'un ingénieur portant son concours à une entreprise de conquête de la Mésopotamie par des lords, freinés par le manque de combustible disponible sur place. Le procédé que le héros choisit d'installer est très intéressant du point de vue de l'imaginaire technicien des années 1880, puisqu'il décide de produire de l'électricité solaire, et ce par deux moyens, thermodynamique, avec une machine Mouchot, et thermo-électrique, avec une « pile thermo-solaire ». L'électricité produite est ensuite stockée « dans d'immenses réservoirs » (Bleunard, 1888, p. 7-8) [13] et distribuée dans la ville. On retrouve dans cette projection l'importance du transport et du stockage des forces naturelles, ainsi que le rôle donné à l'électricité pour résoudre ces deux problèmes. Je n'ai cependant trouvé sur cette période aucun projet technique visant à produire de l'électricité solaire.

11. Cet ingénieur entrepreneur teste plusieurs pompes solaires à partir de 1907 avant d'installer cette station de pompage à Meadi (Égypte).

12. À propos de tous les travaux américains, voir les numéros suivants de *La Nature* et *Le Génie civil* : *La Nature* : 05/04/1884, p. 289-290 ; 26/05/1888, p. 415 ; 08/06/1901, p. 30 ; 03/01/1903, p. 78 ; 01/08/1903, p. 143 ; 03/03/1906,p. 207 ; 03/06/1908, p. 27 ; 04/11/1911, p. 366-368 ; 30/12/1911 (supplément), p. 34 ; 05/10/1912, p. 145 ; 22/03/1913, p. 121.

*Le Génie civil* : 05/10/1912, p. 312 ; 24/07/1909, p. 254-255 ; 08/04/1911, p. 488 ; 05/10/1912, p. 312 ; 04/11/1911, p. 13-14 ; 18/01/1913, p. 239 ; 11/07/1914, p. 227.

13. cité par Pehlivanian, (2014, p. 575).

Dans le troisième roman, intitulé *Les exilés de la Terre* (Laurie, 1888), des industriels entreprennent de mettre en valeur la lune en y recherchant des ressources minérales. Ils souhaitent construire un aimant géant dans le Soudan, qui leur permettrait de rapprocher la lune de la terre. Pour ce faire, ils ont besoin de la pyrite du sous-sol, mais le combustible leur manque : ils décident donc de faire appel à la machine solaire de Mouchot. Cet exemple est la manifestation particulièrement ambitieuse d'une volonté de conquête et de mise en valeur de nouveaux territoires.
Ces trois romans présentent des points communs intéressants : les héros sont tous ingénieurs ; grâce à une force naturelle, l'énergie solaire, ils contribuent à développer l'activité agricole et/industrielle dans des zones où elles n'existent pas encore. Ils mettent en valeur des ressources inutilisées industriellement et/ou fertilisent des zones considérées comme stériles, et légitiment ainsi la colonisation de des territoires.

On retrouve dans l'imaginaire technicien de ces quelques projets fictifs ou réels, et, pour ces derniers, tous inaboutis, l'idéal de « domination de la nature et [d']aménagement de l'espace », ainsi que le devoir moral de mise en valeur des terres que les pays colonisateurs portaient pour justifier la conquête de territoires (Fredj et De Suremain, 2013, p. 269-270). Ils révèlent en outre la volonté d'utiliser « la science », en l'occurrence la science de l'ingénieur, « pour modeler le monde et le posséder », que Claire Fredj et Marie-Albane de Suremain ont nommée « prométhéisme » (Fredj et De Suremain, 2013, p. 259).

# Conclusion Partie 1

Entre 1880 et la première guerre mondiale, les discours d'acteurs du monde scientifique et industriel français révèlent une activité inventive pour de nouveaux convertisseurs utilisant les forces naturelles (vent, marées, vagues, soleil, gradients naturels de température), avec des applications concrètes éparses et peu nombreuses. Les périodiques et les sociétés savantes diffusent des idées d'inventeurs français qui ne donnent majoritairement pas de résultats pratiques. Les articles sur des projets français sont plus nombreux à la fin du XIX$^{e}$ siècle, après quoi ils laissent place à des informations sur les expériences étrangères. Après l'absence de mise en application de l'utilisation des marées qui paraissait si prometteuse, l'échec des projets de Mouchot et Tellier pour l'utilisation de l'énergie solaire, et de de l'Angle Beaumanoir et de Feltre pour la production d'électricité éolienne, les chroniqueurs considèrent toujours l'utilisation des forces naturelles comme intéressante, mais pour l'avenir. Certains inventeurs trouvent le moyen de donner une réalisation à leurs conceptions en construisant des prototypes et en effectuant des essais, grâce à leurs propres moyens . Les seules entreprises impliquées sont les constructeurs de moteurs à vent, qui proposent des modèles servant essentiellement au pompage, de leur propre conception ou inspirés des machines américaines auxquelles ils apportent quelques perfectionnements.

L'imaginaire technicien exprimé dans les discours est orienté vers la conquête de sources d'énergie illimitées, encore inutilisées, mais pour lesquelles un avenir prometteur est envisagé. Les inventeurs et promoteurs de convertisseurs innovants louent leur abondance qui pourrait assurer une production, industrielle et agricole, tout aussi généreuse et permettrait à la France de pallier à son manque de charbon et de préparer l'épuisement à venir de ce combustible. On retrouve ainsi le « nouvel imaginaire productiviste du travail » d'une « nature désormais intrinsèquement productive et laborieuse, une nature-moteur » décrite par Fureix et Jarrige, (2015) citant Michel Blay. La nature est conçue comme une immense réserve d'énergies à exploiter, rappelant une des caractéristiques de la pensée de l'époque moderne selon laquelle le « territoire est reconceptualisé comme un espace devant être mis en valeur, en même temps que de nombreux éléments de la nature sont repensés en tant que « ressources » devant être exploitées »
(Fressoz, Graber et al., 2014, p. 21). En ce qui concerne l'énergie solaire, cet esprit

prométhéen est soutenu par le projet colonial qui prend un nouvel essor à la fin du XIX^e siècle. Quelques inventeurs imaginent ainsi emmagasiner la chaleur solaire et l'exploiter sur de vastes territoires pour faire des régions arides d'Afrique des lieux florissants de production de matières premières agricoles.

Dans tous les cas, les qualités associées à l'exploitation du charbon dans la machine à vapeur exercent une grande influence sur la conception des nouveaux convertisseurs et la valeur accordée au couple machine-source d'énergie. Les aspects de concentration, de régularité et de transportabilité, qui représentent les atouts principaux de la houille noire pour des applications industrielles, sont la mesure de la qualité d'une source d'énergie. L'imaginaire de la « civilisation thermo-industrielle », induit par la machine à vapeur et le nouveau concept d'énergie, et les caractéristiques du système énergétique dominé par le charbon, sont donc tout-à-fait opérants dans la manière que les ingénieurs et inventeurs étudiés dans cette partie ont eue de concevoir le couple convertisseur-force naturelle.

Une multiplicité de solutions est proposée pour régulariser et/ou stocker et/ou transporter les forces naturelles. Elles dépendent à la fois de la nature de la source d'énergie, et des convertisseurs ou techniques en œuvre dans le système technique (machines à vapeur, mais aussi barrages hydroélectriques, locomotives à air comprimé, machines frigorifiques...) . Parmi ces solutions, c'est en premier lieu, et le plus fréquemment, à l'électricité que les inventeurs ont eu recours. En effet, l'activité inventive est stimulée par les nouvelles applications de l'électricité, à savoir la dynamo qui permet de transformer toute forme d'énergie mécanique en énergie électrique, et le transport à distance de l'électricité par câbles conducteurs, avec les premières réussites du transport de l'énergie hydroélectrique. Des inventeurs envisagent une conversion similaire des forces naturelles pour produire de l'électricité, et tout particulièrement, à partir du vent et des marées, dont l'usage ancestral serait ainsi modernisé, à la manière de la houille blanche. Aussi, c'est en partie parce que la houille blanche est plus facilement régularisable que les autres forces naturelles et que, pour cette raison, l'électricité a permis dès les années 1880 de la transporter, qu'elle trouve une place parmi les sources d'énergie modernes de l'industrie. Parmi les autres forces naturelles, les marées, qui étaient depuis des siècles utilisées dans certaines petites manufactures littorales, sont aussi celles qui semblent ressembler le plus à la houille blanche, ce qui explique leur position de choix dans les discours techniciens de la fin du XIX^e. L'énergie éolienne, elle aussi utilisée depuis des siècles, présente quant à elle une grande irrégularité qui complique son asservissement à des fins industrielles. Associés à la dynamo, les accumulateurs électriques font entrevoir la possibilité de la concentrer et de l'utiliser à volonté. Mais l'expérience de Charles de Goyon et Raoul de l'Angle Beaumanoir, et les quelques installations qui s'ensuivent au tout début du XX^e siècle, laissent dans les esprits l'idée que l'électricité éolienne est une solution plus chère que l'électricité d'origine hydraulique ou charbonnière.

À la fin du XIX^e siècle, les inventeurs proposent plusieurs manières d'utiliser l'électricité comme vecteur de modernisation en fonction de la nature des forces naturelles (réseau par câble pour les marées, accumulateurs comme réservoirs de force pour le vent). L'électricité n'est pas le seul nouveau moyen envisagé pour l'exploitation des forces naturelles : c'est aussi le cas de l'air comprimé, éprouvé de plus longue date pour le transport à distance de la force motrice. L'accumulation hydraulique, mais aussi l'utilisation directe, sont par ailleurs toujours envisagées, et ne sont pas forcément considérées comme archaïques. En témoignent les milliers de moteurs à vent dits « modernes » pour le pompage de l'eau, installés sur la période (1880-1918). Plusieurs éléments permettent ainsi de relativiser le déclin de l'emploi des moteurs à vent à la fin du XIX^e siècle : d'une part, dans les usages, et ce malgré leur net recul dans le bilan énergétique global, avec le succès de ces machines dans les zones rurales où elles sont parfois considérées comme plus avantageuses que les autres moteurs ; d'autre part, dans les discours, car elles sont présentées comme modernes par certains protagonistes du progrès scientifique et technique dans les périodiques et les expositions. En outre, si l'électricité et l'air comprimé sont adaptés à la transformation de la force motrice, ils ne le sont pas pour la chaleur. Pour la chaleur solaire, les inventeurs cherchent à faire directement du soleil le « combustible » de nouveaux modèles de machines à vapeur. La pompe solaire de Tellier est ainsi inspirée de sa propre invention, la machine frigorifique à compression, et fonctionne, comme la machine à vapeur, selon un cycle thermodynamique où la source chaude est de l'eau vaporisée par une source primaire.

Quoi qu'il en soit, jusque 1919, aucune institution publique ne se préoccupe spécifiquement de forces naturelles, même si les questions juridiques concernant l'utilisation énergétique des chutes d'eau sont abordées lors du congrès de la Houille blanche en 1902 (Morsel, 1991a, p. 522-523), et si l'Administration centrale effectue un inventaire des ressources hydrauliques, à partir de la création, en 1903, d'un Service hydrographique au ministère de l'Agriculture (Morsel, 1991b, p. 594). Les usages énergétiques des ressources hydrauliques sont ainsi traités au même titre que leurs autres usages par l'Administration des Travaux publics et celle de l'Agriculture qui, depuis 1881, instruisent les demandes relatives à tous les aménagements hydrauliques du territoire national (Varaschin, 1998). Aussi, la première guerre mondiale clôt-elle cette période caractérisée par des initiatives éparses, puisqu'on y voit le ministère des Travaux publics prendre en main à la fois la construction d'un réseau électrique interconnecté, et l'utilisation des forces naturelles que constituent les énergies marines et l'énergie des chutes d'eau, première marque d'une politique énergétique des forces naturelles au niveau national.

# Deuxième partie

# « Arc-en-ciel des houilles » et politique énergétique nationale (1919-1939)

# Introduction

L'issue de la première guerre mondiale est favorable à l'exploitation des forces naturelles. Dans une situation de pénurie ressentie en combustibles fossiles, de prise en main du système hydro-électrique par l'État, d'encouragement à l'innovation et d'injonction à la mise en valeur des colonies, l'ensemble des forces naturelles est à nouveau très étudié et donne lieu à de nombreuses initiatives en France. De nouveaux acteurs apparaissent (institutions publiques nationales, métropolitaines et coloniales, entreprises du secteur de l'électricité), et l'imaginaire de l'électricité s'affirme comme hégémonique dans l'activité inventive. Pour commencer, cette section introductive présente les éléments de contexte déterminants de cette période, avant d'annoncer le plan de la Partie II. Elle explicite d'abord le contexte énergétique, puis un nouveau tournant dans la politique impériale française, et, enfin, la mise en place d'une institution nationale de recherche, l'Office national des recherches scientifiques et industrielles et des inventions (ONRSI).

## Contexte énergétique métropolitain

### Pénurie de guerre et politique énergétique nationale : électrification et houille blanche

La pénurie en énergie et la dépendance aux importations étrangères lors de la première guerre mondiale mène l'État français à une intervention accrue dans le domaine énergétique. En effet, le besoin d'une mobilisation de l'énergie a fait ressortir la faiblesse de la France en termes de ressources charbonnières : alors que la production est diminuée de moitié, les importations le sont aussi dans la même proportion. Cette position de dépendance est aggravée à la sortie du conflit par l'état des principales houillères et infrastructures de distribution du charbon, qui ont été dévastées par l'avancée des troupes allemandes dans le Nord et le Pas-de-Calais [14]. La reconstruction de ces infrastructures

14. Les troupes allemandes « détruisent une centaine de sièges, des matériels, des voies de chemin de fer (Chélini, 2009, p. 112) ».

prend plusieurs années (Chélini, 2009, p. 112). En outre, le pétrole s'est révélé comme une ressource cruciale pour la victoire du camp français, mais il n'y en a pas en métropole ni dans les colonies. De multiples mesures sont prises au niveau national pour limiter la consommation de charbon et de pétrole étrangers : utilisation plus efficace du combustible d'une part [15], augmentation des disponibilités nationales d'autre part.

L'implication accrue de l'État dans le domaine énergétique passe par une prise en main du développement de l'utilisation de la houille blanche, et du secteur électrique qui s'y rattache. En effet, la houille blanche a acquis auprès des industriels et des pouvoirs publics l'image d'une ressource nationale décisive. Quant à l'électricité, elle est devenue une « figure plus combative de l'industrie dont l'utilité n'est plus contestée » (Lévy-Leboyer, 1994b, p. 29-30). Par des mesures juridiques et une participation financière (avances et subventions aux entreprises concessionnaires), l'État s'approprie l'énergie hydraulique en tant que ressource, encourage la construction par les sociétés privées d'un réseau électrique national interconnecté, et incite à un approvisionnement maximal en hydroélectricité (Lévy-Leboyer, 1994b, p. 46 ; Varaschin, 2009a, p. 63). Cette action législative et réglementaire a pour but de « contrôler l'accès au secteur » (Varaschin, 2009a, p. 63) et de « favoriser, au moment de la relève, l'équipement du pays à l'aide de l'initiative privée » (Lévy-Leboyer, 1994b, p. 46). Elle tend à renforcer le pouvoir central dans la mise en place et la gestion des centrales hydroélectriques et du réseau électrique (avec une forte présence du ministère des Travaux publics), à mettre de côté les collectivités locales, et à faciliter la création de groupes puissants de production et de distribution à caractère monopolistique (Varaschin, 2009a, p. 65). On peut ainsi parler d'une politique publique de l'énergie hydraulique et du secteur électrique, une politique publique étant entendue comme « interventions d'une autorité investie de puissance publique et de légitimité gouvernementale sur un domaine spécifique de la société ou du territoire » (Thoening, 2010). De manière plus large, l'organisation au niveau national de l'approvisionnement en énergie peut être qualifié de « politique énergétique ».

Tout comme les mines, l'énergie hydraulique fait désormais partie du domaine public en tant que telle, et non plus comme un usage parmi d'autres des eaux nationales, et en totalité, alors qu'une partie, les cours d'eau ni navigables ni flottables, relevait avant du droit d'eau privé (Lévy-Leboyer, 1994b, p. 44-46). Ainsi, la loi du 16 octobre 1919 donne un statut précis à l'énergie hydraulique, sous forme de marées, de chutes d'eau de montagnes ou de rivières et cours d'eau [16]. L'aménagement de toute chute d'eau doit désormais faire

15. La création d'une Commission d'utilisation des combustibles au ministère des Travaux publics par le décret du 14 mars 1920 doit permettre de réaliser des économies de carburant dans l'industrie. Cette Commission a publié dix rapports dix rapports sur le sujet dans le *Bulletin de la SEIN* entre 1921 et 1923 (Bulletin de la SEIN, 1921).

16. La loi est édictée en ces termes : « Nul ne peut disposer de l'énergie des marées, des lacs et des cours d'eau, quel que soit leur classement, sans une concession ou une autorisation de l'État. » D'après le compte-rendu du débat parlementaire du 4 juin 1919 à propos de cette loi, il semble que la mention

l'objet d'une demande de concession, et une déclaration d'utilité publique rend possible l'expropriation des propriétaires riverains, contre une indemnisation. De nouvelles institutions spécifiquement dédiés à la houille blanche sont établies. Un Comité d'études et de recherches scientifiques pour l'aménagement et l'utilisation des forces hydrauliques est ainsi créé au sein du ministre des Travaux publics le 10 janvier 1919. Constitué d'industriels du secteur de l'électricité et de représentants des différents ministères, il est chargé de « préparer, provoquer et coordonner les études et recherches entreprises par des Instituts techniques et les industriels s'intéressant au développement des forces hydrauliques en France » (Cels, 1919, p. 63). En 1920, le ministère des Travaux publics crée un Comité central des forces hydrauliques, constitué de représentants de l'industrie en lien avec l'énergie hydraulique, l'agriculture et la navigation, de représentants de l'Administration et de sénateurs afin « d'émettre un avis sur toutes les demandes de concession et de veiller à l'harmonisation des projets »(Lévy-Leboyer, 1994b, p. 46). Pour l'électricité, une série de lois[17] facilite le regroupement d'entreprises productrices et distributrices dans une même région, unifie les tarifs de l'électricité, et favorise la construction des réseaux à haute tension et l'interconnexion (Varaschin, 2009a).

Cette politique a de fortes incidences sur la construction du système électrique français. Elle mène à la construction de réseaux interconnectés régionaux puis interrégionaux, basés sur la technologie des lignes à haute tension. Celles-ci desservent quatre cinquièmes du territoire en 1946 (Bouneau, 1994b, p. 777) — l'interconnexion nationale n'aura lieu qu'après la seconde guerre mondiale, avec la création d'EDF. L'équipement hydroélectrique sur les rivières et cours d'eau se développe considérablement. Ce réseau relève d'une vision géographique de la complémentarité des ressources énergétiques disponibles par les acteurs de l'aménagement électrique (ingénieurs des Ponts et chaussées associés au ministère des Travaux publics, entreprises concessionnaires) : houille noire dans le Nord-Est, houille blanche dans le Sud, à l'origine d'une « mystique de l'interconnexion qui anime à cette époque les responsables de l'économie électrique française (Bouneau, 1994b, p. 777) »[18]. De plus en plus, il est le fait de puissants groupes. Ce mouvement de concentration, qui s'était amorcé avant la guerre et fait suite à une dispersion des entreprises et des réseaux, est ainsi renforcé (Varaschin, 2009a, p. 63).

L'électricité pénètre de plus en plus la société française malgré de fortes disparités

des marées dans cette loi soit due au député de l'Aveyron de Castelnau, qui, proposant un contre-projet de loi, la faisait apparaître, suggestion qui a semblé judicieuse aux membres de la Chambre des députés (JORF, 1919, p. 2506).

17. Lois du 19 juillet 1922, du 27 février 1925, du 16 juillet et du 30 octobre 1935, du 17 juin 1938 et du 13 août 1938.

18. Émile Genissieu, ingénieur en chef du service des Forces hydrauliques et des distributions d'énergie électrique et un des plus importants organisateurs de la politique énergétique nationale, a ainsi affirmé que « la France est par excellence le pays de l'interconnexion » en raison de cette complémentarité (Bouneau, 1994b, p. 777).

géographiques : espace domestique (en particulier, par l'éclairage électrique, autrefois un luxe) (Beltran et P. Carré, 2016), monde rural, où vit encore la majorité de la population (la moitié en 1928) et d'où elle était jusqu'alors presque absente [19]. Ses usages se multiplient, quoiqu'ils restent majoritairement industriels et urbains, ainsi que la consommation annuelle nationale : entre 1920 et 1930, elle passe de 3.5 milliards de kWh à 17.2 milliards de kWh (Woronoff, 1994, p. 382). Cependant, certaines zones restent à l'écart des réseaux d'interconnexion : « la Bretagne, la Normandie, et la Champagne à cause de leur éloignement des sources hydrauliques et de la faible densité de leur consommation potentielle »(Bouneau, 1994a, p. 817).

L'approvisionnement en houille blanche, et la mise à disposition de l'énergie électrique, sont ainsi érigés en mission d'intérêt général, encadrée par des institutions publiques de l'État (Stahl, 1992). Ces acteurs, associés à leurs partenaires industriels qui tendent à se concentrer en sociétés puissantes, construisent le système électrique sous la forme d'un réseau électrique national interconnecté, approvisionné par des sources d'énergie géographiquement complémentaires, et qui maille l'ensemble du territoire.

## Un charbon encore dominant dans le bilan énergétique national

Il faut cependant relativiser la place de l'électricité dans la consommation totale d'énergie. Le tableau de Lévy-Leboyer, (1994b, p. 14) (Figure 3.4), qui représente le bilan énergétique de la France entre 1920 et 1946, permet d'appréhender cette évolution globale [20].

Elle montre tout d'abord une consommation totale d'énergie doublée entre 1920 et 1930 (32 tep sur 60 tep), puis, signe de la crise financière touchant particulièrement l'industrie, décroissant entre 1930 et 1935 de 60 Mtep à 51 Mtep, avant de ré-augmenter à partir de 1935. En période de réarmement, à partir de 1937, la production nationale, que ce soit d'électricité, de charbon ou de pétrole, est augmentée, tandis que les importations diminuent.

La production totale d'électricité croît considérablement, puisqu'elle est multipliée par 5 entre 1920 et 1938, en passant par une phase de ralentissement voire de légère diminution entre 1930 et 1937. La crise financière touche en effet le secteur de l'électricité, qui se retrouve en situation de surproduction en raison d'une clientèle qui reste essentiellement

19. En 1919, 20% des communes françaises sont desservies par le réseau électrique et ce sont toutes des villes. L'accès à l'électricité devient synonyme de modernité (Beltran et P. Carré, 2016). En 1946, 97% des communes sont desservies (Berthonnet, 2003, p. 202-203)

20. Il est remarquable que l'unité utilisée pour ce bilan est le tep, montrant l'hégémonie qu'a gagnée le pétrole au moment de l'élaboration de ce bilan énergétique rétrospectif. En effet, au vu de la place prépondérante du charbon dans ce bilan, le tec a beaucoup plus de sens pour le contexte de l'époque.

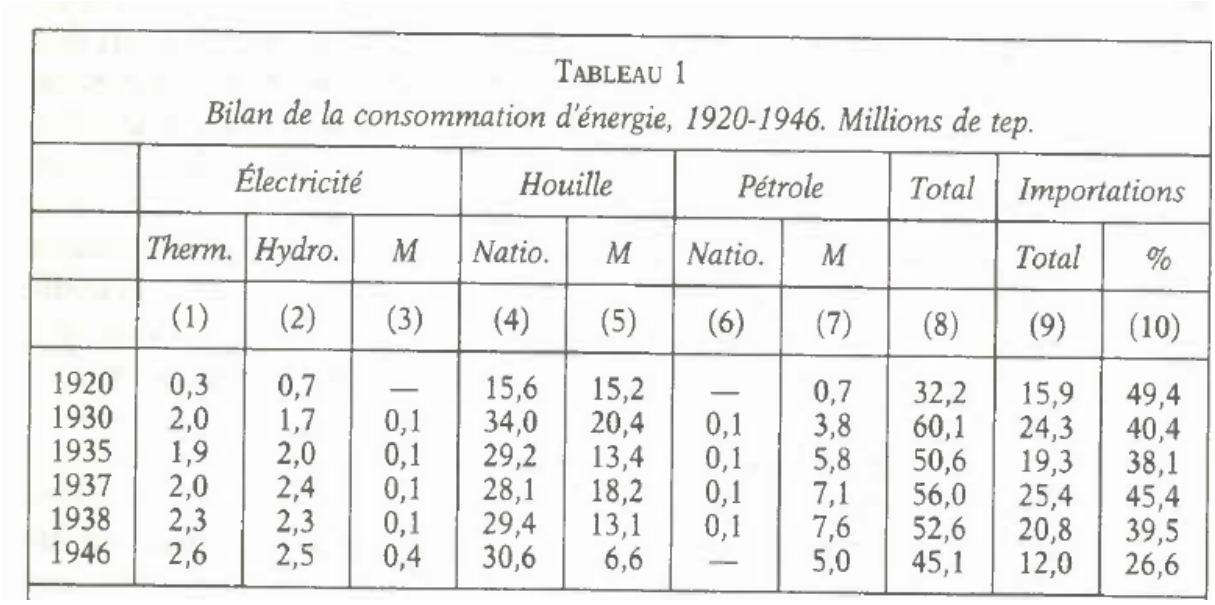


TABLEAU 1
*Bilan de la consommation d'énergie, 1920-1946. Millions de tep.*

| | *Électricité* | | | *Houille* | | *Pétrole* | | *Total* | *Importations* | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | *Therm.* | *Hydro.* | *M* | *Natio.* | *M* | *Natio.* | *M* | | *Total* | *%* |
| | (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (9) | (10) |
| 1920 | 0,3 | 0,7 | — | 15,6 | 15,2 | — | 0,7 | 32,2 | 15,9 | 49,4 |
| 1930 | 2,0 | 1,7 | 0,1 | 34,0 | 20,4 | 0,1 | 3,8 | 60,1 | 24,3 | 40,4 |
| 1935 | 1,9 | 2,0 | 0,1 | 29,2 | 13,4 | 0,1 | 5,8 | 50,6 | 19,3 | 38,1 |
| 1937 | 2,0 | 2,4 | 0,1 | 28,1 | 18,2 | 0,1 | 7,1 | 56,0 | 25,4 | 45,4 |
| 1938 | 2,3 | 2,3 | 0,1 | 29,4 | 13,1 | 0,1 | 7,6 | 52,6 | 20,8 | 39,5 |
| 1946 | 2,6 | 2,5 | 0,4 | 30,6 | 6,6 | — | 5,0 | 45,1 | 12,0 | 26,6 |

FIGURE 3.4 – Bilan énergétique de la France entre 1920 et 1946 (LÉVY-LEBOYER, 1994b, p. 14)

industrielle (DEBEIR, DELÉAGE et HÉMERY, 2013, p. 249). Elle a pour conséquence de moindres investissements dans l'équipement, et *a fortiori* dans l'innovation [21]. Cependant, en période de réarmement (1936-1939), il se produit un « rebond momentané de la production ». En 1938, un programme hydro-électrique national est ainsi élaboré conjointement par le ministère de l'Industrie et les entreprises de l'électricité. On assiste donc, pour des raisons militaires, à un « resserrement des liens entre l'État et l'industrie » électrique (LÉVY-LEBOYER, 1994a, p. 20-21 ;LÉVY-LEBOYER, 1994b, p. 111-117).

On voit également que la part d'électricité thermique et d'électricité hydraulique est globalement équivalente pendant toute la période, illustration de la complémentarité de ces deux sources d'énergie pour le réseau en construction.

Cependant, la place de l'électricité dans la consommation totale d'énergie en France, bien que croissante, reste minoritaire pendant toute la période : 1 Mtep sur 32 Mtep en 1920 (3%), 5 Mtep sur 52 Mtep (10%) en 1938. Le charbon reste ainsi très largement majoritaire : 50% en 1920 (16 Mtep sur 32), 56% en 1938 (28 Mtep sur 53 Mtep). Globalement, la politique nationale de limitation des importations de charbon est efficace [22]. Enfin, le pétrole, utilisé dans les automobiles dont l'utilisation se développe [23] suit, dans la

21. Selon François Caron, « l'effort d'investissement s'est sensiblement réduit : il se situe de 1933 à 1938 à un niveau inférieur d'un tiers à celui de 1913. La baisse des investissements dans de nombreux secteurs entraîna une grave obsolescence de l'appareil productif français, qui resta à l'écart de l'évolution technologique » (CARON, 1996, p. 242).

22. la proportion totale d'importations passe de 49% à 40% quoiqu'avec une courte phase d'augmentation entre 1937 et 1938.

23. Le parc automobile, qui concerne essentiellement les régions rurales et une clientèle aisée, passe de 108 000 voitures en 1914 à 2.4 millions de voitures en 1939 (WORONOFF, 1994, p. 397).)

consommation absolue comme dans l'évolution globale, à peu près la même tendance que l'électricité. Sa consommation, qui reste minoritaire mais croît dans le bilan, augmente progressivement de 0.7 Mtep à 5 Mtep, presque exclusivement à partir d'importations.

Certains travaux historiques on mis en évidence que, dans le cadre du développement de l'hydroélectricité nationale, l'État français a pris en considération une force naturelle qui avait déjà suscité de nombreux espoirs pendant la période précédente : l'énergie des marées. Une commission de la « Houille bleue » est créée en 1919 au ministère des Travaux publics dans ce but, et supprimée en 1943. Les nombreux travaux dont elle a été le moteur et/ou l'arbitre ont cependant été peu étudiés, en la quasi absence de réalisations concrètes. Girolammo Ramunni compare les trajectoires technologiques de l'énergie des marées et de l'énergie thermique des mers entre 1919 (création de la commission de la Houille bleue) et 1966 (inauguration de l'usine marémotrice de la Rance). Il met en évidence l'histoire parallèle de ces deux sources d'énergie en France, et deux tentatives avortées de centrales productrices d'énergie dont elles ont été l'objet dans l'entre-deux-guerres : l'usine marémotrice de l'Aber Wrac'h et la station maréthermique de Georges Claude à Cuba (Ramunni, 1985). Dominique Guillé relate l'histoire de la Commission de la houille bleue et de certains projets d'utilisation des marées auxquels elle a contribué, et met en évidence l'existence d'échanges entre les projets français, anglais et américains (Guillé, 2008). Cependant, ces travaux ne détaillent pas la dynamique d'innovation qui s'est déployée autour de la Commission de la houille bleue . Par exemple, dans une situation similaire, quoique plus critique, en termes de ressources en charbon et en pétrole que la métropole, des entrepreneurs coloniaux ont cherché à exploiter l'énergie des vagues en Afrique du Nord. Ces projets méconnus de l'historiographie sont étudiés dans cette partie II au sein d'une dynamique globale concernant toutes les forces naturelles.

## Empire colonial français : électrifications et « mise en valeur »

La situation de l'empire colonial français change de deux manières d'un point de vue énergétique, en fonction de deux enjeux distincts : le premier a trait à la politique coloniale de mise en valeur économique qui prévaut parmi les institutions coloniales dans l'entre-deux-guerres. Le second concerne, de la même manière qu'en métropole, l'approvisionnement en électricité d'une population blanche, urbaine, qui souhaite bénéficier du confort moderne apporté par le réseau électrique.

Après une période d'intense expansion coloniale, s'affirme une volonté de « mise en valeur » des territoires colonisés, permettant d'enrichir la métropole et de servir l'« intérêt

général » : celui des colons mais aussi des indigènes. L'intensification de la production coloniale est apparue nécessaire pendant la guerre en raison des pénuries de matières premières, et la propagande coloniale, issue de groupes de pression autour du « parti colonial » [24], « atteint des sommets et promet des merveilles du « réservoir colonial » »(Bonneuil, 1991, p. 32-33). La politique coloniale devient à l'issue de la guerre une « question nationale » et « la colonisation, qui revêtait une tonalité d'aventure géographique et militaire [...] devient un but économique affiché ». Elle est obtenue « au prix d'une organisation de la production et d'une intervention accrue de l'État et des administrations coloniales dans l'économie nationale (Bonneuil, 1991, p. 33). » Les puissances coloniales accompagnent cette politique de mise en valeur d'un discours sur l'impératif de « mission sacrée de civilisation », comme il apparaît dans l'article 22 du pacte de la Société des Nations. Ce discours était déjà présent dans la période précédente, mais prend de plus en plus la forme d'une injonction au « développement » des colonies — discours qui s'affirmera après la seconde guerre mondiale (Fredj et De Suremain, 2013, p. 293). De grandioses projets d'aménagement de l'espace prennent ainsi naissance, mais tous échouent. Des initiatives pour l'exploitation des forces naturelles dans les colonies jugées sous-exploitées s'inscrivent dans ce type de projet, en particulier l'énergie solaire, mais aussi l'énergie thermique des mers et l'énergie éolienne.

En termes d'électrification, les situations sont très diverses selon les territoires [25]. Globalement, l'électricité s'adresse à des usagers d'origine européenne (services : éclairage, froid ; industries : minoteries, brasseries...) aussi des entreprises construisent-elles des infrastructures de production et de transport au sein de territoires où la concentration de population européenne est la plus importante, c'est-à-dire en premier lieu les villes, mais aussi dans des zones où des matières premières suscitent leur convoitise et où des infrastructures (usines électrochimiques, chemins de fer...) peuvent servir à les extraire ou les transporter jusqu'à un lieu de transformation (Frémeaux et Hélène, 2002), pour répondre au projet colonial de mise en valeur. Dans l'entre-deux-guerres, c'est en Afrique du Nord que le réseau électrique est le plus développé. Au sein de ces territoires, pauvres en combustibles et possédant une population urbaine et européenne plus importante que dans le reste de l'Empire, ces entreprises opèrent ainsi la construction du réseau électrique et, souhaitant tirer profit des ressources hydrauliques, mettent en place des usines hydro-électriques (D. Barjot, 2002) [26]. Les modèles sont différents selon les pays : au

24. Ce groupe hétérogène, formé dans les années 1890 en pleine expansion coloniale, était « « nébuleuse de groupes de pression et de propagande coloniale ». Il regroupe des « négociants, des banquiers, des hommes d'affaire, des militaires, des parlementaires de tous bord, des fonctionnaires coloniaux, des géographes » et « des scientifiques et techniciens travaillant en direction des colonies ». (Bonneuil, 1991, p. 21-24)

25. À ma connaissance, les travaux à ce sujet, comme ceux sur les politiques énergétiques coloniales, sont rares. Un numéro thématique de la revue *Outre-mers* en 2002 (T.89, n°334-335) rassemble cependant plusieurs contributions qui éclairent sur cette disparité de contextes.

26. Les entreprises de travaux publics ont été particulièrement actives dans les aménagements hydro-

Maroc, la création d'une société nationale, Énergie électrique du Maroc (EEM), dès 1924, a pour but de « réaliser une mise en valeur rationnelle des forces hydrauliques du Maroc, en vue de la production d'énergie électrique » et de « transmettre cette énergie vers les principaux points d'utilisation en s'efforçant de conjuguer la production du courant avec les besoins de l'irrigation agricole » (Saul, 2002, p. 497). En Algérie, on assiste à la « prolifération d'un grand nombre d'entreprises » de production d'électricité, majoritairement d'origine thermique et provenant d'un charbon importé (Lefeuvre, 2002, p. 480). C'est dans ce contexte que des inventeurs créent des entreprises pour l'exploitation de l'énergie des vagues, répondant à la dynamique nationale d'exploitation de toutes les sources d'énergie hydraulique.

## Organisation de la recherche au niveau national : l'ONRSI

Une nouvelle institution publique est issue de l'organisation de la recherche en temps guerre : l'Office national des recherches scientifiques et industrielles et des inventions (ONRSI). Il est formé au sein du ministère de l'Instruction publique en 1922 dans la continuité de la Direction des recherches scientifiques et industrielles et des inventions (DRSII), elle-même héritière du Sous-secrétariat d'État des inventions. Celui-ci a été créé pendant la Première Guerre mondiale pour mobiliser et coordonner des activités de recherches afin de faire face technologiquement à l'Allemagne. Il devait organiser le lien entre recherche scientifique et industrie au niveau national. À l'aide de 49 membres, ingénieurs, professeurs de faculté, agrégés, normaliens, il étudiait toutes les propositions d'inventions qui lui étaient soumises, et mettait au point celles qui semblaient prometteuses avant de les transmettre au ministère de la Guerre.

Cette mobilisation nationale en temps de guerre, considérée comme efficace, mène les savants et politiques à souhaiter, le conflit terminé, un rapprochement entre recherche et industrie, grâce à une organisation de la recherche au niveau national (Galvez Behar, 2008). La DRSII est donc maintenue puis transformée en l'ONRSI. Cette institution, dotée de laboratoires à Meudon-Bellevue, garde tout au long de son existence l'idée d'une « place décisive de l'invention dans le progrès des civilisations » (Picard, 1990, p. 50) et agit essentiellement par le biais d'aides ponctuelles accordées, à leur demande ou à l'issue de concours, aux inventeurs, qui « deviennent rapidement le point focal vers lequel convergeront tous les soins de l'Office et de son directeur », Jules-Louis Breton (Guthleben, 2011, p. 12). Il est supprimé en 1938 au profit d'un autre organisme, le Centre national de la recherche scientifique appliquée (CNRSA), qui deviendra un an plus tard le CNRS. Celui-ci correspond à un modèle différent de l'organisation de la recherche, plus centralisé

électriques.

et faisant une large part à un type de recherche scientifique appelée « science pure » par ses protagonistes, parmi lesquels le célèbre physicien Jean Perrin. L'efficacité de l'ONRSI est en effet mise en doute par les partisans de cet autre modèle, qui lui reprochent le caractère trop ponctuel et diversifié de son action, le manque de place donné à la science fondamentale, ainsi que le peu d'ampleur de ses réalisations. C'est encore le constat de Picard, (1990, p. 50), selon lequel l'ONRSI n'a abouti qu'à une recherche ponctuelle et diversifiée. Capable de « bricoler » des systèmes de petite taille, il se serait révélé inapte à réaliser des « travaux de quelque ampleur », dans un contexte d'apparition d'une « science lourde » nécessitant une instrumentation coûteuse.

L'ONRSI, organisme dédié aux inventeurs et à la recherche scientifique à applications industrielles, s'est impliqué dans des recherches à propos de deux formes principales de forces naturelles, l'énergie éolienne et l'énergie solaire. Le projet de bateau propulsé par un aéromoteur (1919-1922), a été évoqué par Étienne Rogier (Rogier, 2000a ; Rogier, 2000b, p. 15) et Denis Guthleben (Guthleben, 2011, p. 90-93), qui le présentent tous deux comme une bizarrerie de l'histoire des techniques. Concernant l'énergie éolienne, l'ONRSI a également encouragé la recherche en vue de la mise au point d'aéromoteurs, en lien avec deux jeunes laboratoires d'aérodynamique, le laboratoire Eiffel et l'Institut aérotechnique de Saint-Cyr. Enfin, il a participé à la mise au point d'un distillateur solaire, en lien avec la régence de Tunis, le musée océanographique de Monaco et l'institut de Physique du Globe de Paris, à destination des colonies et protectorats français d'Afrique du Nord. Ces deux derniers projets n'ont pas, à ma connaissance, fait l'objet d'études historiennes. Avec le projet de bateau éolien, ils seront examinés dans le cadre d'une histoire globale des forces naturelles dans l'entre-deux-guerres.

## Corpus - Plan

Ces éléments contextuels (pénurie et politique énergétique en faveur de l'hydroélectricité, construction du réseau électrique interconnecté, projet colonial de mise en valeur par l'Administration et les entreprises françaises, mise en place d'une institution chargée d'organiser la recherche au niveau national), ont eu un impact sur les initiatives en faveur de l'exploitation des forces naturelles dans l'entre-deux-guerres. De façon plus marquée que pendant la période (1880-1918), les périodiques relatent les projets d'inventeurs. De nouveaux acteurs entrent en jeu : ministère des Travaux publics, ONRSI, mais aussi gouvernements généraux de colonies et protectorats, collectivités territoriales, laboratoires (publics et privés), entreprises liées au secteur de l'énergie. Ils donnent naissance à des projets, dont certains parviennent à des réalisations fonctionnelles, mais qui échouent tous à mettre en œuvre des installations pérennes.

Certains auteurs ont étudié plusieurs de ces projets ou des institutions qui les ont portés : Commission de la houille bleue (Guillé, 2008 ; Ramunni, 1985), bateau éolien (Rogier, 2000b, Guthleben, 2011). Le projet d'usine maréthermique (utilisant l'énergie thermique des mers) de Georges Claude a été étudié par Girolammo Ramunni en parallèle de celui de l'usine marémotrice de l'Aber Wrac'h (Ramunni, 1985), et, par Paul Barbier, dans la lignée des projets d'usines maréthermiques jusque dans les années 1980 (Barbier, 2000). Étienne Rogier a écrit plusieurs articles de vulgarisation sur l'énergie éolienne dans l'entre-deux-guerres, où il mentionne l'usage encore courant des éoliennes de pompage dans les campagnes françaises, et relate certaines tentatives françaises pour la production d'électricité, notamment celle de Louis Constantin et celle de Georges Darrieus (Rogier, 2000a, Rogier, 2000b, Rogier, 2002). Excepté Girolammo Ramunni, qui souligne bien la conjoncture énergétique favorable à ces essais, ces auteurs ont tendance à mettre en évidence plutôt la singularité de ces initiatives que leur inclusion dans un processus global.

Dans cette partie, je voudrais montrer que ces projets n'ont pas été isolés et qu'ils faisaient partie d'une dynamique nationale d'innovation en faveur de l'exploitation des forces naturelles. Cet ensemble d'initiatives ne fait pas système en ce qu'elles n'ont pas toutes été coordonnées de façon globale par un groupe cohérent d'acteurs. Cependant, plusieurs éléments de cohérence permettent de relier les projet entre eux. D'abord, leurs acteurs parlent toujours de forces naturelles, catégorie globalement inchangée par rapport aux décennies précédentes, qui regroupe les marées, les vagues, le vent, le soleil, l'énergie thermique des mers et la géothermie, et auxquelles sont associées les mêmes caractéristiques (disponibilité, abondance, illimitation, mais aussi caractère national et gratuité ; dispersion, variabilité, intermittence). Les enjeux de ces projets sont ainsi, pour beaucoup, celui de pallier le manque national en charbon, grâce au génie inventif français. Un autre enjeu, moins proprement énergétique, répond au projet colonial de mise en valeur par la création de nouvelles richesses dans des régions jugées inexploitées, et où l'absence de charbon n'est pas posée comme un problème. Une conception largement partagée par ces acteurs est celle d'une complémentarité spatiale entre les sources d'énergie qui mène à la création d'un « arc-en-ciel des houilles », commençant par la houille bleue, et induit par l'imaginaire du réseau électrique interconnecté. L'imaginaire de l'électricité devient ainsi prépondérant, quoique non dominant, dans la conception des nouveaux convertisseurs. Enfin, des inventeurs et/ou entrepreneurs ont fait appel (souvent en vain) aux mêmes institutions publiques ( Commission de la houille bleue et ONRSI) pour obtenir leur soutien afin de construire et commercialiser leurs convertisseurs innovants.

Le Chapitre 4 examine la multiplication des discours sur des convertisseurs innovants exploitant les forces naturelles, ainsi que leurs contenus techniques et politiques. Cette analyse est à nouveau effectuée à partir de *La Nature* et *Le Génie civil*, ainsi que de l'étude ponctuelle d'autres périodiques, publications scientifiques et techniques et bulle-

tins d'institutions, qui a permis de recueillir des informations sur des projets et sur la manière dont ils sont relatés. Elle montre une volonté d'exploiter au maximum toutes les ressources énergétiques à disposition, et de mailler le territoire national métropolitain et colonial par un réseau d'approvisionnement en énergie équilibré par les ressources de chaque région, dessinant un « arc-en-ciel des houilles ». Deux enjeux se mêlent : l'approvisionnement en énergie, tout particulièrement électrique, des populations occidentales (métropole et Afrique du Nord), et mise en valeur de ressources inexploitées, en particulier dans les colonies.

Le Chapitre 5 étudie la multiplication des acteurs en jeu, les mécanismes institutionnels déployés ou sollicités pour matérialiser leurs conceptions, et effectue une synthèse typologique des projets identifiés. Certains de ceux qui ont abouti à des expérimentations ou à des installations opérationnelles sont relatés, à l'exception des projets d'exploitation des vagues et des marées qui sont traités dans un chapitre à part. Il s'agit de ceux relevant d'initiatives uniquement privées (Georges Claude et l'énergie thermique des mers, Raymond Joëssel et son bateau à éolienne, la Compagnie électro-mécanique et les aérogénérateurs), et de ceux qu'a soutenus l'ONRSI. Ils permettent d'illustrer plusieurs cas concrets avec différents acteurs et sources d'énergie. Je mets notamment en évidence, grâce au dépouillement du bulletin de cette institution et des diverses publications qu'en ont donné leurs protagonistes, que le soutien de l'ONRSI relève d'un soutien à l'invention plus que d'une contribution à la politique énergétique nationale.

Enfin, le chapitre 6 examine la source d'énergie qui a le plus fait parler d'elle et qui a mobilisé la plus grande variété d'acteurs, la « houille bleue » (vagues et marées). Administration centrale, ingénieurs, laboratoires et entreprises ont interagi pour développer l'utilisation de cette houille colorée sur l'ensemble d'un territoire. Elle sera étudiée à partir de l'examen des archives de cette institution et des publications qui en font part.

# Chapitre 4

# L'« arc-en-ciel des houilles » : une mise en ressource du territoire pour l'économie nationale

Sur l'ensemble de la période, le nombre de propositions pour l'utilisation des forces naturelles est plus important que pendant la période (1880-1918). Ce premier chapitre étudie les discours de leurs protagonistes : forces naturelles dont l'exploitation est le plus souvent envisagée, types des convertisseurs, motivations politiques et sociales. Il montre l'influence de la construction du réseau électrique sur la forme que les acteurs donnent aux convertisseurs et les qualités qu'ils leur associent, et met en évidence leur volonté de participer à la construction d'une carte nationale des forces naturelles. Dans celle-ci, chaque zone trouverait, pour son approvisionnement, une force naturelle, qui constituerait un facteur d'indépendance énergétique et de production de richesses nationales, et, plus généralement, de progrès économique et social.

Une première section (4.1) montre la multiplication des propositions et des acteurs autour de l'utilisation des forces naturelles dans l'entre-deux-guerres, témoins d'une expansion de l'intérêt pour ce sujet. La section 4.2 s'intéresse ensuite aux discours sur les sources d'énergie et à l'imaginaire qu'ils sous-tendent. Elle montre l'utilisation encore courante de l'expression de « forces naturelles », mais aussi de nouveaux dérivés colorés de l'expression de « houille blanche », pour désigner les mêmes sources d'énergie, et avec des caractéristiques similaires que pendant la période précédente. Elle met en évidence la vision cartographique d'une complémentarité spatiale entre les différentes houilles colorées, ainsi que l'apparition de projets grandioses visant à tirer profit de toutes les zones jugées sous-exploitées de la planète. Elle montre enfin que la houille bleue, le vent et l'énergie thermique des mers ont été jugées les plus prometteuses pour l'avenir industriel des forces

naturelles. Pour terminer, la section 4.3 examine les formes de convertisseurs les plus fréquemment proposées en fonction des sources d'énergie et montre l'influence du réseau électrique dans leur conception.

## 4.1 Une augmentation du nombre de discours et de projets

Plusieurs éléments permettent de parler d'un accroissement très important des propositions techniques pour l'utilisation des forces naturelles et de l'intérêt qu'elles ont suscité dans les milieux scientifiques et techniciens, en particulier dans l'immédiat après-guerre. En 1920, Charles Maurain, géophysicien membre de l'Académie des sciences et alors directeur-adjoint à la DRSII, constate, dans le *Bulletin de la DRSII*, que, dans le souci de remplacer le charbon et le pétrole en voie d'épuisement et manquant en France, de nombreuses propositions techniques ont été envoyées à la DRSII (Maurain, 1921a). La Commission de la houille bleue reçoit quant à elle probablement plus d'une centaine de demandes de soutien technique, de subventions ou de concession pour utiliser les marées, les vagues ou la houle, parmi lesquelles seules une dizaine recevront un soutien financier [1].

À nouveau, l'analyse des publications à caractère scientifique et technique donne un indice de l'intérêt porté aux forces naturelles dans le temps. Les occurrences d'articles ou notes sur le sujet dans *La Nature* et *Le Génie civil* (Figures 4.1 et 4.2) montrent un écho des travaux sur les forces naturelles très important dans l'entre-deux-guerres, et particulièrement en sortie de guerre (années (1920-1922)), par rapport aux autres années de la période (1880-1940).

Contrairement à la période précédente, la proportion d'articles et notes mentionnant des travaux français est majoritaire pendant tout l'entre-deux-guerres, comme le montre la table 4.1.

Table 4.1 – Proportion d'articles et notes sur les travaux français dans *La Nature* et *Le Génie civil* (1918-1939)

| | [1919-1930] | [1931-1939] | [1919-1939] |
|---|---|---|---|
| *Le Génie civil* | 81% | 79% | 79 % |
| *La Nature* | 87 % | 67% | 84 % |

Des recherches ponctuelles ont permis de déceler la présence d'articles sur des thèmes similaires dans d'autres périodiques : de manière non exhaustive, des articles ont été relevés dans les *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* (Table 4.2).

1. 19770313/46

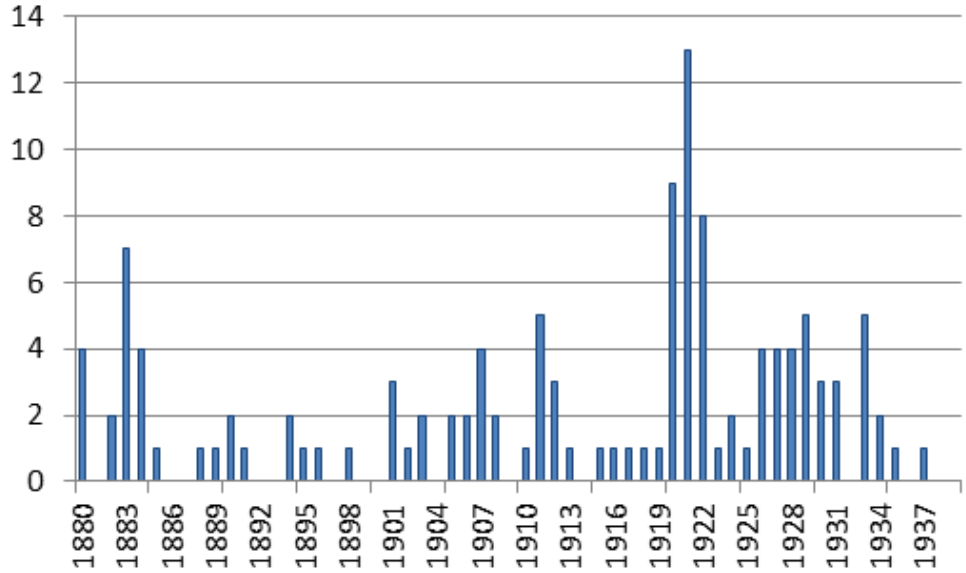



FIGURE 4.1 – Occurrences d'articles et notes sur les forces naturelles dans *La Nature* entre 1880 et 1940

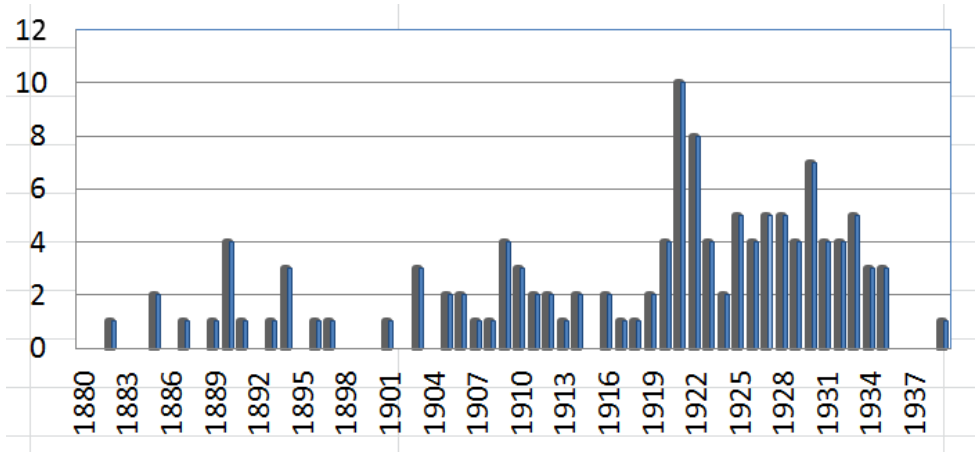



FIGURE 4.2 – Occurrences d'articles et notes sur les forces naturelles dans *Le Génie civil* entre 1880 et 1940

On trouve au moins dix articles sur l'énergie des marées entre 1917 et 1921 et un article sur l'énergie éolienne dans la *Revue générale de l'électricité* (*RGE*), revue technique professionnelle dont le but est de « promouvoir les intérêts de la science et de l'industrie électrique » [2](table 4.2). Une autre revue de vulgarisation généraliste, *La Science et la vie*, créée en 1913, recèle certainement une quantité d'articles comparables à celle de *La Nature*. On y trouve par exemple un article sur les énergies du vent et des vagues (SANCERY, 1925).

Un autre nouveau type de publication montre l'intérêt accru porté aux forces naturelles

2. Elle est issue de la fusion de *La Lumière électrique* et de *La Revue électrique*, fondée en 1904 (A. BLONDEL, 1917&).

TABLE 4.2 – Relevé non exhaustif d'articles et notes sur les forces naturelles dans les *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* et la *RGE* entre 1818 et 1939

| | Nb articles examinés | Source d'énergie | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Revue | | Marées | Vent | énergie thermique des mers | Vagues | Solaire |
| *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* | 13 | 2 | 1 | 4 | 1 | 2 |
| *RGE* | 11 | 10 | 1 | - | - | - |

dans cette période : des ouvrages ou mémoires spécifiquement dédiés à l'énergie solaire [3], à l'énergie des marées [4] et des vagues [5] ou aux forces naturelles en général [6]. Ils promeuvent l'exploitation de ces forces naturelles, présentent un état de l'art des inventions proposées, d'un ou plusieurs convertisseurs de leur propre invention, voire des appareils disponibles sur le marché (cas des aéromoteurs).

Des articles sont également publiés dans des périodiques locaux tels que le quotidien *L'Ouest-Éclair* sur des projets d'utilisation de l'énergie des marées (onze articles entre 1919 et 1921), ou le bihebdomadaire colonial *Le journal général de l'Algérie, de la Tunisie et du Maroc*, traitant de « travaux publics, bâtiments, industries et mines », sur le projet de l'ingénieur André Fusenot pour l'exploitation de l'énergie des vagues (six articles entre 1921 et 1922 ; voir Chapitre 6). Ils témoignent du caractère concret de ces projets aux yeux des chroniqueurs de ces périodiques, qui les décrivent comme les facteurs d'un développement économique local imminent ou proche.

Une thèse d'économie est en outre soutenue à l'Université de Paris sur l'avenir de la houille bleue en Bretagne, témoignant de l'intérêt d'économistes à un niveau académique pour ce sujet (NOYER, 1926).

La majorité de ces nombreux projets sont restés à l'état d'invention, et malgré une diffusion relative de leurs idées, leurs auteurs apparaissent comme isolés. Cependant, certains projets d'initiatives privées, plus rares, sont parvenus à un certain niveau de matérialisation, avec des tests sur maquettes ou la construction de prototypes opérationnels, grâce aux moyens financiers et/ou matériels de leurs porteurs. D'autres, plus rares encore, sont le fruit d'une dynamique institutionnelle associant à la fois des acteurs publics au niveau national, et d'autres acteurs tels que des entreprises, des laboratoires spécialisés ou des

3. Bernard-J DUBOS, 1928 ; DE MONTILLE, 1929 ; G GINESTOUS, 1929a), à l'énergie éolienne (E.-H. LÉMONON, 1920 ; JOESSEL, 1922 ; CHAMPLY, 1933.
4. FICHOT, 1923 ; MOREAU, 1931 ; DEFOUR, 1921.
5. LEGRAND, 1918.
6. VINCENT, 1924 ; VINCENT, 1933.

collectivités locales. Ceux-ci ont aussi été à l'origine de la construction de machines. Ce fut le cas des projets d'utilisation des marées et des vagues, au cœur duquel on trouve la Commission de la houille bleue , et de plusieurs projets autour de l'ONRSI et des gouvernements généraux de colonies d'Afrique du Nord, dont le projet de distillateur solaire. C'est pourquoi ceux-ci seront traités en détails dans cette partie (Chapitre 6 et sous-section 5.4).

## 4.2 Des forces naturelles aux houilles colorées. Une palette géographique de sources d'énergies

### 4.2.1 Les forces naturelles, une catégorie toujours opérationnelle

L'analyse des discours montre que « forces naturelles » est toujours utilisé pour désigner les mêmes sources d'énergie. La table 4.3 montre que, dans *La Nature* et *Le Génie civil*, il s'agit toujours globalement d'un ensemble de sources d'énergie regroupant le vent, le soleil, les marées, les vagues, la chaleur interne et les gradients naturels de température, malgré quelques variantes. Par exemple, Louis de Launay, ingénieur des Mines, écrit en 1918 un article dans *La Nature* intitulé « Les forces naturelles » où il exclut de cet ensemble « la houille blanche qui a maintenant son application généralisée » (De Launay, 1918).

Table 4.3 – Occurrences de l'expression « forces naturelles » dans *La Nature* et *Le Génie civil* entre 1818 et 1939

| Revue | Occurrences « forces naturelles » | Sources d'énergie désignées |
|---|---|---|
| *La Nature* | 6 | vent, soleil, chaleur interne, marées, vagues, gradients de température, chutes d'eau, gravité |
| *Le Génie Civil* | 3 | vent, soleil, marées, vagues, chutes d'eau, atomique |

On trouve toujours des variantes proches (Table 4.4 et 4.5).

Table 4.4 – Variantes proches pour désigner les forces naturelles dans *La Nature* (1918 et 1939)

| Expressions utilisées | Occurences | Sources d'énergie désignées |
|---|---|---|
| Energies naturelles | 4 | Marées ; DDT |
| Sources naturelles d'énergie | 2 | Vent ; Chutes d'eau ; Chaleur interne |

TABLE 4.5 – Variantes proches pour désigner les forces naturelles dans *Le Génie civil* (1918 et 1939)

| Expressions utilisées | Occurences | Sources d'énergie désignées |
|---|---|---|
| Force(s) motrice(s) naturelle(s) | 1 | Marées |
| Énergie(s) naturelle(s) | 2 | Vent ; Soleil ; Marées ; Vagues ; Chaleur interne |
| Source naturelle d'énergie /Source d'énergie naturelle | 1 | Vent ; Marées ; Soleil ; Chaleur interne |

La présence et la spécification similaire de telles expressions dans une publication à caractère encyclopédique, le *Larousse universel* (1922), appuie cette analyse. À l'article « électricité », « sources naturelles de l'énergie » s'applique au vent, aux cours d'eau et aux rivières ; à l'article « électrification », « forces naturelles » désigne les « chutes d'eau, marées, etc. »

Les mêmes qualités sont affectées à ces sources d'énergie : abondance, infinité, disponibilité, avec une emphase particulière pour ces deux dernières caractéristiques, et notamment leur disponibilité sur le territoire national. Dans l'article « électrification » du *Larousse*, il est ainsi mentionné que leur utilisation permettra « une grande économie dans la consommation du charbon, suppléant ainsi au manque de combustible, si insuffisant en France » (AUGÉ, 1922). On a vu en introduction que le problème de l'approvisionnement en énergies fossiles de la France était particulièrement criant en sortie de guerre. Ce sujet revient sur le devant de la scène, accompagné, de façon récurrente, de celui de l'épuisement des ressources en énergies fossiles.

Les différentes communications du célèbre chimiste suédois Svante Arrhenius sur l'épuisement prochain du charbon et du pétrole, ainsi que sur les réserves estimées de chaque nation y ont probablement contribué. Il publie en effet un article dans le *Journal of Franklin institute* en 1920 pour lequel il reçoit une médaille d'or, et donne une série de trois conférences à l'Université de Paris en 1922, dans lesquelles ils reprend les résultats du Congrès géologique international de 1913, qui s'est tenu à Toronto, et avait pour objectif de « faire le calcul des réserves de charbon dans les pays civilisés ». Il se fait très alarmiste en évaluant à moins de mille ans la durée séparant l'humanité d'une « disette pénible de houille fossile » et à soixante ans le délai d'épuisement du pétrole. Pour lui, pour que « notre actuelle et haute civilisation » continue de « progresse[r], ou tout au moins ne rétrocède pas » et pour « pourvoir à notre haute situation matérielle, nécessaire à notre progrès intellectuel », « il devient nécessaire de trouver d'autres sources d'énergie, afin que la civilisation du monde ne s'effondre pas lorsque les combustibles fossiles seront sur le

point d'être épuisés » (Arrhenius, 1922, p. 74-92). Il fait un état des lieux des ressources mondiales en énergie et des possibilités techniques pour exploiter les forces naturelles : selon lui, la houille blanche, l'énergie solaire, le vent et les marées sont de bons candidats contre la disette. Il prône en particulier l'utilisation de l'énergie solaire, très importante sur terre et qui serait vouée à un grand avenir au vu des résultats des entrepreneurs américains et Shuman [7].

Ces communications sont relayées explicitement dans plusieurs publications qui se font à leur tour l'écho d'un appel à utiliser les forces naturelles abondantes et inépuisables disponibles sur terre. Le géophysicien Charles Maurain (ensuite impliqué dans un projet de distillateur solaire, cf sous-section 5.4), écrit à ce sujet un long article dans le *Bulletin de la DRSII* ((Maurain, 1921a) ; (Maurain, 1921b)), où il passe en revue les forces naturelles encore disponibles en France. Dans *La Nature*, A. Dessol reprend les conclusions d'Arrhenius, déplore la situation énergétique de la France et affirme que le « jour où l'humanité n'aura plus à sa disposition de combustibles fossiles, il ne lui restera que ce que l'on appelle aujourd'hui les forces naturelles » (houille blanche, des marées, des vagues, du bois, du vent, du soleil) qu'il faut alors faire en sorte de pouvoir utiliser entre temps (Dessol, 1920). Dans *Le Génie civil*, un auteur reprend une conférence d'Arrhenius donnée cette fois-ci à l'École technique supérieure de Dantzig, et énumère avec pessimisme l'ensemble des sources d'énergie à disposition qui, fossiles ou naturelles, sont selon lui insuffisantes (Le Génie civil, 1922).

Sans faire référence à ces travaux, de nombreux discours techniciens mais aussi certains discours politiciens sur les forces naturelles font allusion à l'épuisement des ressources fossiles et/ou à leur manque sur le territoire, et en appellent à l'utilisation des forces naturelles pour compléter le panel des ressources nationales. Ce souci est une des raisons explicites de la création de la Commission de la houille bleue , selon laquelle « l'utilisation de l'énergie des marées est revenue à l'ordre du jour, surtout en France et en Angleterre, depuis que la hausse considérable [du prix] des combustibles minéraux obligent à leur adjoindre de nouveaux succédanés [8] ». Dans les débats de la Commission, mais aussi au Parlement et au Sénat, lors de la discussion des lois concernant la création de stations

7. Le sujet est ensuite à nouveau discuté au niveau international puisque les trois Conférences mondiales de l'énergie, en 1924 (Berlin), 1930 (Londres) et 1936 (Washington) visent également à évaluer les ressources mondiales en énergie : charbon, pétrole et énergie hydraulique. Dans un rapport de 1929 sur les ressources énergétiques mondiales, une nette distinction est dressée entre celles qui sont « perpétuellement renouvelées » (« perpetually renewed ») et celles qui sont susceptibles d'un « épuisement final » (« capable of ultimate exhaustion »). Les premières contiennent les végétaux, le vent, les marées et le soleil. L'étude choisit cependant de ne pas les prendre en considération car leur utilisation pas encore économiquement viable comparativement à celle du charbon, du pétrole et de l'énergie hydraulique (World power conference, 1929, p. 2-3).

8. AN 1977 0313/46, p.d., Note du 21 mars 1921, diffusée au sein de la Commission de la houille bleue , et probablement à l'ensemble du Comité d'études et de recherches scientifiques pour l'aménagement et l'utilisation des forces hydrauliques.

marémotrices, cet argument revient de façon récurrente. Dans un rapport au Sénat pour autoriser la création de la station marémotrice de l'Aber Wrac'h , le sénateur Albert Louppe commence ainsi son discours en rappelant le « déficit français en charbon » en attendant la remise en fonctionnement des houillères du Nord, qui serait de trente millions de tonnes, ainsi que le « tarissement plus ou moins prochain » des houillères françaises, et, enfin, « l'absence de combustibles liquides en quantité suffisante », nécessitant la mise en valeur de toutes les ressources françaises en énergie hydraulique (Louppe, 1923).

Les différents inventeurs de cette période ne se privent pas non plus de cet argument pour faire valoir l'utilité, voire la nécessité, de matérialiser leurs conceptions.

À propos du vent, l'ingénieur Louis Constantin, inventeur d'aéromoteurs et propagandiste de l'exploitation de cette force naturelle, rappelle dans *La Nature* que « les réserves mondiales de combustibles, solides et liquides, s'épuisent rapidement » et que « cette question doit particulièrement nous préoccuper, nous, français, qui n'avons pas su, comme notre voisine la Grande-Bretagne, nous assurer une part suffisante de terrains pétrolifères pour sauvegarder, à ce point de vue, notre indépendance actuelle » ; il plaide pour l'utilisation du vent pour produire de l'électricité (Constantin, 1924d). Dans un article sur la production industrielle d'électricité par la force du vent publié dans la *Revue scientifique* l'ingénieur Edmond Marcotte, professeur à l'École des constructions aéronautiques, affirme que « la puissance disponible dans l'air en mouvement est considérable » que la France « n'est pas, au point de vue de ses combustibles, dans une situation qui lui permette de faire fi du vent » (Marcotte, 1930).

En ce qui concerne les vagues, l'ingénieur André Fusenot, auteur d'un système d'utilisation des vagues dont il a construit une installation d'essai à Guyotville, déclare à propos de l'Algérie que « [l]e moment est enfin arrivé où notre belle colonie pourra remplacer le charbon, ce pain de l'industrie, par une autre source d'énergie beaucoup plus abondante et assurément meilleur marché qu'elle pourra recueillir sur son littoral. (Fusenot, 1922) ». Dans la même idée, en 1925, les ingénieurs Pinard et Sala concluent leur étude de l'utilisation des vagues en se déclarant « largement payés de [leur]s peines et de [leur]s travaux, si dans un avenir prochain, [il]s pouv[aient] doter le littoral de [leur] pays [l'Algérie] d'une énergie gratuite et toujours renouvelée, à une époque où la question du combustible se pose de plus en plus ».

Les promoteurs de procédés utilisant une différence de température constante invoquent le même avantage : dans *La Nature*, en 1927, un article évoquant l'énergie thermique des mers de Georges Claude et un procédé similaire proposé par Henri Barjot affirme que « [p]artout où la nature nous offre des différences de température, maintenues par le jeu des éléments physiques de notre globe, il est théoriquement possible de créer de la force motrice, sans autres dépenses que celles nécessaires pour construire l'installation qui tirera

parti de cette chute de température, mise gratuitement à notre disposition (Troller, 1929, p. 267). » Georges Claude et Paul Boucherot, plus pragmatiques sans doute, n'affirment pas la gratuité de l'exploitation de leur système mais annoncent que « [leurs] études permettent d'espérer qu'une telle installation, capable d'un fonctionnement continu d'un bout d'année à l'autre, ne coûterait pas plus cher que dans le cas des chutes d'eau . »

Certaines expressions relevées dans *La Nature* et *Le Génie civil* pour désigner les forces naturelles témoignent de la fréquence de ces thématiques (Tables 4.6 et 4.7).

Table 4.6 – Expressions manifestant l'aspect abondant, gratuit et inépuisable des forces naturelles dans *La Nature* entre 1918 et 1939

| Expressions utilisées | Occurences | Sources d'énergie désignées |
|---|---|---|
| Énergie gratuite/énergie mécanique à bon marché | 2 | Vent ; Chutes d'eau ; Marées ; Soleil |
| Calories gratuites | 1 | DDT |
| Immense source d'énergie/Immenses ressources d'énergie | 2 | Marées ; vagues |
| Prodigieuse source d'énergie /puissance énorme/Immense quantité de chevaux-vapeur | 3 | Soleil ; Vent |
| Force que la nature met si amplement à notre disposition | 1 | Vent |
| Source inépuisable - d'énergie à bon marché/et gratuite d'énergie | 2 | Chutes d'eau ; Vent ; Marées |
| Réservoir - immense d'énergie à bon marché/inépuisable et gratuit de calories | 2 | Vent ; Chutes d'eau ; Marées ; Soleil |

Table 4.7 – Expressions manifestant l'aspect abondant, gratuit et inépuisable des forces naturelles dans *Le Génie civil* entre 1918 et 1939

| Expressions utilisées | Occurences | Sources d'énergie désignées |
|---|---|---|
| Forces naturelles gratuites | 1 | Vent ; Chutes d'eau |
| Source d'énergie calorifique absolument gratuite et parfois très importante | 1 | Chaleur interne |
| Energie inépuisable de la houille bleue | 1 | Marées |

### 4.2.2 L'arc-en-ciel des houilles : substitution à la houille noire et complémentarité spatiale avec la houille blanche

La palette des couleurs de houilles commence à s'étendre à l'issue de la première guerre mondiale : après la houille blanche et la houille verte à la fin du XIX^e siècle vient la houille bleue. Les premières occurrences de ce terme apparaissent avant la première guerre mondiale [9], mais elles se répandent avec la création de la Commission de la houille bleue qui l'officialise en quelque sorte. Dans ce terme s'expriment plusieurs représentations partagées par ceux qui souhaitaient voir l'exploitation de cette source d'énergie se développer : inventeurs, porteurs de projets d'exploitation des marées et des vagues, personnalités du monde scientifique et industriel mais aussi responsables politiques. Signifiant tantôt l'énergie des marées seule, tantôt l'ensemble des « énergies de la mer » [10] que constituent la force des marées, des vagues, de la houle et des courants marins, la houille bleue est, comme la houille blanche, une source d'énergie hydraulique, et elle doit jouer le même rôle, à savoir contribuer à l'approvisionnement énergétique français sans besoin d'importations. De plus, elle possède l'avantage d'être une ressource abondante là où il n'y a ni houille noire ni houille blanche : en Bretagne et en Normandie. En 1928, Yves le Trocquer, ancien ministre des Travaux publics, député des Côtes du Nordet fervent partisan d'un développement de l'utilisation des marées, plaide ainsi à la Chambre des députés pour le démarrage des travaux de l'usine marémotrice de l'Aber Wrac'h en ces termes :

« La nature a [...] fait admirablement les choses dans notre pays ; on dirait qu'elle a voulu le doter d'un remarquable équilibre économique. Là où nous n'avons pas la houille noire, nous avons la houille blanche ou la houille verte. Et voilà qu'en Bretagne, où nous n'avons pas de charbon, où nous n'avons pas en quantité suffisante, la houille blanche, c'est-à-dire l'énergie des cours d'eau, voilà que, grâce au marnage exceptionnel des marées et à la découpure d'une littoral dont les baies et les estuaires se prêtent à la création de vastes réservoirs naturels, nous avons le moyen d'utiliser pratiquement l'énergie des marées (JORF, 1928, p. 3171). »

À cet argument d'une complémentarité spatiale des trois houilles colorées, s'ajoute celui du caractère pratique de l'utilisation des marées en Bretagne : il y est possible, à la faveur du marnage important et du découpage de ce littoral, de créer de grands réservoirs d'eau régularisant le débit et permettant d'obtenir des puissances comparables à celles obtenues avec la houille blanche. Grâce à ces caractéristiques topographiques et

9. En 1907, Étienne-F. Côte, dans *La houille blanche*, raille un inventeur belge qui donne à l'énergie des marées et des vagues le nom de « houille grise », et lui préfère le nom de « houille bleue » (CÔTE, 1907). En 1912, Jules Séverin présente un projet d'utilisation des marées à Granville, ressource qu'il appelle « houille bleue » (*La Lumière électrique*, 1912).

10. Expression utilisée par Max-Albert Legrand, ancien médecin de la marine et propagandiste de la houille bleue dont il sera question dans les paragraphes 5 et 6.

à cette familiarité technique, la houille bleue, sous forme de marées, pourrait aussi être transformée en électricité, et participer à l'approvisionnement du réseau d'électricité en construction. Elle compléterait ainsi favorablement la carte du réseau national.

L'énergie des marées est finalement la seule pour laquelle les porteurs de projets reçoivent un soutien conséquent de la part de la Commission de la houille bleue (cf 6). Cependant, plusieurs projets d'utilisation des vagues et de la houle sont proposés et arrivent à un stade assez avancé. Ils suivent en fait la même logique de complémentarité spatiale de la houille bleue avec la houille noire et la houille blanche : les marées sont importantes dans le Nord-Ouest de la France, mais presque inexistantes en Méditerrannée et plus faibles sur le reste du littoral. Des ingénieurs ont donc proposé d'utiliser une autre forme de houille bleue, les vagues et la houle, dans le sud de la France (Méditerrannée et Atlantique Sud) et en Afrique du Nord, en particulier en Algérie. Ce fut le cas, entre autres, de Paul Grasset à Biarritz, de Jules Richard à Monaco et d'André Fusenot à Guyotville, en Algérie ( cf 6.4). La carte représentée en Figure 4.3, réalisée par Paul Grasset probablement dans les années 1930 [11] est une belle illustration de cette vision de la complémentarité des houilles pour le territoire métropolitain. Elle représente des « zones d'action économique » qui, tenant compte « de ce que le prix du kWh aux lieux de consommation est fonction de la distance séparant ces lieux de l'emplacement que la nature impose aux centrales électriques », sont séparées par des « lignes des lieux d'égalité des prix de revient du kWh consommé. » On y voit les « usines hydro-marines » alimenter toutes les régions littorales, pendant que la région Nord-Est et Paris est approvisionnée par les usines thermiques, et les régions montagneuses par les usines hydro-électriques [12].

D'autres houilles colorées font leur apparition après la houille bleue, d'une façon cependant plus ponctuelle, et uniquement dans les discours d'inventeurs présentant leurs procédés ou dans ceux de leurs vulgarisateurs. Elles sont révélatrices d'une volonté de compléter la palette des houilles colorées par d'autres forces naturelles et à les apparenter. Un auteur de *La Science et la vie* écrit ainsi en 1925 qu' « [a]u fur et à mesure des progrès de la science appliquée, l'homme parvient à utiliser les sources d'énergie les plus variées : après la houille noire (charbon), après la houille blanche (chutes d'eau), voici la

11. Cette carte est issue d'un rapport écrit en 1943 par le commissaire du pouvoir Migeon et soutenant la demande de Paul Grasset qui, ayant commencé les travaux de construction conséquents de son « Laboratoire d'hydrodynamique maritime », sollicitait une aide financière de la part du ministère de la Production industrielle (le destinataire de ce rapport n'est pas précisé). Étant donné que les chiffres utilisés sur la carte pour donner le prix du kWh électrique dans chaque région se basent sur les prix de 1934, il est probable que cette carte ait été dessinée autour de cette date, où Grasset a également sollicité des aides publiques avec un succès relatif (voir 6.4).

12. AN 1977 0605/5, p.d., Commissaire du pouvoir Migeon, « Note au sujet des avantages d'ordre économique du procédé Grasset et des usines hydromarines », 25/10/1943.

14. « Les chiffres accolés aux noms de localités donnent le prix du courant-lumière en 1934 »
AN 1977 0605/5, p.d., Commissaire du pouvoir Migeon, « Note au sujet des avantages d'ordre économique du procédé Grasset et des usines hydromarines », 25/10/1943, Annexe III, p. 11.

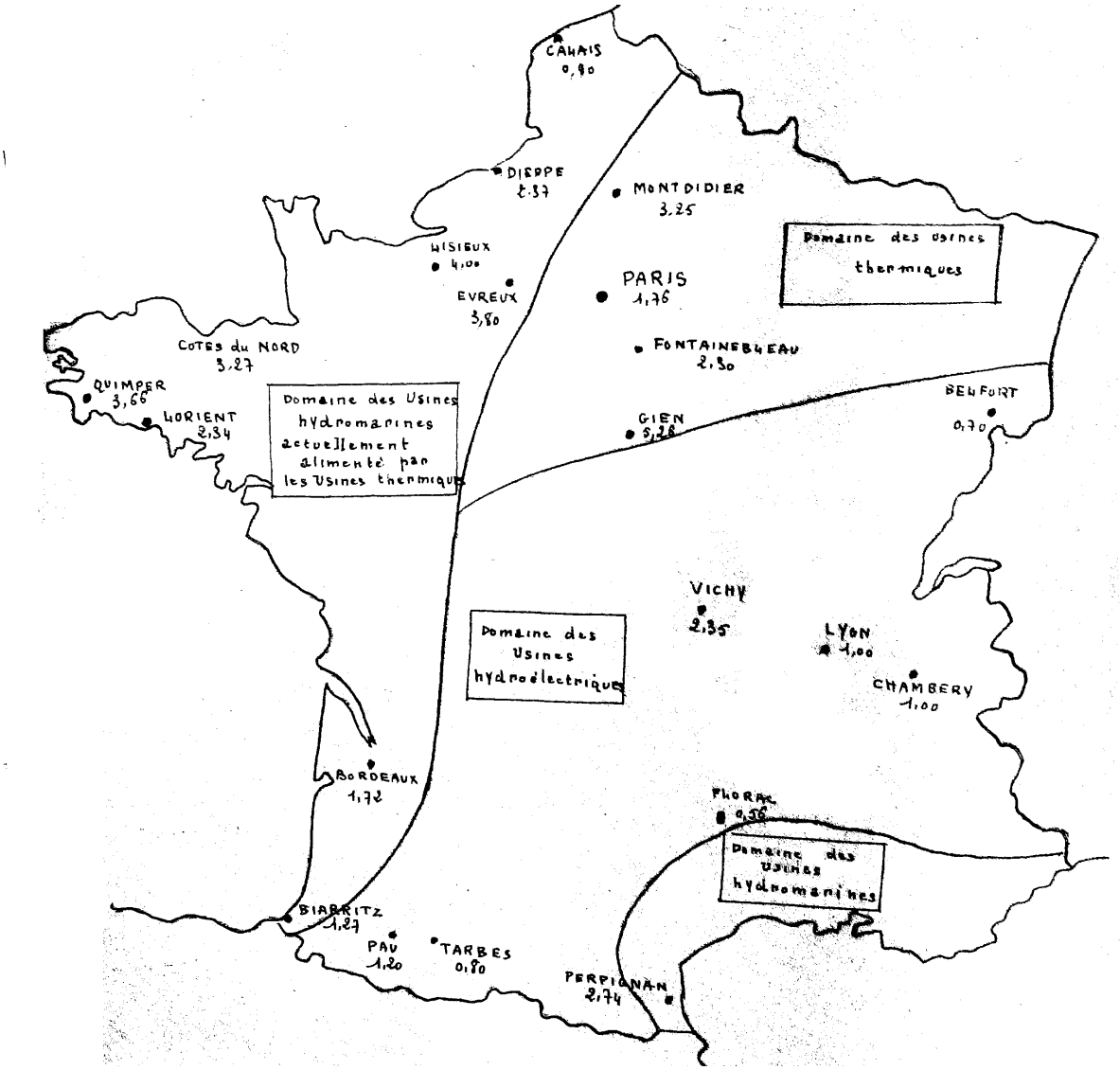



FIGURE 4.3 – Carte des zones de répartition de la production électrique en Métropole par Paul Grasset [14]

houille aérienne (ou éolienne), qui peut être captée par des procédés vraiment pratiques. Demain, sans doute, on verra l'utilisation de la houille bleue (marées) » (SANCERY, 1925). Ces houilles colorées révèlent une recherche de la complémentarité des sources d'énergie nationales, mais traduisent également la volonté de mettre en valeur toutes les sources abondantes et inutilisées disponibles sur terre.

Raymond Joëssel, ingénieur civil des Mines et directeur de la Compagnie des forges d'Audincourt, publie ainsi en 1922 un ouvrage sur le « navire à turbine aérienne pouvant progresser contre le vent » de son invention (cf 5.3). Il souhaite voir les voiles des bateaux remplacées par des turbines aériennes, afin que la houille noire cesse de se substituer à la force du vent, ou « houille azur », dans la marine. La houille azur est avantageuse par rapport aux « autres forces naturelles les plus employées, houille blanche, houille verte, qui ne se rencontrent qu'en des régions ou des lieux limités en nombre » en ce qu'elle

est disponible partout sur terre (Joessel, 1922, p. 7) [15]. L'expression « houille azur », signifiant le vent, est exhibée au grand public lors de la Foire de Paris de 1920, où Joseph Escaffre, constructeur en région parisienne de turbines aériennes à axe vertical de son invention, en expose un modèle sur lequel cette inscription est visible, comme le montre la Figure 4.4 [16]. « Houille azur » est aussi l'expression utilisée par Bernard-Jean Dubos, inventeur des « usines atmosphériques » qui doivent exploiter les courants d'air chaud pour produire de la force motrice dans les colonies d'Afrique centrale « où la houille noire et la houille blanche manquent totalement », et où « l'industrie n'existe encore qu'en puissance » (Aimé, 1929).

Pour ce types de contrées également, l'« ingénieur des villes » Pierre Gandillon expose dans une conférence à l'AFAS en 1925 son « nouveau dispositif d'utilisation de l'énergie solaire », que, « pour rappeler l'éclat des radiations actives du soleil [il a désigné] par le vocable de la « houille d'or » » (Gandillon, 1925). Sa méthode, qui canalise l'eau de mer vers des réservoirs en contrebas, maintenus en équilibre volumétrique grâce à l'évaporation solaire, « vise essentiellement à appliquer les méthodes classiques de l'industrie hydro-électrique aux dépressions naturelles du globe terrestre qui se trouvent précisément dans les zones abondamment ensoleillées. » Là où la houille blanche n'est pas présente naturellement, la houille d'or permet de la créer artificiellement pour la production d'électricité. De manière similaire, le médecin général de l'Armée Félix Pasteur nomme « houille jaune » la chaleur solaire (Pasteur, 1942). Grâce au procédé qu'il a inventé et expérimenté pour le chauffage et la distillation de l'eau, la houille jaune peut remplacer, dans les colonies d'Afrique du Nord, la houille noire absente. La « houille blanche d'hiver » est un autre substitut à la houille blanche inventé par Henri Barjot, auteur d'un procédé de conversion des gradients de température entre l'eau des lacs glacés et l'air ambiant de l'atmosphère, sur le même principe que le « procédé Claude-Boucherot » (cf sous-section 4.3.3)(Troller, 1929). Celle-ci doit permettre aux habitants des régions froides du globe comme le Canada d'obtenir de l'électricité toute l'année : la houille blanche d'hiver serait complémentaire, d'un point de vue saisonnier, de la houille blanche : la première est exploitable l'hiver, lorsque la seconde est presque immobilisée à cause du froid. Barjot invente en outre un autre procédé, qu'il aurait pu, comme Gandillon ou Pasteur, et en continuant selon sa propre logique, appeler « houille d'or » ou « houille jaune ». Elle est complémentaire à la fois spatialement et temporellement de la houille blanche d'hiver : l'exploitation de la différence de température entre un volume d'eau chauffé par le soleil

15. En 1924, un article de *La Nature* relate la construction d'un bateau fonctionnant à l'énergie éolienne en Allemagne, et celle-ci, certainement traduite de l'Allemand, est appelée « charbon bleu », ce qui suggère qu'en Allemagne des chroniqueurs ont également désigné l'énergie éolienne comme une variante bleue du charbon.

16. Un concurrent d'Escaffre, la Société des ateliers Saint-Jacques, établie à Paris, et qui fournissait des turbines aériennes verticales brevetées par Jules-Léon Costes, affirmait quant à elle, dans ses brochures de réclame, mettre à profit la « houille bleue ».




FIGURE 4.4 – Turbine Escaffre avec l'inscription « Houille azur » exposée lors de la Foire de Paris en 1920 (WEISS, 1920)

dans les régions polaires et sous les tropiques, et un réservoir d'eau naturel. La Figure 4.12 représente les zones possibles d'exploitation de la houille blanche d'hiver et la complémentarité que l'inventeur entrevoit avec la houille blanche, et la Figure 4.6 l'utilisation de la chaleur solaire envisagée par Barjot en complémentarité spatiale (tropiques) et temporelle (régions polaires, l'été) avec la houille blanche d'hiver.

De manière parodique, dès 1919, et avant que des inventeurs ne créent de nouvelles houilles colorées, des chroniqueurs raillent l'arc-en-ciel des houilles en formation en singeant le discours des partisans de la houille bleue, inventant à leur tour de nouvelles houilles colorées et de nouveaux procédés pour les exploiter. Par exemple, le *Journal amusant*, hebdomadaire satirique, imagine d'abord la « houille jaune » :
« il existe, au coeur même de la France, dans notre belle capitale, si fertile en surprises de toutes sortes, des mines de ce combustible encore inexploité, dont la matière première est presque pour rien, ou sans estimation possible ; c'est le livre ; la houille jaune ».

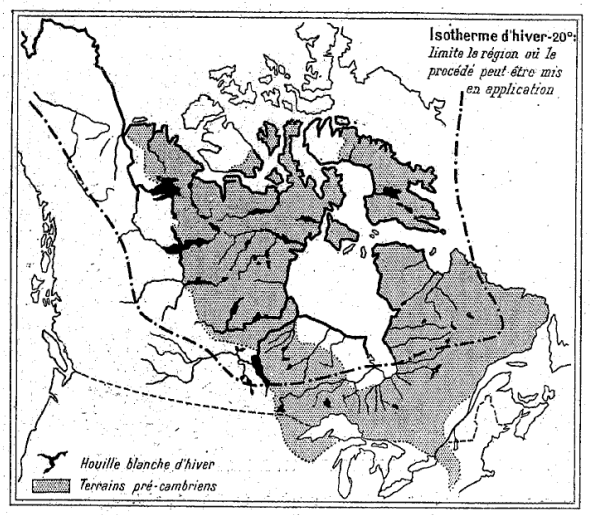



*Fig. 4. — Carte du Canada montrant la situation de l'isotherme d'hiver de — 20° (limite de la région où le procédé Barjot est applicable).*

*Fig. 5. — Courbe de débit d'une chute d'eau au Canada.*
**Elle montre que l'hiver rigoureux, en immobilisant l'eau, produit un profond affaiblissement de la production hydroélectrique. L'utilisation de la « houille blanche d'hiver » permettrait de remédier au déséquilibre entre la production et la demande.**

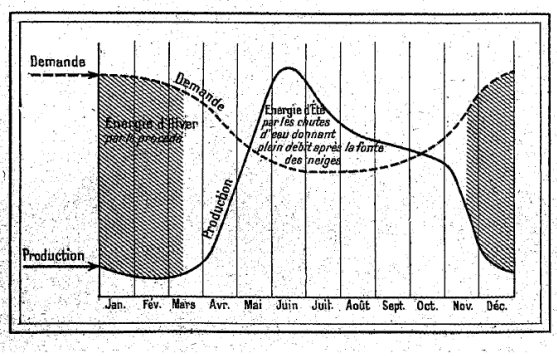



FIGURE 4.5 – Zones d'applications de la « houille blanche d'hiver » et complémentarité avec la houille blanche (TROLLER, 1929, p. 270)

Il fait ensuite une explication pseudo-technique de la façon dont il faut employer cette grande quantité de vieux livres inutilisés et des endroits où on peut en trouver, avant de conclure :« Et maintenant, que nos autorités scientifiques se chargent du reste... Il est grand temps car l'hiver est en train de succéder à l'automne (RACHILDE, 1919). »

La « houille rose », faisant référence à des sources d'énergie et des inventions différentes, fait aussi l'objet de ce type d'articles. Toujours dans le *Journal amusant*, deux mois plus tard, Paul Perret raconte l'histoire d'un inventeur, auteur du « peigne pour chauve et du savon imperméable », qui, « [a]yant entendu parler des merveilleuses propriétés de la houille noire, de la houille blanche, de la houille bleue et même de la houille jaune, s'avisa qu'il existait encore d'autres couleurs, et après de longues méditations devant de nombreux vermouth-cassis » eut l'idée de la houille rose. Cette source d'énergie est l'effort, « infini », fourni par les « charmantes enfants qui, du matin au soir pour ne pas dire du soir au matin, errent dans la capitale à la recherche d'une âme sœur ». Cette « source d'énergie sans pareille » serait captée grâce à de « minuscules magnétos nichées dans les chaussures de la belle et qu'actionnerait le mouvement de la marche, magnétos qui transformeraient l'effort dépensé en énergie électrique et que des accumulateurs menus – qui pourraient être des accessoires de toilettes originaux – recueilleraient précieusement. Ceux-ci seraient déchargés chaque soir au profit d'appareils de capacité plus grande. ». L'auteur en appelle pour conclure aux « capitaliste[s] que l'idée intéresse et qui veuille[nt] se lancer dans l'affaire (PERRET, 1920) ! » En 1919, Maurice de Waleffe, dans un article du *Temps* sur « le problème du charbon », désigne par houille rose le « calorique humain » (DE WALEFFE, 1919). En effet, on « nous promet bien de la houille de toutes les couleurs, mais la houille noire est rare, la houille blanche n'est pas encore là, la houille bleue n'est

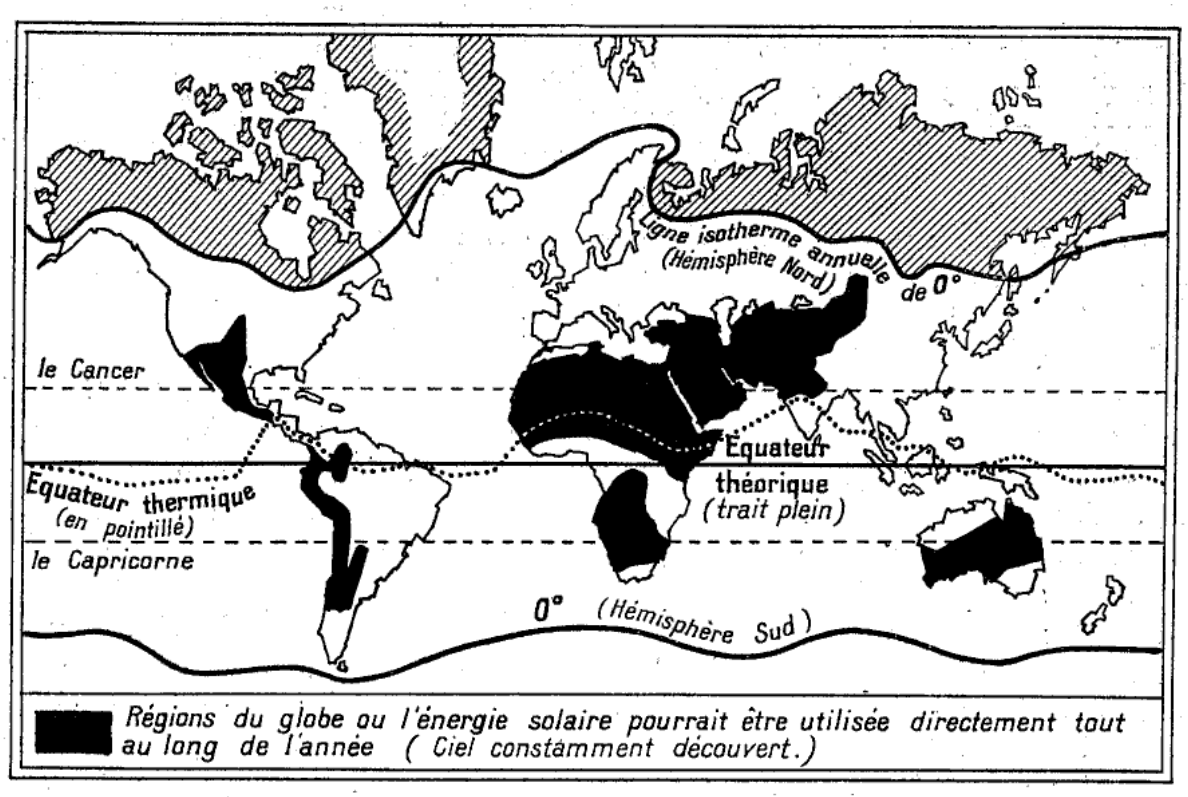



*Fig.* 6. — *Planisphère* (d'après Gibson *in* A. Berget. Le Ciel) *montrant les régions du globe où l'énergie solaire pourrait être utilisée directement tout au long de l'année.*
Au-dessus de la ligne isotherme annuelle de 0°, l'énergie thermique des eaux incongelées peut être utilisée pendant l'hiver en combinaison avec une utilisation directe de la chaleur solaire en été.

FIGURE 4.6 – Utilisations complémentaires de la houille blanche d'hiver et de l'énergie solaire selon le procédé Barjot (H. BARJOT, 1933, p. 217))

pas pour la prochaine marée, et la houille verte - le bois - donne plus de fumée que de feu. » En outre, on est loin avant que la science « découvr[e] un jour le procédé pour condenser la chaleur solaire pendant l'été, et la mettre en bouteilles [17] pour l'hiver », ce qui formera « la houille couleur d'or ». La houille rose, en revanche, « court davantage les rues, mais vaut bien un seau de charbon » : on la trouve en abondance dans les « sports violents », dans l'« enthousiasme des réunions » politiques, dans « l'amour-passion ». Aussi, « [d]evant notre disette de houille noire, un concours devrait être ouvert sur le meilleur rendement à obtenir des quatre millions de calorifères humains que nous possédons dans Paris, et que nous laissons perdre follement, comme des grands seigneurs ! » Un dernier exemple de houille rose, celui d'Eugène le Mouël, dans *Le Temps*, qui imagine l'histoire malheureuse de Benjamin Colombel, arpenteur géomètre. Pour convaincre M. Boulo, le père de celle qu'il aime, de lui donner la main de sa fille, il a reçu la mission d'« inventer quelque-chose », à « l'époque des inventions qui rapportent gros » (LE MOUËL, 1920). S'enfermant pendant six mois pour trouver une invention rémunératrice, Benjamin finit par devenir fou et présente à M. Boulo un « appareil de fer blanc, en forme de cône évasé », muni

17. Référence à Louis Simonin ?

d'une « hélice, posée au milieu d'une tige qui traversait le pavillon du cône ». Celle-ci est destinée à transformer la puissance du souffle des hommes politiques lors de leurs discours, énergie abondante qu'il nomme houille rose. Le pauvre homme finit « au fond d'un asile d'aliénés, dans la section des inventeurs ». Il n'y est donc pas seul !

Ces articles sont de véritables caricatures des articles sérieux sur la houille bleue : ils feignent un appel au développement industriel de l'utilisation d'une nouvelle houille colorée, illimitée et abondante mais gaspillée, grâce à de nouveaux systèmes d'exploitation plus farfelus les uns que les autres. Ils semblent dénoncer une foison de propositions et montrent un certain scepticisme à propos des discours prometteurs, émanant d'hommes politiques ou d'inventeurs, qui annoncent l'utilisation prochaine de la houille bleue. Pour Max-Albert Legrand, propagandiste de la houille bleue et un des responsables de l'officialisation de cette expression (cf paragraphe 6), le contenu de ces articles railleurs relève d'une « controverse futile » et montre que leurs auteurs se sont amusés « avec beaucoup plus d'humour que de justesse, des expressions métaphoriques successivement utilisées pour différencier entre elles les forces de la nature ». Selon le médecin,

> « [d]u moment qu'on avait adopté partout les termes de houille blanche, pour désigner l'énergie demandée aux neiges et aux glaciers, de houille verte, pour spécifier la forme torrentueuse des cours d'eau, n'était-il pas logique d'appeler houille bleue celle que recèle dans sa profondeur la mer immense, houille rouge ou volcanique, la puissance empruntée aux deux souterrains du globe, houille jaune ou solaire, l'ardeur soustraite aux rayons du divin Phoebus, enfin, houille incolore ou éolienne le souffle puissant d'Eole, de Borée et des Aquilons asservis (Legrand, 1920) ? ».

Pour Legrand, dans cet « arc-en-ciel des houilles » (expression forgée par le médecin propagandiste), la plus prometteuse dans l'avenir proche est bien-sûr la houille bleue.

Cet arc-en-ciel des houilles, dont la houille bleue est la plus commentée et suscite l'espoir d'un développement industriel le plus largement partagé en-dehors des cercles scientifique et techniciens, est donc révélateur d'une volonté de remplacer la houille noire et la houille blanche par des ressources disponibles là où les deux premières sont absentes ou insuffisantes. La houille bleue est la seule discutée jusqu'aux instances publiques au niveau le plus élevé de l'État, et elle relève de la politique énergétique métropolitaine de l'entre-deux-guerres consistant à approvisionner au maximum le réseau électrique en construction par des ressources nationales. Mais ces initiatives ont stimulé chez les inventeurs la création de procédés d'utilisation d'autres forces naturelles complémentaires des houilles blanche, noire et bleue, baptisées par certains du nom d'autres houilles colorées.

### 4.2.3 Les marées, le vent et l'énergie thermique des mers, les sources d'énergie les plus prometteuses

Les paragraphes ci-dessous visent à étudier, pour chaque force naturelle, les discours des ingénieurs au cours de la période, et à identifier celles qui ont été le plus en vogue auprès des ingénieurs et enthousiastes du progrès technique. Ils se basent en particulier sur l'analyse de *La Nature* et *Le Génie civil*.

La houille bleue, et en particulier les marées, est une des forces naturelles, si ce n'est la force naturelle, dont l'exploitation est la plus fréquemment mentionnée dans l'entre-deux-guerres, et ce, surtout au début des années 1920, aux débuts de la Commission de la houille bleue . C'est aussi le cas, en particulier après la première communication de Georges Claude et Paul Boucherot à l'Académie des sciences sur leur invention en 1926 (voir 5), de l'énergie thermique des mers et des procédés analogues de transformation des gradients naturels de température. L'utilisation du vent suscite également un engouement important, quoique de manière plus contrastée en fonction des publications qui en font part. Enfin, les travaux français sur l'exploitation de la chaleur solaire ont reçu un écho limité, bien qu'ils aient donné lieu à des réalisations, notamment avec la mise au point d'un distillateur solaire pour les colonies d'Afrique du Nord (cf 5.4).

Tout d'abord, la Table 4.8 représente la fréquence d'apparition de ces sujets dans les deux revues.

TABLE 4.8 – Occurrences d'articles et notes sur les forces naturelles dans *La Nature* entre 1918 et 1939

| | Source d'énergie | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Revue | Marées | Vent | énergie thermique des mers | Vagues | Solaire |
| *La Nature* | 17 (25%) | 31 (31%) | 14 (21%) | 9 (13%) | 9 (13%) |
| *Le Génie civil* | 31 (41%) | 14 (17%) | 17 (22%) | 7 (10%) | 10 (13%) |

On constate que les marées, le vent, l'énergie thermique des mers, les vagues et le soleil y sont discutées en tant que sources d'énergie. Si la houille bleue (marées et vagues) est le sujet le plus fréquent dans les deux revues, les marées sont davantage traitées dans *Le Génie civil*, et, dans *La Nature*, c'est le vent qui fait l'objet du plus grand nombre d'occurrences. En revanche, dans les deux revues, des travaux sur l'énergie solaire trouvent peu d'écho. Les paragraphes suivants détaillent la manière dont chaque force naturelle est traitée dans les deux revues au cours de la période. Ils donnent en outre des éléments pour expliquer les différences constatées entre les deux revues, et qui peuvent être associées

au public auquel elles étaient destinées : *La Nature*, destinée à un lectorat plus large et valorisant l'innovation dans son ensemble, quels que soient ses usages (industriels, domestiques, agricoles...) et *Le Génie civil*, s'adressant à des ingénieurs à propos de sujets touchant plutôt à l'industrie.

**4.2.3.0.1 La houille bleue, espoirs et déception** Le sujet des marées a été discuté à la Chambre des députés, au service des Forces hydrauliques du ministère des Travaux publics, et dans des publications scientifiques et techniques, des périodiques généralistes nationaux et locaux, des ouvrages, ainsi que dans une thèse d'économie (cf 4.1). Dans le *Bulletin de la SEIN*, les seules mentions qui sont faites des forces naturelles concernent la houille bleue. Avec les travaux de la Commission de la houille bleue et tous les projets d'aménagements marémoteurs et houlomoteurs qui seront détaillés en 6, la presse, des revues scientifiques et techniques aux quotidiens nationaux ou locaux, prévoit en effet la réalisation imminente d'usines marémotrices contribuant à l'approvisionnement national en électricité.

Dans *Le Génie civil*, la proportion d'occurrences sur les marées est ainsi largement majoritaire (trente-et-un sur soixante-quinze). En revanche, dans *La Nature*, on constate qu'il y a plus d'articles sur l'utilisation du vent que sur celle des marées. En outre, on y trouve un plus grand nombre d'articles sur les vagues. Dans les deux revues, on retrouve des reproductions ou des résumés d'autres articles, notes ou ouvrages [18], et notamment de communications à l'Académie des sciences, d'articles de la *RGE*[19] ou de mémoires des *Annales des Ponts et chaussées*[20]. Dans *Le Génie civil*, on trouve aussi plusieurs articles consacrés à des avant-projets étudiés par la Commission de la houille bleue [21] , ainsi que deux articles sur le projet anglais d'exploitation de la Severn (Le Génie civil, 1921, Le Génie civil, 1934). Dans *La Nature*, les articles sont davantage consacrés à faire un état de l'art des inventions et projets proposés, et pas uniquement ceux visant à produire de l'électricité pour le réseau électrique en construction [22]. Une plus large place est aussi laissée aux inventions et initiatives visant à exploiter les vagues [23], et les auteurs parlent

18. Pour les marées : dans le *Génie civil*, c'est le cas de dix-huit sur trente-deux, donc plus de la moitié ; dans *La Nature*, cinq sur dix-sept.
Pour les vagues : trois sur quatre dans le *Génie civil*, et, sur neuf articles dans *La Nature*, tous sont des inédits.

19. Ceux, qui constituaient des documents de référence pour la Commission de la houille bleue , de Maynard et de l'Amiral Amet.

20. En particulier, ceux de Georges Boisnier et Jules Baré.

21. En ce qui concerne les marées : un projet d'André Defour pour l'aménagement de l'anse de Rothéneuf (Dantin, 1921), et un projet de Louis Schwob pour l'aménagement de la Frénaye (Schwob, 1927).
En ce qui concerne les vagues, le projet d'un ingénieur belge, P. Van Vloten, pour la création de grandes centrales hydroélectriques actionnées par la houle (Van Vloten, 1926).

22. À ce sujet, un article est consacré au projet d'usine marémotrice de l'Aber Wrac'h en 1922 (La Nature, 1922c).

23. En 1921, un article, signé par le propagandiste de la houille bleue Max-Albert Legrand, évoque le

volontiers dans le même article des deux formes de houille bleue [24].

On constate, que ces occurrences sont concentrées au début des années 1920, comme le montre la Figure 4.7. Elles sont majoritaires parmi les occurrences sur les forces naturelles à cette période. Ainsi, en 1921, sept occurrences sur treize concernent la houille bleue dans *La Nature*, et sept articles sur dix dans le *Génie civil*. Ceci traduit l'augmentation du nombre de projets proposés, l'engouement des deux revues scientifiques et techniques à ce sujet, ainsi que la prépondérance du sujet de la houille bleue parmi les discours sur les forces naturelles en ce début de période. Ceci est lié à la dynamique d'innovation autour de la Commission de la houille bleue (cf 6).

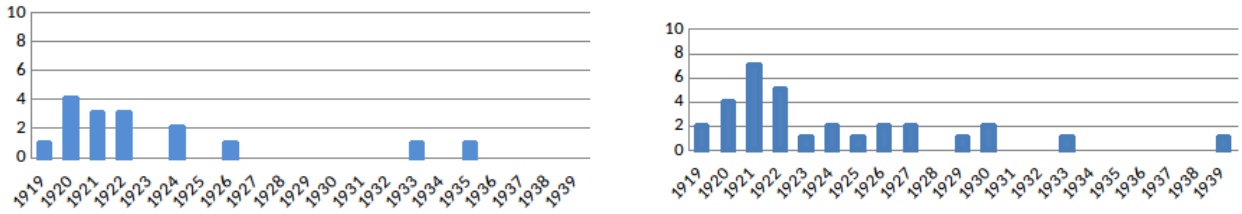



FIGURE 4.7 – Occurrences d'articles et notes sur l'énergie des marées dans *Le Génie civil* et *La Nature* [1919-1939]

Cet intérêt se tarit à la fin des années 1920, et, dans les années 1930, seuls sont évoqués l'ouvrage du doyen de la faculté de Rennes Georges Moreau , ainsi que, dans *Le Génie civil*, le projet anglais de la Severn et ainsi que le résumé d'un article de la *Revue générale de l'électricité* sur le projet de Defour (cf 6). Dans *La Nature*, la critique du livre de Moreau est l'occasion de montrer un certain scepticisme sur la viabilité de ces technologies :

« L'auteur conclut son étude en réclamant un effort immédiat de mise en valeur de cette énergie naturelle ; on peut regretter, à ce point de vue, qu'il ne se soit pas appliqué à serrer d'un peu plus près les devis manifestement optimistes des promoteurs de projets. Il en aurait pu, sans doute, dégager l'explication d'un fait réellement paradoxal : il ne

projet d'André Fusenot visant à utiliser les vagues pour produire de l'électricité en Algérie (LEGRAND, 1921). L'année suivante, un lecteur attentif réagit à cet article et présente des calculs qui apportent des précisions sur le rendement du système. Il affirme qu'« [au] Maroc surtout [...] il y a grand profit à créer des organisations du genre de celles de M. Fusenot », témoin de l'intérêt des lecteurs et du sérieux apporté au sujet (EFFÈRE, 1922)..
En 1933, Jules Richard écrit un article sur la pompe actionnée par les vagues qu'il a fait construire pour le Musée océanographique de Monaco (voir 6.4) (J. RICHARD, 1933a).
L'année suivante, un article de Pierre Devaux décrit le Laboratoire hydrodynamique marin de Paul Grasset, pour laquelle l'auteur en appelle à l'aide des pouvoirs publics que Grasset avait lui-même demandée de son côté (J. RICHARD, 1933a).

24. En 1921, H. Lémonon écrit deux articles qui constituent un état des lieux des brevets déposés pour l'utilisation des vagues et des marées en France et à l'étranger, avec explications techniques et schémas illustratifs (H LÉMONON, 1921 ; H. LÉMONON, 1921).
En 1925, un nouvel état des lieux des travaux sur la houille bleue est établie par Auguste Pawlowski : avancement du projet de l'Aber Wrac'h , projet de Fusenot et de l'Italien Francesco Cattaneo (voir dans le 6.4, l'ondo-pompe de Jules Richard).

s'est encore révélé, en aucun pays, aucune initiative privée pour exploiter cette richesse apparemment gratuite, cette source d'énergie que l'on déclare beaucoup plus économique que les hautes chutes d'eau. Tous les projets de réalisation font appel au concours et à la garantie de l'État. Est-ce bien le moyen de résoudre le problème capital de l'économie moderne, c'est-à-dire produire de l'énergie industrielle réellement à bon marché ? » (La Nature, 1931).

Ce scepticisme est probablement lié à l'enlisement du projet de l'Aber Wrac'h et à l'absence de concrétisations de tous les autres projets d'usines marémotrices. L'engouement de la presse pour la houille bleue s'est donc concentré dans les années qui ont directement suivi la fin de la première guerre mondiale.

**4.2.3.0.2 Le vent, entre usages et innovation** En fonction des acteurs et des revues, les discours sur les aéromoteurs divergent. Il existe en effet toujours, pendant l'entre-deux-guerres, des constructeurs de machines agricoles qui commercialisent des moulins à vent pour le pompage de l'eau ou, au moins sur le papier, la production de petites puissances électriques. Certains inventeurs cherchent à commercialiser de nouveaux modèles d'aéromoteurs d'une puissance de l'ordre de quelques chevaux, pour le pompage de l'eau et la production d'électricité (voir 5.1). Des recherches sont aussi menées sur la production exclusive d'électricité éolienne de quelques chevaux à quelques dizaines de chevaux par certains inventeurs, ainsi que par la Compagnie électro-mécanique (cf 5.3). Enfin, des expérimentations sont menées pour l'amélioration du rendement des aéromoteurs et la mise au point de nouveaux modèles à l'Institut aérotechnique de Saint-Cyr en lien avec l'ONRSI, qui encourage également la mise au point d'un bateau propulsé par un aéromoteur (cf 5.4).

Dans *La Nature*, l'énergie éolienne représente la majorité des occurrences sur les forces naturelles dans l'entre-deux-guerres (dix-sept sur cinquante-cinq). Celles-ci sont également concentrées au début des années 1920 (voir Figure 4.8). Le pompage de l'eau et la production de petites puissances électriques sont toujours décrits dans *La Nature*, quoique moins souvent pour le premier usage. Dans cinq de ces articles, de nouveaux modèles français sont présentés comme amenant de réels « progrès » dans l'exploitation de la force motrice du vent : meilleur rendement, plus grande régularité, plus grande robustesse, mais aussi, le plus souvent, possibilité de produire de l'électricité pour des « utilisations plus industrielles » que les classiques « applications rurales ou domestiques de petite importance » [25].

25. Par exemple, le « moteur éolien Fayard de Mille » (Blin, 1919), la « turbine Escaffre » (Weiss, 1919), la « turbine Costes » (Weiss, 1921a).
Selon Weiss, qui a écrit plusieurs articles sur les aéromoteurs dans *La Nature*, la turbine Escaffre a particulièrement captivé le lectorat, qui a produit une « correspondance abondante sur le sujet » ; optimiste, l'auteur en déduit que « l'emploi des turbines à vent semble se développer » (Weiss, 1921b). Ainsi, par exemple, un lecteur signale en janvier 1921 qu'un curé de la paroisse d'Auxy a construit en 1903 une

L'accent est mis sur les grands avantages économiques que représente l'utilisation de cette énergie illimitée, gratuite et mieux répartie que le charbon, les chutes d'eau ou encore les marées, argument repris tout au long de la période. En revanche, un journaliste avance aussi que « [l]es essais et modèles sont nombreux et souvent très variés, ce qui indique bien que l'unanimité est loin d'être faite sur le type le plus parfait qu'il convient d'adopter. (La Nature, 1921b) ».

La production de plus grandes puissances électriques, injectées dans le réseau, est également évoquée avec enthousiasme comme un grand progrès dont la réalisation est proche et souhaitable [26] (cf section 4.3).

Enfin, les travaux de l'ONRSI sur le navire propulsé par un aéromoteur sont relayés très favorablement, et suscitent une abondante correspondance [27]. Ce panache est cependant de courte durée, éclipsé par une réalisation allemande similaire mais d'une taille incomparable. En 1924 et 1926, deux occurrences mentionnent la construction, non pas d'un bateau, mais d'un « navire paradoxal mû par le vent », conçu par un chercheur allemand, le Dr Anton Flettner (La Nature, 1926c ; La Nature, 1926b). De dimensions toutes différentes que celles du bateau de Constantin, celui-ci mesure 90 m de long, contre 8.50 m pour le plus gros que l'inventeur français a fait construire. *La Nature* ouvre cependant ses pages à un dernier article de Constantin sur son bateau éolien, où l'inventeur met en avant les avantages de ses conceptions, et rappelle amèrement que, contrairement à lui, Flettner[noms]Flettner, Anton a obtenu les aides financières de puissantes institutions publiques et privées allemande (voir 5.4).

Dans *Le Génie civil*, les occurrences sont plus rares et dispersées sur l'ensemble de la période (voir Figure 4.8). Seuls sont rapportés des travaux étrangers sur les aéromoteurs, le projet de navire éolien de l'ONRSI, des études concernant la production exclusive d'électricité éolienne, ainsi que l'invention d'un moteur actionné par les courants aériens ou aquatiques (Dantin, 1930). Trois articles inédits concernent ainsi le navire éolien de Flettner et les expériences menées au laboratoire aérodynamique de Göttingen pour mettre au point les rotors Flettner [28]. G. Delanghe, ingénieur des Arts et manufactures

turbine similaire à la turbine Escaffre (La Nature, 1921a) et en mai 1921, un « ingénieur spécialiste en turbines » propose des améliorations à cette turbine, calculs à l'appui (Weiss, 1921b).)

26. Louis Constantin (Constantin, 1924d), Georges Darrieus (Darrieus, 1925) et G. Lacroix (G. Lacroix, 1929) écrivent chacun un article sur ce sujet.

27. En décembre 1922, mentionne trois exemples d'inventions du même type, que les auteurs affirment avoir réalisés avant ou en même temps mais indépendamment de Constantin. Un des lecteurs se trouve cependant « heureux en constatant la réalisation industrielle de [ses] recherches et surtout en voyant que la découverte est bien française », et espère que ces travaux « susciteront bientôt la création d'une petite flottille calaisienne de bateaux de pêche, qui, sans charbon, pourront, poussés par un vent bienfaisant, désormais dompté, s'orienter et naviguer en tous sens » (La Nature, 1922a). Encore une fois, on remarque que ce système a reçu un accueil favorable auprès des lecteurs, et que ce type d'invention avait le vent en poupe.

28. Comme dans *La Nature*, ils suivent l'évocation des travaux de l'ONRSI sur le navire éolien, examiné cependant une seule fois, en un article reproduisant une note aux *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* des porteurs de ce projet.

et professeur à l'École supérieure d'aéronautique qui écrit deux des articles sur le navire Flettner, les conclut, comme Constantin, par un reproche sur l'encouragement à la recherche en France [29]. Les autres occurrences concernent des résumés ou commentaires d'articles ou ouvrages, majoritairement étrangers [30]. Il n'est donc plus nulle part question des modèles, anciens ou nouveaux, d'aéromoteurs commercialisés par les constructeurs de machines français, ni, de manière plus générale, de l'utilisation de ces aéromoteurs telle qu'elle existe encore dans les campagnes (pompage et petites productions d'électricité) (cf 5.1), ni, enfin, des expériences menées à l'Institut aérotechnique de Saint-Cyr en soufflerie, qui sont totalement ignorés (cf 5.4). Seuls de nouveaux modèles associés à de nouveaux usages sont ainsi décrits.

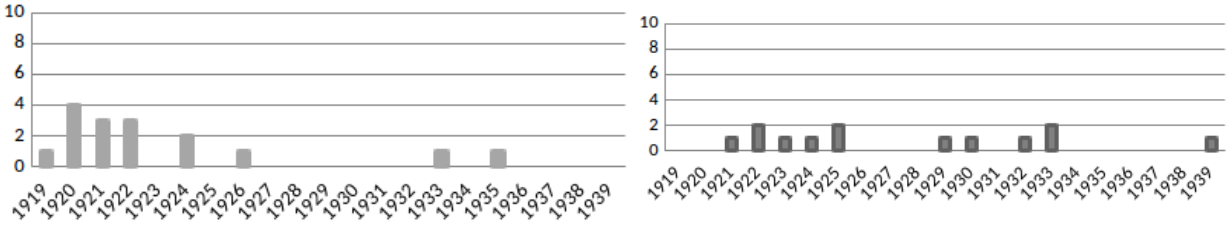



FIGURE 4.8 – Occurrences d'articles et notesdécrit sur l'énergie éolienne dans *La Nature* et *Le Génie civil* [1919-1939]

Dans le *Bulletin de la SEIN*, qui avait publié tant de travaux sur les moulins à vent pendant la période précédente, le désintérêt pour l'énergie éolienne est encore plus grand puisqu'il n'y est plus du tout question ni des modèles, anciens ou nouveaux, s par les constructeurs français, ni des travaux consacrés à la mise au point de nouveaux aéromoteurs ou à la production exclusive d'électricité. Cela indique, de la part des ingénieurs et industriels membres de la société savante, d'une part une désaffection pour les usages classiques des aéromoteurs, d'autre part une indifférence pour les tentatives d'innovation dans le domaine, que ce soit au niveau du moteur, du mode de transformation de l'énergie ou de l'usage.

Auprès des ingénieurs de l'industrie comme les membres ou correspondants de la SEIN ou les auteurs du *Génie civil*, les aéromoteurs qui avaient eu beaucoup de succès dans la presse scientifique et technique pendant la période précédente ont donc perdu de leur intérêt. Si certains auteurs sont confiants dans le développement à venir de la production d'électricité éolienne ou d'aéromoteurs de meilleur rendement et plus puissants, ils ne

LE GÉNIE CIVIL, 1924 ; DELANGHE, 1925a ; DELANGHE, 1925b.

29. Il s'exprime en ces termes : « Nous trouvons là un exemple particulièrement frappant du rôle des laboratoires scientifiques vis-à-vis de l'industrie ; ce n'est pas le seul qui nous vienne de l'autre côté du Rhin, et c'est à nous de tirer de ces enseignements toutes les leçons qu'ils comportent (DELANGHE, 1925b, p. 457) ».

30. Elles concernent le travail théorique d'un auteur allemand sur la production d'électricité éolienne au moyen d'accumulateurs (n°2050, 1921), et « la construction, aux États-Unis, d'une centrale électrique mue par le vent » (n°2626, 1932).

considèrent plus comme un progrès la multiplication de l'usage des aéromoteurs alors commercialisés dans les campagnes. Ce n'est pas le cas des auteurs de *La Nature* qui s'adressent à un public plus large ; ceux-ci valorisent cependant en particulier la production d'électricité éolienne. L'usage devenu classique des aéromoteurs à la campagne passe donc moins pour une utilisation d'avenir, et est associé à des pratiques du passé. Ceci lié au développement du réseau électrique en campagne qui promet, dans un avenir plus ou moins proche, la fourniture de cette forme d'énergie, condition d'accès à la modernité (cf section 4.3).

### L'énergie thermique des mers : le projet Claude-Boucherot et quelques émules

L'annonce du projet d'exploitation de l'énergie thermique des mers par Georges Claude et Paul Boucherot à l'Académie des sciences en 1926, puis leurs différentes expérimentations jusqu'en 1935, ont fait couler beaucoup d'encre (voir Figure 4.9).

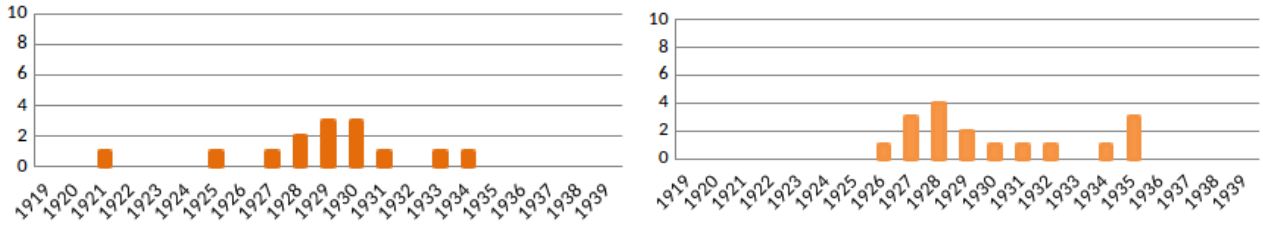



FIGURE 4.9 – Occurrences d'articles et notes sur l'énergie thermique des mers et ses dérivés dans *La Nature* et *Le Génie civil* [1919-1939]

Dans le *Génie civil*, c'est le seul projet de ce type mentionné. Dans *La Nature*, d'autres rares inventions[31] visant à exploiter des gradients naturels de température sont mentionnées, toutes restées à l'état théorique. Ainsi, les auteurs de *La Nature* et *Le Génie civil* témoignent d'un vif intérêt et d'une confiance dans la réalisation à venir d'une usine Claude-Boucherot fonctionnelle. Les notes aux *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* et autres articles et conférences des deux ingénieurs-inventeurs-entrepreneurs sont reproduites, synthétisées, commentées et/ou reformulées.

Dans *La Nature*, à l'issue de la première présentation aux *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* de Claude et Boucherot, des réactions de lecteurs ne se font pas attendre, entre revendications de priorité et expression d'une admiration pour ces travaux[32].

31. Six occurrences sur quatorze.

32. En décembre 1927, un lecteur affirme qu'il a eu une idée analogue à celle de Claude et Boucherot, consistant à forer un puits de 3000 m sous un réservoir naturel d'eau, et à produire de la force motrice selon le même procédé que celui de l'énergie thermique des mers, imaginant l'utiliser à la campagne pour produire de l'énergie pour l'éclairage ou l'eau chaude (LA NATURE, 1927). L'auteur est conscient que son projet est « chimérique » par le prix exorbitant d'un tel forage, il n'empêche que la note de Georges

On trouve également, dans la revue de vulgarisation, deux articles enthousiastes sur les deux inventions d'Henri Barjot, présentées aux *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* en 1928 et 1933 (cf sous-section 4.3.3), ainsi que, dès 1921, un article proposant de puiser, selon un procédé similaire à celui de Claude et Boucherot, dans le « réservoir immense et gratuit de calories à basse température » que prodigue la nature, mais cette fois-ci pour le chauffage, selon un cycle basse pression utilisant l'eau d'une rivière comme source chaude et l'air comme source froide (Troller, 1921).

Ainsi, du début à la fin des expérimentations de Georges Claude, *La Nature*, *Le Génie civil*, et quelques lecteurs de *La Nature* ont accordé une valeur importante aux travaux sur l'énergie thermique des mers et à certains procédés qui s'en rapprochent, ces derniers traduisant un intérêt répandu porté à ce type de systèmes. Cependant, avec l'interruption des activités de Georges Claude, plus aucune mention n'est faite de travaux de ce type, que l'inspiration des inventeurs se soit tarie, peut-être en partie par cette déception, ou que les auteurs des deux revues se soit désintéressés de ces conceptions pour ces mêmes raisons.

### L'énergie solaire et la mise en valeur des colonies françaises

Les occurrences sur l'énergie solaire dans *La Nature* et *Le Génie civil* sont plus rares et dispersées entre 1922 et 1937 (Figure 4.10). À l'inverse des occurrences sur le vent et la houille bleue, elles ne répondent pas de manière aussi immédiate et directe à la pénurie de combustibles. Elles répondent en effet moins à l'ambition d'une contribution à la production énergétique nationale, qu'au projet de mise en valeur des colonies françaises. Elles mentionnent en effet toutes des applications sur ces territoires. Dans *La Nature*, elles envisagent presque exclusivement l'irrigation ou la production d'eau potable, tandis que dans *Le Génie civil*, il n'est question que de moteurs solaires actionnant des machines industrielles ou produisant de l'électricité.

Dans *La Nature*, seules sept occurrences évoquent l'énergie solaire. Toutes considèrent intéressants les travaux menés en France pour la distillation de l'eau, et aux États-Unis pour la cuisson, bien que certains déplorent le manque d'intérêt pour les applications

Claude l'a encouragé à en faire part. Le mois suivant, un autre lecteur rebondit sur cette intervention en précisant que le système proposé « n'est pas seulement chimérique, en ce qui concerne la réalisation, mais qu'il pèche aussi par principe », déclarant avoir eu lui aussi cette idée mais l'avoir abandonnée en prenant conscience de son impossibilité physique. Il termine ainsi : « Je ne saurais conclure sans exprimer à MM Claude et Boucherot mon admiration pour leur magnifique conception et remercier *La Nature* de l'avoir communiquée à ses lecteurs (Viel, A, 1927). »
En mars 1921, un autre lecteur dit avoir imaginé un système similaire à l'énergie thermique des mers, et rappelle avec insistance avoir pour cela déposé un brevet neuf mois avant la communication de Claude et Boucherot à l'Académie des sciences. Le système en question fonctionnait grâce à la différence de température entre de l'eau chauffée pendant la journée et celle d'un puits, et avait été mis en œuvre en 1923, produisant une puissance de 0.2 chevaux (Jauvert, 1927).

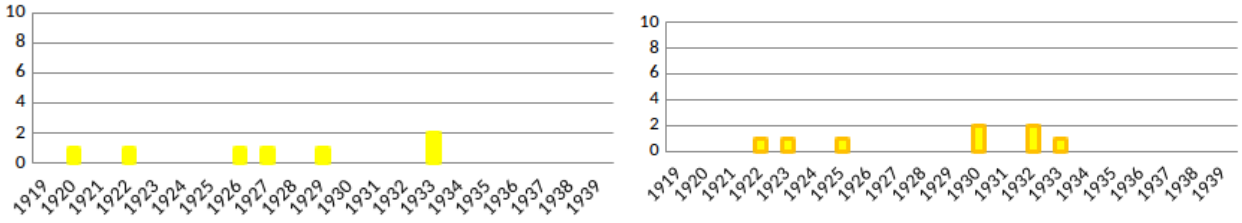



FIGURE 4.10 – Occurrences d'articles et notes sur l'énergie solaire dans *La Nature* et *Le Génie civil* [1919-1939]

industrielles de cette source d'énergie (force motrice et électricité). En 1926 paraît ainsi un article qui exprime cette insatisfaction, et en profite pour critiquer le système de recherche en France (DOUBLET, 1926). L'exemple de Mouchot permet à l'auteur d'affirmer que l'encouragement national à la recherche était plus important cinquante ans plus tôt [33] ! Ces considérations ignorent les travaux de l'ONRSI sur le distillateur solaire, dont l'application non mécanique ne doit pas avoir attiré l'attention de l'auteur : celui-ci regrette l'absence de moteurs solaires dans les colonies françaises.
Trois résumés d'articles américains relatent les travaux menés aux États-Unis par les astronparagraphomes Abbot, Fowle et Aldrich de la Smithsonian Institution. L'un d'entre eux, après avoir mentionné les travaux de Mouchot et Shuman, qui n'ont « jamais conduit à des réalisations industrielles pratiques », fait allusion aux recherches de cette équipe pour la réalisation d'un « fourneau de cuisine solaire », qui, bien qu'utiles, sont d'une application d'un « but plus modeste » (LA NATURE, 1922b.).

Le distillateur solaire de l'ONRSI fait cependant l'objet d'un article de Jules Richard, qui, présentant ses propres travaux, y rappelle que « l'extraction de l'eau douce de l'eau de mer est d'un très grand intérêt [...] dans des régions chaudes et désertiques dépourvues de combustible » (J. RICHARD, 1929). En outre, un article détaillé de Félix Pasteur sur ses essais pour la captation de l'humidité atmosphérique paraît en 1933 (PASTEUR, 1933). Celui-ci, remarquable par sa « simplicité et par sa supériorité économique », doit permettre de déjouer, dans les régions arides, « les entraves que le manque d'eau met à [l']expansion coloniale [française] » . Enfin, un article d'Henri Barjot est publié en 1933, sur ses nouvelles conceptions pour l'utilisation de la chaleur solaire (H. BARJOT, 1933), développant la note publiée dans les *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* (H. BARJOT, 1932). Son dispositif, « simple » et « très bon marché », serait notamment applicable pour la distillation de l'eau et l'irrigation dans les colonies telles que le Soudan ou les pays des

33. Il retrace ainsi la vie de Mouchot, « modeste professeur » qui, soucieux de rendre la science utile au bien-être de l'humanité, mena des recherches sur l'utilisation de la chaleur solaire, à une époque où, « [d]ans le monde intellectuel comme dans le monde politique, on s'efforçait de venir au secours du pays ». Un demi-siècle plus tard, en revanche, c'est « au défaut national par excellence, au manque de persévérance, qu'en Algérie, aux Antilles, au Congo, on doit ne point voir de machines mises en marche par l'action des rayons solaires », bien qu'on utilise le « charbon fossile » qu'on ne possède qu'en quantités limitées.

régions sahariennes. Dans tous ces exemples, la simplicité de ces appareils est montrée comme un avantage pour leur utilisation aux colonies, ce qui est opposé à la sophistication des solutions électriques.

Le projet de Pierre Gandillon, qui vise la production en grand d'électricité et est présenté aux *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*, n'est pas du tout mentionné. Un article de 1927 sur la chaleur solaire évoque cependant la possibilité de produire de l'électricité directement à partir de l'énergie solaire grâce au « phénomène physique bien connu de la thermo-électricité » (Richet, 1927). Celui-ci stipule qu' « on produirait deux fois plus de travail à transformer de la chaleur solaire en mouvement, qu'à dégager de l'électricité par la pile thermo-électrique », et conclut que cette expérience pourrait être intéressante...pour les enfants, par simple curiosité scientifique. On est donc très loin d'envisager sérieusement la transformation directe de l'énergie solaire en électricité.

Le comité de rédaction du *Génie civil* semble avoir été plus attentif aux propositions françaises pour l'utilisation industrielle de l'énergie solaire. Il ignore en revanche les travaux sur les distillateurs solaires pour l'Afrique du Nord, les seuls projet d'exploitation de l'énergie solaire ayant abouti à une matérialisation. Il y est question du projet de Gandillon, de celui de Barjot, mais aussi d'inventeurs qui ont présenté leurs idées dans d'autres revues ou conférences [34]. L'ingénieur des Ponts et chaussées Paul Caufourier expose dans un article une solution originale qu'a conçue Jean Berland, chef de la station hydrologique de Touggourt, pour la production simultanée d'électricité, de force motrice, d'eau distillée et de glace dans « tous les points [des] possessions africaines où l'énergie produite trouvera son emploi [35] (Caufourier, 1923, p. 329). » L'utilisation du « générateur auto-vaporisateur » inventé par Caufourier, qu'il imaginait à la base appliquer à l'exploitation des sources thermales (voir paragraphe suivant), permet d'améliorer le rendement et la régularité des cycles habituellement proposés, en séparant le chauffage de l'eau de sa vaporisation [36]. Une « usine solaire » d'essai d'une centaine de kilowatts, avec une surface d'insolation de 2500 m$^2$ pourrait ainsi être construite à l'oasis de Touggourt.

La lecture des deux revues montre donc un intérêt de leurs auteurs pour l'énergie solaire. Dans *La Nature*, les applications concrètes effectuées pour la distillation de l'eau dans les colonies françaises, bien que montrées comme modestes, sont jugées profitables

34. Par exemple, celui de Delecourt dans la *Revue universelle des mines de Liège* où l'auteur propose de chauffer directement du chlorure d'éthyle vaporisé dans un moteur adapté, pour la production en grand d'électricité (il donne l'exemple d'une surface de 20 000 m²) (Le Génie civil, 1930b). Ou encore celui de J. Boisse de Black dans la *Revue industrielle*, qui imagine, à son tour, exploiter la chaleur solaire pour actionner le chemin de fer transsaharien (Le Génie civil, 1933).

35. Berland a fait breveter ce procédé (Berland, 1922). Il a ensuite participé au concours de l'ONRSI (voir sous-section 5.4.

36. Un miroir solaire à concentration chauffe l'eau à l'état liquide, qui est envoyée dans le générateur auto-vaporisateur où se produit la vapeur, utilisée ensuite dans une turbine basse pression.

pour l'économie nationale, par l'expansion ou l'intensification de l'agriculture qu'elles permettent. Des projets plus ambitieux, et sans aucune concrétisation, visant à produire de la force motrice ou de l'électricité, ne sont pas du tout évoqués, même si certains auteurs manifestent le regret qu'ils ne soient pas plus étudiés en France. Dans le *Génie civil*, c'est l'inverse : les projets sont les applications de l'énergie solaire, probablement considérées comme trop modestes, ne sont pas relayées, et les projets plus ambitieux sont davantage valorisées, sans toutefois donner l'impression d'une réalisation imminente ou proche.

### La chaleur interne : de rares propositions

La « chaleur interne », qui correspond à ce qu'on appelle aujourd'hui géothermie, fait l'objet de rares articles. Dans *La Nature*, deux idées pour l'utilisation des sources thermales selon des procédés similaires à l'utilisation de l'énergie thermique des mers ont été évoqués pour l'un dans *La Nature* et, pour l'autre, dans *Le Génie civil*[37] : celui de l'ingénieur des Ponts et chaussées Paul Caufourier (Caufourier, 1921) et celui G. Ginestous, directeur du Service météorologique de Tunisie, qui a ensuite plus spécifiquement travaillé sur les énergies solaire et éolienne (voir 5.4). Son idée est d'utiliser la chaleur constante de la source thermale d'Aïn-el-Atrous pour faire fonctionner une « usine Claude-Boucherot » en Tunisie, selon la formulation même du protagoniste[38] .

### Synthèse sous-section 4.2.3

La houille bleue (marées et, en moindre mesure, vagues), le vent, l'énergie thermique des mers ont donc fait l'objet d'une attention particulière de la part des auteurs de *La Nature* et du *Génie civil*.

Les marées et les vagues ont été surtout suivies dans les années qui ont immédiatement suivi la guerre. Elles doivent en effet, selon le programme fixé par les ingénieurs de la Commission de la houille bleue , trouver une application rapide pour contribuer à l'alimentation du réseau électrique national, ce qui était largement relayé dans la presse. Cet engouement s'estompe cependant au fur et à mesure de l'enlisement des projets les plus prometteurs, à commencer par celui de l'Aber Wrac'h .

Le vent, se présentant sous forme mécanique et disponible sur l'ensemble du territoire, est mentionné comme source d'énergie tout au long de la période. Selon les auteurs des deux

37. Ces projets n'ont pas été comptabilisés dans « énergie thermique des mers et ses dérivés » car je les ai considérés comme faisant partie de la catégorie « chaleur interne » (nom alors donné à la géothermie), à propos de laquelle d'autres types d'invention ont été imaginées (utilisation directe des puits artésiens pour la production de force motrice).

38. L'article se base sur celui d'un quotidien colonial : *La dépêche tunisienne*, ce qui montre que l'idée a pu avoir une plus large diffusion en Tunisie.

revues, des moteurs à vent modernes doivent produire de l'électricité, pour le temps présent dans des accumulateurs, et pour l'avenir pour le réseau interconnecté. Les auteurs de *La Nature*, plus ouverts à des applications non industrielles, valorisent aussi la production locale de petites puissances électriques, et toujours, mais en moindre mesure, le pompage de l'eau à la campagne, ce dont il n'est plus du tout question dans *Le Génie civil*.
L'énergie thermique des mers fait l'objet de commentaires enthousiastes et élogieux, ainsi que de nombreuses réactions dans *La Nature*, jusqu'à la dernière expérience, échouée, de Georges Claude lors de la mise à l'eau du tube plongeur. Cette source d'énergie dont il n'était quasiment pas question lors de la période précédente, ainsi que les applications au refroidissement dans les colonies tropicales, a aux yeux des ingénieurs un caractère sensationnel et éminemment utile.
Enfin, la chaleur solaire et ses applications à la distillation de l'eau sont considérées comme un progrès pour la nation française dans les articles de *La Nature*, tandis qu'elles ne trouvent aucun écho dans *Le Génie civil*, ses rédacteurs semblant considérer la production en grand de force motrice ou d'électricité comme seule possibilité de débouché.
Quant à la chaleur interne, si des projets d'exploitation sont évoqués, ils le sont beaucoup plus rarement, et ce, en ce qui concerne les projets français, uniquement pour la production d'électricité aux colonies.

## Synthèse section 4.2

Les forces naturelles désignent toujours le même ensemble de sources d'énergie et les mêmes caractéristiques leur sont globalement affectées. Les marées, les vagues et le vent et l'énergie thermique des mers ont été particulièrement discutées dans les publications scientifiques et techniques, mais c'est aussi le cas de l'énergie solaire. Avec la politique de construction du réseau électrique selon une complémentarité houille noire/houille blanche en France, ces forces naturelles se retrouvent en outre cartographiées selon un arc-en-ciel des houilles, qui dépasse cependant le territoire métropolitain. Il révèle une des caractéristiques du XX$^{e}$ siècle en tant que « moment terminal des globalisations » après cinq siècles de conquêtes et de « découvertes » : celui d'un monde « quadrillé », « approprié car travaillé en continu par les sciences de l'inventaire et de la conquête » (Bonneuil, Pessis et Topçu, 2015, p. 18). Les cartes représentant les zones d'exploitation possibles, sur la terre entière, de la « houille blanche d'hiver » et de l'énergie solaire selon le procédé Barjot sont emblématiques de cet imaginaire, qui inventorie et met en ressource. Cependant, ces cartes sont davantage performatives, au sens où elles soulignent la présence d'un phénomène considéré comme ressource (en énergie), et enjoignent à exploiter ce manque à gagner, qu'elles ne forment des inventaires précis des ressources en énergie. La seule force naturelle à disposer d'une cartographie en tant que telle, avec un inventaire des sites

effectué de manière expresse pour y installer des convertisseurs, est la marée (cf 6).

Cette cartographie est en outre fortement liée au développement du réseau électrique, ce qui est évident pour le cas de la houille bleue. La section 4.3 étudie la forme donnée aux convertisseurs de forces naturelles en fonction de la nature de ces dernières, mais aussi des territoires d'application projetés. Elle montre ainsi l'influence du réseau électrique interconnecté sur l'imaginaire technicien des forces naturelles.

## 4.3 Formes des convertisseurs et territoires

Cette section étudie les modes de conversion envisagés (électrique, direct, par air comprimé, par élévation de l'eau) en fonction des forces naturelles, et la valeur qui leur est accordée dans *La Nature*, *Le Génie civil* et ponctuellement d'autres publications à caractère scientifique et technique. Elle montre que le réseau électrique en construction, nouvel horizon de modernité énergétique, prend une place importante dans la conception des nouveaux convertisseurs, quoique de manière différente en fonction la nature des sources d'énergie, mais aussi des territoires d'application des projets. Ces territoires induisent en effet la disponibilité de la force naturelle, mais aussi la présence d'infrastructures ou de projets d'infrastructures, et d'un certain type d'usager (européen ou indigène) et d'usage (industriel, agricole, domestique, militaire...). Ces éléments de nature géopolitique s'ajoutent à l'analyse de la complémentarité des houilles colorées présentée en 4.2.2.

Cette section décrit d'abord, de façon globale, la fréquence de chacun des moyens de conversion en fonction des sources d'énergie dans *La Nature* et *Le Génie civil*. Elle montre l'importance qu'a pris l'électricité, et en particulier le réseau électrique interconnecté, dans l'imaginaire des forces naturelles. Elle examine ensuite les quatre principaux types de conversion électrique relatés et les territoires qui y sont associés : production centralisée de grandes puissances pour le réseau interconnecté (métropole et colonies d'Afrique du Nord), production de grandes puissances de tous types d'énergie utile dans des lieux dépourvus de toute infrastructure (déserts coloniaux ou non), production décentralisée de petites puissances dans des accumulateurs (campagnes françaises, colonies) puis les utilisations directes (*idem*).

### 4.3.1 L'influence du réseau électrique interconnecté

Il apparaît que, par rapport à la période (1880-1918), l'électricité est, dans les sources étudiées, un vecteur énergétique plus fréquemment envisagé pour l'exploitation des forces naturelles. Les Tables 4.9 et 4.10 indiquent, pour chaque force naturelle, la fréquence à

laquelle chaque mode de conversion est envisagé dans les notes et articles de *La Nature* et *Le Génie civil*, lorsque celui-ci est indiqué.

TABLE 4.9 – Mode de conversion envisagé pour chaque force naturelle dans *Le Génie civil* [1919-1939]
[39]

| Type source | Source | Élec. | Élévat° de l'eau | Autre ut° dir. force mot. | Air comprimé | Ut° dir. chaleur | | | Nb total articles |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Chauffage | Froid | Distillat° eau | |
| Mécanique | Vent | 46% | 8% | 38% | 8% | 0% | 0% | 0% | 13 |
| | Marées | 74% | 6% | 10% | 6% | 0% | 3% | 0% | 31 |
| | Vagues | 38% | 0% | 25% | 13% | 0% | 13% | 0% | 8 |
| Thermique | Soleil | 38% | 38% | 25% | 0% | 25% | 13% | 25% | 8 |
| | DDT | 29% | 0% | 47% | 0% | 0% | 29% | 0% | 17 |
| | Chal. int. | 29% | 0% | 43% | 0% | 14% | 0% | 0% | 6 |
| Total | | 55% | 7% | 32% | 4% | 4% | 11% | 3% | 75 |

TABLE 4.10 – Mode de conversion envisagé pour chaque force naturelle dans *La Nature* [1919-1939]
[40]

| Type source | Source | Électricité | Élévat° de l'eau | Autre ut° dir. force mot. | Air comprimé | Ut° dir. chaleur | | | Nb total articles |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Chauffage | Froid | Distillat° eau | |
| Mécanique | Vent | 53% | 24% | 29% | 0% | 0% | 6% | 0% | 17 |
| | Marées | 69% | 6% | 31% | 13% | 0% | 0% | 0% | 16 |
| | Vagues | 75% | 13% | 25% | 25% | 0% | 0% | 0% | 8 |
| Thermique | Soleil | 14% | 14% | 0% | 0% | 29% | 0% | 43% | 7 |
| | DDT | 36% | 0% | 29% | 0% | 7% | 21% | 7% | 14 |
| | Chal. int. | 33% | 0% | 17% | 0% | 50% | 0% | 0% | 6 |
| Total | | 46% | 7% | 24% | 3% | 7% | 7% | 6% | 67 |

Sur l'ensemble de la période (1919-1939), le passage par l'électricité est la forme la plus fréquemment envisagée pour la conversion des forces naturelles (55% des occurrences

39. Comme pour la partie I, il arrive que plusieurs modes de conversion soient envisagés pour la même force naturelle dans le même article (par exemple : dans les différents articles de Georges Claude sur l'énergie thermique des mers, l'inventeur parle parfois à la fois de production d'électricité et de production de glace, ce qui fait pour le même article une occurrence dans la case "Électricité" et une occurrence dans la case "Refroidissement".). Cela explique que la somme des pourcentages soit différente de 1.

40. Même remarque.

relevées dans le *Génie civil* et 46% dans *La Nature*). Alors que celle-ci n'était majoritaire que dans les procédés d'exploitation des marées au cours de la période (1880-1918), elle l'est désormais, dans les deux revues, pour l'utilisation de toutes les forces naturelles se présentant sous forme mécanique. De plus, alors que l'électricité n'était pas ou était peu envisagée pour la transformation de la chaleur solaire, elle est, avec l'élévation de l'eau, le vecteur le plus souvent proposé pour cette source d'énergie thermique dans le *Génie civil* (trois occurrences sur huit) — elle reste minoritaire pour cette source d'énergie dans *La Nature* (une occurrence sur sept). Enfin, pour les deux autres sources d'énergie thermique dont il n'était presque pas question lors de la période précédente (les gradients naturels de température et la chaleur interne), elle est fréquemment imaginée comme vecteur énergétique (dans environ un tiers des occurrences pour les deux revues). En comparaison, les procédés faisant appel à l'air comprimé sont très rares, comme ceux ayant recours à l'élévation de l'eau. En revanche, l'utilisation directe de la force motrice est toujours fréquemment imaginée, pour les forces naturelles disponibles sous forme mécanique comme pour celles se présentant sous forme de chaleur. Enfin, l'utilisation directe de la chaleur est, pour ces dernières, souvent considérée.

Deux grandes tendances dans les modes de production de l'électricité sont ainsi présentes dans les projets décrits : la production dans des centrales de grandes puissances électriques injectées dans le réseau national en construction, à l'image de la houille blanche ; et, comme de nombreux inventeurs l'imaginaient pendant les décennies précédentes et comme certaines installations ont déjà été mises en œuvre, la production de petites puissances régularisées à l'aide d'accumulateurs électriques. La première tendance concerne surtout les marées et les vagues, et la seconde le vent. Pour ces trois sources d'énergie, les utilisations directes sont encore envisagées, et pour le reste des sources d'énergie (gradients naturels de température, soleil, chaleur interne), elles sont majoritaires. Chacun des deux types (production centralisée de grandes puissances électriques, production décentralisée de petites puissances électriques) est maintenant examiné. Ces deux types de production d'électricité sont associés à deux modèles de gestion : l'un, centralisé, où l'utilisateur est client d'une ou plusieurs entreprises gestionnaires de la production et de la distribution, et l'autre, décentralisé, où l'utilisateur est aussi le producteur. Il s'agit de deux tendances vers lesquelles s'orientent plus ou moins les projets étudiés, sans qu'un classement tranché soit possible pour chaque cas. Ces deux modèles sont complémentaires plus que concurrents : la production décentralisée d'électricité est envisagée justement dans les lieux que le réseau électrique, pour des raisons technico-économiques, n'est pas susceptible d'atteindre, en particulier les campagnes isolées, en métropole comme aux colonies. Les porteurs de projets de nouveaux convertisseurs entendent contribuer à produire de l'électricité en tout endroit du territoire français et dans certaines zones de l'Empire français, et ainsi, contribuer soit à l'œuvre de service public que représente l'alimentation des

Français en électricité, soit à la mise en valeur de ressources inemployées. Commission de la houille bleue ?

### 4.3.2 Production centralisée de grandes puissances électriques pour un réseau national en construction

Pour le premier type de production d'électricité, l'utilisation de chaque force naturelle a été envisagée. C'est surtout le cas des forces mécaniques naturelles (marées, vagues et vent), en moindre mesure de l'énergie thermique des mers, et plus rarement de l'énergie solaire.

En ce qui concerne les marées et les vagues, la production d'électricité centralisée concerne donc la majorité des projets, ce qui est directement lié à la dynamique d'innovation autour de la Commission de la houille bleue , dont les protagonistes ont le but affiché de contribuer à la construction du réseau électrique français. Comme l'exprime clairement un auteur de *La Nature*, ils considèrent qu'une « station marémotrice isolée paraît peu pratique » mais que « l'idée d'utiliser les marées semble devoir être, au contraire, très féconde, si par l'interconnexion avec d'autres stations d'énergie non seulement pélagique [41], mais aussi thermique et fluviale, la station marémotrice est destinée à jouer le rôle de simple élément d'un réseau de production et de distribution d'énergie électrique » (La Nature, 1921d, p. 387). Les porteurs de la plupart des projets identifiés dans cette section se sont ainsi adressés à la Commission de la houille bleue pour son soutien technique, financier, ou pour une demande de concession. L'usine marémotrice de l'Aber Wrac'h doit constituer un premier exemple à petite échelle, pour le réseau nord-finistérien, de ce type d'installation. Il y a donc, en ce qui concerne la houille bleue, un lien évident entre le réseau électrique et la cartographie des houilles colorées.

À ce sujet, la carte de la Figure 4.11 est très intéressante, et est à mettre en regard avec la carte de la Figure 4.3, où les usines hydromarines complètent les usines thermiques et les usines hydroélectriques.

Publiée dans un article de 1930 sur l'électrification de la France, elle représente le réseau électrique français en 1930 mais aussi les projets de construction de nouvelles lignes. On y voit la complémentarité entre les centrales thermiques (houille noire) et hydrauliques (houille blanche), dans le réseau existant, ainsi qu'une quasi absence de lignes dans le Nord-Ouest de la France, que quatre projets de ligne tendent à combler. Pour l'auteur de cet article, la houille bleue, mais aussi l'énergie thermique des mers, sont destinées à combler ce manque :

41. C'est-à-dire des lacs, donc des chutes d'eau de montagne.




CARTE DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE PRINCIPAL DE LA FRANCE, MONTRANT LES LIAISONS ENTRE USINES.

FIGURE 4.11 – Carte du réseau électrique (MATHIVET, 1930)

« seule la région de l'Ouest et, principalement la Bretagne, semble avoir été traitée en parente pauvre : mais n'est-ce pas justement pour permettre l'installation, sur les côtes du Finistère de puissantes stations marémotrices et mieux encore, pour permettre aux deux célèbres ingénieurs Claude et Boucherot de venir installer, non loin de Brest ou de Lorient, les tubes plongeurs qui leur permettront d'utiliser les différences de température entre la surface de la mer et les eaux des profondeurs. Il ne restera plus ensuite qu'à lancer de Brest à Paris une ligne ou un câble à 220 000 volts qui apportera au cœur de la France un nouvel appoint d'énergie électrique (MATHIVET, 1930, p. 175) ».

Georges Claude et Paul Boucherot ont effectivement envisagé la production d'électricité à partir de centrales maréthermiques [42] , même si ce n'est pas la première application qu'ils

42. Utilisant l'énergie thermique des mers.

ont cherché à mettre en œuvre. En effet, la production de glace n'a été expérimentée par Claude que faute de pouvoir relier son usine flottante à la terre par une connexion électrique et à la nécessité d'utiliser l'énergie produite sur place (Claude, 1933).

Les projets d'utilisation de la chaleur interne relatés dans les publications concernent peu la France, mis à part celui de l'ingénieur en chef des Ponts et chaussées Paul Caufourier, anciennement affecté à Mostaganem, en Algérie. Caufourier envisage en particulier la production d'électricité à partir des eaux thermales d'Hammam Meskoutine, grâce au « générateur auto-vaporisateur » de son invention : 12 200 ch serviraient en priorité à électrifier les 600 km de chemins de fer du réseau Bône-Guelma (Caufourier, 1921).

Caufourier a également imaginé, avec Berland, chef de la station hydrologique de Touggourt, l'emploi du même appareil pour l'exploitation de l'énergie solaire dans des « usines solaires » : il étudie le cas de l'oasis de Touggourt, où celles-ci alimenteraient en électricité un réseau d'éclairage dans les villages alentours, et servirait à la fabrication de glace et à l'approvisionnement en force motrice de petits ateliers (Caufourier, 1923). Pierre Gandillon projette quant à lui une production d'électricité à grande échelle, à partir de l'énergie solaire, injectée dans un réseau couvrant des centaines de kilomètres à construire intégralement (cf sous-section 4.3.3). On l'a vu en 4.3.3 et 4.2.3, aucun de ces deux projets d'exploitation en grand de la chaleur solaire pour la production électrique dans le réseau n'a donné lieu à des applications pratiques. À ma connaissance, la seule tentative de mise en pratique de production d'électricité solaire a été effectuée par Jules Richard, directeur du Musée océanographique de Monaco, qui travaillait également sur le distillateur solaire avec l'ONRSI (voir 5.4), et Alfred Henry, vers 1927. Mais il s'agissait là plutôt de production de petites puissances électriques, traitées dans le paragraphe suivant.

La création de stations éoliennes de production d'électricité injectée dans le réseau a été proposée par des ingénieurs comme Paul Basiaux, ingénieur hydraulicien [43], dans la *Revue générale de l'électricité* (Basiaux, 1921), ou, de manière plus détaillée, Louis Constantin, ingénieur de l'École supérieure d'électricité, spécialiste de l'aéronautique et inventeur d'un « bateau paradoxal » mû par un moulin à vent (cf 5.4), dans *La Nature* (Constantin, 1924d). Dans l'esprit de ces ingénieurs, il s'agit de fournir dans un ré-

43. D'après les publications dont il est l'auteur, Paul Basiaux était ingénieur-conseil, et s'est occupé de prospection hydraulique et d'aménagements hydro-électriques dans les Pyrénées dans les années 1920. On peut le voir en particulier à partir de ces deux ouvrages dont il est l'auteur :

— *Aménagement intégral et économique des forces hydrauliques. Nouveau mode collecteur d'eau avec prises à des réservoirs d'altitudes différentes. Quelques cas et projets d'usines hydro-électriques de pointes, commandées par des lacs, pris à titre d'exemples, dans la région des Pyrénées. Application à une chute de 1950 mètre*, Éditions de l'onde, Toulouse, 1922,

— *Quelques notes sur la prospection hydraulique avec des exemples pris dans le département des Hautes-Pyrénées [Texte imprimé] : programme de 200.000 chevaux, dont une centrale de 80 000 chevaux et une chute de 1 900 mètres dans le bassin supérieur du Gave de Pau*, Éditions de l'onde, Toulouse, 1925.

seau étendu un maximum d'énergie éolienne, en complément de l'énergie hydraulique, afin de minimiser l'emploi des centrales thermiques, qui devraient devenir un appoint aux centrales exploitant les forces naturelles. Ces deux auteurs mettent en évidence l'intérêt de « groupes atmosphériques » (Basiaux, 1921, p. 215) par rapport aux centrales hydrauliques, qu'elles exploitent la houille blanche ou la houille bleue. Ils imaginent la construction en série de « turbines aériennes » et leur installation à moindre frais dans de multiples zones favorables, alors que chaque aménagement hydraulique est très onéreux, car la turbine hydraulique n'est qu'un élément d'une installation de génie civil conséquente et particulière à chaque site [44]. Les deux ingénieurs invoquent en outre l'emploi d'un réseau interconnecté pour corriger le défaut de l'irrégularité du vent. Selon eux, les usines atmosphériques pourraient être, grâce au réseau électrique, conjuguées avec les usines exploitant la houille noire, la houille blanche et la houille bleue, ce qui permettrait d'ajuster la production avec la demande des usagers. L'analogie entre les appareils récepteurs ainsi qu'entre les centrales productrices d'électricité éoliennes et hydrauliques (turbines atmosphériques contre turbines hydrauliques, « groupes atmosphériques » ou « centrales éoliennes » contre centrales hydrauliques) montre la considération selon laquelle les premières sont une forme voisine et complémentaire des secondes.

Basiaux et Constantin envisagent cependant des dispositions différentes. Basiaux affirme que les « turbines à axe vertical, reproduction assez fidèle des turbines hydrauliques » sont toutes désignées pour suppléer à leurs homologues hydrauliques dans la production d'électricité. Il fait certainement allusion aux modèles d'aéromoteurs construits sur le même principe que les turbines hydrauliques [45] qui sont commercialisés par certains constructeurs français [46]. Ceux-ci seraient « réparti[s] en grand nombre sur des réseaux existants ». Si certains de ces constructeurs affichent la possibilité d'atteindre des puissances allant jusqu'à 300 ch (env. 220 kW) [47], il semble que les installations effectivement réalisées, pour la production de force motrice ou d'électricité, ne dépassaient pas la dizaine de chevaux. Constantin imagine quant à lui l'installation de multiples éoliennes bipales de grande puissance (400 ch (env. 300 kW) pour 40 m de diamètre) de sa conception, dont la puissance serait centralisée en un poste qui distribuerait l'électricité produite sur le réseau. L'irrégularité de la force du vent est corrigée d'une part par le réseau interconnecté, et d'autre part grâce des chaudières et des accumulateurs à vapeur [48]. Situés au niveau de

44. Constantin ajoute que l'aménagement des chutes d'eau arrive « à la limite économique d'exploitation » : les plus intéressantes auraient déjà été équipées (Constantin, 1924d, p. 395).

45. Avec, comme il l'a été expliqué à propos des éoliennes Bollée dans la Partie 1, un distributeur fixe qui dirige le courant aérien perpendiculairement aux pales mobiles.

46. Voir, par exemple, la turbine Escaffre ou la turbine Costes présentées avec louanges dans *La Nature* en 1920 et 1921 (Weiss, 1920 ; Weiss, 1921a), ou encore la turbine Lafond, présentée dans *La Science et la vie* (Pyramont, 1920) et dans l'ouvrage de René Champly (Champly, 1933, p. 130).

47. Weiss donne l'exemple d'une installation constituée de l'empilement, sur le même arbre, de trois roues Escaffre, atteignant 300 ch.

48. Constantin prend plusieurs brevets en 1924 à propos de ce système :
— pour la centrale électrique : Constantin, 1924b ;

la centrale, ils emmagasinent, le cas échéant, le surplus d'électricité grâce à une chaudière électrique, et déchargent ce surplus en cas de sous-production en restituant du courant électrique [49].

Basiaux n'a pas donné la moindre application pratique à son idée. Constantin est quant à lui parvenu à construire une hélice aérienne bipale de 8 m de diamètre, vers 1924, qui pouvait charger des accumulateurs [50]. Ce prototype, servant à une production locale, semble être resté la seule réalisation pour la production d'électricité éolienne selon les conceptions de Constantin. Au final, la construction d'aérogénérateurs de moyennes et grandes puissances (de l'ordre de 100 kW et plus) pour l'injection dans le réseau national attendra l'après-guerre. Lacroix considère ainsi que la « création d'unités plus puissantes, de l'ordre de plusieurs centaines de kW, dont le groupement permettra de disposer d'une puissance assez importante pour en justifier les branchement à un réseau général de distribution d'énergie » était possible et souhaitable mais pas dans l'immédiat (G. Lacroix, 1929, p. 554). Il a en effet travaillé avec Georges Darrieus sur la production d'électricité au moyen d'aérogénérateurs de moyenne puissance au sein de la Compagnie électro-mécanique (cf 5.3).

De tous ces projets de production d'énergie électrique destinée au réseau par les forces naturelles, peu ont donc fait l'objet de matérialisations, et aucun n'a été finalisé.

### 4.3.3 Projets prométhéens et mise en valeur des régions inexploitées du globe

Une projection est récurrente dans les propositions des inventeurs ainsi que dans les publications qui en font la promotion : l'idée que l'homme, grâce à un procédé technique permettant d'« asservir » les forces naturelles, même (et peut-être surtout) le plus grandiose, pourrait créer *ex nihilo*, et dans les conditions les plus hostiles, un environnement propice à son développement, suivant les critères de la modernité occidentale (confort, production de biens, déplacements...), et ce, n'importe-où sur terre, car on peut en tout endroit du globe trouver une force naturelle à exploiter : à chaque région sa houille colorée. Cela est vrai pour les régions de la métropole où le réseau électrique est encore absent et où les porteurs de projets imaginent la création de richesses économiques et l'apport de

— pour l'accumulation thermique : Constantin, 1923 ;
— pour l'accouplement de l'aéromoteur à la génératrice électrique : Constantin, 1924c et Constantin, 1924a .

49. L'usage des accumulateurs à vapeur « Ruth », d'origine suédoise, se répandaient à l'époque dans les centrales thermiques, pour limiter les pertes à la production, ce qui permettait de faire des économies de charbon. Sources secondaires sur la question ?

50. Selon Rogier, il se serait associé à l'industriel Paul Fortier-Beaulieu pour cette réalisation (Rogier, 2000b, p. 15-16).

confort matériel synonymes de modernité : avec la Commission de la houille bleue , ce fut en particulier le cas de la Bretagne. Mais certains exemples cités en 4.2.2 montrent que les territoires colonisés, ou que l'ambition serait de coloniser, furent des terrains idéaux pour ces utopies techniques. Dans ces derniers se joue en effet d'une part le problème du combustible, mais également, de manière plus marquée que pendant la période précédente, la volonté d'exploiter les richesses de ces territoires et de les modeler, soit pour les rendre habitables, à l'image de l'Europe occidentale, soit pour les rendre productifs. Déjà présent dans les projets de Tellier et Dessoliers dans la période précédente, le gigantisme de plusieurs projets que ce soit vis-à-vis des ambitions techniques, ou de modification de l'environnement ou de la société, est frappant.

Georges Claude, dont le projet est le seul de la sorte à avoir reçu la sanction de l'expérience (cf 5.3), imagine ainsi les côtes des régions tropicales prospérant grâce à la production de « glace non alimentaire » à très bas coût par des usines exploitant l'énergie thermique des mers. Elles permettraient non seulement de « lutter contre la chaleur et de transformer ainsi les conditions d'existence des villes côtières de ces régions », mais aussi d'envisager la création de « de[] villages ou de[] villes de toutes pièces » (Claude, 1933, p. 569). Dans un brevet pris en 1928 avec Paul Boucherot, les deux auteurs témoignent des motivations qui les animent :

> « On sait que si les pays chauds n'ont pas pris jusqu'ici le développement correspondant à leur magnifique végétation et souvent à leurs immenses ressources minérales, il faut attribuer ce fait aux dures conditions qu'imposent à la vie et même à la santé de l'homme, principalement au voisinage des côtes, l'ardente chaleur et l'intense humidité de l'air (Claude et Boucherot, 1928a) ».

Claude prétend donc apporter, à l'aide de son usine, les conditions d'un développement économique à l'occidentale dans les régions chaudes et côtières du globe. Ici, le climat, considéré comme délétère à la santé humaine et à l'activité économique dans les régions tropicales, et la possibilité de le modifier pour le rendre comparable à celui de la Métropole, sont utilisés comme arguments de colonisation. En cela, l'entreprise de Claude rejoint les caractéristiques que Fressoz et Locher prêtent à la colonisation européenne à partir du XIX$^{e}$ siècle et à sa justification par des considérations climatiques : « [l]a notion de climat permettait de justifier ensemble colonisation et industrialisation. La colonisation fut en effet pensée et légitimée comme une entreprise d'assainissement, de restauration climatique, permettant aux corps européens de ne pas subir la même dégradation que les corps indigènes » (Fressoz et Locher, 2010, p. 2).

Le projet de Claude et Boucherot, très médiatisé dans les cercles scientifiques et industriels, fait plusieurs émules, à l'affût de gradients naturels de température exploitables pour rendre productif et/ou habitable tout territoire où ils se présenteraient. Si Claude

et Boucherot ne sont pas les premiers à imaginer exploiter ce type de force naturelle [51], le dynamisme de Claude pour mener à bien ce projet et l'écho positif qu'il rencontre auprès de ses pairs qui en font la promotion (cf 5.3) semblent avoir stimulé la créativité des ingénieurs pour des projets similaires. André Troller, ingénieur de l'École polytechnique et rédacteur en chef de *La Nature* [52], signale ainsi en 1929 qu'« [i]l existe en d'autres points du globe des chutes de température naturelles dont il est également possible de tirer parti » et qu'« à la suite des communications de Georges Claude, il en a été signalé un certain nombre (Troller, 1929, p. 267). »

En 1928, l'ingénieur Bernard-Jean Dubos conçoit ainsi un procédé, pour lequel il prend plusieurs brevets(Bernard-Jean Dubos, 1928, Bernard-Jean Dubos, 1929, Bernard-Jean Dubos, 1932), utilisant des gradients de température en fonction, non pas de la profondeur marine, mais de l'altitude atmosphérique. Le procédé consiste à placer de vastes colonnes verticales de pas moins de plusieurs dizaines de kilomètres de haut dans les régions désertiques, et de profiter du courant d'air ascendant produit par la différence de température entre l'air chaud du sol et l'air froid de l'altitude. Une « chambre de Saussure, formée de deux parois transparentes », permet de réchauffer l'air au sol et d'accentuer ce gradient de température (Aimé, 1929). Dubos en imagine de multiples applications : production de force, par l'utilisation du courant d'air ainsi formé, qu'une turbine au niveau de l'orifice supérieur viendrait transformer en une force utilisable ; production de pluie artificielle, si la chambre de Saussure est installée au niveau de plans d'eau comme la mer : les vapeurs obtenues provoqueraient des pluies irriguant le désert à des kilomètres aux alentours. Dubos envisage même l'exploitation de l'électricité atmosphérique au sommet de ces tours géantes. Grâce à cette production simultanée de force et de pluie, l'auteur imagine, à l'instar de Charles Tellier, la « conquête agricole des régions désertiques » par la multiplication de ces « usines atmosphériques » (Bernard-Jean Dubos, 1931a, p. 1). Il ne s'agit cependant plus, comme avec Charles Tellier, d'augmenter la taille de l'empire colonial français, mais d'en rendre profitable la partie saharienne. Selon Dubos, ce qu'il appelle la « houille azur » est la « source de force [...] la plus riche qui soit au monde et précisément elle jaillit au centre de [l'] empire africain dont elle rend possible la colonisation trop différée. On s'est habitué à penser que le Sahara n'est qu'un obstacle à cette colonisation tant désirable il en sera l'instrument quand on voudra (Bernard-Jean Dubos, 1931a). »

Dubos multiplie les voyages dans les colonies françaises (Madagascar, Djibouti...) pour étudier le phénomène des trombes atmosphériques, et effectue quelques expériences sur

51. Claude prétend lui-même que « l'auteur incontestable [...] de l'idée d'utiliser mécaniquement l'énergie thermique des mers » est d'Arsonval (Claude, 1929), dans l'article de la *Revue scientifique* présenté en 1.2 (D'Arsonval, 1881a). Il reconnaît cependant là l'antériorité de l'idée de son ami, et non le fait de s'en être inspiré.

52. Selon une notice nécrologique de *La Nature*, il était le « second de [Maurice] Leblanc, en même temps que chef du service des brevets de la société Westinghouse-Leblanc » (Legendre, 1946).

maquettes. Il tente avec peu de succès de diffuser ses idées dans les milieux académiques [53].

Selon Dubos, l'administration coloniale a porté un relatif intérêt à ses travaux, puisque le Gouverneur général de l'Afrique occidentale française (AOF) Jules Carde ainsi que le résident général de la France au Maroc, Lucien Saint, lui ont demandé l'écriture d'un mémoire afin de faire étudier le projet aux services coloniaux pour une application en Afrique du Nord (Bernard-Jean DUBOS, 1931a, p. 10). L'Académie des sciences coloniales, devant laquelle il présente ses travaux en 1931 et en 1935, l'aurait soutenu, en les personnes de Charles Bourdarie, son fondateur et secrétaire perpétuel, et Henry Hubert, géologue et inspecteur général du service de Météorologie du ministère des Colonies, qui auraient recommandé aux ministres des Travaux publics et du Travail d'incorporer son projet dans le « programme des grands travaux » (Bernard-Jean DUBOS, 1935, p. 6). Si cet intérêt de l'administration coloniale pour le projet de Dubos a été réel, il semble qu'il en soit resté là, et que l'idée de construire un « tube météorologique de 600 mètres de haut », de 30 mètres de diamètre à la base et 100 mètres de diamètre à l'extrémité haute pour l'Exposition coloniale de 1937 n'ait pas connu de suites [54].

Présentés en 1929 et 1932 à l'Académie des sciences par Léon Lecornu, les projets du médecin Henri Barjot sont du même ordre d'idées : exploiter les différences de température dans les régions polaires ou tropicales pour en extraire des richesses économiques. Il imagine en premier lieu d'utiliser les différences de température entre l'air ambiant (comme source froide) et l'eau des lacs glacés (comme source chaude) des régions polaires, ou « houille blanche d'hiver », pour le chauffage et la production de force motrice (H. BARJOT, 1928). Un fluide à faible point d'ébullition est vaporisé sous basse pression par l'eau pompée, la vapeur produite utilisée pour actionner une turbine basse pression, et cette vapeur condensée à l'aide d'une saumure glacée (« cryohydrate ») obtenue par la congélation, grâce à l'air ambiant, d'une solution saline épandue sur une vaste surface de glace, qui détermine la puissance de la centrale. La Figure 4.12 représente l'illustration dans *La Nature* d'une installation telle que l'imagine Barjot.

D'après Troller, qui présente le projet de Barjot avec enthousiasme dans *La Nature*, « une solution saline couvrant 1 $km^2$ et congelée sous une épaisseur de 15 cm peut alimenter pendant 24 heures, à pleine charge, le condenseur d'une centrale de 30 000 ch d'électricité nécessitant des aménagements conséquents (TROLLER, 1929, p. 270). » Grâce à la multiplication de telles centrales, les régions polaires, froides et inhospitalières, seraient

53. Il adresse un ouvrage, présenté par Charles Lallemand, et deux notes sur les « usines atmosphériques » à l'Académie des sciences en 1929 et 1930, qui ne sont pas reproduites dans les *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* ; il présente à nouveau ces notes à l'AFAS en 1931 (Bernard-Jean DUBOS, 1931b)- qui ne sont pas davantage reproduites dans les comptes-rendus.

54. En 1939, Dubos tente de jouer une nouvelle carte pour son procédé : la création de trombes artificielles, non pour l'irrigation des zones désertiques, mais pour la défense passive de Paris, comme un moyen d'occulter la ville et de la protéger des attaques ennemies (Bernard-Jean DUBOS, 1939)...

*Fig. 3. — Vue d'une centrale disposée au bord d'un lac.*

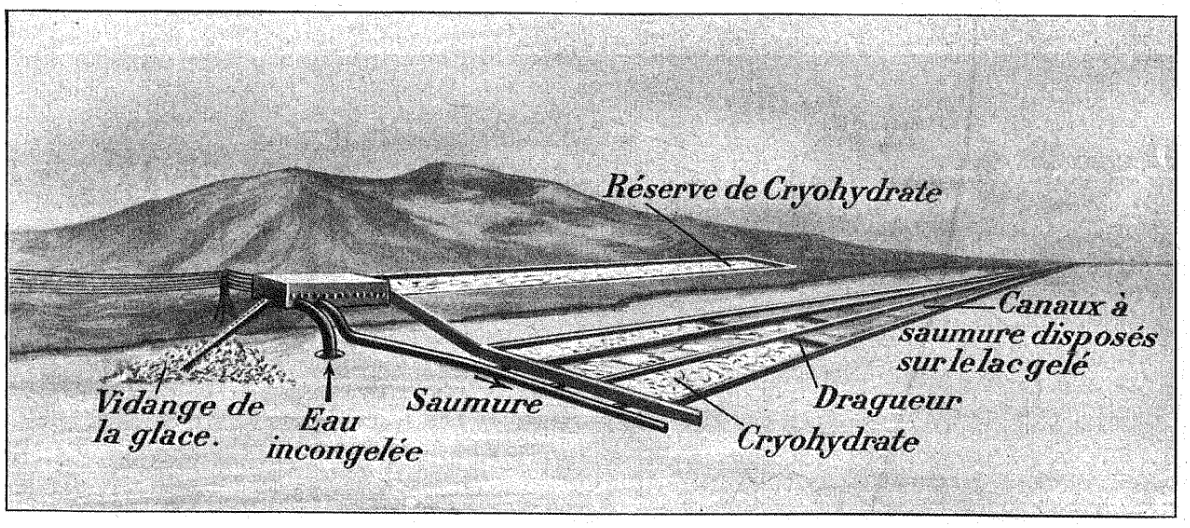



FIGURE 4.12 – Centrale de production de force motrice à partir de la « houille blanche d'hiver » (TROLLER, 1929, p. 270)

ainsi transformées en « de belles contrées de peuplement et d'industrie » (TROLLER, 1929, p. 270). Les richesses minières de l'Arctique deviendraient en outre accessibles.
Barjot propose également l'exploitation de la chaleur solaire selon un principe similaire, et qu'il juge moins onéreux que celui de Mouchot, dans les régions tropicales : un plan d'eau recouvert d'une lame d'huile provoquant un effet de serre forment la source chaude, et l'eau non surchauffée d'un réservoir naturel d'eau (mer, lac ou rivière) la source froide. L'énergie transformée dans une turbine basse pression peut être utilisée dans les colonies des régions intertropicales (Soudan français, Sahara), où l'on peut envisager « d'aménager à très bon marché des surfaces de terrain considérables », en imperméabilisant et noircissant, par du bitume par exemple, ces vastes étendues. Serait ainsi obtenue la force motrice « nécessaire en premier lieu à l'irrigation du sol en vue de la culture ». En effet, là-bas, « le sol, s'il était convenablement irrigué, deviendrait d'une étonnante fertilité » (H. BARJOT, 1933).

Un dernier exemple est celui de Pierre Gandillon, « ingénieur conseil des Villes », dont l'idée audacieuse est d'utiliser la chaleur solaire pour créer dans les régions arides des chutes d'eau, moyennant des aménagements conséquents, afin de produire de l'électricité. Il ne s'agit pas d'un projet d'exploitation de gradients de température — il est d'ailleurs antérieur à celui de Georges Claude et Paul Boucherot— mais il est comparable aux précédents par l'ampleur des aménagements imaginés et l'ambition de modification et d'exploitation de la nature exprimée. S'il n'a pas non plus mené son projet à terme, Gandillon a, comme Barjot, retenu l'attention de l'Académie des sciences et de l'AFAS. Son procédé, la « houille d'or », qu'il a fait breveter, est présenté en 1925 par l'ingénieur des Ponts et chaussées Édouard Imbeaux (IMBEAUX, 1925), et par lui-même à l'AFAS la

même année (Gandillon, 1925). Il consiste à détourner de l'eau d'un grand réservoir vers une dépression naturelle, afin d'y générer une chute d'eau continue grâce à l'évaporation de l'eau par le soleil dans un autre réservoir en contrebas. Cette chute d'eau est exploitée à la manière de la houille blanche, avec une turbine hydraulique, pour produire de l'électricité . Gandillon se propose d'appliquer ce procédé à la Palestine en un projet pour le moins « hardi », comme le fait remarquer un de ses contemporains dans la *Revue des sciences générales et appliquées* (De Varigny, 1932). La Méditerranée y sert de réservoir supérieur, et le Jourdain puis la mer Morte de réservoirs inférieurs, comme l'illustre la Figure 4.13 [55].

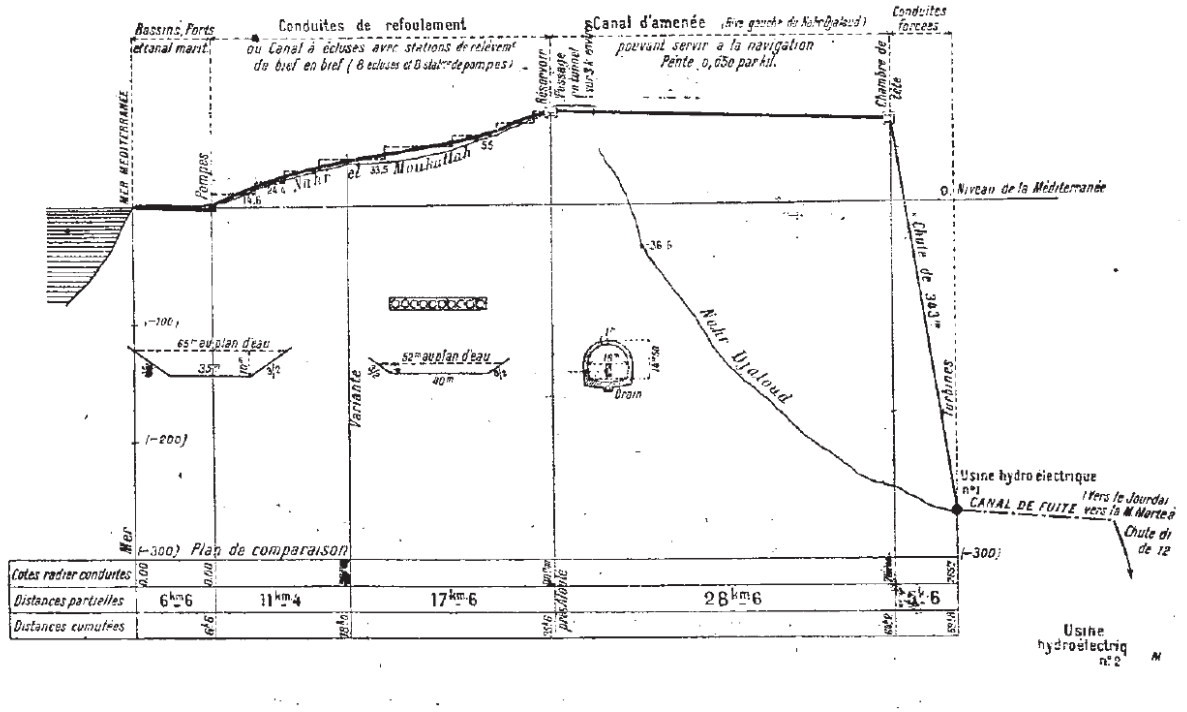



Figure 4.13 – Aménagement de production d'électricité à partir de la « houille blanche d'or » (Gandillon, 1925, p. 173)

Le Jourdain est en effet surélevé par rapport à la mer Morte, ce qui permet d'installer

55. Imbeaux lui-même reconnaît que d'autres inventeurs ont eu une idée similaire, en France et même à l'étranger. Dans une note aux Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences, il mentionne ainsi qu'un certain P. Simon a fait paraître, « dans le journal l'*Électricien*, les 15 et 22 août 1903, deux articles décrivant un procédé analogue » à celui de Gandillon et Imbeaux, ayant de même « la Méditerranée pour origine et la mer Morte pour aboutissement »(Imbeaux, 1932). *La revue générale des sciences pures et appliquées* signale en outre qu'un Allemand, M. Soergel, et un Anglais, M. Hodgson, ont présenté, chacun de leur côté, le même projet en 1929 (La revue générale des sciences pures et appliquées, 1931). On peut aussi signaler le projet relaté dans le *Génie civil* en 1920, d'un ingénieur norvégien A. Hiorth, qui conçoit un aménagement très proche de celui proposé par Gandillon pour la Palestine, mais qui, à la différence de ce dernier, le présente comme une installation hydro-électrique classique, et pas comme une utilisation indirecte de l'énergie solaire (Le Génie civil, 1920). Ce projet n'est en outre pas sans rappeler celui du capitaine Élie Roudaire, qui, à la fin du XIX$^{e}$ s, projetait de réaliser une « mer intérieure » au Sahara, non pour produire de la force motrice, mais pour créer un réseau fluvial, modifier le climat du Sahara et le fertiliser, et qui échoua, malgré le soutien du gouvernement français (Marçot, 2003).

deux usines hydroélectriques. L'eau de la Méditerranée est ainsi déviée vers le Jourdain, puis vers la mer Morte, où elle s'évapore. En 1930, à l'occasion du congrès de l'AFAS à Alger, Gandillon fait part des applications que la houille d'or pourrait permettre dans les colonies et protectorats français (Gandillon, 1930). La « dépression du lac Assal dans la Côte française des Somalis » (actuelle République de Djibouti) engendrerait ainsi la production de 70 000 chevaux-vapeur (plus de 500 000 kW) d'électricité. Les chotts (étendues d'eau salées) des Sud algérien et tunisien seraient exploitables pour obtenir 40 000 chevaux vapeur (environ 300 000 kW). Cet aménagement aurait pour heureuses conséquences la création « de richesses agricoles, industrielles, d'énergie électrique et de produits chimiques, qui forment un tout homogène susceptible de transformer les superficies inutiles des Chotts en une région étonnamment prospère et féconde. » Outre une nouvelle « conquête sur les forces de la nature » (Gandillon, 1930, p. 71) [56], elle serait une preuve des bienfaits de la « culture française » dans le monde Nord-Africain, et « un nouveau témoignage de la vigueur de[s] efforts [des colonisateurs] tendus avec sérénité vers le progrès et le mieux-être de toute l'humanité (Gandillon, 1930, p. 71) ». Même si aucune de ces conceptions n'a été menée à bien, Gandillon communique une dernière étude sur la houille d'or dans les *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*, concernant cette fois-ci le lac Macaraïbo au Vénézuela (Gandillon, 1932). Le principe est toujours le même, ainsi que les bienfaits qu'on pourrait en retirer...

Ces quatre exemples de projets (Claude, Dubos, Barjot, Gandillon) montrent une conception de la science et de la technique conquérantes, vecteur de progrès social, instrument et légitimation de la colonisation par la création de nouvelles richesses. L'optimisme de ces inventeurs face à la possibilité de maîtriser la nature - captation des forces naturelles, modification du climat, fertilisation des déserts de glace ou de sable - dans une perspective productiviste relève de la « dimension prométhéenne » allant jusqu'à l'« *hybris* », caractéristique de certains projets de domination de la nature et d'aménagement de l'espace de la part des puissances colonisatrices (Fredj et De Suremain, 2013, p. 527 ; 269-270). Ils ont tous échoué, semblent *a posteriori* utopiques, mais, étant donné l'audience qu'ils ont obtenue dans certains cercles scientifiques et industriels (cf 4.2.3), Claude et Boucherot, Barjot, Gandillon ont été pris tout à fait au sérieux au moins par certains de leurs membres.

56. L'article de la *Revue générale des sciences pures et appliquées* sur la houille d'or, intitulé « L'utilisation industrielle du soleil », exprime également cette idée de maîtrise absolue de la nature, qui sous-entend que le soleil n'est qu'une composante parmi d'autres d'un système productif. L'article, très favorable, considère d'ailleurs l'entreprise de Gandillon comme un « très joli projet d'aménagement de la planète » (De Varigny, 1932).

### 4.3.4 Production décentralisée de petites puissances électriques pour les campagnes et les colonies

Un type d'installation fréquemment décrit dans les périodiques concerne des installations de production d'électricité de faible puissance, accouplées avec des accumulateurs. Dans *La Nature* et *Le Génie civil*, ainsi que dans les discours d'inventeurs, elles sont destinées aux régions dépourvues de réseau électrique et donc en particulier aux habitations individuelles en campagne métropolitaine et dans les colonies. La plupart d'entre elles concernent l'électricité éolienne, mais il y a aussi eu au moins une tentative pour la production d'électricité solaire. Celle-ci est d'abord décrite, avant les projets éoliens.

Jules Richard et Alfred Henry ont ainsi travaillé, au Musée océanographique de Monaco, sur la production de petites puissances électriques par la chaleur solaire, à l'aide de piles thermo-électriques. Ils présentent leurs résultats dans la revue *La Météorologie* en 1927 (J. Richard et Henry, 1927). Ils partent du principe que « l'irrégularité du rayonnement solaire rend indispensable l'accumulation et la conservation de l'énergie recueillie ». Or, l'accumulation électrique étant « beaucoup plus facile » que l'accumulation mécanique, et l'électricité présentant l'avantage de sa souplesse, de son transport et de ses multiples usages possibles, Richard et Henry considèrent qu'elle serait « particulièrement intéressante, si elle pouvait être obtenue par des procédés simples ». Ils effectuent leurs tests avec plusieurs types de piles thermo-électriques, sur lesquels les rayons solaires sont concentrés grâce à des miroirs paraboliques. Le meilleur rendement qu'ils obtiennent est de 0.187%, résultats qu'ils jugent « encore beaucoup trop faibles, pour être utilisés pratiquement, sauf dans certains cas particuliers ». Ils en déduisent que la « « mise au point » industrielle de ces procédés, si elle est possible, exigera[it] encore, vraisemblablement, de longues et laborieuses recherches » (J. Richard et Henry, 1927, p. 14).

En ce qui concerne les aéromoteurs, il s'agit de modèles allant de quelques centaines de watts à une dizaine de kilowatts, en particulier pour la lumière, mais aussi l'alimentation de petits appareils ou moteurs électriques, pour des installations individuelles. Dans *La Nature*, la majorité des articles mentionnant la production d'électricité par le vent concernent également des dispositifs de ce genre, mis à part ceux de Constantin et Lacroix (cf 4.3.2), ainsi qu'un article de Darrieus sur des centrales éoliennes à partir de rotors Flettner qui sont à l'étude aux États-Unis (Darrieus, 1931a). Certains constructeurs affichent en effet la possibilité, avec les mêmes aéromoteurs, non seulement d'élever de l'eau, mais aussi de produire de l'électricité pour des puissances allant jusqu'à 5 kW grâce à l'emploi d'accumulateurs électriques et de dynamos à marche lente. Ils veulent ainsi concurrencer d'autres moteurs pour les habitations non reliées à un réseau de distribution (cf 5.1). En outre, dans les années 1930, un nouveau type de moteur à vent, les « aérochargeurs », spécifiquement dédiés à la production de puissances électriques inférieures à 1 kW pour

le chargement d'accumulateurs, sont en vente en France métropolitaine et coloniale (cf 5.1). Ils servent pour l'éclairage et la radio, et semblent avoir été surtout utilisés comme générateur portatif pour les automobilistes.

Les ingénieurs Fortier-Beaulieu et Constantin d'un côté, Darrieus et Lacroix de l'autre ont cherché à mettre au point de nouveaux modèles d'aérogénérateurs, conçus grâce à la science aérodynamique. Avec des moyens privés (capitaux de l'entreprise Fortier-Beaulieu, et ceux de la Compagnie électro-mécanique) ils ont fait construire des aérogénérateurs de moyenne puissance accouplés à des accumulateurs, et considéraient ces machines comme des échelles réduites de modèles plus grands destinés à alimenter le réseau électrique. Une éolienne bipale de 8 m de diamètre chargeant des accumulateurs est ainsi restée la seule matérialisation des conceptions de Constantin (Rogier, 2000a, p. 15-16). Son projet était de mettre en place des appareils de 30 à 40 m de diamètre, pour utilisation dans des réseaux électriques (cf 4.3.2). Autour de 1935, Darrieus et Lacroix, à la Compagnie électro-mécanique, ont également fait construire et expérimenter des aérogénérateurs de moyenne puissance, comme une étape avant la mise au point d'aérogénérateurs plus grands destinés au réseau électrique. Si ce type d'aérogénérateurs était leur objectif final, ils ont cherché à profiter de cette expérience pour se positionner sur le marché « d'aéromoteurs industriels adaptés principalement à la production d'énergie électrique » de 2 à 15 kW, destinés aux campagnes et aux colonies (G. Lacroix, 1949) (cf 5.3). En raison d'un prix de revient jugé trop élevé du kWh, ces machines ne se sont pas diffusées. Mais elles sont donc avant tout un moyen, et non un objectif, et le marché associé (campagnes et colonies) une opportunité pour mettre à profit ces expériences préalables.

### 4.3.5 Des convertisseurs « simples et robustes » pour les campagnes et les colonies

Le passage par l'électricité, bien que devenu prépondérant dans les discours pour une utilisation moderne des forces naturelles, n'est pas le seul à être décrit. Certains auteurs préconisent l'utilisation directe de la force motrice, pour les vagues et le vent, et de la chaleur, pour le soleil. Des articles de *La Nature* décrivent ainsi des procédés exploitant directement la force motrice des vagues (ondo-pompe Cattaneo), du vent (navires éoliens, aéromoteurs), ainsi que de la chaleur solaire (distillation, pompage...) (cf 4.2.3). On peut d'ailleurs remarquer que ces derniers sont les seuls à avoir été mis en œuvre et à avoir trouvé une utilisation pratique : l'ondo-pompe Cattaneo de Jules Richard, qui a fonctionné au moins de 1929 à 1940, le distillateur solaire, dont des installations ont été mises en place en Algérie et en Tunisie et effectivement utilisées, et enfin, des aéromoteurs, qui continuent de pomper de l'eau, de manière beaucoup plus importante qu'ils ne produisent de l'électricité *via* des dynamos.

Cependant, certains des appareils fonctionnant avec ces modes de transformation ont perdu de leur caractère moderne, au profit du passage par l'électricité. Dans un article de *La Nature*, Lacroix, ingénieur à la Compagnie électro-mécanique, associe ainsi très clairement les moteurs à vent en usage dans les campagnes (qu'il assimile aux « anciennes roues hydrauliques ») à une tradition dépassée, et énonce deux conditions de « progrès » de ces moteurs : la mise au point de modèle nouveaux par la science aérodynamique, et la production d'électricité par des « groupes aéroélectrique » – ceci lui permet à la fois de critiquer la méconnaissance des constructeurs de moteurs à vent de l'aérodynamique, et de valoriser l'action de la Compagnie électro-mécanique dans ce sens (cf 5.3). Lacroix n'est pas le seul à vouloir moderniser les convertisseurs du vent par la science aérodynamique : c'est aussi le cas des ingénieurs Joëssel et Constantin, qui souhaitent transformer l'utilisation du vent dans les navires en remplaçant les voiles par des aéromoteurs profilés selon cette science, et ont effectué des calculs et mené à bien des expériences dans ce sens (cf 5.3, 5.4). Enfin, Les aéromoteurs ne sont presque pas décrits dans *Le Génie civil* ni dans le *Bulletin de la SEIN*, et le sont moins dans *La Nature* que lors de la période (1880-1918) (cf 4.2.3).

Les discours sur les distillateurs solaires et les pompes éoliennes vantent leurs qualités de robustesse et de simplicité, et en font des appareils idoines pour des territoires qui ne pourraient trouver de meilleurs convertisseurs. Les distillateurs solaires sont ainsi destinés aux zones de l'Empire français dépourvues d'infrastructures électriques, mais aussi d'alimentation en eau potable (cf 5.4). De même, certains auteurs présentent la destination des éoliennes de pompage comme proprement coloniale, pour les mêmes raisons de simplicité et de robustesse. Dans un rapport publié dans la *Revue internationale des produits coloniaux*, Pierre Jacquinot, ingénieur des Ponts et Chaussées, ingénieur en chef adjoint à l'inspecteur général des Travaux publics des colonies, expose ainsi son souhait de voir se développer l'utilisation de ces moteurs dans les colonies françaises dépourvues de réseau électrique . En effet, « ce sont des moteurs de fonctionnement très simple, dont la construction et l'entretien ne présentent pas de grosses difficultés », ce qu'il considère comme une « qualité proprement coloniale » (Jacquinot, 1933, p. 338), ceci en raison des conditions matérielles (manque de réseau de transport et d'approvisionnement en matières premières), et humaines (main d'œuvre indigène). L'auteur pointe probablement l'incompétence supposée de ces personnes en ce qui concerne la marche des machines. Dans le même numéro, A. Charles-Roux, chargé de mission par le ministère des Colonies sur la question des « combustibles et carburants africains », parle dans les mêmes termes de l'intérêt des aéromoteurs dans les colonies françaises d'Afrique (Charles-Roux, 1933) [57].

57. Selon lui, « la production de la force motrice fait nécessairement appel à la mécanique, et dès qu'il s'agit de mécanique il faut ne pas perdre de vue que celle-ci, pour être mise entre les mains de conducteurs indigènes, doit posséder les deux qualités maîtresses du matériel colonial : Robustesse et simplicité. » (p. 213)

## Synthèse section 4.3

L'électricité a gagné en influence sur l'imaginaire technicien des forces naturelles. Dans *La Nature* et *Le Génie civil*, elle est le moyen de conversion le plus fréquemment décrit pour exploiter la houille bleue et le vent, et devient l'horizon de modernité pour l'utilisation de toutes les forces naturelles. Le réseau électrique, que l'État et certaines entreprises entreprennent d'étendre et de ramifier en métropole et dans certaines colonies, permet en effet de transporter, sur des distances de plus en plus grandes, l'énergie quelque part captée à l'aide d'un convertisseur électrique. Il devient la réponse par excellence à l'exigence de modernité technique de contraction du temps et de l'espace. L'électricité est ainsi très valorisée dans *La Nature* et *Le Génie civil*, et en particulier sur le mode du réseau électrique. Elle l'est en moindre mesure sous forme de production décentralisée avec accumulation, qui devient un moyen par défaut d'obtenir de l'électricité. Il n'est plus du tout question, comme dans les années 1880, de transporter l'électricité emmagasinée « en bouteille », et les accumulateurs (qui pèsent toujours le même poids) sont destinés à une utilisation locale.

L'électricité n'est cependant pas le seul mode de conversion envisagé comme avantageux par les inventeurs et ingénieurs étudiés dans cette partie : d'autres types de convertisseurs sont toujours étudiés, qui d'ailleurs ont seuls (à part les aérogénérateurs de petites puissances) connu des applications pratiques : les distillateurs et chauffe-eau solaires (cf sous-section 5.4), l'ondo-pompe Cattaneo du Musée océanographique de Monaco (cf sous-section 6.4.0.0.1), sans oublier les moulins à vent en usage dans les campagnes (voir 5.1). Ceux-ci sont, cependant, moins valorisés par les ingénieurs adeptes de l'innovation technique du *Génie civil*, de *La Nature* et sont parfois assimilés à un passé archaïque (aéromoteurs) ou à une utilisation par défaut (aéromoteurs et distillateurs solaires). Pour ces deux appareils, leur utilisation est cantonnée aux campagnes non connectées au réseau et aux colonies.

On voit ainsi se dessiner, en fonction des territoires, un arc-en-ciel des houilles qui est lié non seulement à la disponibilité de la ressource (et à la connaissance qu'on en a), mais aussi aux systèmes techniques et énergétiques ainsi qu'aux populations en présence. Ainsi, non seulement les marées sont abondantes dans le Nord-Ouest de la France, mais ce territoire est aussi visé par les acteurs de la construction du réseau électrique national, qui y est quasi absent dans l'entre-deux-guerres. Aussi, de nombreux projets d'usines marémotrices concernent-ils ce territoire. Les vagues sont présentes en Méditerranée alors qu'il n'y a pas de marées, et les lieux qu'elles bordent (sud de la France, Nord de l'Afrique) sont également en cours d'électrification, c'est pourquoi des entrepreneurs y ont porté des projets d'usines houlomotrices. Le soleil se présente en abondance dans les territoires africains, mais, quoique de manière différenciée selon les pays, des infrastructures de transport de

l'électricité y sont presque absents, de même que des usagers européens, qui sont concentrées dans quelques zones urbaines. Certains acteurs envisagent ainsi de tout y construire de toutes pièces (réseau, mais aussi ville, industrie...). Ces projets revêtent une dimension prométhéenne, c'est-à-dire qu'ils « visent à utiliser la science [ici, de l'ingénieur] pour modeler le monde et le posséder » et ce « dans une optique modernisatrice » (Fredj et De Suremain, 2013). Ils rejoignent le souci d'une intensification de la production coloniale de la part des responsables politiques français et de l'administration coloniale typique de l'entre-deux-guerres (Bonneuil, 1991, p. 33). Enfin, des convertisseurs utilisant l'accumulation électrique, non connectés au réseau, ou, *a fortiori*, utilisant directement l'énergie (calorifique ou mécanique), parfois décrits comme « simples » et « robustes », sont destinés à des territoires qui ne disposent pas de réseau électrique ou à des populations qui n'en auraient pas l'usage (campagnes, colonies, indigènes).

## 4.4 Synthèse Chapitre 4

Ce chapitre montre une multiplication des propositions de projets visant à exploiter les forces naturelles, témoins du regain d'intérêt pour ce sujet, en particulier dans les années suivant directement l'issue de la première guerre mondiale. Ceci est dû à un engouement pour l'utilisation des marées et des vagues dans la perspective du programme hydroélectrique national amorcé en 1919.

L'expression de forces naturelles est toujours utilisée pour désigner le même ensemble de sources d'énergie que pendant la période précédente. Les mêmes avantages (inépuisabilité, abondance, omniprésence) et inconvénients (dispersion, irrégularité, intermittence), leur sont conférés, montrant une constance dans l'imaginaire technicien des forces naturelles. Les marées, les vagues et le vent ont été particulièrement discutés, suivis de l'énergie thermique des mers et du soleil. Les nouveaux dérivés colorés de l'expression de « houille blanche », qui les désignent aussi désormais, montrent le dessin d'une carte énergétique des forces naturelles, et ce sur le territoire français et colonial, voire mondial.

En métropole, cette vision territorialisée des forces naturelles est liée à la politique de développement des forces hydrauliques sur le territoire français, qui sera développée en 6. L'électricité, associée au réseau électrique en construction, est ainsi un mode de conversion privilégié par les inventeurs et valorisé par les ingénieurs pour exploiter les forces naturelles. Il ne donne cependant lieu à aucune installation opérationnelle. À cette vision est liée l'apparition de projets grandioses visant à exploiter aux mieux toutes les zones jugées sous-exploitées de la planète. D'autres modes de transformation sont toujours imaginés, et ce sont les seuls qui sont finalement expérimentés et/ou utilisés, bien que moins valorisés par les ingénieurs des revues étudiées. Ces convertisseurs sont destinés aux

campagnes ou aux colonies, faute de mieux, et servent aux usages suivants : production localisée d'électricité, avec les moulins à vent électriques et aérochargeurs muni d'accumulateurs ; utilisation directe de l'énergie : chauffage ou distillation de l'eau par l'énergie solaire ; pompage de l'eau avec les aéromoteurs. Certains auteurs portent en outre des projets grandioses visant à exploiter aux mieux toutes les zones jugées sous-exploitées de la planète, et les convertisseurs qu'ils conçoivent sont imaginés au sein de tout un système technique à mettre également en place. Cette vision prométhéenne n'a pas dépassé le stade du papier, sauf le projet de Claude et Boucherot qui ont effectué des expériences à un degré important de réalisation (5.3).

Le degré de mise en pratique de ces projets dépend des acteurs qui les ont mis en œuvre et des moyens dont ils ont disposé. Le Chapitre 5 propose une classification des projets identifiés en fonction des acteurs impliqués, et décrit plus en détails les applications auxquelles ils sont parvenus.

# Chapitre 5

# Typologie des projets en fonction des acteurs impliqués

Le nombre de propositions pour l'exploitation des forces naturelles a considérablement augmenté à l'issue de la première guerre mondiale. Ceci est lié à la multiplication des acteurs impliqués durant cette période. Ce chapitre propose une classification des projets en fonction de ces acteurs :

1. les inventeurs. Ceux-ci sont les seuls individus de la liste, car ils agissent en leur nom et sans en référer systématiquement à une institution particulière.
2. les cercles scientifiques et techniques au sens large : revues, sociétés savantes,
3. les institutions publiques au niveau national : Ministère des Travaux publics ( Commission de la houille bleue et services des Ponts et chaussées départementaux), ONRSI, résidences générales de Tunisie ou du Maroc, ou encore services techniques de l'Algérie et de la Tunisie,
4. les institutions publiques à un échelon inférieur : conseils départementaux et communes,
5. les grandes entreprises du secteur de l'énergie,
6. les nouvelles entreprises créées pour exploiter les marées ou les vagues,
7. les constructeurs d'aéromoteurs,
8. les laboratoires publics ou privés : Institut de Physique du Globe, Institut aérotechnique de Saint-Cyr, Musée océanographique de Monaco...

La période (1880-1918) ne comportait que trois de ces types d'acteurs (inventeurs, cercles scientifiques et techniques, constructeurs d'aéromoteurs), la multiplication des acteurs concerne donc trois nouvelles catégories : les institutions publiques nationales, les

conseils départementaux et les communes, les laboratoires publics et privés, les grandes entreprises du secteur de l'énergie, les nouvelles entreprises dédiées à l'exploitation de l'énergie des marées et des vagues.

La Figure 5.1 représente schématiquement le réseau des acteurs identifiés. Lorsque deux acteurs (ou types d'acteurs) sont reliés par un trait simple, cela signifie qu'ils ont agi ensemble pour mener à bien un projet, qui est stipulé. Les flèches définissent plus précisément des sollicitations d'un acteur à un autre acteur.

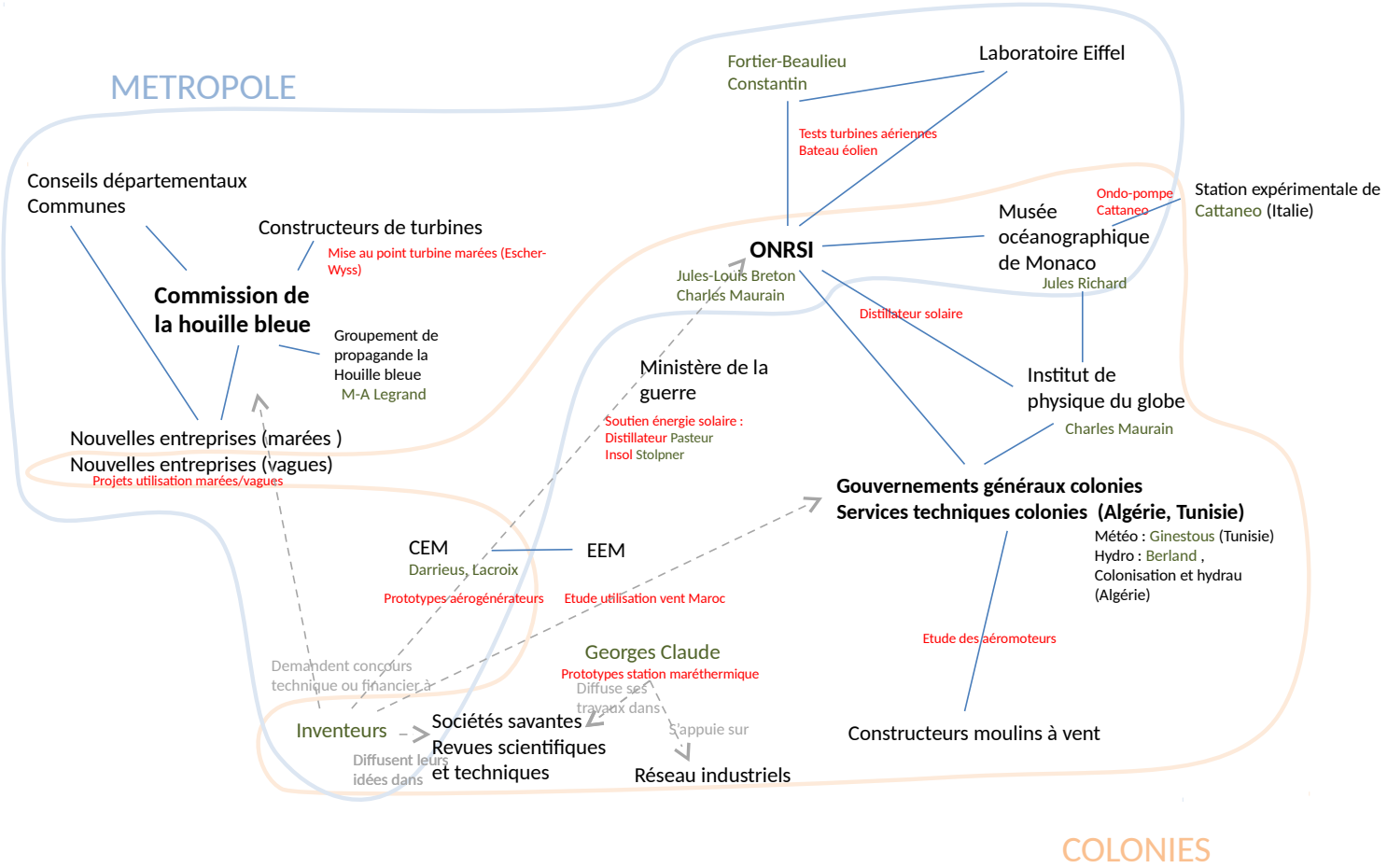



FIGURE 5.1 – Réseau d'acteurs pour l'utilisation des forces naturelles dans l'entre-deux-guerres

Ce schéma permet d'appréhender l'ensemble des initiatives en faveur de l'exploitation des forces naturelles comme présentant certaines cohérences d'acteurs, mais non comme une dynamique globale coordonnée et pensée comme telle par un acteur ou un ensemble

d'acteurs.

Ainsi, comme lors de la première période, les inventeurs et les cercles scientifiques et techniques sont présents dans la majorité des projets. Pour assurer la propriété de leur invention, trouver un soutien financier ou tout simplement une diffusion de leurs idées, ils prennent des brevets, présentent leurs conceptions aux revues scientifiques et techniques ou aux sociétés savantes.

Mais, à la différence de la période précédente, ils s'adressent également aux nouvelles institutions publiques qui pourraient leur apporter un soutien financier et technique, notamment l'ONRSI et la Commission de la houille bleue . Celles-ci ont en effet vocation à encourager, pour la première, la mise en œuvre de toutes les inventions pouvant servir à l'intérêt national, et, pour la seconde, l'exploitation de la houille bleue sur les côtes françaises. Les municipalités et conseils départementaux ont aussi choisi de financer certains projets d'exploitation des marées. Les inventeurs peuvent enfin faire appel aux ressources techniques et financières d'entreprises, dont ils sont employés ou proches.

Certains projets, qui bénéficient de financements privés ou publics, arrivent ainsi à quelques réalisations, mais la majorité restent de l'ordre théorique. Cette matérialisation peut consister en des essais expérimentaux sur les composantes d'un système ( Commission de la houille bleue  : essais de turbines, de corrosion des matériaux, d'un « bélier du Minou »...), en la construction d'appareils de taille réduite (bateau éolien de l'ONRSI) ou de prototypes opérationnels (éoliennes électriques de la Compagnie électro-mécanique), ou encore celle de plusieurs appareils effectivement utilisés (distillateurs solaires, aéromoteurs).

Sur le schéma 5.1, deux acteurs se révèlent centraux de nuées d'acteurs, suggérant deux grandes dynamiques : l'ONRSI et la Commission de la houille bleue . Les îlots correspondent à des acteurs qui ne sont pas, comme la majorité des inventeurs identifiés pour la période, restés au stade de la théorie, et, bénéficiant de leurs moyens propres et/ou de leurs réseaux scientifiques et industriels, sont restés relativement isolés de la dynamique nationale d'innovation. C'est le cas de Georges Claude, de la Compagnie électro-mécanique et de Raymond Joëssel. Enfin, des inventeurs partent des multitudes de flèches : ils ont sollicité, souvent en vain, les institutions qui pourraient leur permettre de mettre en œuvre leurs conceptions. Un cas à part, qui forme aussi une sorte d'îlot : les constructeurs d'aéromoteurs, qui vendent déjà des aéromoteurs depuis la période précédente et ont été sollicités par certains acteurs pour des projets d'innovation. Cette multiplicité de dynamiques d'acteurs révèle le caractère dispersé et non systémique de la dynamique d'innovation en faveur des forces naturelles. Il s'agit ainsi, plutôt, d'un ensemble de dynamiques.

La typologie proposée a pour but de saisir cette dynamique. Elle classe les projets selon

les acteurs impliqués, en trois grands types, présentés dans le Tableau 5.1. Le premier type de projets était le seul présent lors de la période (1880-1918), c'est-à-dire des inventeurs qui, par le biais de publications, trouvent une diffusion pour leurs idées, mais ne vont pas plus loin dans leur réalisation. Le second concerne des essais menés par des moyens uniquement privés, venant d'entreprises. Le dernier type de projets concerne ceux qui ont été portés ou soutenus par des institutions publiques au niveau national, menant à différents degrés de concrétisation. Ils forment des ensembles de nœuds d'acteurs, identifiables sur le schéma de la Figure 5.1, et dont les acteurs centraux apparaissent comme étant l'ONRSI et la Commission de la houille bleue . Autour de ces deux acteurs se trouvent des nuées d'autres acteurs, mais ils ont peu d'intersections entre eux, si ce n'est indirectement *via* les inventeurs qui les ont sollicités souvent simultanément et vainement pour obtenir leur soutien.

TABLE 5.1 – Typologie des projets en fonction des acteurs impliqués

| Acteurs impliqués | Résultats obtenus |
|---|---|
| Inventeurs,<br>cercles scientifiques et techniques | Publications : articles, communications, brevets... |
| Inventeurs,<br>cercles scientifiques et techniques,<br>entreprises | Publications, réalisations : éléments de machines, tests, prototypes, séries d'appareils... |
| Inventeurs,<br>cercles scientifiques et techniques,<br>entreprises, institutions publiques | Publications, réalisations : éléments de machines, tests, prototypes, séries d'appareils... |

Cette typologie permet d'appréhender le mouvement global d'initiatives en faveur de l'exploitation des forces naturelles, sa ou ses chronologies, sa cohérence ou sa dispersion, et les raisons de l'inaboutissement de la plupart des projets.

Le Chapitre 5 est construit selon cette typologie, dans l'ordre du nombre d'acteurs croissant. Pour chaque type de projets, leur relation avec une dynamique nationale en faveur des forces naturelles sera questionnée. Outre les jeux d'acteurs, les études de cas permettent d'étudier plus en détails les spécificités de chaque projet : convertisseur utilisé et territoire d'application. Une exception est mentionnée dans un premier temps : les constructeurs d'aéromoteurs. Ils étaient présents lors de la période précédente, et proposent encore les mêmes types de machines, qui sont en usage sur le territoire métropolitain et colonial. Cependant, étant donné qu'ils sont toujours présentés avec faveur dans certaines revues comme *La Nature*, qu'ils sont sollicités par certains acteurs de l'exploitation des forces naturelles (l'ONRSI, les services techniques des Colonies et l'énergie éolienne) et qu'ils proposent de plus en plus l'usage électrique des aéromoteurs, ce chapitre questionne leur maintien au long de la période et examine leur activité . Sont ensuite

étudiés : les inventions qui sont restées de l'ordre théorique, les projets portés par des acteurs privés qui ont donné lieu à des expérimentations (navire aéro-turbo de Raymond Joëssel, usine maréthermique de Georges Claude et aérogénérateurs de Georges Darrieus), puis les projets qui ont été soutenus par l'ONRSI (bateau éolien Constantin, tests aérodynamiques de moteurs éoliens et distillateurs solaires). Ceux-ci impliquent en effet une institution publique au niveau national, et rentrent donc dans la dernière catégorie de projets qui caractérise l'entre-deux-guerres par rapport à la période (1880-1918) (troisième type du tableau 5). Les projets d'utilisation de la houille bleue, qui entrent également dans cette troisième catégorie, seront traités dans un chapitre à part : d'abord, en raison de leur grand nombre et ainsi que du grand nombre d'acteurs qui y ont participé, mais aussi en raison d'une différence de nature entre ces deux dynamiques : on verra que l'action de soutien de l'ONRSI en faveur des projets d'exploitation des forces naturelles n'a pas été pensée comme telle, alors que les projets d'exploitation de la houille bleue ont été encouragés et encadrés de façon cohérente par le ministère des Travaux publics dans le cadre d'une politique énergétique.

## 5.1 Un cas à part : les constructeurs d'aéromoteurs

Après l'expérience échouée du duc de Feltre (cf 3.1) et de rares exemples d'installations, la production d'électricité par l'énergie éolienne reste une nouveauté en France dans l'entre-deux-guerres. Elle concerne deux types de machines : les éoliennes de pompage identiques à celles de la période (1880-1918), accouplées à des dynamo et à des accumulateurs, et des appareils de plus faibles puissances, spécifiquement dédiés à la production d'électricité et inspirés de modèles américains apparus dans les années 1930. Dans cette section, le marché des aéromoteurs en général, puis l'usage de ces deux types de production d'électricité éolienne sont questionnés.

Premièrement, des données montrent une continuité dans certaines entreprises avec la période précédente, et d'autre part une permanence du marché pendant l'entre-deux-guerres. Des constructeurs continuent en effet de vendre des moulins à vent pour le pompage de l'eau dans l'entre-deux-guerres. L'*Annuaire industriel* indique un nombre de constructeurs de moulins à vent quasi-constant entre 1925 et 1938 [1], avec des sociétés qui étaient déjà présentes sur le marché avant la guerre. Vidal-Beaume, devenu R. Henry puis Henry-Beaume (Boulogne), mais aussi Caruelle (Paris), Araou frères (Narbonne), Chêne (Saint-Quentin), Pilter (Paris), qui vendent des moulins à vent de type américain, sont ainsi indiqués en 1925, 1935 et 1938 comme sociétés commercialisant des « moulins à vent » et « éoliennes » dans un annuaire professionnel. Une nouvelle société,

1. 18 en 1925, 21 en 1935, 19 en 1938.

les « applications aérodynamiques et industrielles », créée en 1929 à Paris, y est même mentionnée [2]. Les sociétés Costes et Escaffre, qui proposent des turbines aériennes vantées dans *La Nature*, sont de même créées dans les années 1920 (Weiss, 1919, Weiss, 1920). Les éoliennes Bollée ont en outre été construites jusqu'après la guerre (cf 2.3), et une trentaine de communes, ainsi qu'un nombre égal de riches particuliers, achètent de telles machines dans les années 1930 (cf 2.3 : Table 2.9.).

Plusieurs éléments vont cependant dans le sens d'une diminution de ce marché, suivant l'hypothèse de Rogier, (2002, p. 18). Selon Pestel, (2010, p. 237), les éoliennes de pompage ont, en France, été progressivement remplacées par des moteurs électriques ou thermiques. Si l'on reprend les chiffres des statistiques décennales du ministère de l'Agriculture déjà examinées en 2.3, on constate en effet que le « nombre de moulins à vent utilisés comme machines agricoles entre 1882 et 1892 » est, en métropole, de 6 167 (Ministère de l'Agriculture, 1897, p. 408 ; 422 ; 256) et qu'il n'y a plus en 1929 que 2 772 aéromoteurs utilisés comme « moteurs de culture mécanique » (Ministère de l'Agriculture, 1936), ce qui va dans le sens d'une restriction du marché. Ceci, à nouveau, ne renseigne que sur l'utilisation agricole de ces machines, sans qu'on sache si les usages domestiques ou autres y étaient également comptabilisés.

En Algérie et en Tunisie, où les pompes éoliennes se sont également multipliées entre 1880 et 1920 (cf 2.3), il est possible que la même tendance ait été à l'œuvre. En 1954, en Algérie, deux ingénieurs des services techniques oranais, responsables depuis 1949 de la mise en place de nouvelles éoliennes de pompage dans les Hauts plateaux oranais, évoquent ainsi « l'impression des plus défavorables [qu'ils ont ressentie] à la vue des nombreux appareils éoliens abandonnés, parce que en panne, voire même partiellement détruits, un peu partout dans les exploitations agricoles [3] ». Après enquête auprès des utilisateurs, ils l'expliquent par deux raisons : d'une part, l'apparition du réseau électrique, et d'autre part, « la conception d'appareils construits pour des buts et des pays totalement différents » de l'Algérie. Ce dernier aspect amène un autre paramètre, qui est l'adaptation des machines à des conditions climatiques particulières (cf 9.2.2.2).

Une multiplication des études de cas de sociétés commercialisant des aéromoteurs permettrait d'établir plus précisément l'évolution de l'utilisation de ces appareils durant l'entre-deux-guerres [4].

2. Kompass international, 1925, Kompass international, 1938Kompass international, 1938

3. ANOM 81F 2042, p.d., Avargues et Ripoll, Création de points d'eau dans les Hauts plateaux oranais. Utilisation de l'énergie éolienne, Conférence du 22 mai 1954 au Service des études scientifiques du Service de la colonisation et de l'hydraulique.

4. Le seul chiffre de ce type dont je dispose est la liste des éoliennes Bollée installées avant 1941 (voir 2.3, Table 2.9), qui ont été commercialisées jusque l'après-guerre, et il contredit l'hypothèse de la restriction du marché : il montre que c'est entre 1927 et 1938 que le plus grand nombre de ces appareils a été vendu ! Mais ce constructeur, qui s'est adressé à une clientèle restreinte (en témoigne le nombre de modèles vendus : une soixantaine) et particulièrement aisée (la moitié des clients sont des particuliers

Dans l'ensemble, ces constructeurs proposent le même type de machines que sur la période (1880-1918), à quelques détails près : par exemple, à partir des années 1930, les Ateliers de construction de Paimboeuf commercialisent un plus grand modèle d'éolienne, de 7 m de diamètre au lieu de 5 m pour le plus grand des modèles jusque là proposé (Pestel, 2010, p. 337). Ainsi, on peut toujours trouver sur le marché le même type d'aéromoteurs : les moulins à vent américains, la panémones, les turbines éoliennes.

Mais, à l'inverse de la période (1880-1918), ces constructeurs affichent pour la plupart la possibilité de produire de petites puissances électriques, pour des usages domestiques ou dans de petits ateliers (cf 4.3.4). Chêne à Saint-Quentin, ainsi que Cyclone à Compiègne, ont ainsi communiqué à René Champly, pour son ouvrage général sur les aéromoteurs, les caractéristiques techniques de telles installations, à partir de moulins à vent de type américain (Champly, 1933, p. 227-228 ;243-244). Cyclone donne en outre un tableau comparatif, très avantageux pour la solution éolienne, entre le prix de revient annuel de l'électricité obtenue à partir d'un aéromoteur, d'un moteur à essence ou du secteur électrique. Il est, dans les deux cas, plus de dix fois inférieur : 5 548 francs pour un moteur à essence, 3 672 francs pour le réseau électrique, et 314 francs pour le moteur éolien (voir Annexe B.1 [5]). De même, les constructeurs de turbines aériennes Escaffre, la Société des ateliers Saint-Jacques ou Lafond, proposent tout à la fois l'élévation de l'eau et la production d'électricité pour l'éclairage (Weiss, 1920 ; Weiss, 1921a ; Hunebelle, 1922), mais aussi, en ce qui concerne Lafond, pour le chauffage (Pyramont, 1920, p. 80). L'Annexe C.1 montre une publicité dans l'ouvrage de E.-H. Lémonon, (1920) pour les turbines aériennes Costes, où les usages de pompage, d'éclairage et de force motrice sont mis en avant.

De nouveaux appareils, petits aérogénérateurs nommés « aérochargeurs », sont en outre inspirés, ou directement importés, des modèles américains de « Winchargers » proposés depuis les années 1920 aux États-Unis (Righter, 1996, p. 73-104, Rogier, 2000b). Ils dérivent des hélices d'avion dont la modélisation et la construction a bénéficié des nombreuses études aérodynamiques de la Première Guerre mondiale et sont utilisés pour alimenter des ampoules, radios ou appareils de TSF (La Nature, 1933). Plusieurs sociétés, parmi lesquelles des constructeurs de matériel automobile, de radiocommunication, ou de petits moteurs, en proposent pour quelques milliers de francs, en France mais aussi dans les territoires d'Afrique du Nord [6].

majoritairement châtelains, l'autre sont des communes.) ne semble pas représentatif des constructeurs d'aéromoteurs.

5. Le prix du kWh électrique utilisé pour le calcul est conforme au prix du kWh donné par Lévy-Leboyer, (1994b, p. 86) : 1.70 fr/kWh, alors que selon Lévy-Leboyer, le prix moyen du kWh électrique dans les villes de moins de 10 000 habitants était de 1.57 francs pour la force motrice et de 2.20 francs pour l'éclairage. L'auteur ne donne pas, en revanche, le prix d'installation de chacune de ces solutions !

6. Le constructeur Lucien Brégeaut, basé à Paris, propose ainsi, en 1933 au moins, des « aérochargeurs », hélices bipales de quelques centaines de watts munis d'accumulateurs, au prix de 2 500 francs.

À nouveau, une étude détaillée de ces constructeurs permettrait d'évaluer le nombre d'installations qui ont été faites de ces deux types de machines aérogénératrices (aéromoteurs munis d'accumulateurs, et aérochargeurs). Le fait que plusieurs constructeurs les proposent suggère qu'il y avait bien là un marché. Mais, pour les aéromoteurs munis d'accumulateurs, le prix important de ces installations à l'achat comparé à celui des autres moteurs individuels pour la génération d'électricité [7] laisse supposer qu'elles sont restées rares dans l'entre-deux-guerres et que ces constructeurs ont continué à vendre très majoritairement des installations de pompage. Les Ateliers de construction de Paimboeuf, affirmant que leurs éoliennes Bollée sont en mesure de fournir l'électricité pour « l'alimentation de fermes ou de petites communautés », n'ont ainsi finalement mis en place aucune installation de ce genre, de même que leurs prédécesseurs [8]. Pour les aérochargeurs, ils connaissent probablement une diffusion plus étendue, étant donné que plusieurs constructeurs les proposent, pour un prix moindre, et que leur seul mode d'utilisation est électrique [9]. Mais ces constructeurs ont probablement disparu dans les années 1940 : des ingénieurs du ministère de l'Industrie, cherchant des moyens d'alimenter le réseau électrique en période de pénurie, ne sont pas parvenus à trouver des modèles français d'aérochargeurs et ont alors choisi de les importer d'Amérique (cf 8.1.2).

Le pompage éolien est donc toujours une réalité de certaines campagnes françaises dans

---

Ce constructeur commercialise également des générateurs de gaz à partir de l'essence pour les usages domestiques dans les zones dépourvues de réseau de distribution du gaz.
La société R. Lavinay, basée à Caen, vend quant à elle, à partir de 1934, des « Aéro-force-Lumière », hélices bi- ou quadripales d'un diamètre maximum de 3.60 m et avec des caractéristiques analogues (Dumas, 1934). Cette société est spécialisée dans l'équipement électrique automobile ainsi que dans la réparation du petit matériel électrique (dynamos, magnétos, accumulateurs). Elles ont fait l'objet de deux brevets au nom de Rodolphe Lavinay et Alfred Beury (Lavinay et Beury, 1934 ; Lavinay et Beury, 1936), et sont vendues au prix de 6 000 francs (il s'agit du prix, sans accessoires, en 1938). Lavinay s'adresse tout particulièrement à une clientèle automobiliste. Un article d'*Auto-Volt*, revue spécialisée dans l'automobile, fait ainsi la promotion de l'Aéro-force Lumière en 1934, avant tout comme un accessoire permettant le rechargement des batteries automobiles (Dumas, 1934, AN 1991 0305/3, p.d., Lettre de Rodolphe Lavinay à Paul Pétry, 02/03/1942.).
En Algérie, les Winchargers américains sont vendus, au moins en 1937, par les Établissements A. Kespy (spécialisée dans la construction et l'entretien d'installation de radio), basés à Alger, ainsi qu'en 1938 par la société Jean Solere, « technicien du Radio-club », basée à Oran (publicité dans *L'Oranie populaire* en 1938 et*L'Afrique du Nord illustrée*, en 1937).
Au Maroc, les Établissements G. Barre, basés à Rabat (vente de petits appareils électriques domestiques : « Lumière, radio, glace, etc ») , commercialisent également des Winchargers (La Terre marocaine, 1937).

7. Par exemple, 80 000 à 200 000 francs pour une éolienne Bollée, sans les accessoires électriques, en 1941.
AN 1991 0305/3, p.d., Lettre de Rodolphe Lavinay à Paul Pétry, 02/03/1942 ; Lettre du directeur de la Société anonyme des Ateliers de construction de Paimboeuf à Paul Pétry, 08/12/1941.)

8. Dans la liste des éoliennes Bollée en fonctionnement en 1941 donnée par les Ateliers de construction de Paimboeuf, seules des installations de pompage sont mentionnées.
AN 1991 0305/3, p.d., Ateliers de construction de Paimboeuf, Liste des références des installations existantes, 1941.

9. Paul Basiaux affirme en 1946 que Georges Bretel, constructeur à Quédillac, aurait installé, à partir de 1937, « une centaine de petits groupes éoliens (à hélices tripales et batteries d'accumulateurs) de 1/2 à 5 ch par vent de 10m/s » (Basiaux-Defrance, 1947, p. 85)

l'entre-deux-guerres, mais son usage s'est probablement amenuisé au fut et à mesure de la période avec l'apparition du réseau électrique. Les installations d'électricité éolienne, que ce soit à partir de modèles de pompage adaptés, ou de Winchargers, ont connu un succès relatif dont il faudrait chiffrer l'ampleur et l'évolution.

## 5.2 Des idées d'inventeurs sans soutien financier ni réalisations

Comme pour (1880-1918), la période (1919-1939) est caractérisée par une quantité importante d'idées pour l'utilisation des forces naturelles, sans aucune expérimentation ou réalisation technique. La promesse d'une aide financière pour l'utilisation de la houille bleue, et la confiance dans l'idée de substituer d'autres houilles colorées à la houille blanche à la place de la houille noire, semblent avoir stimulé l'imagination et le dynamisme des inventeurs. En raison de leur nombre, il est difficile de faire une liste exhaustive de ces inventeurs ou d'en dresser un profil-type. Ils sont souvent ingénieurs, de spécialités et de cercles divers : ingénieurs des Ponts et chaussées, ingénieurs civils des Mines, spécialistes de l'électricité, de l'hydrodynamique, de l'aérodynamique ou encore de l'hygiène des villes. On trouve également d'autres profils, comme des astronomes, des médecins, des militaires retraités. Ces personnages sont pour certains renommés, par exemple des académiciens. En voici quelques exemples : Laporte, ingénieur civil des Mines et spécialiste de l'électricité, qui imagine un système de turbines mises en marche par les courants de marées et le communique à l'Académie des sciences en 1920 (Laporte, 1920) ; Guillaume Bigourdan, astronome reconnu et futur directeur de l'Académie des sciences, qui propose en 1920 l'utilisation d'une « cloche » à marées à l'Académie des sciences (Bigourdan, 1920) ; Max-Albert Legrand, médecin de la marine, secrétaire du groupe de propagande « La houille bleue » (voir 6), qui conçoit une pompe utilisant l'énergie des vagues, dont il fait part dans un ouvrage et plusieurs articles (Legrand, 1918 ; Legrand, 1921 ; Legrand, 1923) ; Henri Barjot, vraisemblablement médecin [10], expose à l'Académie des sciences deux procédés pour exploiter les gradients naturels de température (H. Barjot, 1928 ; H. Barjot, 1932) ; Pierre Gandillon, « ingénieur-conseil des villes », communique son projet d'utiliser la chaleur solaire à l'Académie des sciences (Imbeaux, 1925 ; Gandillon, 1932), mais aussi à l'AFAS (Gandillon, 1925 ; Gandillon, 1930), et a rencontré un certain succès dans la presse coloniale (Le courrier d'Ethiopie, 1932). Certains d'entre eux sont des lecteurs de revues scientifiques et techniques qui ne sont pas davantage présentés, et doivent être des ingénieurs, techniciens ou tout simplement amateurs de techniques tels

10. Une thèse en médecine a été soutenue au nom de Henri Marie René Barjot en 1925 à l'Université de Bordeaux.

que Jauvert, qui imagine exploiter les différences de température entre l'air et une source thermale en 1921 (La Nature, 1921c).

Certains individus, qui n'étaient pas inventeurs de leur procédé, se sont aussi fait les chantres de la « propagande » autour d'une force naturelle, et ont cherché à organiser leur développement. Tel est le cas des membres du « groupement de propagande La houille bleue », soutenus par la Ligue maritime, et dont le plus actif fut le secrétaire Max-Albert Legrand, médecin principal de la marine en retraite, qui a joué un rôle déterminant dans la création de la commission du même nom (voir 6). D'après son prospectus de présentation, le groupement, auquel appartenaient différentes personnalités du monde politique et de la presse, se proposait de promouvoir « par la plume, par la parole et par l'action » l'utilisation des vagues, des marées et de la houle [11].

Un autre exemple de militaire retraité cherchant à promouvoir et à organiser l'utilisation d'une force naturelle est celui de Constant Riet, ancien commandant résidant à Sidi Bel Abbès. Celui-ci effectue dans la presse locale une « propagande », pour le développement de l'utilisation de la force motrice du vent en Algérie, afin de remplacer le combustible insuffisant par de l'électricité éolienne. Il publie sept articles entre février et juin 1926 dans le journal du Syndicat commercial et industriel de Sidi-bel-Abbès [12] et engage une série de conférences sur le sujet, dont une à l'AFAS à Constantine en 1927, une autre au Congrès de l'eau à Alger en 1928. Il propose son aide aux lecteurs pour installer des moulins à vent chez eux. Il étudie, avec un ingénieur du service agricole de son arrondissement, l'installation d'un aéromoteur pour le pompage de l'eau dans un réservoir de 400m$^3$ à l'École d'agriculture de Sidi-bel-Abbès en construction. Il réussit à attirer l'attention du Gouvernement général d'Algérie, puisqu'en 1928, son assemblée financière aborde à trois reprises le sujet de la construction de stations éoliennes en Algérie [13]. L'administration coloniale promet des crédits pour la construction de deux stations éoliennes, dont l'une à l'Institut d'agriculture de Maison-Carrée, et l'autre à l'École d'agriculture de Sidi-Bel-Abbès, mais cette promesse semble ne pas avoir été honorée. Les ingénieurs du service du Génie rural y sont en effet opposés car ils considèrent la solution préconisée par Riet trop onéreuse et peu originale au regard d'autres propositions qui leur ont été envoyées.

11. AN 1977 0313/46, p.d., Prospectus du Groupement de propagande La houille bleue.
12. Riet, 1926a ; Riet, 1926b ; Riet, 1926c ; Riet, 1926d ; Riet, 1926e ; Riet, 1926f ; Riet, 1926g.
13. Gouvernement général d'Algérie, 1928b, p. 155-157 ; Gouvernement général d'Algérie, 1928c, p. 171-173 ; Gouvernement général d'Algérie, 1928a, p. 1126-1130.

## 5.3 Des initiatives privées menant à des tests de machines ou à la construction de prototypes

Certains inventeurs ont bénéficié de moyens privés suffisants pour construire des prototypes et mener des expériences à l'échelle envisagée pour l'exploitation future de leurs procédés (îlots du schéma Figure 5.1, deuxième type de projets du Tableau 5). C'est le cas de trois inventeurs : Raymond Joëssel, Georges Claude et Georges Darrieus. Claude et Joëssel ont des profils similaires : ingénieurs de grandes écoles, ils sont aussi industriels, patrons d'entreprises, et ont utilisé leurs propres moyens pour mettre en œuvre leurs conceptions. Darrieus s'en éloigne légèrement puisqu'il a agi en tant qu'ingénieur-conseil au service de Recherche et développement de la Compagnie électro-mécanique, qui est en outre une entreprise du domaine de l'énergétique, et plus précisément de l'électrotechnique. Cependant, il a également agi en tant qu'inventeur et avec les moyens d'une entreprise privée, sans lien avec des institutions publiques.

Ces trois ingénieurs ont ainsi imaginé et testé des convertisseurs innovants très différents (navire propulsé par une éolienne, station maréthermique, aérogénérateurs de moyenne puissance) en pensant trouver un marché en métropole (Joëssel, Darrieus), aux colonies ou à l'international (Darrieus, Claude) dans une situation de pénurie en charbon. Malgré des expériences prometteuses, leurs projets n'ont pas abouti. Leur étude parallèle permet de montrer l'influence des contextes globaux (économique, politique, scientifique) mais aussi les particularités propres à chaque projet (formation de l'acteur, liens institutionnels, situation personnelle, etc.). Elle situe en outre ce type de projet dans la dynamique nationale d'innovation.

### Raymond Joëssel et le navire « Aéro-turbo » (1917-1922)

Raymond Joëssel, ingénieur civil des Mines et directeur de la Compagnie des forges d'Audincourt, naît en 1871 à Indret, et fait sa scolarité à Nantes. Son père, Joseph-Émile Joëssel, ingénieur de la Marine, est en effet directeur de l'arsenal de l'Indret (Barreau, Guiffan et Liters, 1992, p. 359). Il est par ailleurs reconnu pour ses travaux en hydrodynamique, et en particulier pour la « formule de Joëssel » sur l'équilibre des gouvernails [14], qui semble avoir également été utilisée par des aérodynamiciens [15]. Ce lien fort avec la marine, et une affinité particulière avec l'hydrodynamique et l'aérodynamique naissante, le décident, bien après le décès de son père, à s'atteler à la question de la propulsion des navires par des aéromoteurs.

14. Voir, par exemple, *Le Génie civil*, n°924, p. 266-269

15. C'est ce qu'affirme en 1922 un article de *La Nature* sur les bateaux éoliens (La Nature, 1922a, p. 306.

Selon ses propres mots, c'est « sous la douce lumière bretonne en louvoyant à la barre d'une modeste chaloupe à voile » (Joessel, 1922, p. I) que l'idée lui vient. Sensible à la substitution des voiles par des moteurs thermiques, qui font de certains ports français de véritables « tombeaux » de grands voiliers pourtant modernes (Joessel, 1922, p. 30), il considère que l'utilisation du vent pour la navigation n'a pas dit son dernier mot. Tout au contraire, les « modifications de détails » auxquelles les voiles ont été soumises depuis des temps immémoriaux ont pour ainsi dire condamné l'utilisation de la « houille azur » dans la locomotion marine, en la soumettant à un « rendement médiocre ». Améliorer ce rendement, ce serait assurer à la marine marchande française un avenir, alors menacé par la marine étrangère qui dispose de charbon à bon marché, et pourrait bien paralyser les exportations françaises. Pour Joëssel (comme pour Constantin et Flettner), le rendement des voiliers est particulièrement grévé par le fait de ne pas pouvoir avancer contre le vent, et d'être obligé de louvoyer pour avancer dans la bonne direction, contrairement aux bateaux utilisant un moteur thermique. C'est à ce problème que Joëssel décide de s'atteler, par la mise au point d'un navire utilisant un aéromoteur. Théoriquement, Joëssel a en effet établi, ce qu'il présente dans son mémoire, que ceux-ci pourraient permettre d'avancer « vent debout » (contre le vent) et même d'obtenir un rendement meilleur que les voiles dans toutes les directions.

Ce projet s'inscrit tout-à-fait dans la pensée des acteurs des forces naturelles dans les années qui ont directement suivi la guerre : pénurie de charbon et infériorité de la France à cause de ce manque ; archaïsme de la voile, moyen ancestral d'exploiter le vent pour la propulsion des navires ; possibilité de moderniser l'usage du vent par la science aérodynamique, et de concevoir ainsi de nouveaux types d'aéromoteurs. Autour de la première guerre mondiale, il y a eu, dans le monde, plusieurs projets visant à remplacer les voiles par des aéromoteurs grâce à la science aérodynamique : celui de Joëssel, mais aussi, à peu près simultanément en France, celui de Constantin (cf 5.4), puis en Allemagne celui de Flettner (cf 4.2.3). Ceci s'explique, d'une part, par un mouvement accentué, au début du siècle, de substitution de ces dernières par les moteurs thermiques ; d'autre part, par la dépendance accrue de la marine au charbon [16].

Joëssel dresse un parallèle intéressant entre la modernisation de l'utilisation du vent et celle de l'utilisation de l'énergie hydraulique par la houille blanche. Il dit ainsi utiliser une « turbine » aérienne : selon lui, la voile est comparable, dans son fonctionnement, à une roue hydraulique « en dessous » (c'est-à-dire, dont les aubes sont entraînées par un courant passant en-dessous de la roue). Il considère donc qu'un aéromoteur apporterait à l'exploitation de la force du vent pour la locomotion marine une amélioration comparable,

16. D'après Debeir, Deléage et Hémery, (2013, p. 243-244), en effet, « le recul de la navigation à voile, commencé dans la première décennie du siècle, accéléré dans les années 1920 [...], se ralentit dans les années 1930 sans toutefois se démentir ».

et même plus importante que ce que la turbine hydraulique apporte par rapport à l'utilisation d'une roue en-dessous (même si les modèles qu'il utilise ne sont pas, à proprement parler, des turbines aériennes : cf 2.3).

En 1917, l'ingénieur entreprend une série d'expériences sur modèles réduits. Deux petits radeaux d'1 m de long et de 0.18 m de large, munis d'aéromoteurs à axe horizontal de 0.40 m de diamètre, sont mis en mouvement à l'aide d'un ventilateur électrique, dans un bassin de 5 m de long, 1 m de large et 0.50 m de profondeur [17]. Il teste plusieurs modèles d'aéromoteurs. La Figure 5.2 représente la photographie d'une de ces expériences, d'après laquelle on peut supposer que Joëssel a essentiellement fait varier le nombre et le diamètre des pales [18]. Les aéromoteurs s'orientent en fonction de la direction du vent. Les mesures visent à établir le rendement de l'ensemble radeau-aéromoteur en fonction de différents paramètres comme la vitesse du vent ou de sa direction par rapport au radeau.

Joëssel, qui se dit « métallurgiste », certainement par son métier mais aussi, peut-être, par sa formation, possède en outre certainement des connaissances en aérodynamique qui lui ont permis de concevoir et d'exploiter ces résultats. Les mesures qu'il effectue et la représentation qu'il en donne s'apparentent en effet beaucoup à celles qui étaient effectuées depuis 1910 aux deux laboratoires Eiffel successifs [19]. Selon lui, ceux-ci prouvent, tout d'abord, que la marche vent debout est possible ; Joëssel s'en sert en outre pour établir une comparaison théorique entre les navires munis d'aéromoteurs et ceux munis de voiles, tout-à-fait avantageuse pour la première solution. Il conçoit enfin un modèle de navire muni de trois aéromoteurs, le navire « Aéro-turbo » ou « anémobile », qu'il fait breveter en 1918 (Joëssel, 1918b) [20]. Sa voilure est variable, la transmission de l'aéromoteur à l'hélice propulsive se fait soit directement, soit via l'électricité, soit via l'air comprimé. Naviguant selon tous les angles du vent, contrairement aux navires à voiles, il aurait une vitesse moyenne augmentée d'un facteur 0.5 à 1 ; de plus, le chemin direct qu'il peut

17. Le lieu de ces expériences, qui s'apparente à une soufflerie miniature improvisée (sans commune mesure avec la soufflerie Eiffel installée depuis 1912 à Auteuil et sur le modèle de laquelle d'autres souffleries ont ensuite été construites en France et à l'étranger (Fontanon, 1998, p. 70)) est assez mystérieux : tout le matériel a été construit par des maisons audincourtoises (Maraget, modeleur, qui a construit l'ensemble des aéromoteurs, et Beaufils, mécanicien), mais le test qui fut effectué ensuite en conditions réelles le fut à Nantes (Joessel, 1922, p. 13), dans sa région d'enfance ou vit encore certainement une partie de sa famille. Il faudrait identifier un site où l'on trouve un tel bassin d'essais !

18. On voit, dans le bassin d'essais, un aéromoteur bipale et un aéromoteur quadripale. Derrière l'homme vêtu de noir, qui est probablement Joëssel lui-même, on voit une dizaine de roues différentes dont le nombre et la largeur des pales, ainsi que le diamètre, semble varier.

19. Effectivement, selon Claudine Fontanon, Eiffel y avait institué, pour la mesure de tous les profils d'ailes proposés par des constructeurs, le dessin d'un diagramme polaire, intégrant « les principales mesures effectuées en soufflerie » : « poussée, traînée, rapport entre les deux valeurs selon l'incidence et la vitesse de l'air ». Or, Joëssel a mesuré la poussée du vent sur l'aéromoteur, ainsi que la poussée résultant de la force transmise par l'aéromoteur, et dessiné, sur un diagramme polaire, fonction de l'angle incident du vent, le rapport de la poussée résultante à la poussée axiale (qu'il appelle « coefficients de progression ») (Fontanon, 1998, p. 66).

20. Il fait également breveter un modèle à un aéromoteur (Joëssel, 1918a).

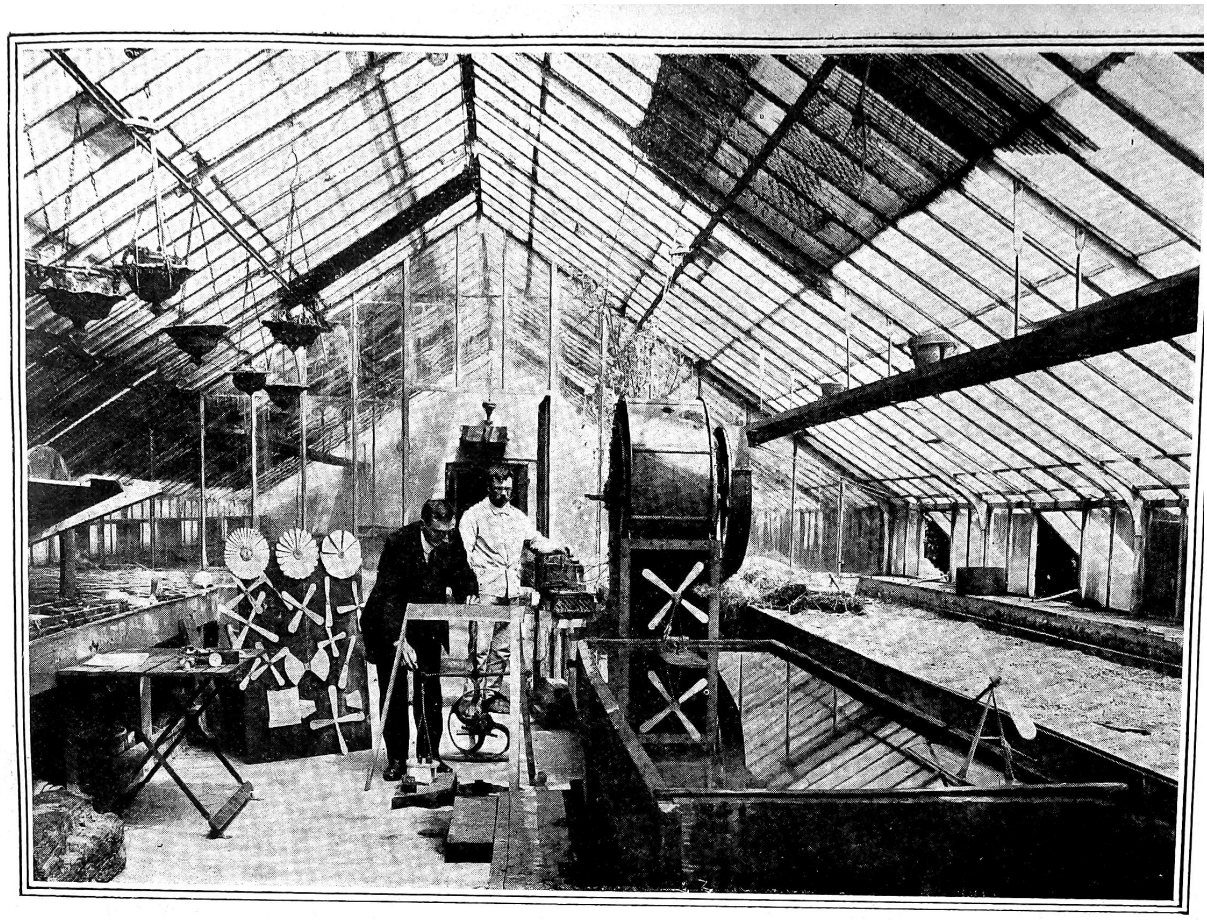


FIGURE 5.2 – Bassin d'expériences d'un navire à propulsion éoliennes par Raymond Joëssel (env. 1918, lieu inconnu, peut-être forges d'Audincourt) (JOESSEL, 1922, p. 9)

prendre diminue le temps de parcours d'un point à un autre (JOESSEL, 1922, p. 27). Chose remarquable : Joëssel envisage la régularisation de l'énergie éolienne par l'air comprimé ou par l'accumulation électrique.

Joëssel effectue également une démonstration en conditions réelles sur la Drésinette, un « bateau de 6 m de longueur et de 1.65 t de jauge » (JOESSEL, 1922, p. 14). Celle-ci, munie d'une éolienne quadripale, puis bipale, de 5 m de diamètre, à surface variable et conduite manuellement (probablement à nouveau construite par Beaufils d'Audincourt) est testée sur l'Erdre et sur la Loire en 1918 et 1919, avec plusieurs personnes à bord (voir Figure 5.3) [21].

La turbine aérienne bipale à surface variable visible sur la photographie Figure 5.2, conçue par Joëssel, est d'un modèle original dont je n'ai pas vu d'exemples similaires dans les projets français. En effet, les aéromoteurs à faible nombre de pales, comme ceux de Constantin, de Darrieus ou les aérochargeurs, sont en général de faible épaisseur et à

21. Joëssel prend soin de souligner qu'il y avait, parmi ces passagers, Norbert Guillon-Verne, le neveu de Jules Verne, « cet esprit divinateur qui a montré à plusieurs générations que l'« impossible » était souvent réalisable JOESSEL, 1922, p.



FIGURE 5.3 – La « Drésinette » de Raymond Joëssel : « ancien petit sloop » muni d'un aéromoteur bipale, sur l'Erdre, en 1918 (JOESSEL, 1922, p. 14)

surface fixe.

En 1922, l'inventeur espère donc avoir résolu le problème qu'il s'était posé : le navire avance contre le vent, et plus rapidement dans toutes les directions que les navires à voile. Il souligne en outre un autre avantage : la facilité de manœuvre nécessitant une main d'œuvre moins qualifiée et moins nombreuse que sur les voiliers, diminuant ainsi un coût important sur les voiliers. Il affirme également que l'entretien serait moins onéreux. Il espère donc voir dans un avenir proche une « Compagnie de navigation » tenter l'expérience sur un de ses navires, et l'utilisation des navires Aéro-turbo se multiplier dans la marine marchande.

Il laisse là ses expérimentations et se consacre à nouveau à plein temps à son entreprise.

Ses expériences ont été peu relayées dans les cercles scientifiques et industriels [22], avant que l'ONRSI ne décide de soutenir les expériences similaires de Constantin, quelques mois après. Joëssel prend alors connaissance de ces travaux menés avec le soutien de l'ONRSI. Son nom est alors associé à ces expériences, bien qu'il n'y ait pas contribué. Les essais, considérés comme réussis, de Constantin, sont ensuite éclipsés par un navire éolien d'une toute autre ampleur construit alors en Allemagne, celui d'Anton Flettner, et aucun navire éolien ne vient remplacer les voiliers en désuétude dans les années 1920.

Le cas de Raymond Joëssel constitue donc l'exemple d'un inventeur qui propose, en fin de première guerre mondiale, de substituer la houille azur à la houille noire dans un secteur économique particulier, celui de la marine marchande, où les voiles subissent depuis le début du siècle un abandon massif. Il fait donc partie de ces ingénieurs inventeurs qui, particulièrement émus du manque de combustible pendant la guerre, ont cherché à étendre l'arc-en-ciel des houilles français, et ce, avant la création de la Commission de la houille bleue . Ceci met en évidence que, si celle-ci a donné une impulsion aux recherches sur les forces naturelles, sa création relève aussi d'un mouvement d'ensemble impulsé par la pénurie de charbon. Cette dynamique a poussé Joëssel à chercher le développement l'exploitation de la houille azur, et, la même année, Legrand et les autres membres de son groupement de propagande, celle de la houille bleue. Joëssel est en outre un inventeur relativement isolé mais qui arrive, grâce à ses propres moyens (issus de l'industrie), à construire un modèle de sa conception : il effectue ses calculs seul, finance ses essais, et sollicite certainement des constructeurs auxquels il a l'habitude de faire appel dans son métier d'ingénieur dirigeant d'une société de métallurgie. Enfin, il montre, par l'approche qu'il utilise pour mener ses expériences, l'importance qu'ont prise les travaux en aérodynamique pendant la guerre (Fontanon, 1998, p. 81-81), et l'immédiateté avec laquelle cette discipline, alors essentiellement vouée à l'aviation, a été appliquée à des études sur les aéromoteurs (voir aussi 5.3 et 5.4).

## Georges Claude et l'Énergie thermique des mers (1925-1935)

Le projet de Georges Claude a déjà été étudié par plusieurs historiens. Le but n'est pas ici de retracer la chronologie des réalisations de ce projet, dont l'article de Paul Barbier représente une bonne synthèse (Barbier, 2000), mais de le replacer dans la dynamique française d'innovation pour l'exploitation des forces naturelles, et de mettre en évidence les particularités du réseau d'acteurs en jeu dans cette entreprise menée par Georges Claude, qui y a montré une grande implication personnelle et financière.

22. Je n'ai trouvé mention de ses travaux que dans le *Bulletin des élèves de l'École nationale supérieure des Mines*. La seule caution académique dont il se pare est celle de deux ingénieurs de la Marine membres de l'Académie des sciences, Bertin et Laubeuf, aussi président de la Société des ingénieurs civils de France, et leur rôle s'est probablement limité à celui de soutien de principe.

Georges Claude, ingénieur de l'École de Physique et de Chimie Industrielle (EPCI), est un expérimentateur touche-à-tout, de la chimie à l'électricité en passant par la thermodynamique. Inventeur prolifique, c'est aussi un industriel, célèbre grâce à un procédé de liquéfaction de l'air exploité par la société Air liquide, qui lui assure des revenus confortables. Claude s'attelle au problème technique de l'utilisation des marées, mais il abandonne cette étude, et affirme, en 1921, que l'utilisation des marées nécessite « des capitaux trop importants pour le résultat » (Claude, 1921). Il s'intéresse cependant à un autre type d'énergie marine, avec son collègue Paul Boucherot, également ingénieur EPCI, qu'ils nomment « énergie thermique des mers ». En 1926, les deux inventeurs déposent quatre demandes de brevet relatives ce procédé [23].

Leur idée est d'utiliser les différences de température quasiment constantes au cours de l'année entre la surface et le fond des océans, et ce, en premier lieu, dans les régions tropicales du globe, où elles sont les plus importantes. Dans ces « usines Claude-Boucherot », l'eau chaude de surface est extraite pour vaporiser de l'eau sous basse pression, utilisée dans des turbines spécialement conçues, et condensée grâce à l'eau froide aspirée des profondeurs (Figure 5.4).

Ce dispositif doit permettre d'assurer la production de force motrice, via l'électricité, et le rafraîchissement des lieux d'habitation des côtes tropicales grâce à l'eau froide extraite des fonds marins. Les auteurs envisagent aussi la possibilité qu'à l'avenir, soient utilisées des différences de température de plus en plus faibles, jusqu'aux régions tempérées.

Bien intégrés dans plusieurs cercles scientifiques et industriels, Claude et Boucherot sont reconnus par leurs pairs pour leurs travaux respectifs [24]. Depuis 1924, Claude est membre de l'Académie des sciences dans la jeune division Application de la science à l'industrie, ce qui lui permet d'y présenter, avec Boucherot, leur invention, visant à l'exploitation de l'énergie thermique des mers. Entre 1926 et 1934, Claude et Boucherot, puis Claude seul, multiplient les communications à l'Académie des sciences sur ce sujet, de la théorie jusqu'aux expérimentations qui mènent à la construction inachevée d'une usine à Cuba, en 1933 [25]. Dès la première d'entre elles (Claude et Boucherot, 1926), ces communications trouvent un large écho dans les milieux scientifiques et techniques [26]. D'abord

23. Claude et Boucherot, 1927
1e addition demandée le 15 octobre 1926, publiée le 12 juin 1928.
2e addition demandée le 22 novembre 1926, publiée le 18 août 1928.
Claude et Boucherot, 1928a

24. Boucherot, spécialiste de l'électrotechnique, est, par exemple, professeur à l'EPCI, président de l'Union des syndicats d'ingénieurs français, ancien président de la Société internationale d'Électricité.

25. Claude et Boucherot donnent ensemble deux communications en 1926 et 1928 qui sont retranscrites dans les *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*, et, sur l'ensemble de la période, on trouve 23 notes, dépêches, télégrammes et commentaires de Claude sur ce sujet dans les *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences.*

26. Par exemple, sept articles seront consacrés au sujet dans la *La Nature* entre 1926 et 1934, et dix-sept dans *Le Génie civil* entre 1926 et 1935.

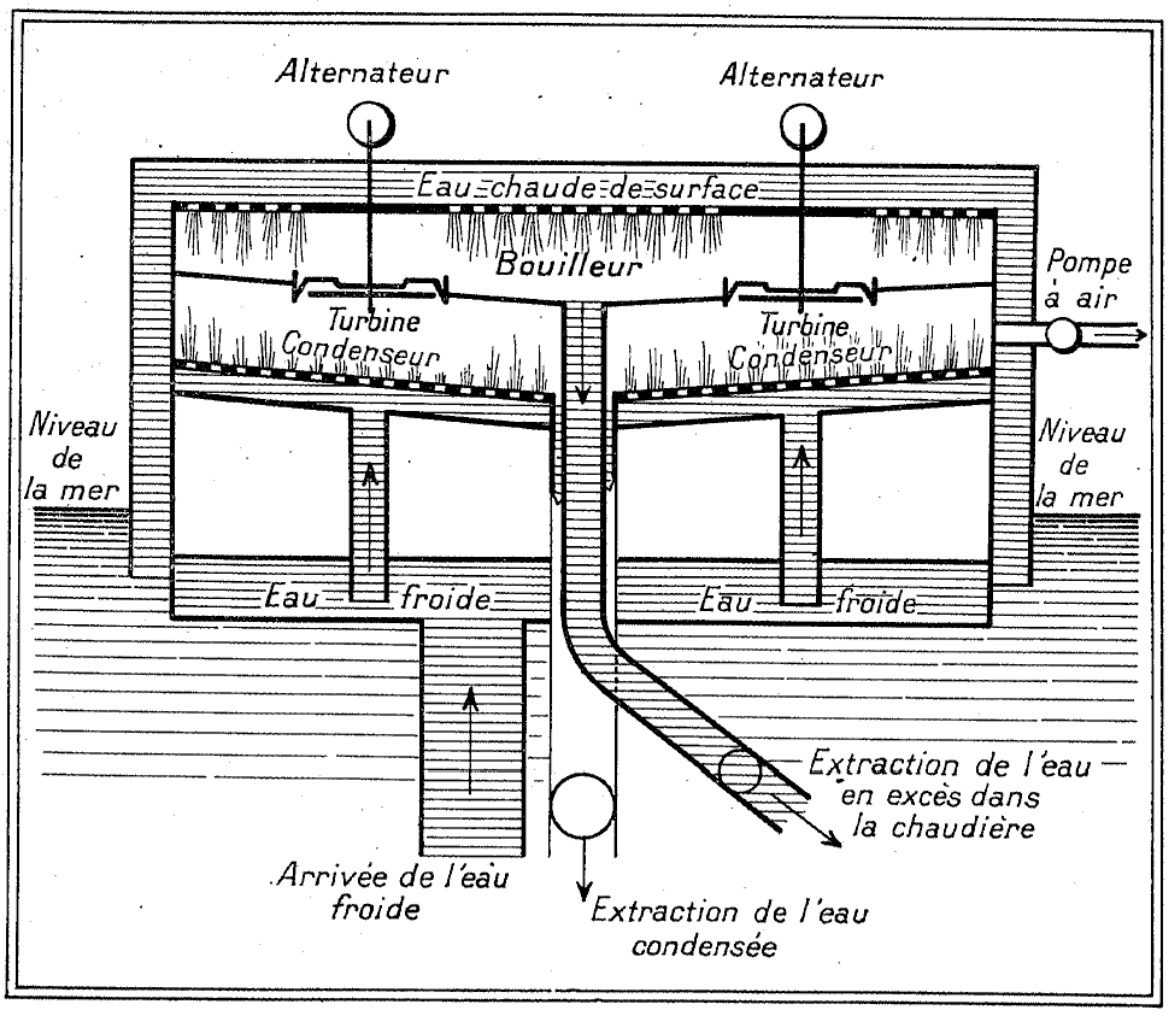



FIGURE 5.4 – Principe de fonctionnement d'une usine exploitant l'énergie thermique des mers (TROLLER, 1928, p. 506)

souvent sceptiques sur la faisabilité technique du procédé, les scientifiques et chroniqueurs qui commentent les travaux de Claude cèdent finalement à un enthousiasme technique et patriotique.

Claude fait construire et tester deux prototypes, l'un, en 1928, à Ougrée, en Belgique, l'autre à Cuba. Il fait appel à la Société alsacienne de constructions mécaniques (SACM, plus tard Alsthom), entreprise importante qui construit entre autres des turbines hydrauliques et à vapeur, des chaudières, des moteurs Diesel et des alternateurs, pour fabriquer une « turbine à vapeur pour très basses pressions » de 50 kW de sa conception (CLAUDE, 1928b ; CLAUDE et BOUCHEROT, 1928c ; CLAUDE et BOUCHEROT, 1928b). Auguste Rateau, également académicien et industriel, lui apporte son expertise dans le domaine des turbo-machines pour résoudre le problème de l'extraction des gaz dissous (CLAUDE, 1927). En 1928, une délégation de l'Académie des sciences vient constater le fonctionnement de son prototype à Ougrée, ce qui lui vaut des commentaires élogieux de ses collègues, comme

Henry Le Chatelier (Claude, 1928b). Il retient en outre l'attention du président de la République Raymond Poincaré, qui voit dans le procédé Claude-Boucherot « un moyen pour la France de contrebalancer la politique de l'Angleterre qui avait réussi à mettre la main sur une part importante des sources de grandes matières premières d'emploi général dans le monde (or, pétrole, caoutchouc) de même que les États-Unis se sont réservé le contrôle de plusieurs grands marchés (notamment coton et métaux non ferreux) », ainsi que celle de la Commission de la houille bleue . Celle-ci se désintéresse cependant du projet « devant la difficulté d'obtenir des renseignements précis sur les essais d'Ougrée » [27].

Claude décide de faire monter le prototype en conditions réelles, à Cuba. Pour effectuer des travaux de sondage dans les mers de Cuba, il obtient en 1928 le soutien technique de l'État français en la personne d'un ingénieur dépêché par les ministres de l'Air, de la Guerre et des Travaux publics (Claude, 1928a) [28]. Après avoir rencontré des difficultés pour la pose du tuyau d'eau froide (Figure 5.5) il parvient finalement, avec l'aide d'un ingénieur dépêché par le gouvernement cubain, à une installation qui lui donne satisfaction (Claude, 1930a). Il considère avoir levé le problème qui suscitait le plus de scepticisme quant à la faisabilité du procédé : celui de l'aspiration de l'eau froide en profondeur. L'entrepreneur prognostique que les « usines Claude-Boucherot de l'avenir » auront un « prix inférieur à celui des meilleures usines hydrauliques » (Claude, 1930b).

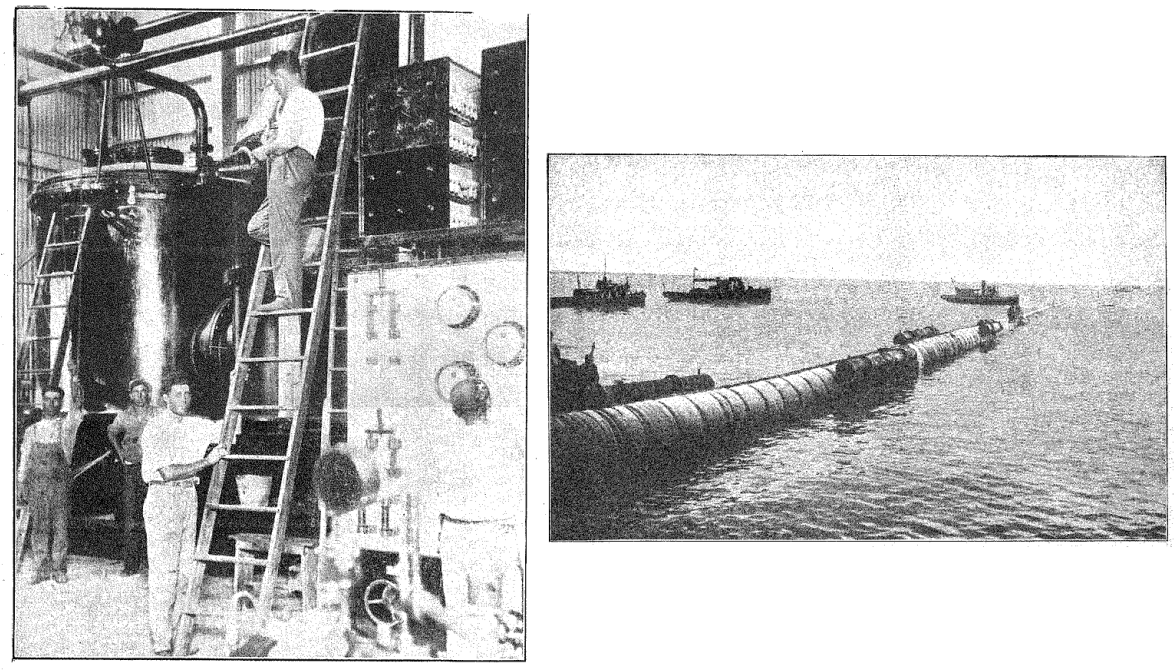


Figure 5.5 – Bouilleur, épurateur d'eau chaude et tuyau de prise d'eau froide du prototype énergie thermique des mers installé à Cuba en 1930 (Villers, 1930) [30]

27. ANOM 91COL1084, p.d., Comité des travaux publics des Colonies, Projet d'installation à Abidjan d'une station d'énergie thermique des mers, Procès-verbal de la séance du 09/09/1941.

28. À noter que le ministre de la Guerre est, en 1928, Paul Painlevé, également académicien, ce qui peut en partie expliquer ce soutien et souligner l'importance du réseau scientifique et technique de Claude.

Claude annonce en 1933 son ambition de construire une usine flottante sur un point des côtes tropicales à Rio de Janeiro (Claude, 1933). La construction d'usines à terre, qui doit pour lui précéder celles d'usines flottantes plus puissantes, devient effectivement trop dispendieuse, avec la crise financière qui frappe l'industrie et qui lui fait perdre les soutiens financiers qu'il a obtenus jusqu'alors [31]. Il trouve une solution également liée à la conjecture économique : les bateaux « désarmés » coûtent peu cher, ce qui lui donne l'idée d'intégrer une usine Claude-Boucherot dans un gros cargo. Claude ne considère cependant pas possible d'alimenter le réseau électrique à terre grâce à un tel bateau, car il ne présenterait pas une stabilité suffisante : l'énergie produite doit être utilisée sur place. Il imagine ainsi produire de la glace, qui serait ensuite distribuée à terre. Il finance l'ensemble de cette campagne, dont le but est, « pour des buts autrement importants dans l'avenir », de montrer le « caractère pratique du procédé Claude-Boucherot » (Claude, 1933, p. 569). Il fait installer l'usine sur le cargo Le Tunisie, de 10 000 t, et part à Rio, au Brésil, fin 1934, pour la mettre en place. Des difficultés dans l'installation du tuyau vont poser de graves problèmes, si bien que Claude choisit d'abandonner ce projet. En effet, en contexte de crise financière, il a déjà dépensé trop d'argent pour pouvoir persévérer.

L'exemple de Claude s'inscrit donc tout-à-fait dans la dynamique d'innovation pour l'exploitation des forces naturelles. Outre le fait qu'il espère répondre au problème mondial de la pénurie énergétique, et qu'il cherche une source d'énergie plus avantageuse que la houille blanche et la houille bleue, sa vision de la nature et le convertisseur qu'il invente sont emblématiques du prométhéisme caractérisé en 4.3.3. Il représente singulièrement bien cette pensée de l'ingénieur, puisque, avec son collègue Boucherot, il invente le nom d'une source d'énergie et le convertisseur qui l'accompagne, les deux étant ensuite inextricablement liés. En effet, dès l'entre-deux-guerres, et c'est encore le cas aujourd'hui, l'énergie thermique des mers désigne à la fois une source d'énergie et le procédé (toujours le même) inventé pour l'exploiter. Par ailleurs, le projet qu'il mène s'inscrit particulièrement dans le système énergétique existant : par le procédé thermodynamique, qui est

30. Le tuyau de prise d'eau froide est en tôle et mesure 1.80 m de diamètre pour 1850 m de long.

31. Claude et Boucherot, dans leur premier brevet, envisageaient déjà deux manières de construire leur machine :
- établir une usine à terre en allant chercher l'eau froide grâce à un tunnel creusé dans les parois rocheuses de la côte,
- construire « une plateforme installée en pleine mer et sur laquelle sera installée l'usine de force motrice », véritable « île flottante » intégrant l'usine dans sa totalité ».
Selon eux, cette solution présenterait l'avantage par rapport à la première de s'affranchir de problèmes techniques, notamment le fait que les côtes ne présentent pas toujours à proximité immédiate des profondeurs importantes, et donc des eaux à température aussi intéressante qu'au large, même par le biais d'un tunnel. En revanche, une telle installation nécessiterait de présenter des dimensions très importantes, afin d'acquérir une stabilité suffisante même en cas de tempête, et serait donc très coûteuse, ce que les inventeurs ne trouvent pas envisageable dans un premier temps.
Cependant, seuls des lieux éloignés des centres économiques et industriels correspondent aux contraintes d'implantation d'une usine à terre, ce qui amènerait des difficultés de construction et de maintenance de l'usine, ainsi qu'à terme de distribution de l'énergie, engendrant un surcoût qu'il ne peut assumer seul (Claude, 1933).

assimilable au fonctionnement d'une machine à vapeur, le seul paramètre changeant étant la température et la pression ; par la taille des usines envisagées, dont la puissance avoisine celle des centrales thermiques alors en usage ; par le réseau d'acteurs auquel il fait appel, à savoir des constructeurs du domaine de l'électrotechnique (Rateau, SACM...). Cela ne suffit pas à la réussite de son dernier projet, arrêté à cause de la conjoncture économique mondiale. Mais, par effet d'inertie, la présence de ces acteurs et la forme des usines projetées explique probablement la reprise des travaux sur l'énergie thermique des mers en 1940, alors que la question énergétique se fait à nouveau criante en France et que le ministère des Colonies s'intéresse à la question (voir 8.2.1). Les projets français qui suivront se réfèrent en effet tous à celui de Georges Claude, et, sans surprise, on retrouve à chaque fois les mêmes entreprises.

## Georges Darrieus, la Compagnie électro-mécanique et les aérogénérateurs (1929-1935)

La Compagnie électro-mécanique est le seul exemple d'une grande entreprise spécialiste de l'électro-technique qui, dans l'entre-deux-guerres, conçoit toute une installation d'exploitation des forces naturelles grâce à son service de recherche interne, et parvient à intéresser une compagnie de production d'électricité : Énergie électrique du Maroc. Ces travaux ont été initiés par Georges Darrieus, ingénieur de recherches issu de l'École centrale de Paris, spécialisé dans l'électrotechnique et l'aérodynamique, d'abord ingénieur de conception puis chef des études techniques à la Compagnie électro-mécanique en 1932. Le modèle de la recherche-développement en interne développé par des compagnies étrangères comme la compagnie suisse Brown-Boveri (maison-mère de la Compagnie électro-mécanique) dont il était, entre autres, ingénieur-conseil, l'a convaincu de l'efficacité de ce mode de recherche, à tel point qu'il tente « dès la fin des années 1920 de convaincre les industriels français d'adopter ce modèle » (Fontanon, 2004, p. 187-188). Appliquant cette stratégie de recherche à la Compagnie électro-mécanique, il « partage son temps entre l'innovation technique et la recherche en mécanique des fluides ».

Ceci le mène entre autres à concevoir et faire tester plusieurs nouveaux modèles d'aéromoteurs à l'aide des récents travaux en aérodynamique. Il fait ainsi breveter une éolienne à axe horizontal en France en 1927, et le même modèle aux États-Unis 1931, (Darrieus, 1931b) [32]. Ces modèles sont destinés à résoudre le « problème de l'électrification des campagnes, grâce à de petites installations individuelles (G. Lacroix, 1929, p. 554) », auquel certains constructeurs de moulins à vent tentent également de répondre (cf section 4.3).

32. Il fait également breveter un modèle à axe vertical, au nom de la société Maurice Leblanc-Vickers (Darrieus, 1925) dont il était ingénieur-conseil. Cette société était une filiale de la Compagnie électro-mécanique (Lanthier, 1994, p. 1055).

Probablement secondé par G. Lacroix, ingénieur des Arts et manufactures, qui relate les résultats théoriques et pratiques de ces travaux dans plusieurs revues, Darrieus en fait construire et tester des prototypes sur le site de l'usine du Bourget, entre 1926 et 1931. Il s'agit de trois éoliennes à axe horizontal accouplées à des génératrices à courant continu : la première, à quatre pales, de 8 m de diamètre et d'une puissance de 2 kW ; la seconde, tripale de 8 m de diamètre et de puissance 4.5 kW ; la troisième, tripale de 20 m de diamètre et d'une puissance de 15 kW [33] (Figure 5.6) (G. Lacroix, 1929 ; G. Lacroix, 1949).

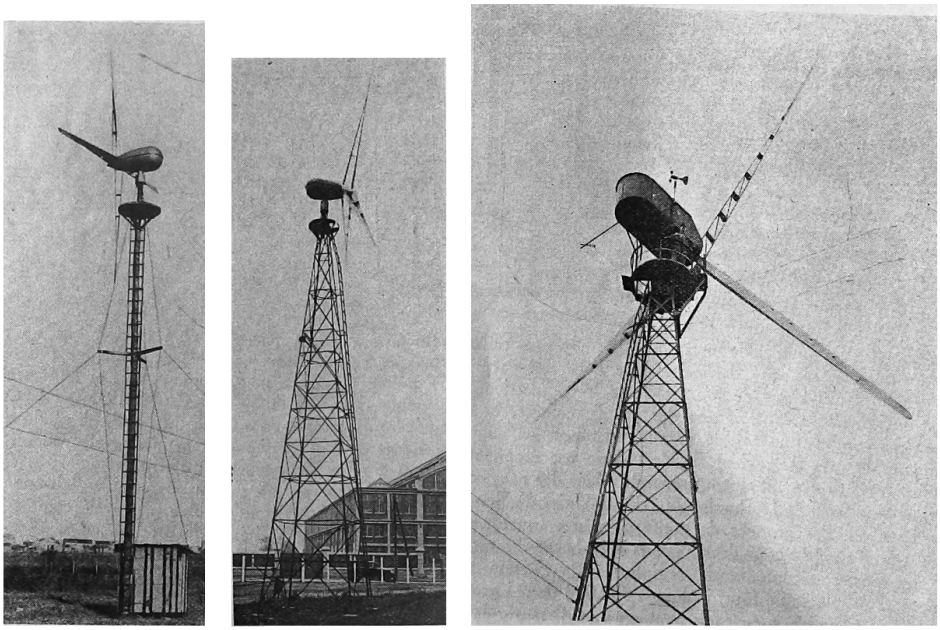


Figure 5.6 – Aéromoteurs Darrieus : 8 m de diamètre sur poteau en bois (1927) ; 10 m de diamètre sur pylône métallique (1930) ; 20 m de diamètre sur pylône métallique (1929) (G. Lacroix, 1949, p. 107).

.

Du point de vue du moteur en lui-même, ces appareils diffèrent des moulins à vent américains et des turbines éoliennes alors commercialisés, en ce qu'elles ont, comme les moulins hollandais, un nombre limité de pales, comme le présente G. Lacroix, (1929). Mais, à l'inverse de ces derniers, leurs pales ont un profil aérodynamique d'une grande finesse : cela signifie qu'elles sont conçues de manière à ce que le rapport de la poussée P, qui entraîne la pale, à la traînée T, qui la freine, soit minimal, ce qui en améliore le rendement pour un même nombre de pales. À cause de leur faible nombre de pales, elles ont en outre un moins bon rendement théorique que les moulins à vent américains [34], mais elles présentent plusieurs avantages qui les rendent plus intéressantes technico-économiquement :

— elles sont plus légères, donc moins coûteuses pour la même puissance,

33. Les puissances sont données pour un vent de 6m/s.

34. « À valeur égale de T/P, le rendement est [...] d'autant plus faible que la vitesse spécifique est plus grande » (G. Lacroix, 1929, p. 551.)

— elles sont moins sensibles aux coups de vent, à tel point qu'elles n'ont pas besoin de dispositif d'effacement. En outre, elles s'orientent dans le vent sans dispositif particulier. Ces deux éléments en simplifient largement la construction (G. Lacroix, 1929).

.

À l'inverse des solutions proposées par les constructeurs d'aéromoteurs qui proposent l'adjonction d'une dynamo et d'une batterie d'accumulateurs à des moteurs initialement prévus pour le pompage de l'eau, ces moteurs sont spécifiquement dédiés à la production d'électricité. La dynamo est ainsi directement intégrée dans un carénage situé au niveau du moyeu, évitant les pertes dues à la transmission du mouvement par arbres verticaux de la roue au pied de l'aéromoteur.

Vers 1936, ces travaux attirent l'attention de de la société Énergie électrique du Maroc (EEM), compagnie semi-publique créée en 1924 par le Gouvernement chérifien et la Compagnie des chemins de fer du Maroc afin de produire de l'électricité à partir des ressources hydrauliques, à destination des principaux points potentiels d'utilisation du territoire (Saul, 2002). EEM s'intéresse en effet à la fourniture d'électricité à partir d'énergie éolienne [35]. La Compagnie électro-mécanique effectue en 1935 l'étude d'une éolienne de pompage tripale de 7 m de diamètre à transmission électrique pour l'alimentation des abreuvoirs d'élevage, ainsi que d'une éolienne électrique de 30 m de diamètre à courant alternatif et d'une puissance de 43 kW pour le compte de l'« Afrique du Nord » (G. Lacroix, 1949 ; G. Lacroix, 1950), et, semble-t-il, plus particulièrement du Maroc (G Lacroix, 1943). Le commanditaire de cette étude n'est pas précisé dans les articles de Lacroix, mais il s'agit probablement d'EEM.

La Compagnie électro-mécanique a ainsi tenté de se greffer sur un marché disputé par les constructeurs de moulins à vent, qui existaient depuis la fin du XIX$^{e}$ s, mais avec des modèles inédits et conçus grâce aux nouveaux résultats de l'aérodynamique, ce qui est un nouvel exemple de l'application de cette discipline à la mise au point des aéromoteurs dans l'entre-deux-guerres. Lacroix tente de démarquer les travaux de la Compagnie électro-mécanique par le caractère scientifique de la construction de ces aéromoteurs contrairement à la démarche des autres constructeurs qu'il dit empirique. Il montre ainsi du doigt leur « impuissance à apporter à la construction de leurs appareils autre chose que des modifications de détails, et l'état rudimentaire de leur connaissance relative à l'action du vent sur les pales » (G. Lacroix, 1929, p. 548). Cependant, dans les faits, ce sont eux qui ont été à l'origine des seules installations opérationnelles dans l'entre-deux-guerres (cf section 4.3) ! En effet, les études de la Compagnie électro-mécanique sur l'électricité éolienne n'aboutissent à aucune utilisation concrète sur cette période. Selon Lacroix, le

35. AN 1991 0305/2, 1941-1957, Lettre de Bauzil à Pétry, 19/01/1952.

coût initial de l'aéromoteur, qui « atteignait [entre 1930 et 1936] trois à cinq fois celui d'un groupe électrogène avec moteur à essence » (G. Lacroix, 1949, p. 108), est la cause de l'échec commercial des aérogénérateurs de petite puissance. Quant aux aérogénérateurs de moyenne puissance destinés à desservir des réseaux existants, leur utilisation aurait été empêchée par l'impossibilité d'obtenir un prix rémunérateur de la part des sociétés distributrices, d'autre part rétives à la multiplication de petites installations « dont le contrôle leur échapperait plus ou moins et dont la présence aurait pour effet de compliquer singulièrement leurs problèmes de réglage de tension et de fréquence » (G Lacroix, 1943). Ils s'agit donc d'une inadaptation au système électrique tel qu'il se construit. La réalisation de l'éolienne de 30 m de diamètre au Maroc est ainsi « empêchée par le prix de 0.10 francs par kWh offert pour l'énergie produite » (G Lacroix, 1943, p. 46).

Darrieus et Lacroix reprennent ainsi leurs travaux dans les années 1940, avec l'apparition d'une nouvelle pénurie d'énergie et l'intérêt nouveau du ministère de la Production industrielle pour l'électricité éolienne. Cependant, l'attention portée à ces travaux en 1936 par EEM et peut-être certains services de l'administration coloniale est remarquable, et elle montre que ces nouveaux aérogénérateurs ont été considérés avec intérêt par l'entreprise chargée du développement du réseau électrique sur le territoire national.

Des expériences de Darrieus à la Compagnie électro-mécanique, on peut retenir l'importance des connaissances de l'inventeur et de sa situation professionnelle. Il s'agit en effet d'un aérodynamicien et électrotechnicien, ingénieur de recherche au sein d'une grande entreprise spécialisée dans le matériel électrotechnique, qui fournit des éléments essentiels au acteurs du système électrique. Tout cela explique la conception par Darrieus d'aérogénérateurs dont les pales sont profilées aérodynamiquement, et qui sont destinés à terme à fournir du courant électrique au réseau. Ce sont, selon Lacroix, les critères de modernité d'un convertisseur éolien. Darrieus et la Compagnie électro-mécanique ont en outre aperçu un marché pour ces machines, en situation de pénurie. Celles-ci s'inscrivent donc, par leur forme et leur destination, par les acteurs qui les portent, dans le système énergétique existant. Ceci explique également qu'elles n'aient pas connu de diffusion, en tant que solution de substitution à d'autres moteurs. Le coût du kWh produit devient alors déterminant, et, dans les années 1930, celui-ci a été défavorable aux machines construites et projetées.

## Synthèse Chapitre 5.3

Ces trois exemples d'initiatives privées permettent de dresser plusieurs constats sur la dynamique d'innovation pour l'utilisation des forces naturelles en France dans l'entre-deux-guerres. Ils sont propres au type de projet dont il s'agit (c'est-à-dire, aux initiatives

privées qui ont mené à des réalisations dans l'entre-deux-guerres : deuxième type du Tableau 5), et d'ordre plus général.

D'abord, par rapport à la période (1880-1918), la présence d'acteurs de l'industrie, qui plus est moteurs des projets, est remarquable : ces industriels ont donc identifié un marché pour des convertisseurs innovants exploitant les forces naturelles. Cela démontre une conjoncture, au moins économique, favorable à ce type d'innovation. Un constat s'impose également : les industriels de l'énergie ne sont pas moteurs dans la dynamique d'innovation, mise à part la Compagnie électro-mécanique, qui fait figure d'exception, car elle a identifié un marché pour les aérogénérateurs. Les entreprises qui ont accepté de travailler avec Georges Claude ont été sollicitées par lui et n'ont pas été à l'initiative du projet.

Par ailleurs, l'ancrage des acteurs dans les cercles scientifiques et industriels a joué dans la mise en œuvre de leurs expériences, la reconnaissance dont ils disposent et la pérennité de leurs conceptions. Ces trois ingénieurs sont en effet chacun établis dans le monde industriel et c'est la raison pour laquelle ils ont disposé de moyens techniques et financiers conséquents pour mener à bien leurs expériences. Leurs liens plus ou moins importants avec le reste de la communauté leur a par ailleurs permis de communiquer à propos de leurs projets et/ou de mobiliser les connaissances de leurs confrères. C'est clairement le cas pour Georges Claude, ingénieur alors très renommé, qui a pu faire appel à d'autres industriels pour la mise au point de certaines composantes de son système, et qui a très largement utilisé son réseau pour communiquer auprès de publics tels que l'Académie des sciences ou les revues scientifiques et techniques. Darrieus a les moyens et la légitimité d'un ingénieur de recherche au sein d'une grande entreprise de l'électrotechnique, mais aussi auprès de plusieurs communautés savantes. Il a moins communiqué sur son projet mais il l'a tout de même fait (dans *Le Génie civil* par exemple). Joëssel est resté plus isolé et n'a presque pas communiqué sur son projet. La plus ou moins grande pérennité des conceptions de ces auteurs s'explique en partie de cette manière : l'énergie thermique des mers est toujours restée attachée à la figure de Georges Claude et plusieurs projets très semblables ont ensuite été formulés dans une conjoncture plus favorable ; des éoliennes aujourd'hui encore dites « Darrieus » ont aussi été mises en œuvre après la seconde guerre mondiale ; peu semblent avoir connu le « navire aéro-turbo » en son temps et il n'a connu aucune pérennité.

De manière plus spécifique, l'inscription de l'inventeur dans le système énergétique ou le système technique auquel il destine son convertisseur joue dans la conception de l'invention et dans son devenir. Elle détermine en effet la forme donnée au convertisseur, et la facilité avec laquelle celui-ci trouve effectivement des débouchés. Georges Claude connaît en effet des ingénieurs de grandes entreprises de l'électrotechnique (Rateau, SACM), et

conçoit une centrale similaire à une centrale thermique classique, compatible avec les composantes (électrotechniques, turbo-machines...) que ces grandes entreprises ont l'habitude de fabriquer. Darrieus est ingénieur dans une grande entreprise du secteur énergétique, et est ainsi amené à concevoir un générateur d'électricité du même type que ceux du système énergétique auquel la Compagnie électro-mécanique fournit habituellement des éléments, c'est-à-dire un générateur de grande puissance pour un réseau interconnecté. Quant à Joëssel, son bateau éolien concerne plusieurs mondes non connectés auxquels l'inventeur n'est pas lui-même connecté : il ne semble pas en effet avoir eu de lien avec les acteurs du système énergétique, ni davantage avec les constructeurs d'aéromoteurs, ni enfin avec le monde de la marine marchande où il envisage des débouchés. Il est ainsi extérieur aux mondes où pourraient se construire ses navires, comme au monde où ils pourraient trouver des débouchés, et ne dispose que d'un faible pouvoir sur la construction comme sur la diffusion de son invention.

De ces trois cas se dégage aussi l'influence des connaissances scientifiques et techniques propres à ces ingénieurs dans la conception de leurs convertisseurs. Claude est formé en sciences physiques et en génie industriel, et le procédé qu'il conçoit ne lui demande que des connaissances générales en thermodynamique. Pour chacune des composantes faisant appel à des connaissances plus pointues, il fait appel à ses confrères (Rateau pour l'extraction des gaz, SACM pour les turbines basse pression). Darrieus, en plus d'être ingénieur à la Compagnie électro-mécanique, est spécialiste de l'électrotechnique et de l'aérodynamique. Cela explique qu'il ait souhaité concevoir des aérogénérateurs de grande puissance, profilés aérodynamiquement. Joëssel, sans être un aérodynamicien professionnel, montre des connaissances dans cette discipline qu'il a cherché à mettre à profit dans l'expérimentation de son navire aéro-turbo.
D'une façon plus globale, l'état et les changements dans la connaissance des phénomènes considérés comme ressource jouent dans deux de ces projets : l'aérodynamique s'est enrichie en moyens théoriques et expérimentaux avec la Première guerre mondiale, et Joëssel et Darrieus en tirent parti pour mettre au point leurs aéromoteurs (Fontanon, 1998).

On peut également souligner l'importance de la figure de l'inventeur dans les projets innovants de l'entre-deux-guerres : si les trois ingénieurs étudiés ici n'ont pas porté seuls leurs projets [36], ces derniers sont rattachés à leur nom [37]. Ils ont en effet été les véritables moteurs de leurs projets.

Pour terminer, un fait général que ces trois études de cas mettent en lumière, est le lien entre la plus ou moins grande inscription du convertisseur dans le système énergé-

36. Même Joëssel, à propos duquel aucune trace de collaborateur ne m'est parvenue, si ce n'est cette photographie d'expérience en Figure 5.2 où l'on voit au moins deux personnes !

37. Moi-même, à partir des sources qui me sont parvenues, j'ai peut-être eu tendance à leur donner trop d'importance !

tique ou dans un système technique existant, et la réussite du processus d'innovation. Les aérogénérateurs de Darrieus ont pour vocation de s'intégrer à un réseau électrique tel que celui qui se construit en France. C'est un générateur électrique comme un autre, aussi son succès est-il déterminé par le prix du kWh qu'il délivre : il est en concurrence directe avec les autres convertisseurs existants. Un prix défavorable a eu pour conséquence l'arrêt des travaux de Darrieus et de la Compagnie électro-mécanique sur le sujet. La station maréthermique et le navire aéro-turbo s'inscrivent plus difficilement dans un système technique ou énergétique, mais pour des raisons différentes. Pour ce qui concerne la station maréthermique, elle ne se substitue à rien et s'inscrit dans un système à construire de toutes pièces (cf 4.3.3). La familiarité de cette station avec les centrales thermiques et donc avec le système énergétique métropolitain facilite cependant la participation des entreprises du secteur de l'énergie au projet. Enfin, le bateau éolien de Joëssel est un objet hybride, croisant plusieurs mondes socio-techniques : celui de la navigation et celui des aéromoteurs. Au caractère innovant des aéromoteurs qui doivent se substituer aux voiles (ces machines ne sont pas en vente et sont elles-mêmes conçues par Joëssel), s'ajoute donc le fait que ces deux mondes (filières techniques de construction : constructeurs de navires et constructeurs d'aéromoteurs, mais aussi groupe social usager : marine marchande) sont totalement déconnectés. Le bateau éolien a beaucoup de peine à se raccrocher au système technique.

## 5.4 L'implication d'institutions publiques au niveau national. Les projets soutenus par l'ONRSI

La Direction des recherches scientifiques et industrielles et des inventions (DRSII), puis l'Office national des recherches scientifiques et des inventions (ONRSI), ont pour rôle d'encourager et de coordonner les recherches scientifiques et leurs applications industrielles au niveau national. Ces institutions ont soutenu des projets d'exploitation de deux forces naturelles : l'énergie éolienne et l'énergie solaire. Cette section examine les différents dispositifs mis en œuvre pour soutenir et/ou organiser ces projets, ainsi que leurs résultats. Elle questionne ainsi la cohérence de ces travaux en tant que recherches visant à exploiter les forces naturelles, de même que l'ambition de politique énergétique sous-jacente. D'abord, elle étudie le point de vue général de l'ONRSI au sujet des forces naturelles. Elle relate ensuite les recherches concernant l'utilisation de l'énergie éolienne menées par deux ingénieurs spécialistes de l'aérodynamique : Albert Toussaint, à l'Institut d'aérodynamique de Saint-Cyr, qui cherche à améliorer les performances d'aéromoteurs, et Louis Constantin, qui cherche à mettre au point un navire éolien similaire à celui de Joëssel (cf 5.3) seront ensuite relatées, puis la mise au point de distillateurs avec les territoires

d'les expériences sur des aéromoteurs pour déterminer et/ou améliorer leur rendement et la mise au point d'un bateau éolien. Elle raconte enfin le projet de mise au point d'un distillateur solaire en collaboration avec les territoires d'Afrique du Nord (sous-section 5.4).

## L'ONRSI et les forces naturelles

Qu'ont pensé, de toutes les propositions d'invention émises pendant l'entre-deux-guerres, les experts de l'ONRSI, qui avait pour but de « [sélectionner] toutes les inventions utiles, en les passant au crible de la Science et en mettant celle-ci au service de l'industrie », et « d'apporter son aide à la plus petite industrie, au plus modeste inventeur » (Viala, 1923, p. 8) ? L'étude du *Bulletin de la DRSII* puis de *Recherches et Inventions* a permis de dégager les éléments suivants.

Globalement, à part les trois projets qui sont développés dans les paragraphes suivants, l'ONRSI n'a porté qu'un intérêt limité aux nombreuses inventions qui lui ont été présentées. Ses experts jugent irréalisables la majorité des propositions qui leur sont envoyées. En 1921, Maurain, est directeur-adjoint des Recherches scientifiques et industrielles et des inventions. Il écrit dans le *Bulletin de la DRSII* un article dans lequel il fait un état des lieux des applications possibles des forces naturelles, en prenant en considération la mise en garde d'Arrhenius concernant une pénurie à venir en charbon et en pétrole (Maurain, 1921a ; Maurain, 1921b). Il y déplore le trop grand nombre d'inventions peu pratiques envoyées à la Direction visant à exploiter les forces naturelles. Un autre article de 1926, mentionne la création d'un Comité italien pour l'examen des inventions, et compare les statistiques de propositions d'inventions envoyées à ce Comité sur quinze mois à celles de l'ONRSI (ONRSI, 1926b). Certains inventeurs italiens sont décrits comme ayant, « sans succès », abordé « les sources d'énergie non encore utilisables », qui, d'après le tableau présenté, consistent en l'énergie des marées, et la « chaleur solaire et terrestre », pour lesquelles sept propositions auraient été faites, soit environ 4% du total des inventions. L'auteur conclut que les inventeurs italiens ont des préoccupations « sensiblement du même ordre qu'en France », et que les statistiques « indiquent une proportion semblable de projets raisonnables et viables ». Outre un intérêt international pour l'exploitation des forces naturelles, on en déduit d'un côté que des inventeurs, peu nombreux en proportion mais bien présents, ont continué à envoyer des idées relatives aux forces naturelles à l'ONRSI, et d'un autre que ce dernier n'a jugé aucun d'entre eux « raisonnable et viable ».

En ce qui concerne la houille bleue, l'ONRSI n'œuvre pas du tout en faveur de l'exploitation des marées, très probablement en raison du fait que le ministère des Travaux publics s'occupe déjà de cette question. Dans son état des lieux, Maurain considère ainsi

favorablement cette source d'énergie (Maurain, 1921b), de même qu'en 1932, le Commandant Lancelin, membre du Comité technique de navigation de l'ONRSI (Lancelin, 1932). En ce qui concerne les vagues et la houle, parente pauvre des marées du côté de la Commission de la houille bleue (voir 6), les membres de l'ONRSI ne croient manifestement pas plus en leurs applications industrielles que les ingénieurs du ministère des Travaux publics. Maurain juge ainsi les procédés de leur exploitation « peu pratiques » (Maurain, 1921b). En 1932 Lancelin déplore que l'ONRSI est chaque année « appelé à examiner plusieurs projets d'utilisation de la force des vagues » et que ces « projets pèchent toujours par quelque endroit » (Lancelin, 1932). En 1930, un article de Jules Richard dans *Recherches et inventions* relève ainsi de l'exception : il relate les résultats positifs de l'expérimentation d'un moteur à vagues (J. Richard, 1930) (cf 6.4.0.0.1). Cet article est le seul à considérer positivement l'utilisation des vagues pour la production industrielle d'énergie dans le bulletin de l'ONRSI.

Les experts de l'ONRSI n'ont cependant pas été catégoriques à propos de toutes ces inventions, et les intérêts personnels de certains d'entre eux ont dirigé le soutien de l'Office vers les trois projets qui sont développés dans les sous-sections suivantes.

## Les mesures de performance d'aéromoteurs à l'Institut d'aérodynamique de Saint-Cyr et au laboratoire Eiffel (1923-1933)

L'ingénieur centralien Albert Toussaint (1885-1956), président du Comité technique d'aéronautique et de météorologie de la DRSII, s'est particulièrement penché sur la mise au point d'aéromoteurs de rendement supérieur à ceux qui étaient alors en usage dans les campagnes. Toussaint est également directeur de l'Institut aérotechnique de Saint-Cyr (IAT). Créé par le mécène Émile Deutsch de la Meurthe, ce laboratoire public est inauguré à la même période et dans la même mouvance de structuration de la recherche en aérodynamique que le Laboratoire Eiffel, en 1911 (Fontanon, 1998, p. 76). L'IAT a bénéficié de l'investissement public de la guerre en faveur des applications militaires de l'aviation et, peu équipé et peu reconnu dans le milieu de l'aéronautique devant le laboratoire Eiffel avant la guerre [38], il en ressort avec un important équipement expérimental (Fontanon, 1998[p. 79]) [39]. Dépendant, au départ, de l'Université de Paris, l'IAT est transféré en 1920

38. Selon Claudine Fontanon, les premières années de l'IAT sont difficiles : les commissions techniques pas très actives à cause de réticences des universitaires qui le composaient envers la recherche appliquée. Il dispose de peu de moyens techniques, son personnel est peu expérimenté, ses prestations sont payantes. En comparaison, le laboratoire Eiffel est plus renommé auprès des constructeurs d'avions qui étaient les premiers destinataires de cette institution, car son personnel est plus expérimenté, dispose d'un équipemenent plus performant, et que ses prestations sont gratuites. Aussi les constructeurs préfèrent-ils encore, avant la guerre, aller faire leurs essais au laboratoire d'Auteuil qu'à celui de Saint-Cyr (Fontanon, 1998.

39. Entre autres, trois souffleries construites grâce aux financements de la Section technique de l'aéronautique militaire (une de type Lelarge, deux de type Eiffel, dont une pour essais en vraie grandeur).

au Service Technique de l'aéronautique du ministère des Travaux publics, qui dépend du Sous-secrétariat d'État à l'aéronautique (ministère des Travaux publics) - ce sera le cas, l'année suivante, du laboratoire Eiffel - montrant « l'étatisation » de l'aérodynamique et des institutions associées (Fontanon, 1998, p. 83).

C'est en tant qu'aérodynamicien, président du Comité technique d'aéronautique et de météorologie et directeur de l'IAT, que Toussaint mène des expériences en vue de la mise au points d'aéromoteurs perfectionnés en 1923, et publie une note de synthèse à ce sujet en 1933. Il est également responsable de plusieurs essais d'aéromoteurs commandés par l'ONRSI à l'IAT, entre 1923 et 1924. En effet, la DRSII, puis l'ONRSI, sont fréquemment sollicités à ce sujet et, d'une part, des inventeurs demandent à faire tester leurs propres modèles, et d'autre part, « le Comité reçoit fréquemment des demandes de renseignement concernant les essais d'aéromoteurs » (Toussaint, 1933). Les résultats de ces différents travaux à l'IAT sont publiés dans *Recherches et inventions*.

Le premier de ces articles concerne l'essai d'un « aéromoteur à ajutage convergent-divergent » de son invention (Toussaint, 1923b) [40]. L'invention ne porte pas sur la forme de l'aéromoteur mais sur son environnement : elle consiste à le placer dans la section contractée d'un « ajutage de Venturi » (ou « ajutage convergent-divergent ») afin d'accélérer et de régulariser le débit de l'air arrivant sur les pales (voir Figure 5.7). L'ajutage (ou ajustage) [41] de Venturi est une conduite dont la section se trouve localement rétrécie puis agrandie, ce qui a en effet pour conséquence que la « vitesse du fluide dans la section contractée est notablement plus grande que la vitesse extérieure » (Toussaint, 1923b, p. 553). Grâce à ce dispositif, l'aéromoteur « se mettra [...] plus vite en mouvement et pourra capter plus d'énergie (cinétique) que s'il était exposé purement et simplement à la seule action du vent ambiant » (Toussaint, 1920). Un dispositif de réglage automatique de l'ouverture du divergent permet de régler le débit ou de l'arrêter totalement en cas de grand vent.

Ce dispositif semble être directement inspiré des dispositifs expérimentaux de souffleries qui permettent le réglage des paramètres des expériences, et en particulier, la vitesse, la

40. Il a pris pour cela un brevet en 1920 (Toussaint, 1920). Selon Toussaint, cet essai a été commandé à l'IAT par l'ONRSI (Toussaint, 1923b, p. 553). L'ingénieur a probablement soumis son idée à ses collègues de l'ONRSI qui ont accepté de faire financer les expériences à l'IAT.

41. Selon le Larousse universel de 1922, un ajutage est un « petit tuyau soudé à l'extrémité d'un tube d'écoulement pour en régulariser le débit » (Augé, 1922, p. 44).

43. « L'orientation de l'ajutage convergent A est commandée par un gouvernail de direction monoplan ou biplan de telle sorte que l'orifice d'entrée est constamment dirigé face au vent régnant. L'aéromoteur C est disposé dans la section contractée à la partie supérieure du divergent B, un arbre vertical D guidé par des paliers E transmet le mouvement de rotation de l'aéromoteur au récepteur F placé près du sol. À la partie inférieure du divergent B se trouve une buse coudée G, orientable sous l'action de deux gouvernails, formant girouette, de telle sorte que l'orifice de sortie est constamment orienté à la direction opposée du vent régnant. » (Toussaint, 1923a, p. 592)

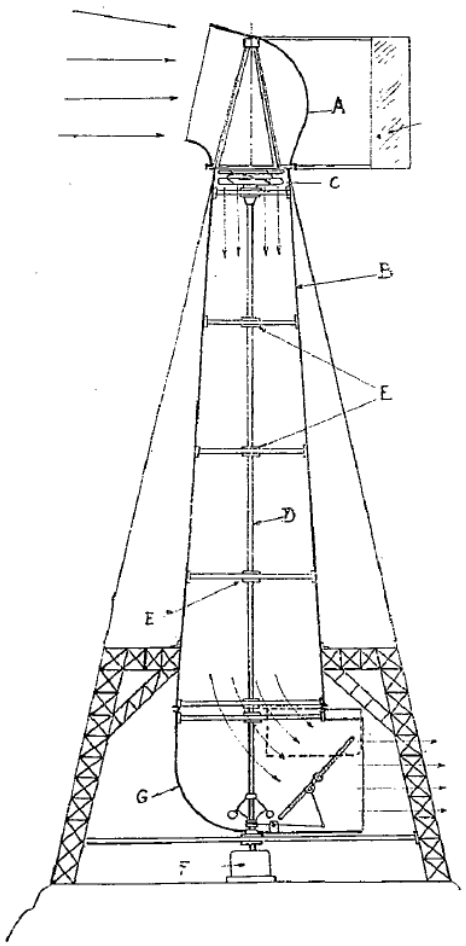



Fig. 15. — Vue d'ensemble d'une disposition d'aéromoteur à ajutage convergent-divergent.

FIGURE 5.7 – Aéromoteur convergent-divergent système Toussaint (TOUSSAINT, 1923a, p. 592) [43]

.

pression et la forme des écoulements d'air [44]. Toussaint effectue une série d'essais et de mesures en 1923 à l'aide d'un ajutage vertical de 3.80 m de long et d'un petit aéromoteur à 6 pales de 20 cm de diamètre, dont il ne détaille pas davantage les caractéristiques (TOUSSAINT, 1923a, p. 583). Il trouve des résultats tout-à-fait intéressants : le maximum de puissance obtenue correspond au maximum d'un aéromoteur sans ajutage de diamètre double ; en extrapolant par le calcul à un aéromoteur de 1.13 m de diamètre, Toussaint trouve que « le même moulinet sans ajutage convergent-divergent donnerait une puissance 4 fois moindre » (TOUSSAINT, 1923a, p. 590). Ces expériences montrent donc l'intérêt de l'invention de Toussaint pour l'augmentation et la régulation de la vitesse du vent incident sur les pales d'un aéromoteur.

44. Par exemple, la soufflerie brevetée par Eiffel, dont deux des souffleries construites pendant la guerre à l'IAT avaient la forme, était constitué d'un ajutage composé, à l'entrée, d'un « cône collecteur qui achemine l'air ...en augmentant sa vitesse et diminuant sa pression », et à la sortie, d'une buse qui « guide l'air vers un cône diffuseur qui diminue la vitesse de l'air et le ramène à la pression atmosphérique (FONTANON, 1998, p. 69) ».

L'année suivante, Pris, un ingénieur de l'IAT, tente d'appliquer ces résultats en expérimentant une turbine aérienne de son invention, intégrant un tube de Venturi, mais il obtient des résultats décevants (Pris, 1924). Les études de l'IAT sur l'aéromoteur à ajutage divergent s'arrêtent là malgré les résultats encourageants de Toussaint, et il ne semble pas qu'elles aient trouvé la moindre application pratique.

En 1924, un autre inventeur, Paul Fortier-Beaulieu, industriel à Roanne [45] obtient que le Comité d'aéronautique de l'ONRSI effectue des mesures sur son invention à l'IAT. Il s'agit également d'une turbine aérienne à axe vertical [46], dont il a d'abord cherché à évaluer le nombre optimal de pales, puis l'influence du stator (qui doit jouer un rôle analogue au distributeur dans les turbines hydrauliques) sur le rendement. Ses conclusions sont défavorables au procédé : il met en évidence que le nombre de pales optimal est situé entre 16 et 24 (Fortier-Beaulieu, 1924b), et que le stator n'a d'influence positive que pour un nombre d'aubes inférieur ou égal à 6 aubes (Fortier-Beaulieu, 1924a) !

D'autres mesures ont pu être effectuées à l'IAT à la demande de l'ONRSI. Outre ces expériences sur de nouveaux modèles d'aéromoteurs, une note de synthèse est publiée par Toussaint en 1933 à propos des mesures faites en France et à l'étranger pour établir les caractéristiques des aéromoteurs à axe horizontal en fonction de leur nombre de pales (Toussaint, 1933) [47]. Il n'y est cependant pas question des mesures de l'IAT, mais de celles du laboratoire Eiffel, ainsi que de celles du laboratoire allemand de Göttingenindex[institutions]Laboratoire aerodynamique de Gottingen@Laboratoire aérodynamique de Göttingen et de l'Institut aérodynamique de Moscou. Au laboratoire Eiffel, Antonin Lapresle, le successeur d'Eiffel à la direction de cette institution, a effectivement exécuté des études systématiques sur le rendement de trois types d'aéromoteurs : à 2, 4 et 12 pales - ou « moulin à 2 pales », « moulin hollandais » et « moulin américain » [48] .

L'ONRSI et l'Institut d'aérodynamique de Saint-Cyr, probablement associés dans la mesure où Toussaint faisait partie des deux, ont donc choisi de mettre à profit leurs nouveaux moyens pour mettre au point des aéromoteurs performants. Ces deux institutions qui portaient la marque de la reconfiguration de la recherche appliquée à l'issue de la guerre et de sa prise en main par l'État, ont ainsi considéré les travaux d'aérodynamique sur les aéromoteurs comme une application d'intérêt national. Ces études n'ont cependant pas été systématiques et ont, à chaque fois, porté sur des modèles particuliers d'aéromoteurs ou des dispositions nouvelles autour des aéromoteurs, et on peut à nouveau voir

45. Dans les prospectus et les revues où je peux en trouver la trace sur Gallica, Fortier-Beaulieu était une tannerie depuis la fin du XIX$^{e}$ s, et il est bien probable que Paul Fortier-Beaulieu ait repris l'entreprise familiale.

46. Pour laquelle il a pris plusieurs brevets (Fortier-Beaulieu, 1923 ; Fortier-Beaulieu, 1924d ; Fortier-Beaulieu, 1924c).

47. 15 modèles sont comparés allant de 2 à 27 pales.

48. J'ai très peu d'éléments sur ces travaux, à part les résultats, publiés dans cet article de Toussaint, ainsi que dans celui de Constantin sur la production d'électricité par le vent(Constantin, 1924d, p. 395).

l'ONRSI fidèle à l'image de l'inventeur qui percerait grâce à ses conceptions nouvelles. Cependant, aucune de celles-ci n'a mené à une exploitation opérationnelle, et, au final, l'étude de synthèse de Toussaint semble plus exploiter les résultats des études systématiques du laboratoire Eiffel que ses propres travaux. En tout cas, que ce soit au laboratoire Eiffel, à l'IAT ou au Comité d'aéronautique de l'ONRSI, ces travaux sont une marque de l'intérêt des aérodynamiciens pour les aéromoteurs dans les années 1920.

## Houille azur : le bateau paradoxal Joëssel-Constantin-Dalloz (1910-1923)

L'histoire du bateau éolien de l'ONRSI commence en fait avant la guerre, avec les premières expériences de Louis Constantin, ingénieur de l'École supérieure d'électricité. Né en 1877, cet ingénieur a travaillé, de 1900 à 1911, pour une société espagnole d'électricité, avant de se lancer dans les recherches en aéronautique (Rogier, 2000a, p. 56). Il est remarqué pour ses travaux sur la résistance de l'air à l'avancement des avions dès les années 1910, qui le mènent à inventer de nouveaux profils d'ailes [49]. Cette époque est également, avec la naissance de l'aviation, celle d'une structuration de la recherche en aérodynamique, par des « individus isolés ou par de minuscules équipes de recherche » (Fontanon, 1998, p. 58) [50]. C'est en particulier les débuts du laboratoire privé Eiffel, dont la première version est achevée en 1910 et munie d'un important équipement de mesures aérodynamiques, mis à disposition des constructeurs d'avions et, plus généralement, des inventeurs.

Les recherches de Constantin sur la résistance de l'air le mènent entre autres à imaginer un procédé spécial pour diminuer la consommation de carburant. En effet, selon un auteur relatant ses travaux, « la résistance de l'air est devenue, avec les véhicules rapides, une cause de perte de puissance, donc de combustible et par suite d'argent » (Chassériaud, 1911b, p. 158). Avec l'augmentation considérable de la vitesse par ces véhicules tous plus ou moins nouveaux (automobiles, locomotives, navires à moteur thermique, avions), cette perte de puissance est très grande car elle est proportionnelle au carré de l'augmentation de vitesse. Au lieu de se focaliser sur le profil des parois des véhicules, Constantin, ayant pris connaissance la théorie des hélices de Stéfan Drzewiecki [51], propose une solution originale : ajouter une partie mobile à l'avant, un aéromoteur, afin, non seulement, de réduire

49. Il est en autres autres question de ces ailes, avec louanges, en 1913, dans la *Revue aérienne* (numéro du 10 juillet 1913, p. 387) et *L'Aérophile* (numéro du 1er janvier 1913, p. 250-251.)

50. Selon l'auteure, cette période dure de 1904 à 1914.

51. Ingénieur centralien d'origine polonaise, Drzewiecki a d'abord commencé par travailler sur de l'hydrodynamique pour le compte de la Marine russe, puis s'est installé à Paris où il s'intéresse à « à l'aviation naissante et en particulier à la propulsion des aéroplanes et conçoit une théorie des hélices propulsives aériennes » (Fontanon, 2010, p. 51). Il se rapproche ainsi de Gustave Eiffel.

la résistance de l'air, mais aussi de récupérer une partie du mouvement relatif de l'air par rapport au véhicule. L'aéromoteur est relié mécaniquement aux organes moteurs, et possède une forme qui permet de limiter la résistance à la pénétration.

L'ingénieur formule également une idée connexe : l'utilisation d'aéromoteurs, non pour récupérer la puissance de l'air en mouvement relatif par rapport à un véhicule propulsé par un moteur thermique, mais pour actionner directement, à partir de la force du vent, les organes moteurs du véhicule. Il demande ainsi, en février 1910, un brevet pour un « bateau muni d'un moteur à vent et d'une hélice marine, et pouvant avancer contre le vent sans louvoyer » (La Nature, 1922d, p. 305).

En 1910, Constantin effectue des expériences et multiplie les démonstrations pour tester et montrer la validité de ses propositions. Il fait fonctionner un « petit chariot d'aluminium ne pesant guère que 1 200 g, et dépourvu de toute puissance motrice propre », équipé à l'avant d'une « sorte d'hélice conique », commandant par une série d'engrenages les roues (Chassériaud, 1911b, p. 252). Lorsqu'on dirige en face lui l'air d'un ventilateur, le chariot avance, même sur un plan incliné, ou lesté de 10 kg (voir Figure 5.8).

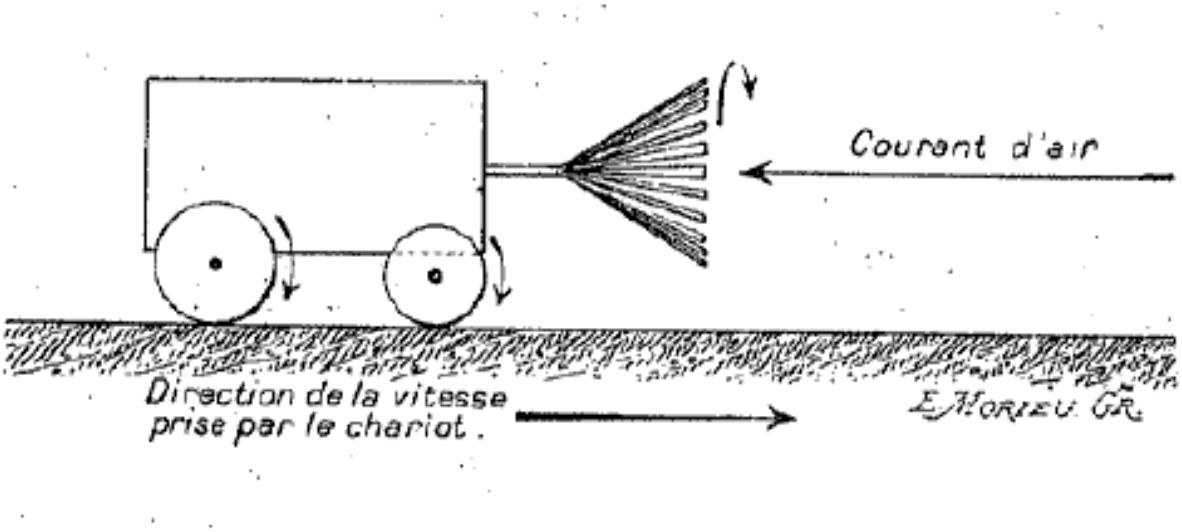



Figure 5.8 – Chariot-test de Contantin, mis en mouvement par un moulin à vent (1911) (Chassériaud, 1911b, p. 251)

.

Au CNAM, un ensemble de « personnalités compétentes » constate le fonctionnement du chariot (Chassériaud, 1911b, p. 252). Constantin sollicite en outre Gustave Eiffel pour effectuer des mesures dans son tout jeune laboratoire du Champ-de-Mars, ce qu'Eiffel accepte. Les mesures de Constantin montrent effectivement une chute de la résistance de l'air grâce à l'aéromoteur. Ces résultats semblent avoir suscité de vifs débats « dans les milieux techniques » (Chassériaud, 1911b), voire d'« ardentes polémiques » dans certaines revues spécialisées (La Nature, 1922d, p. 306). Certains scientifiques renommés auraient pris le sujet en grande considération, comme Paul Painlevé, qui relate ces

expériences dans *La technique aéronautique*, ou Lecornu, qui « introduisit la description [du chariot] dans son cours de l'École polytechnique » (La Nature, 1911b, p. 306).

Quoi qu'il en soit, il semble que des deux directions (économies de carburant, et propulsion éolienne), celle qui ait retenu le plus d'attention soit, à cette période, la possibilité de faire des économies de carburant d'un moteur existant, et non de remplacer le moteur par un moulin à vent, dans les moyens de locomotion. Chassériaud, qui a assisté aux essais et les relate dans *La Nature*, considère ainsi que si la poursuite des expériences confirme les résultats positifs des premières, on « aurait là le moyen de réaliser dans les automobiles, les locomotives, les bicyclettes, les motocyclettes, et même les ballons dirigeables, les aéroplanes, et les sous-marins, des économies de puissance dont le total constituerait peut-être une épargne formidable » (Chassériaud, 1911b, p. 252). Selon lui, cependant, « faire progresser un navire aérien sans puissance motrice propre, c'est un problème qu'on ne peut évidemment résoudre qu'en apparence » (Chassériaud, 1911a, p. 158). En outre, à la même période, d'autres inventeurs ont eu l'idée de remplacer les voiles des navires par des aéromoteurs. Allary, dans les années 1900, à Brest, et l'abbé Piedfort, vers 1916, à Calais, disent avoir de même testé des chariots, mais également des flotteurs propulsés par le vent via un aéromoteur (La Nature, 1922a).

Dans les années qui suivent ces premières expériences, Constantin se consacre à ses études sur les profils d'ailes, puis vient la guerre. Avec celle-ci, plusieurs circonstances sont favorables à la poursuite de ses recherches pour la mise au point de bateaux propulsés par des aéromoteurs, parmi lesquelles, en particulier, la structuration de la recherche scientifique au niveau national, et la pénurie de combustibles. En 1917, Constantin est en effet « rappelé du Front et nommé membre de la section d'Aéronautique du Sous-secrétariat d'État des inventions » (La Nature, 1922c, p. 306), signe de la reconnaissance dont il dispose en tant qu'aérodynamicien. C'est là que, sans être au courant des travaux de Joëssel, qui commence alors ses expérimentations sur le navire Aéro-turbo, Constantin reconsidère cette idée de bateau éolien, et présente le chariot à ses collègues de la Section d'aéronautique, puis à Jules-Louis Breton, le directeur du Sous-secrétariat. Celui-ci se montre tout-à-fait enthousiaste et décide, malgré des avis divergents [52], d'encourager les recherches de Constantin, soutien qui ne se démentira pas la guerre étant terminée. Constantin obtient ainsi des crédits pour construire et faire expérimenter un modèle en vraie grandeur (La Nature, 1922a, p. 306).

L'ingénieur choisit de confier la mise en pratique des expérience à Gaston Dalloz, avec qui il prend deux brevets sur les « véhicules à turbines aériennes » (Constantin

52. Selon Dalloz, chargé de la partie pratique de ces expériences, « il a fallu à M. Breton, en plus de sa clairvoyance habituelle, un certain courage pour la faire mettre en œuvre, car elle a été l'objet de très vives critiques » (Daloz, 1921).

et Daloz, 1919 ; Constantin et Daloz, 1922)[53]. En 1919, sous la direction d'André Broca, chef du Comité technique de navigation et de génie de la DRSII, celui-ci commence, comme Joëssel, par des tests sur modèle réduit en bassin[54], puis en conditions réelles, sur la Seine, à Courbevoie (Daloz, 1921, p. 24). Breton, Broca, et Maurain, qui est alors directeur-adjoint de la DRSII, ayant constaté la bonne marche de ce petit radeau, Breton décide de commander à Dalloz des essais sur un radeau de 6 m. Celui-ci, achevé en 1920 et testé par Breton lui-même sur la Seine, avec cinq personnes à bord, vient confirmer la positivité de l'essai.

Breton, désireux de « vider la question sans appel » en montrant « un vrai bateau gréé avec le nouveau système » , fait commander un bateau par la DRSII : le Bois-Rosé, « petit bateau de 5 tonneaux, de 8,50 m de longueur et de 1,80 m de diamètre de tirant d'eau » (La Nature, 1922a, p. 306). Celui-ci est équipé d'une « turbine aérienne Levasseur » bipale de 9 m de diamètre, montée sur un pylône d'acier (voir Figure 5.9). Constantin est alors « chef du bureau d'études » de Levasseur, constructeur d'avions, et « travaill[e] en particulier sur la prédétermination des caractéristiques des hélices » (Rogier, 2000a, p. 56). C'est donc certainement lui qui a conçu cet aéromoteur bipale, dont la morphologie ressemble davantage aux hélices d'avion qu'aux aéromoteurs multipales alors en usage dans les campagnes. Selon Constantin, c'est un fait « bien connu des techniciens » que ce sont les aéromoteurs bipales qui ont le meilleur rendement. Le 15 septembre 1922, pendant deux heures, des promeneurs peuvent voir sur la Seine, « entre le Pont de Saint-Cloud et le pont de Sèvres », le Bois-Rosé, à bord duquel Jules-Louis Breton, accompagné de quatre passagers, tient la barre, satisfait de la grande maniabilité du bateau (La Nature, 1922a, p. 307). L'expérience fait l'objet d'une note aux *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* par Constantin, Dalloz et Joëssel[55], présentée le 23 octobre à l'Académie des sciences par Breton (Constantin, Daloz et Joëssel, 1922). La démonstration est réitérée de 4 novembre suivant, devant un public composé de « sénateurs, députés, membres de l'Institut, représentants des ministères de la Guerre, de la Marine, des Colonies, des Travaux publics » et de journalistes (voir Figure 5.9).

Dans un article du bulletin de l'ONRSI, Constantin fait, en avril 1923, un comparatif

53. J'ai très peu d'informations sur ce personnage, dont, selon un article de *La Nature*, Constantin « connaissait l'esprit inventif, la grande expérience pratique et le sens très sûr des réalités mécaniques » (La Nature, 1922a, p. 306).

54. Le dispositif est analogue : dans un bassin de 4 m de long sur 0.70 m de large, un ventilateur électrique souffle sur le radeau. Dalloz ne teste toutefois qu'un modèle d'aéromoteur, de 0.60 m de diamètre, à 26 pales et à axe horizontal. Par une série de mesures, il parvient à coupler une hélice propulsive à l'aéromoteur de manière à faire avancer le radeau dans un courant aérien régulier (Daloz, 1921).

55. Joëssel a en effet pris connaissance des travaux de Constantin et Dalloz à l'été 1922 et a choisi de s'associer, au moins symboliquement, aux expériences des deux inventeurs (Joessel, 1922, p. 30).

57. Photographie de l'Agence Rol : « Expériences d'un bateau à turbine aérienne », 04/11/1922, disponible sur Gallica.
On distingue bien Jules-Louis Breton, tout à droite sous la petite tonnelle. Je n'ai pas réussi à identifier les autres passagers.



FIGURE 5.9 – Le Bois-Rosé, bateau de pêche équipé d'une « turbine aérienne Levasseur » bipale de 9 m de diamètre, sur la Seine, le 4 novembre 1922 [57]

.

entre les bateaux à voile et les bateaux munis d'aéromoteurs (CONSTANTIN, 1923). Comme Joëssel, il montre les nombreux avantages de ce dernier : plus grande vitesse à toutes les allures, progression ininterrompue, grande maniabilité y compris en chenaux étroits, besoin d'une main d'œuvre moins qualifiée, etc.

Cependant, les expériences françaises concernant la propulsion des navires par les aéromoteurs s'arrêtent là. En effet, le Bois-Rosé subit un « fâcheux accident de remorquage en mer, alors que l'installation était provisoirement démontée » (CONSTANTIN, 1928, p 17). Les inventeurs, à la grande déception de Constantin, ne trouvent plus de soutien public, l'ONRSI arrêtant son aide une fois cette dernière expérience réalisée et réussie, et n'obtiennent aucun encouragement industriel pour poursuivre leurs expériences à plus grande échelle. Malgré le souhait explicite et optimiste de Joëssel, aucune « compagnie de navigation » ne fait en sorte d'équiper ses bateaux d'aéromoteurs. Puis, on l'a vu en 4.2.3 : à

partir du moment où l'ingénieur allemand Anton Flettner a fait construire un paquebot à rotors Flettner de dimensions considérablement plus importantes [58], il n'est quasiment plus question dans la presse du petit bateau de pêche de l'ONRSI. Dans un article de 1928, Constantin tente de mettre en avant certains avantages de ses conceptions par rapport à celles de Flettner, et surtout rappelle amèrement que Flettner a obtenu des concours financiers de puissantes institutions privées et publiques, alors qu'en France, ces dernières sont trop frileuses « quand il s'agit d'expériences à ce point nouvelles » (Constantin, 1928, p. 16).

Du projet de bateau éolien de Constantin, on peut retenir, premièrement, la multiplicité des inventions, autour de la première guerre mondiale, visant à remplacer les voiles par des aéromoteurs, avec la substitution accélérée, au début du siècle, des voiles par les moteurs thermiques, mais aussi la structuration des sciences aérodynamiques au début de ce siècle, qui a guidé les conceptions et expérimentations de Constantin. C'est pour les mêmes raisons que Joëssel a mené à bien un projet similaire presque simultanément (cf 5.3). C'est ainsi grâce aux nouveaux moyens de la science aérodynamique que Constantin effectue ses premiers essais dans les années 1910 : il utilise les résultats de cette science naissante ainsi que les moyens techniques mis à disposition par le jeune laboratoire Eiffel, afin de contribuer lui-même aux applications de cette science pour le domaine de la locomotion. Ensuite, c'est l'institutionnalisation de la recherche au cours de la première guerre mondiale, avec la création des organismes successifs aboutissant à l'ONRSI, qui permet à Constantin de matérialiser son idée jusqu'à la construction d'un petit bateau opérationnel. L'intérêt personnel de Breton pour le procédé, directeur et fervent défenseur de cet organisme, a été décisif dans ce projet. Cet intérêt reste en effet important tout le long des expérimentations guidées par Constantin, puisque Breton décide de faire financer par l'ONRSI tous les essais jusqu'à celui du Bois-Rosé, qu'il présente les résultats des expériences à l'Académie des sciences en 1922, et qu'il teste lui-même le bateau éolien à au moins deux reprises. Enfin, ce soutien de l'ONRSI n'est pas suffisant à ce que des tests plus importants soient effectués et que ce procédé soit effectivement utilisé dans la marine française. Le reproche d'une aide trop ponctuelle de l'ONRSI pour aboutir à des résultats industriels est justifiée en un sens, et la concurrence du navire éolien de Flettner en Allemagne est tout-à-fait illustratif du lien fort entre recherche et industrie qui existait en Allemagne, et de ce manque à gagner en France, que l'ONRSI s'était pourtant donné pour tâche de combler [59]. De la même manière que le bateau éolien de Joëssel, celui de Constantin peine à trouver sa place dans le système technique.

58. Il mesurait 90 m de long et était équipé de trois rotors Flettner de 27 m de haut et de 7 m de diamètre ; en comparaison, le Bois-Rosé mesurait 8.50 m de long, son aéromoteur 9 m de diamètre, monté sur un pylone de quelque mètres de haut. Il était cependant muni de moteurs thermiques de secours.

59. Cette différence entre la recherche française et la recherche allemande est développée dans l'article de Radvaniy et Bordry (Radvanayi et Bordry, (1989))

## Houille jaune et mise en valeur des zones sahariennes des colonies françaises

En janvier 1925, l'ONRSI annonce le lancement, à la demande de Lucien Saint, résident général de la France à Tunis, de deux concours dont le but est « d'améliorer les conditions de ravitaillement en eau potable des postes du Sud tunisien et des convois appelés à circuler dans ces régions » (ONRSI, 1925). Selon l'ONRSI, « [l]a question présente un intérêt général et sa solution est susceptible d'applications dans toutes les régions pourvues seulement d'eaux fortement minéralisées », dont font partie les territoires du Sud algérien et tunisien. Le premier concours récompensera les inventeurs du meilleur appareil portatif permettant une épuration chimique de l'eau, et est doté de 1000 francs. Le second, doté de 5000 francs, primera les meilleurs inventeurs d'un « appareil fixe permettant de produire de l'eau distillée par utilisation de la chaleur solaire, et capable de fournir environ 100 litres d'eau pure par jour, durant la période d'insolation moyenne de l'été, dans le sud tunisien ». L'appareil doit être performant, solide, peu coûteux et assez simple pour que les colons qui l'utiliseront puissent le réparer aisément dans des conditions où l'approvisionnement en eau en dépendra. L'ONRSI examinera les propositions des inventeurs, et, « dans le cas d'essais satisfaisants, les Services tunisiens seraient très vraisemblablement acquéreurs de plusieurs de ces appareils ».

Initialement prévue pour le 1er Janvier 1926, la clôture du concours est reportée à janvier 1927 , puis à nouveau à janvier 1928, pour laisser aux inventeurs le temps de terminer leurs études et essais (ONRSI, 1926a). Une allocation de 500 francs est de plus accordée à chacun des inventeurs pour les « aider [...] à poursuivre leurs essais » (ONRSI, 1927), ce qui manifeste une prise de conscience de l'ONRSI qu'il peut être efficace de financer les travaux de recherche, et non pas seulement les récompenser. Cette somme est modique au regard, par exemple, des aides publiques que certaines entreprises ont pu recevoir pour faire des études relatives à l'aménagement du littoral pour l'utilisation des marées. Mais elle peut se justifier par le fait que les appareils à mettre en œuvre doivent être le plus économiques possibles, et que des prototypes ne doivent donc pas non plus être coûteux. Quelques informations destinées à aider les inventeurs dans leurs mises au point sont publiées dans *Recherches et inventions*. En 1926, Maurain, explique ainsi les méthodes relatives à l'évaluation de l'ensoleillement d'une zone donnée, puis il fait un état de l'art des applications auxquelles l'utilisation de l'énergie solaire a donné lieu dans le monde (Maurain, 1926). Il évoque notamment les expériences faites au même moment par Abbot et ses collègues au Mont Wilson pour la cuisson solaire. Enfin, il expose les « données sur le climat sud-tunisien pouvant servir aux recherches en vue de l'utilisation de la chaleur solaire », adressées par G. Ginestous, chef du Service météorologique de Tunisie.

Sept propositions sont présentées à l'ONRSI. Les trois d'entre elles qui retiennent l'attention du Comité de météorologie concernent toutes des miroirs paraboliques (ONRSI, 1927). La première émane de Ginestous et Poullain, « ingénieur principal » du même Service de météorologie de Tunisie. La deuxième est une invention de Pouget, professeur à la faculté de sciences d'Alger, dont les essais seront cependant « interrompus par divers incidents » (ONRSI, 1929). La dernière est l'œuvre de Félix Pasteur, médecin général de l'armée, qui continue cependant ses recherches de son côté, hors du concours. Ginestous est donc le seul concurrent de départ qui continue ses recherches dans le cadre du concours. Cependant, progressivement, en plus de la collaboration de Maurain mais aussi de son collègue Charles-Émile Brazier, à l'Institut de Physique du Globe de Paris, il s'adjoint celle de Jules Richard au Musée océanographique de Monaco, et de Berland à la Station hydrologique de Touggourt [60].

Jules Richard, directeur du Musée océanographique de Monaco (cf 6.4.0.0.1) s'intéresse en effet à la question de l'utilisation de l'énergie solaire depuis au moins 1924, où il mène des expériences sur « l'utilisation de la chaleur solaire à la production d'énergie électrique » (J. Richard et Henry, 1927, p. 14) (voir 4.3.4). La lecture des deux articles publiés en 1926 et 1927 dans *Recherches et inventions*, le pousse à poursuivre ses travaux sur la chaleur solaire. Richard est en effet séduit par le procédé présenté par Maurain dans *Recherches et inventions* (Brazier et Maurain, 1927), qu'il estime « le plus simple et le plus économique » (J. Richard, 1927). Inspiré de l'invention de J. Harding, un Américain qui a, en 1883, fait installer 4800 $m^2$ d'un tel système pour distiller de l'eau, il se compose d'une « cuve peu profonde en tôle, fermée par un couvercle dont la partie supérieure est une lame de verre inclinée par rapport à l'horizontale ». « Par curiosité », Richard en construit un modèle et l'expérimente en 1927 au Musée océanographique. À son tour, Ginestous abandonne le miroir parabolique pour le châssis distillateur, le premier, « trop coûteux et trop fragile » (G Ginestous, 1929b), n'ayant pas pu être mis au point à cause de « difficultés d'installation » et d'un « manque de personnel » (G. Ginestous, 1929). Maurain, Brazier, Richard, Berland et Ginestous collaborent à distance à la détermination et à l'amélioration des performances du châssis distillateur - couleur, matière, dimensions, détails de fonctionnement. Berland est quant à lui l'auteur de plusieurs « modifications ingénieuses » au châssis distillateur (ONRSI, 1929).

L'appareil final est une caisse en bois contenant une cuve en tôle galvanisée peinte en noir. Son rendement moyen annuel est de 1,5 L/jour.$m^2$ de surface ensoleillée sur l'année dans la région de Tunis (G Ginestous, 1929a). Le Service météorologique de Tunisie reçoit mission, probablement de la part de la Résidence générale de France à

60. Berland a déjà travaillé au début des années 1920 avec l'ingénieur des Ponts et chaussées Paul Caufourier sur la mise au point d'un appareil de chauffage solaire (Caufourier, 1923), qui a aussi étudié l'utilisation des marées et celle des sources thermales.

Tunis, d'installer un ensemble de trente châssis distillateurs au poste militaire de Ben Gardane, (voir Figure 5.10) et trente autres au poste militaire de Fort-Saint, deux postes du Sud tunisien. Ils sont alimentés en eaux souterraines saumâtres par un aéromoteur de construction américaine — preuve que, pour cette situation particulière, il était soit moins avantageux, soit tout simplement impossible de se procurer des aéromoteurs français.

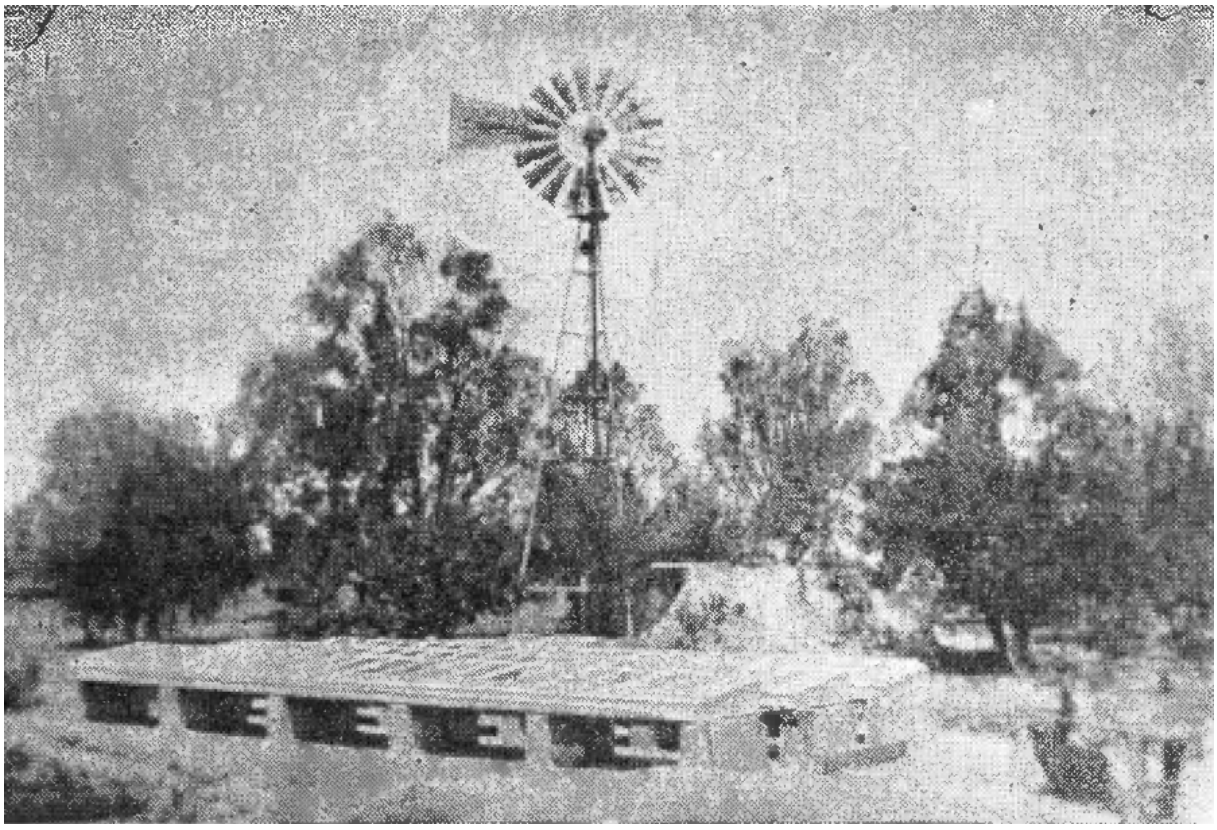


FIGURE 5.10 – Distillateur solaire installé par le Service de météorologie de Tunisie à Ben Gardane en 1928 (Photo) (G. GINESTOUS, 1929, p. 21)

.

La production moyenne étant de 67 L/jour pour les mois de mai et juin 1928, l'ONRSI considère en 1929 que l'objectif du concours est atteint. Le prix est donc partagé entre Ginestous, Berland, Brazier et Richard (ONRSI, 1929). Cela, ajouté au fait que l'invention dérive du châssis d'Harding, signe l'aspect collectif de la mise au point de l'appareil, ainsi que l'artifice que représente l'affectation d'un nom à une invention.

Ginestous tente de diffuser l'usage domestique et agricole de ces appareils, par « une série de brochures, d'articles et de conférences » à visées pratiques, s'« adressant plus spécialement aux colons de Tunisie et de l'Afrique du Nord » (G GINESTOUS, 1929a, p. 4). Dans ces interventions, il signale la présence de deux entreprises à même de construire des batteries de châssis à installer en terrasse, et donne les indications nécessaires à leur fonctionnement (G GINESTOUS, 1929a ; G. GINESTOUS, 1929). Il signale même qu'un droguiste de Tunis peut fournir le vernis noir utilisé pour fabriquer les distillateurs, imaginant

certainement que les colons fabriquent leurs propres appareils, ce qui montre l'importance de l'aspect pratique donnée au distillateur, qui doit pouvoir rendre service à tous les colons, facilement et économiquement. Cette promotion semble avoir eu un relatif succès, tout du moins en dehors de l'Afrique du Nord, puisque Guilmet, « ingénieur météorologiste » à l'Observatoire central de l'ine , expérimente le châssis distillateur dans son Service, et en fait part dans *Recherches et inventions* (Guilmet, 1933). Ses expériences sur des cuves constituées de plusieurs matériaux le mènent à recommander le béton ou le ciment armé à la place du bois, en raison de la rapide détérioration du bois par l'humidité et les grandes variations de température qu'il subit [61].

Les installations de Fort-Saint et Ben Gardane sont rapidement endommagées à cause de la détérioration du bois et mais aussi des canalisations, rongées par les eaux saumâtres. Elles ne sont pas remplacées, car, selon les mots d'un rapport d'activité de l'ONRSI en 1933, « l'Administration recule devant les frais des réparations qu'il faudrait entreprendre » (Breton et Borrel, 1933). En 1933, Maurain et Brazier tentent tout de même, au nom du Comité de météorologie de l'ONRSI, de mettre au point un appareil qui résiste à la corrosion de l'eau à l'Observatoire de géophysique de Saint-Maur (Brazier et Maurain, 1934). Ils utilisent pour la cuve, non pas le béton ou le ciment armé, comme Guilmet, mais de la céramique. Ils se disent également satisfaits des résultats : l'appareil a distillé de l'eau sans modification de rendement ni détérioration, pendant un an, et ce, à Paris. Les travaux de l'ONRSI sur le distillateur s'arrêtent là, Maurain et Brazier considérant avoir répondu au problème posé.

Malgré ces améliorations de principe, aucun des deux ensembles de Fort-Saint ou de Ben Gardane n'est finalement réparé. En effet, d'une part, il aurait fallu changer tous les châssis distillateurs, c'est-à-dire une bonne partie des installations ; d'autre part, aucune solution de canalisation résistante à la corrosion n'a été mise au point. Dans les dernières mentions qui sont faites du distillateur solaire que l'ONRSI tenterait encore d'améliorer, il n'est plus question que d'appareils domestiques individuels, qui nécessiteraient moins d'entretien et de surveillance (Breton et Borrel, 1933) [62]. En 1931, Ginestous exprime son désintéressement du distillateur solaire, qu'il dit cantonné à une consommation domestique, avec de petits volumes d'eau (inférieure à 1000 L/jour) (G. Ginestous, 1931b). Mais, toujours intéressé par le problème de la distillation des eaux impures dans le Sud tunisien, il se tourne vers l'utilisation d'une autre force naturelle, après avoir rencontré l'ingénieur des Ponts et Chaussées Paul Darche au Congrès de l'eau d'Alger en 1928. Ginestous y présente en effet le distillateur solaire [63]. Séduit par l'idée d'exploiter l'énergie

61. Je n'ai cependant pas trouvé de traces d'autres installations de châssis distillateurs, domestiques ou militaires, qui auraient été installés dans les colonies françaises.

62. Mais à nouveau, je n'ai pas de trace de telles installations.

63. Au même congrès, il y a au moins trois communications sur l'utilisation des énergies solaire et éolienne.

éolienne grâce aux aéromoteurs expérimentés par Darche, il formule ainsi, au Congrès d'agronomie du Cinquantenaire du protectorat français en Tunisie, un projet de distillation mécanique de l'eau par l'énergie éolienne. Celui-ci est, néanmoins, probablement resté sans suites.

Félix Pasteur, un médecin général de l'armée de terre, a aussi participé aussi au concours lancé en 1925, avec un appareil à concentration utilisant un miroir parabolique. Il le brevette la même année[64], et en fait construire, probablement à ses frais et pour répondre aux objectifs du concours, un premier modèle en 1926, qu'il teste à Paris (Pasteur, 1932). Mais il se retire du concours, préférant se focaliser sur les applications de son appareil au chauffage domestique de l'eau. Pasteur multiplie les expériences avec différents matériaux et différentes dispositions. Celles-ci le mènent à délaisser la concentration par miroir parabolique, auquel il reproche l'inconvénient de devoir être orienté, pour une caisse métallique plate placée dans un caisson de même forme, dont toutes les parois sont calorifugées sauf une qui est vitrée et destinée à être orientée au soleil. À Paris, il obtient ainsi 3 L d'eau par heure à 100°C, puis à Biarritz, il obtient 4 L d'eau par heure à 100°C[65].

Des appareils solaires ayant participé au concours de l'ONRSI, c'est celui de Pasteur qui connaît la plus grande diffusion. Le secrétaire général du ministère de la Guerre Guinand, qui se penche alors sur problème de l'alimentation en combustibles des oasis sahariens d'Afrique du Nord, s'intéresse en effet à ses travaux, et l'envoie en mission en 1930 à Colomb-Béchar, dans le Sahara algérien, pour « étudier sur place les possibilités d'utilisation de la chaleur solaire » (Pasteur, 1937). À partir de ce moment, les expériences de Pasteur sont très certainement financées par le ministère de la Guerre. Lors d'une première mission en mars 1930, il teste plusieurs dispositifs dans des conditions diverses, qui le mènent à mettre au point l'installation qu'il fera réaliser lors d'une autre mission, en mai 1931, à l'hôpital militaire de Colomb-Béchar. Celle-ci est composée d'une batterie de dix-huit caisses chauffantes d'une contenance de 8 L, placées sur l'appentis d'un des bâtiments de l'hôpital (voir Figure 5.12), et sert à assurer, « d'une manière à peu près certaine et constante », l'eau chaude pour 15 ou 20 bains quotidiens à 37°C(pour 150 L à 200 L/bain) et 150 à 200 douches à 20°C (pour 15 L/douche) » (Pasteur, 1932, p. 48). Il sert également pour la confection du café et le blanchiment du linge.

Il met en outre au point des installations individuelles, portant, comme les participants

En 1931 Ginestous a aussi formulé un projet d'exploitation des sources thermales d'Aïn-el-Atrous, selon un cycle type Claude-G. Ginestous, 1931a).

64. Brevet n°662.017. Il prend également deux additions pour ce brevet en 1926 et 1928.

65. Il ne se limite d'ailleurs pas, dans ses expériences, au chauffage et à la distillation de l'eau, mais, entre 1926 et 1928, il tente aussi, comme Richard et Henry, de produire de l'électricité grâce à des couples thermo-électriques, ainsi que de carboniser des matériaux — résultats qu'il présente à l'Académie des sciences (Pasteur, 1928)

67. ANOM 93COL18, p.d.



FIGURE 5.11 – Appareils de chauffage solaire de Pasteur : caisson chauffant et miroir parabolique (Colomb-Béchar, vers 1932) [67]

au concours de l'ONRSI, une très grande attention à l'aspect pratique, facile d'entretien et de transport, de l'appareil : un modèle de 4 L, portatif, et un modèle de 8 L, sur roulettes, doivent ainsi être facilement déplacés, pour des usages militaires ou domestiques. Des exemplaires sont installés dans quelques autres villes du Sahara algérien [68]. Les usagers de ces appareils semblent en obtiennent satisfaction, d'après des témoignages que Pasteur utilise comme preuves de leur caractère pratique. D'après un article de Pasteur, en 1942, ces distillateurs étaient alors encore en place. En outre, pendant la seconde guerre mondiale, le service des Travaux publics du secrétariat d'État aux Colonies s'intéresse à ces installations au point que, sur sa suggestion, le gouvernement général de l'Afrique occidentale française fait commander dix appareils distillateurs Pasteur d'une nouvelle conception pour les services de santé [69], ce qui suppose qu'elles sont être encore opérationnelles (voir 8).

Le ministère de la Guerre soutient par ailleurs le développement d'un autre appareil solaire, le procédé « Insol », inventé par Woulf Stolpner [70], qui fonde les « Établissements

68. Au moins, dans le « Quartier Sainte-Marguerite », à la « boulangerie du services de l'Intendance à Laghouat », et à Ghardaïa (PASTEUR, 1942, p. 172).
69. ANOM 93COL18, p.d.
70. Il a pris 3 brevets entre 1934 et 1938 pour ces chauffe-eau solaires.

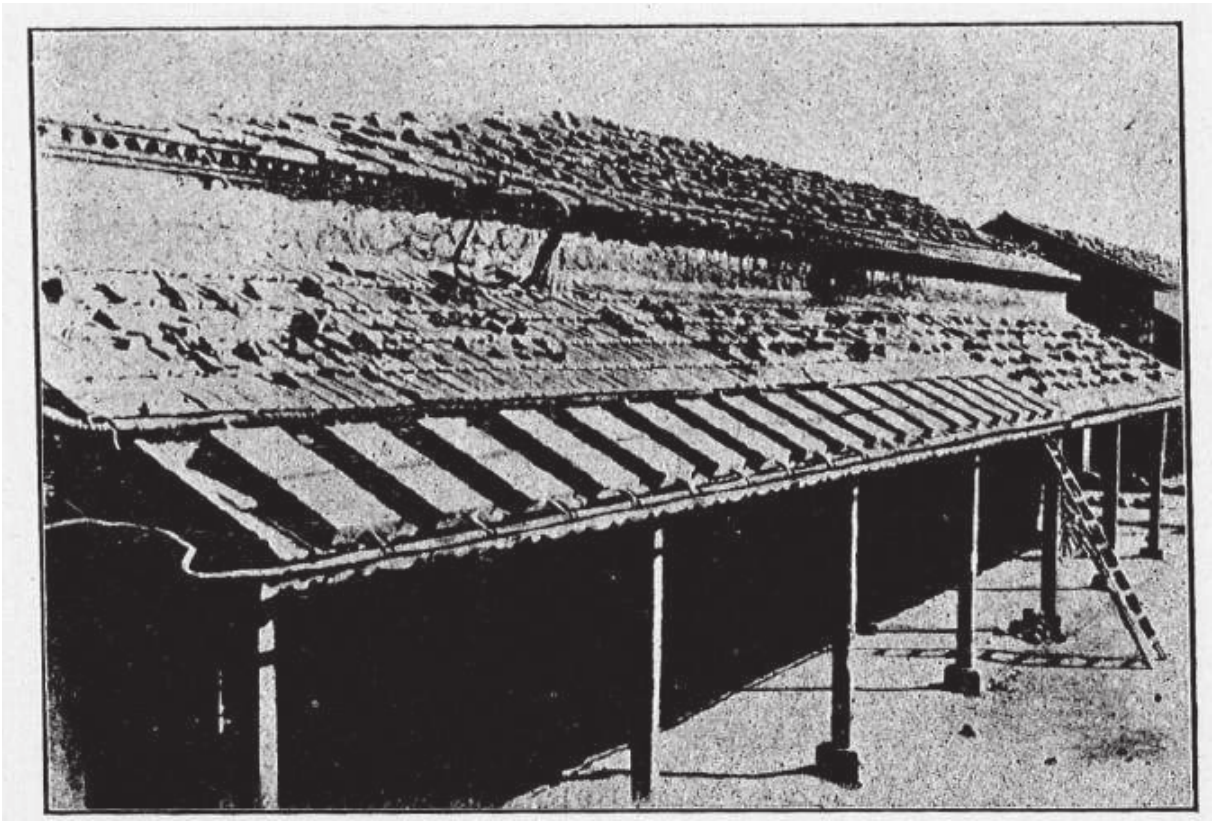


FIGURE 5.12 – Chauffe-eau solaires installés par Félix Pasteur à l'hôpital de Colomb-Béchar en 1931 (PASTEUR, 1932, p. 48)

.

Insol » pour exploiter ce procédé. Il reçoit par le ministère de la Guerre et des PTT une commande d'essai (LE JOURNAL JUIF, 1935). Pour répondre à cette demande, des installations sont mises en place dès 1936 « sur le bâtiment des douches de la caserne du Béquet (Talence) », près de Bordeaux (LE JOURNAL JUIF, 1936). Comme le procédé Pasteur, il obtint l'attention du ministère des Colonies pendant la guerre (voir 8).

Outre les applications domestiques et militaires de ces appareils solaires, qui sont claires, les acteurs de ces projets expriment un imaginaire tourné vers la colonisation de nouvelles terres. Ginestous écrit ainsi, dans une brochure destinée aux familles, que transformer les eaux souterraines en eau potable dans les colonies voisines du Sahara permettrait d' « assurer au colon sa vie et sa réussite sur ces terres quasi-désertes qui cependant sont susceptibles de productions naturelles ou culturales choisies rémunératrices », et ainsi de « donner à l'activité coloniale un nouvel essor, agrandir son domaine en lui livrant de nouveaux territoires où ses efforts soutenus, sa volonté, son énergie créatrice, édifieront de nouvelles richesses » (G GINESTOUS, 1929a, p. 1). Il met également en avant l'avantage qu'il y aurait à faire pousser dans ces zones, grâce à l'eau distillée, « nombre d'essences végétales, dont la culture serait rémunératrice » (G. GINESTOUS, 1929). Pasteur va dans le même sens. Désignant l'énergie solaire par « houille jaune », il

imagine que son chauffe-eau solaire, en rendant « bienfaisante une chaleur dont les excès sont, par ailleurs, souvent dévastateurs des richesses agricoles », pourra, par ses multiples applications effectives (distillation et chauffage de l'eau) et futures (force motrice, électricité, froid) faciliter le projet, récurrent depuis la fin du XIX$^{e}$ siècle, du chemin de fer transsaharien reliant la Méditerranée au Niger (PASTEUR, 1928, p. 32 ; PASTEUR, 1942, p. 173). Ce projet, qui ne s'est jamais concrétisé, et auquel Tellier, en 1890, proclamait déjà contribuer par son projet de construction de moteurs solaires dans le Sahara, a depuis connu en France de nombreuses formulations, et mobilisé des entreprises et commissions techniques missionnées par le ministère des Travaux publics. Il reste, malgré des intérêts parfois divergents selon ses promoteurs, destiné à mettre en valeur et accroître les richesses des territoires que le chemin de fer doit traverser (LAKROUM, 1989). En 1931, Eugène Vallet, conseiller départemental et délégué financier de Constantine, également « vice-président du Comité interdépartemental du Transafricain », prend d'ailleurs pour caution la mise au point du distillateur solaire par l'ONRSI et l'idée de Ginestous d'un distillateur éolien, pour justifier la possibilité et la nécessité de hâter la construction de ce chemin de fer (VALLET, 1931, p. 14).

Avec le projet de mise au point de distillateur solaire, on a donc affaire, après les deux projets éoliens, à une forme encore différente de soutien à la mise en œuvre d'appareils exploitant les forces naturelles par l'ONRSI. À la demande d'une composante de l'administration coloniale (la résidence générale de France à Tunis) sur un problème particulier d'approvisionnement (l'eau potable dans les territoires du Sud tunisien), l'ONRSI contribue ainsi à la mise au point d'un appareil qui solutionnerait ce problème, et ce au moyen d'un concours. Cette forme de soutien ponctuelle et peu adaptée à l'élaboration d'une solution pérenne révèle ses faiblesses. En effet, la forme du concours ne permet pas de financer des essais, et donc de rendre possible des expériences par des inventeurs qui n'en auraient pas les moyens, ce qui est pourtant une des vocations de l'ONRSI. Finalement, les principaux participants au concours restent leurs protagonistes (Ginestous et Maurain) et les seuls acteurs véritablement extérieurs à l'organisation du concours sont Berland, un membre de l'Administration algérienne, et Jules Richard, au Musée océanographique de Monaco, deux personnalités qui montrent déjà un intérêt pour l'utilisation de l'énergie solaire et qui disposent des moyens techniques et financiers de leurs institutions.
On peut en outre souligner la petitesse des moyens financiers mis en œuvre (un prix de 5000 francs à partager entre les vainqueurs !), qui sont cependant cohérents avec la modestie de l'appareil projeté : un appareil robuste, simple, peu coûteux, facilement transportable et utilisable par tout pas usager, de l'armée ou simple habitant.
Pour finir, l'appareil conçu à l'issue du concours n'est pas encore au point quand les premières grandes installations, à Ben Gardane et Fort-Saint sont réalisées. Elles ne sont donc pas encore opérationnelles et, après leur détérioration, ne sont jamais remplacées.

D'abord, par manque d'argent : celui-ci ne vient ni de l'ONRSI, ni de l'administration tunisienne, qui s'est finalement désintéressée du procédé lui-même, même lorsque les problèmes sont, en apparence du moins, résolus en 1933 sur un nouveau modèle d'essais par l'ONRSI. Les maigres infrastructures du sud tunisien et le manque de matériel nécessaire pour réparer ces installations ont probablement également joué dans l'abandon de ces installations.
Ainsi, alors que le concours vient de se terminer, le ministère de la Guerre préfère encourager le médecin militaire Pasteur, un *outsider* du concours, pour un problème un peu différent (le chauffage et non la distillation de l'eau) mais tout-à-fait connexe, au lieu d'utiliser les recherches menées par l'ONRSI. Les installations de Pasteur ont d'ailleurs été paradoxalement plus pérennes, alors qu'il a mené ses recherches sans l'aide de l'Office destiné à réaliser les idées des inventeurs.
Enfin, d'un point de vue des visées sociales, politiques, et économiques de l'administration coloniale et de ses services comme du ministère de la Guerre, la houille jaune est un pendant colonial de la houille bleue : pour les inventeurs de distillateurs solaires, elle doit en effet compléter l'arc-en-ciel des houilles en apportant confort et bien-être aux habitants (blancs), et possibilité d'exploitation de richesses délaissées ou encore à créer pour l'économie française. Le territoire très particulier où le distillateur solaire s'implante en fait un convertisseur radicalement différent des usines marémotrices : il utilise le soleil abondant en Tunisie, où il n'existe aucune infrastructure de production d'électricité, et où il y a peu d'infrastructures en général ; il n'a qu'un usage, direct, celui de production d'eau potable, et ce en petites quantités ; il est « simple » et « robuste », portatif.

## Synthèse section 5.4

L'ONRSI a tenté de jouer son rôle de moteur et de coordinateur national entre les laboratoires de recherche et l'industrie pour la mise au point d'installations exploitant le vent et le soleil, et ce par trois types d'interventions : recherches propres et aide matérielle aux inventeurs (aéromoteurs), aide matérielle et financière à un inventeur (bateau éolien), concours en réponse à un problème technique posé par le gouvernement colonial (distillateur solaire).

Ces efforts ont été globalement dispersés, ponctuels et sans suivi, ce qui explique le caractère inabouti des réalisations, qu'il s'agisse de prototypes sans exploitation effective (aéromoteurs à l'IAT, bateau éolien) ou d'installations détériorées sans réparation (batteries de distillateurs solaires). En fait, à chaque fois, l'implication de l'ONRSI est liée à l'intérêt personnel d'un des membres des Comités techniques de l'ONRSI, qui mène ses propres recherches dans son institution de rattachement principale (Toussaint) ou se greffe à des initiatives d'inventeurs ou d'autres institutions pour les soutenir (Breton et Mau-

rain). Maurain, à la fois directeur de l'Institut de Physique du Globe, directeur adjoint et membre du Comité d'aéronautique et de météorologie de l'ONRSI, considérait ainsi avec intérêt l'énergie solaire [71], ce qui explique probablement que l'ONRSI se soit associé à la Régence de Tunis pour la mise au point d'un distillateur solaire. Pour le bateau éolien de Constantin, l'intérêt personnel de Jules-Louis Breton, directeur de l'ONRSI, est décisif dans l'aide accordée par l'Office à cet inventeur. Enfin, Albert Toussaint, directeur de l'Institut aérotechnique de Saint-Cyr et membre du Comité d'aéronautique de l'ONRSI est lui-même inventeur d'un dispositif visant à exploiter le vent.

Aussi, on ne peut pas parler de politique énergétique ni d'un soutien cohérent pour l'utilisation des forces naturelles de la part de l'ONRSI. Mis à part dans l'état des lieux des techniques dressé par Maurain en 1921 (Maurain, 1921b ; Maurain, 1921a), qui, après Arrhenius, souligne l'urgence de trouver des énergies pour remplacer les carburants fossiles en voie d'épuisement, il n'est pas question, au nom de cette institution, d'une quelconque vision d'ensemble de l'utilisation des forces naturelles ou de l'approvisionnement en énergie en France. Cependant, l'utilisation des termes de houille jaune et de houille azur dans les titres de ces sous-sections se justifie par leur emploi par certains acteurs des projets, et révèlent dans leur imaginaire technicien l'arc-en-ciel des houille explicité dans le 4.2.2. Une ambition explicite en en effet exprimée, pour le bateau éolien et les appareils solaires, de remplacer la houille manquante par ses substituts colorés. En ce qui concerne le bateau éolien, Joëssel affirme sa volonté d'empêcher les moteurs thermiques de remplacer les voiles, et de garder la houille azur comme principal carburant de la marine (5.3) ; Constantin, sans utiliser le terme de houille azur, vante le caractère inépuisable du vent et la complémentarité qu'il peut présenter par rapport à la houille noire et la houille blanche (Constantin, 1924d). En ce qui concerne l'énergie solaire, Constantin, Pasteur, mais aussi Guinand imaginent remplacer le combustible manquant (charbon et bois) par le soleil, appelé houille jaune par Pasteur. La houille azur remplacerait ainsi la houille noire dans secteur particulier de l'économie française ; la houille jaune aurait un usage très différent mais aussi complémentaire de la carte des houilles : elle serait l'instrument de la conquête du désert, par la production d'eau potable et de nouvelles terres habitables et agricoles. On peut aussi noter que des personnes comme Ginestous se sont intéressés à la fois au vent et au soleil, et même aux sources thermales, et que Jules Richard s'est penché sur l'utilisation du soleil, mais aussi des vagues.

À propos de la houille bleue, l'ONRSI ne s'y est enfin délibérément pas intéressée, et ce, par mésestime des procédés d'exploitation des vagues, et, très probablement, en ce qui concerne les marées, parce que le ministère des Travaux publics est déjà impliqué dans cette question.

71. Mentionnant les travaux de Schuman en Egypte, il dit que « ces essais montrent que l'utilisation de l'énergie solaire est possible pratiquement » (Maurain, 1921b, p. 11).

## 5.5 Synthèse Chapitre 5

De ces projets classifiés par type (inventions sans réalisations, projets financés par des industriels avec construction de prototypes, projets financés par des institutions publiques et parfois des industriels et avec expérimentations ou construction de prototypes), on peut d'abord remarquer une permanence par rapport à la période (1880-1918), celle de la figure de l'inventeur, qui est toujours centrale dans toutes les initiatives pour l'exploitation des forces naturelles. En revanche, l'implication d'industriels, dont une grande entreprise du secteur de l'énergie comme la Compagnie électro-mécanique, dans la mise au point de convertisseurs, est nouvelle, et montre qu'un marché est identifié pour des convertisseurs innovants exploitant les forces naturelles. Le soutien de l'ONRSI et de certaines composantes de l'administration coloniale montre aussi l'intérêt des pouvoirs publics pour ces techniques, considérées comme un moyen de contribuer à l'accroissement du bien-être et des richesses nationales. La dispersion de ces acteurs est une autre caractéristique notable, menant à conclure à l'absence d'une politique nationale des forces naturelles en général.

Comme lors de la période (1880-1918), de nombreuses inventions ou projets sont formulés dans la presse sans concrétisations, en revanche certains inventeurs parviennent à construire des appareils d'essais et des prototypes fonctionnels, par leurs propres moyens. Certains tentent d'obtenir le soutien de l'ONRSI, mais n'y parviennent pas pour la plupart. Les chercheurs des Comités techniques considèrent en effet la très grande majorité de ces propositions comme peu intéressantes ou irréalisables. Constantin, grâce à Breton, et certains inventeurs d'aéromoteurs, font ainsi figure d'exception, ce qui n'a d'ailleurs pas assuré une meilleure destinée à leurs inventions. En effet, hormis quelques nouveaux aéromoteurs dont l'utilisation s'amenuise au cours de la période, concurrencée par l'électricité, de toutes les inventions décrites dans ce chapitre, pas une seule ne dépasse le stade du prototype.

Pour certains projets, l'influence de la crise financière est évidente. C'est le cas de l'industriel Georges Claude, qui se retrouve sans moyens suffisants pour poursuivre ses essais. Peut-être est-ce aussi le cas de Constantin et Fortier-Beaulieu. Ainsi, la crise financière a très certainement eu une influence sur cette dynamique globale et dispersée, car la majorité des réalisations ont été effectuées entre 1919 et 1933. À ce sujet, Edgar Micanel affirme, en 1935, dans la *Revue d'économie politique*, que « la crise, qui brise l'esprit d'entreprise, les difficultés financières, la répugnance de l'épargne à s'investir dans des entreprises nouvelles, enfin, la surproduction d'énergie, n'encouragent guère le développement de ces nouveaux modes de production d'énergie » (Micanel, 1935, p. 924 [72]). L'auteur parle alors de la houille bleue, mais aussi de l'énergie éolienne qu'il appelle houille

72. Micanel est ingénieur de l'Institut électrotechnique de Grenoble et avocat à la Cour d'appel.

verte [73], et de l'énergie thermique des mers qu'il appelle houille d'or [74].

Mais pour d'autres projets, d'autres types de contingences sont manifestement à l'œuvre. Un ensemble d'éléments comme la forme du convertisseur, sa destination (territoriale, socio-économique), l'ancrage des porteurs du projet dans les réseaux d'industriels, font que le convertisseur ne s'insère pas dans le système technique. Les bateaux éoliens de Joëssel et Constantin, qui ont montré un fonctionnement conforme aux *desiderata* de leurs inventeurs, ont été abandonnés au début des années 1920, dans une période encore tout-à-fait favorable aux forces naturelles ( Commission de la houille bleue encore active, pénurie de charbon toujours ressentie, nombreuses propositions manifestées dans les revues...). Il s'est peut-être agi de la concurrence, au niveau international, du navire Flettner, faisant perdre du prestige et de l'intérêt à l'utilisation de ces petits bateaux dans la marine ; ou encore du caractère hybride du bateau éolien et du peu d'ancrage de ses promoteurs dans les secteurs économiques dont dépend sa diffusion (constructeurs de navires, constructeurs d'aéromoteurs, marine marchande), qui rendent difficile son inscription dans le système technique. En ce qui concerne les distillateurs solaires de l'ONRSI, leur peu de diffusion puis leur disparition des colonies françaises résulte d'un défaut de suivi pour la pérennisation des techniques mises au point et des difficultés logistiques liées à un manque d'infrastructures. Pour la Compagnie électro-mécanique, c'est la concurrence des convertisseurs classiques (moteurs à essence individuels ou centrales électriques hydrauliques ou thermiques) et la structure du système électrique (les distributeurs rachetant l'électricité à des producteurs au plus bas prix) qui ont stoppé les travaux menés par Darrieus et Lacroix, considérant qu'il n'y avait pas de débouchés intéressants pour l'entreprise. Le chapitre suivant montre que la houille bleue a quant a elle été touchée par la crise financière au même titre que tout le secteur de l'électricité.

73. Il ne fait pas référence à des projets français mais à un projet russe d'installation électrique à Balaklava, mentionné dans la *RGE*.

74. Il rappelle que Claude a stoppé ses expériences en raison des difficultés financières de l'industrie chimique.

# Chapitre 6

# Houille bleue, électrification du territoire et politique d'indépendance énergétique métropolitaine

La houille bleue est la force naturelle la plus largement mentionnée pendant l'entre-deux-guerres. Objet d'une grande activité inventive, elle rentre dans le programme énergétique du ministère des Travaux publics dans le cadre de l'électrification par les forces hydrauliques, avec la création de la Commission de la houille bleue . De plus, quelques grandes entreprises de l'énergie hydraulique s'y intéressent, et de nouvelles entreprises sont créées pour son exploitation. Les résultats de cette dynamique sont cependant modestes et, des projets d'exploitation des marées encouragés par la Commission, aucune installation opérationnelle ne voit le jour. En revanche, des procédés d'utilisation des vagues et de la houle sont expérimentés, et l'un d'entre eux, celui de Jules Richard, parvient à une application pratique, malgré le désintérêt de la Commission pour ce type de procédé.

Dans ce chapitre, l'historique de la Commission de la houille bleue est d'abord retracé. Tout d'abord, les archives de la Commission de la houille bleue permettent d'en retracer la genèse, l'esprit et l'évolution globale, en la recoupant avec des publications d'époque sur le sujet [1]. Ensuite, il sera mis en évidence que la préférence des ingénieurs associés à la Commission allait pour des systèmes à bassins régularisés, produisant de l'électricité, à l'instar de la houille blanche, et donc pour des systèmes d'exploitation des marées, et non des vagues ou de la houle. Enfin, seront examinés les projets d'utilisation des marées qui ont retenu l'attention de la Commission (qui rentrent donc dans la troisième catégorie

1. Les archives de la Commission consultées pour cette étude étant lacunaires - il y a, en particulier, un vide de documents entre 1921 et 1926, entre 1930 et 1935, et entre 1937 et 1940 - il est impossible d'en tirer l'ensemble des études effectuées, le nombre de projets étudiés, le nombre d'allocation de subventions décidées.

de projets du Tableau 5), et les projets d'exploitation des vagues qui, majoritairement sans soutien de la part du ministère des Travaux publics (et rentrent dans la deuxième catégorie de projets du Tableau 5), sont pourtant parvenus à certaines matérialisations.

## 6.1 La commission de la Houille bleue (1919-1943) : un élément du dispositif d'encouragement pour l'énergie hydraulique

En 1919 est créé, au sein du ministère des Travaux publics, un Comité d'études et de recherches scientifiques pour l'aménagement et l'utilisation des forces hydrauliques. Initialement, celui-ci est uniquement dédié à l'étude des projets d'aménagements « classiques » des chutes d'eau. Mais, quelques semaines après sa création, Max-Albert Legrand, médecin principal de la marine en retraite, adresse au ministre des Travaux publics une lettre au nom du « Groupement de propagande La houille bleue », et lui suggère la création d'un service dédié à l'étude des énergies marines : les marées, la houle, les courants [2]. Fondé en 1918, probablement encore pendant la guerre [3], avec l'appui de la Ligue maritime, le Groupement se donne pour but de promouvoir, « par la plume, par la parole et par l'action », l'utilisation des énergies de la mer, ou houille bleue [4]. Legrand en est secrétaire et semble avoir été le plus actif de ses membres. Le Groupement est essentiellement composé de personnalités du monde de la presse [5], mais aussi d'un homme politique, Édouard Herriot, maire de Lyon, et sénateur du Rhône, qui est son président d'honneur [6]. La présidence d'Herriot n'a rien de fortuit, car, sur le territoire que représente ce politicien au Parlement, le Rhône fait l'objet d'importants projets d'aménagements hydro-électriques. Quant à Legrand, il est lui-même inventeur d'un procédé d'exploitation de la force des vagues.

Legrand constate en effet qu'à l'issue de la guerre, les marées et les vagues, dont

2. AN 1977 0313/46, p.d., Lettre de Legrand au ministre des Travaux publics, 16/02/1919.

3. D'après leur prospectus de présentation, les membres du Groupement ont déjà à leur actif plusieurs articles de promotion de la houille bleue publiés dans diverses revues pendant la guerre : dans *L'actualité scientifique*, la *Revue Eurêka*, l'*Électro-journal*, le *Journal de la houille blanche*, etc (AN 1977 0313/46, p.d., prospectus du Groupement de propagande La houille bleue).

4. AN 1977 0313/46, p.d., Prospectus du Groupement de propagande La houille bleue.

5. On y trouve, comme président : Émile Gautier, directeur de *L'année scientifique et industrielle*, et comme membres : François-Victor Foveau de Courmelles, médecin et directeur de *L'année électrique* ; Émile Solari, « homme de lettres » ; plusieurs « publicistes » — selon le *Dictionnaire historique de la langue française* d'Alain Rey (2012), ce mot pouvait désigner un journaliste ou écrivain public, sens alors moins courant que celui d'agent de publicité, mais, certainement, celui qu'ont voulu lui donner ces membres du Groupement qui ont tous écrit des articles sur la Houille bleue — : Brugères, « avocat à la Cour d'appel de Paris, président de la Société des officiers de complément rayés des cadres » ; P. de Montgolfier ; Louis Forest ; Marcel Molinié, ingénieur-conseil.

6. AN 1977 0313/46, p.d., Prospectus du Groupement de propagande La houille bleue.

l'exploitation a été l'objet d'un très grand nombre d'inventions, n'ont pourtant toujours pas donné lieu à des installations opérationnelles de grandes production d'électricité, au contraire de la houille blanche. Il invoque le « souci de l'avenir économique de [la] patrie, et principalement celui [des] régions maritimes et septentrionales, pour lesquelles la houille blanche a toujours été un mythe » [7], et se montre ainsi surpris qu'aucune disposition visant à répondre à ce but n'ait été prise au Comité des forces hydrauliques. Il en appelle donc à l'étude approfondie de ce sujet par des « juges impartiaux et compétents » qui permettrait de « trouver, dans beaucoup d'ivraie, le bon grain » [8], et d'arriver à la mise au point de procédés pratiques.

Le Groupement retient l'attention de l'inspecteur général des Forces hydrauliques René de la Brosse, et Legrand est convoqué pour présenter ses idées lors d'une session du Comité pour l'aménagement et l'utilisation des forces hydrauliques [9]. Pour diverses raisons, aucun membre du Groupement ne peut s'y rendre [10] , mais une nouvelle lettre de Legrand précise ses recommandations [11]. Il s'appuie en particulier sur une longue étude (environ 100 pages) de l'ingénieur des Ponts et chaussées Émile Maynard, anciennement affecté aux services maritime de La Rochelle et Saint-Nazaire [12]. Ce mémoire, publié en novembre et décembre 1918 dans la *Revue générale de l'électricité*, porte sur la production d'électricité par les marées [13]. Le Groupement reprend les conclusions de De la Brosse à son compte [14].

En fin de guerre, De la Brosse part du constat que « toute la partie du territoire français au nord de [la] démarcation » partant de la Rochelle et arrivant à la Suisse « est soustraite à l'influence des Alpes et des Pyrénées » en ce qui concerne le « rayon d'action des usines hydro-électriques ». Ainsi, « il serait grand temps de se préoccuper des ressources en force motrice que peut donner la mer par le mouvement des marées, en vue de l'activité industrielle qui ne manquera pas de se manifester après la guerre » (Maynard, 1918a, p. 653). En effet, en plus d'être une ressource nationale qui pourrait permettre de « supprimer l'emploi du charbon dans de nombreuses usines » (Maynard, 1918h, p. 1007),

7. AN 1977 0313/46, p.d., Lettre de M-A Legrand au ministre des Travaux publics, 16/02/1919.

8. AN 1977 0313/46, p.d., Lettre de Legrand au directeur de la Navigation intérieure et de la Navigation, 01/03/1919.

9. AN 1977 0313/46, p.d., Lettre du directeur de la Navigation intérieure et de l'aménagement des eaux à Legrand

10. L'une d'entre elles est la surdité de Legrand, qui contraint ce dernier à n'agir que « par la plume » (AN 1977 0313/46, p.d., Lettre de Legrand au directeur de la Navigation et de l'aménagement des eaux, 01/03/1919).

11. AN 1977 0313/46, p.d., Lettre de Legrand au ministre des Travaux publics, 18/03/1919.

12. D'après le dossier personnel de cet ingénieur aux Archives nationales (AN F14/2611), il a en effet été affecté pendant un an au Service maritime de Saint-Nazaire, en 1909. Né en 1959, il était alors en fin de carrière, puisqu'il cesse ses fonctions en 1922. Ces informations m'ont été transmises par Guillaume Saquet, du service des archives des Ponts et chaussées.

13. Maynard, 1918a ;Maynard, 1918b ;Maynard, 1918c ;Maynard, 1918d ;Maynard, 1918e ;Maynard, 1918f ;Maynard, 1918g.

14. AN 1977 0313/46, p.d., Lettre de Legrand au directeur de la Navigation intérieure et de la Navigation, 01/03/1919.

les marées des côtes de la Manche font partie des plus importantes du globe. Ayant fait une synthèse des brevets proposés depuis le XIX^e s, il retient les solutions qu'il trouve les plus intéressantes, qui l'amènent à la conclusion que « ce captage peut se faire dans des conditions en général plus avantageuses que pour les hautes chutes de montagnes » (MAYNARD, 1918h, p. 1007). Il en appelle ainsi à une organisation nationale pour l'exploitation des marées, avec, d'une part, la création d'un Service hydraulique des marées qui s'occuperait d'effectuer, en tous points de la côte susceptibles d'être aménagés, les relevés nécessaires à l'élaboration d'un avant-projet ; et d'autre part, une simplification des démarches à effectuer pour obtenir l'autorisation d'entreprendre un tel aménagement, ainsi qu'une subordination au « captage de la force motrice [de] tous les intérêts en présence » ; enfin, une implication des entreprises françaises afin de ne pas se voir voler une telle opportunité industrielle par des sociétés étrangères. Le groupement La Houille bleue se range donc à ces *desiderata*, mais va plus loin et souhaite que ce service étudie « l'ensemble des « énergies de la mer » » [15].

Les arguments du Groupement et de De la Brosse sont pris en considération par le Comité pour l'aménagement et l'utilisation des forces hydrauliques. Son président, Albert Mahieu [16], décide, en avril 1919, la création, au sein du Comité, d'une sous-commission, dite « Commission de la houille bleue », afin d'étudier l'organisation de projets d'utilisation de la houille bleue en France. Cette création marque l'inscription de la houille bleue dans le dispositif national d'encouragement à l'énergie hydraulique. La carte de Paul Grasset présentée en 4.2.2 (Figure 4.3) en est une bonne illustration. Le travail principal de cette Commission consiste à identifier des sites, commander des études et étudier les projets émanant d'inventeurs pour décider au sein du Comité pour l'aménagement et l'utilisation des forces hydrauliques des projets les plus intéressants et de la manière de les encourager. À partir de ce moment, tous les projets d'aménagement visant à utiliser la houille bleue sont adressés à cette Commission, qui oriente les choix du ministre des Travaux publics en la matière. De la Brosse est désigné pour présider cette Commission et, quelques semaines plus tard, celle-ci se compose en plus d'André Gervais de Rouville, ingénieur en chef du service des Phares et balises, Joseph Renaud, directeur du service hydrographique de la Marine, Paul Janet, professeur à L'École supérieure d'électricité et Hippolyte Bouchayer, ingénieur des Arts et manufactures spécialiste de l'hydraulique et industriel [17]. Au fur et à mesure des séances s'adjoignent d'autres spécialistes du génie maritime, de l'énergie hydraulique et de l'électricité. Ils sont, pour la plupart, ingénieurs des grands corps de l'État (surtout, des Ponts et chaussées, mais aussi Hydrographes de la Marine, du Génie maritime, des Mines), mais on compte aussi, selon les périodes,

15. AN 1977 0313/46, p.d., Lettre de Legrand au ministre des Travaux publics, 18/03/1919.
16. Il est aussi directeur de la Voirie routière.
17. AN 1977 0313/46, p.d., De la Brosse, Procès-verbal de la séance du 06/06/1919.
D'après une recherche sur Gallica, il semble que Bouchayer ait été ingénieur dans les Papeteries de France.

deux amiraux, un professeur de l'École supérieure d'électricité , un ingénieur-conseil et un industriel (voir Annexe D). Les industriels sont donc peu représentés dans cette Commission. Celle-ci, composée majoritairement d'ingénieurs des grands corps de l'État, incarne leur vision d'une mission de service publics dont ils sont investis.

Plusieurs éléments montrent que cette sous-commission du Comité d'aménagement et d'utilisation de l'énergie hydraulique garde un caractère secondaire dans la question de l'aménagement des forces hydrauliques au ministère des Travaux publics. D'abord, elle comporte en moyenne entre six et dix membres, ce qui est peu par rapport à la composition du Comité pour l'aménagement et l'utilisation des forces hydrauliques (une trentaine) [18]. En outre, en tant que sous-commission, elle ne dispose pas de moyens propres, elle dépend en effet des budgets que le Comité pour l'aménagement et l'utilisation des forces hydrauliques veut bien lui allouer. Le budget total qui lui est consacré, entre les études de sites et les subventions allouées aux porteurs de projets, peut être évalué à au moins mais sans doute guère plus que 230 000 francs [19], contre 88 millions de francs pour l'hydro-électricité pendant l'entre-deux-guerres (Lévy-Leboyer, 1994b, p. 108). Dix millions de francs devaient être consacrés à l'usine marémotrice de l'Aber Wrac'h sous forme de subvention, mais celle-ci ne fut finalement jamais versée (cf 6.3).

Malgré cette relative faiblesse, la Commission de la houille bleue ainsi formée œuvre dès le départ à répondre au souhait de De la Brosse - qui est d'ailleurs reçu lors des deux premières séances [20]. Ses membres sont unanimes : il faut chercher à tirer parti des marées « au moins sur les points favorables, comme on a déjà tiré parti des chutes d'eau courante et de faire contribuer la mer comme les fleuves et les ruisseaux à nous fournir l'énergie que nous avons jusqu'ici trop exclusivement demandée à la houille. » [21] Dans un premier temps, de Rouville est ainsi chargé d'effectuer une étude visant à élaborer un projet de loi pour l'aménagement du domaine public maritime, probablement pour faciliter les démarches administratives en vue de l'utilisation des marées [22]. Il doit aussi, avec Renaud, établir une carte des sites les plus intéressants, et solliciter les services des

18. Il y en avait environ vingt-six en 1919, d'après la liste des présents et des excusés d'une séance d'octobre 1919 (AN 1977 0313/46, p.d., Procès-verbal de la réunion du Comité d'études et de recherches scientifiques pour l'aménagement et l'utilisation de l'énergie hydaulique, 10/10/1919).

19. Au moins 20 000 francs pour les études de sites, 10 000 francs pour les constructeurs de turbines, 95 000 francs pour l'aménagement de la Rance par Maire et de Tregomain, environ 100 000 francs pour le Bélier du Minou par Coyne. Grasset a réussi à obtenir une subvention du ministère des Finances, mais apparemment, contre l'avis de la Commission de la houille bleue . Il faudrait aussi certainement prendre en compte les salaires versés aux membres pour leur travail au sein de la Commission, et certains projets dont il n'y aurait pas les traces d'un encouragement dans les archives consultées.

20. AN 1977 0313/46, p.d., De la Brosse, Procès-verbal de la séance du 06/06/1919.

21. AN 1977 0313/46, p.d., De la Brosse, Procès-verbal de la séance du 07/10/1919.

22. De cette étude législative, il n'y a rien au sujet des travaux de de Rouville dans les archives que j'ai consultées. La loi du 19 octobre 1919, qui donne un statut juridique précis à l'énergie hydraulique sous ses trois formes de chutes d'eau, rivières et marées, marque la mainmise de l'État sur ces questions, clôt de toutes manières la question d'une loi concernant l'utilisation des marées, sans probablement que les considérations de de Rouville aient eu à être prises en compte.

Ponts et chaussées locaux pour avoir des renseignements sur les installations de moulins à marées existantes. Enfin, Bouchayer contacte divers constructeurs de turbines afin d'avoir leur point de vue sur les possibilités d'obtenir des turbines adaptées au régime des marées et à la chimie de l'eau de mer.

À l'issue de ces premières études, de la Brosse élabore un programme à destination du Comité des forces hydrauliques. Il retient dix sites comme potentiellement intéressants sur les côtes bretonnes de la Manche, en raison de l'amplitude des marées, du peu de fréquentation des bateaux qui s'y trouvent et de leur découpage favorable à la construction d'un bassin d'accumulation (cf 6.3) [23]. Six d'entre eux retiennent particulièrement l'attention des membres de la Commission de la houille bleue : l'Aber Wrac'h , l'Aber Benoît, l'Abert Ildut, la baie de Téménès, les anses de Saint-Briac et de Rothéneuf [24]. Les réponses des constructeurs de turbines mettent en évidence qu'aucun d'entre eux n'est encore en mesure de fournir des machines adaptées au régime des marées et à la chimie de l'eau de mer. La Commission décide donc d'orienter les recherches en vue de l'utilisation de la houille bleue dans trois directions :

— la mise au point de turbines adaptées à l'utilisation des marées par les constructeurs français ;
— une mise en pratique rapide. En effet, comme le met en avant le mémoire de De la Brosse, les membres de la Commission considèrent que toutes les inventions possibles ont déjà été proposées, et que ce n'est plus sur le plan théorique, mais sur le plan pratique, qu'il faut travailler [25]. La Commission recommande donc de faire construire rapidement deux usines d'essais au niveau des sites identifiés, pour lesquelles 500 000 francs pourraient être alloués ;
— une étude détaillée des sites par les ingénieurs des Ponts et chaussées locaux, en l'occurrence ceux du Finistère et ceux de l'Ille et Vilaine, afin de faciliter l'élaboration de projets par les industriels.

Le Comité des forces hydrauliques réuni le 10 octobre 1920 accepte de financer des études de sites par les ingénieurs des Ponts et chaussées du Finistère et d'Ille et Vilaine, à hauteur de 10 000 francs par Service [26] (sur son budget d'1 800 000 francs). En 1920, la Commission obtient également la possibilité de mettre au concours auprès des constructeurs un prix de 10 000 francs pour les meilleurs projets de mise au point de turbines (voir 6.3). Enfin, la Commission se fixe rapidement sur le choix d'une petite usine marémotrice d'essais au niveau de l'Aber Wrac'h , dans le Finistère. Celle-ci devait permettre

23. AN 1977 0313/46, p.d., Note sur l'utilisation de l'énergie des marées, 09/10/1919.
24. AN 1977 0313/46, p.d., PV de la séance du 07/09/1919.
25. C'est l'argumentaire qu'on retrouve dans trois mémoires auxquels beaucoup d'études sur l'utilisation des marées font référence et sur lesquels la Commission de la houille bleue s'est appuyée : celui de Brosse, mais aussi celui de l'Amiral Amet, membre de la Commission, et celui de Georges Boisnier, ingénieurs des Ponts et chaussées en Ille et Vilaine, qui a aussi décrit un projet d'aménagement de la Rance.
26. AN 1977 0313/46, p.d., Lettre du ministre des Travaux publics à De la Brosse, 22/09/1919.

d'acquérir de l'expérience avant d'envisager la construction d'usines plus importantes. Elle encourage en outre quelques autres projets d'usines marémotrices et une étude sur l'exploitation de la houle.

Au courant de l'intérêt que porte le ministère des Travaux publics à la question de la houille bleue, des inventeurs envoient, sur l'ensemble de la période, un grand nombre de propositions pour l'exploitation des marées et des vagues à la Commission. Ils sont stimulés par la possibilité d'aides financières, mais aussi obligés par la loi du 19 octobre 1919 de faire une demande une concession pour tout aménagement marémoteur. La Commission reçoit plusieurs dizaines de propositions [27] mais ne fait allouer qu'une poignée de subventions [28]. En effet, elle veut encourager, non pas de nouvelles inventions, mais la mise en œuvre de conceptions déjà proposées depuis longtemps. Au final, la seule concession accordée, après toutes les démarches administratives nécessaires depuis la loi du 16 octobre 1919, est celle de la Société technique d'études pour l'industrie (STEPI) qui doit construire une usine à l'Aber Wrac'h . Sur la Figure 6.1, on peut voir une partie des sites étudiés, qui, selon Gibrat et Thibaudin, reprenant les études sur la houille bleue en 1944, ont fait l'objet des études les plus intéressantes [29]. La majorité de ces projets concerne le Nord-Ouest de la France, conformément au souhait des acteurs de la construction du réseau électrique d'exploiter les sources d'énergie complémentaires pour l'alimentation du réseau électrique interconnecté.

Selon Gibrat et Thibaudin, le plus grand nombre de propositions a été donné entre 1919 et 1923. Ce chiffre correspond au pic de publications relevé en 4.2.3, ce qui va dans le sens d'une corrélation sur cette période, entre le nombre de projets et le nombre d'articles sur la houille bleue. Il est probable que la Commission de la houille bleue ait aussi été particulièrement active pendant ces années d'après-guerre : malgré l'aspect lacunaire des

27. Comme je n'ai pas trouvé les procès-verbaux de toutes les séances, je n'ai pas de chiffre précis sur le nombre de projets reçus ou sur le nombre de subventions qu'elle a permis d'allouer. Sur les seuls procès-verbaux de séances et documents administratifs auxquels j'ai eu accès, j'en ai dénombré au moins dix-sept pour les marées et cinq pour les vagues. Robert Gibrat et R. Thibaudin, dans une synthèse en 1944, donnent une liste des projets les plus intéressants qui ont été formulés pour des aménagements marémoteurs, constituée en particulier à partir des archives de la Commission de la houille bleue . Ils y mentionnent au moins quinze projets supplémentaires, et précisent bien que de nombreux autres projets ont été proposés (AN 1977 1457/42, p.d., Robert Gibrat et R. Thibaudin, « Notes sur la production d'énergie électrique au moyen des marées », Rapport présenté aux journées d'information du Syndicat professionnel des producteurs et distributeurs d'énergie électrique des 31 mai, 1er et 2 juin 1944 p. 11-12).

28. Sans compter celles qui ont été allouées aux constructeurs de turbines et aux services des Ponts et chaussées locaux : pour les marées, celles de la Société technique d'entreprises pour l'industrie qui devait construire l'Aber Wrac'h ; celle de Defour ; celle de Maire et de de Tregomain ; pour les vagues : celles du Service hydrographique de Brest, pour le Bélier du Minou.

29. AN 1977 1457/42, p.d., Robert Gibrat et R. Thibaudin, « Notes sur la production d'énergie électrique au moyen des marées », Rapport présenté aux journées d'information du Syndicat professionnel des producteurs et distributeurs d'énergie électrique des 31 mai, 1er et 2 juin 1944 p. 11-18).

31. AN 1977 1457/42, p.d., Robert Gibrat et R. Thibaudin, « Notes sur la production d'énergie électrique au moyen des marées », Rapport présenté aux journées d'information du Syndicat professionnel des producteurs et distributeurs d'énergie électrique des 31 mai, 1er et 2 juin 1944 p. 12).

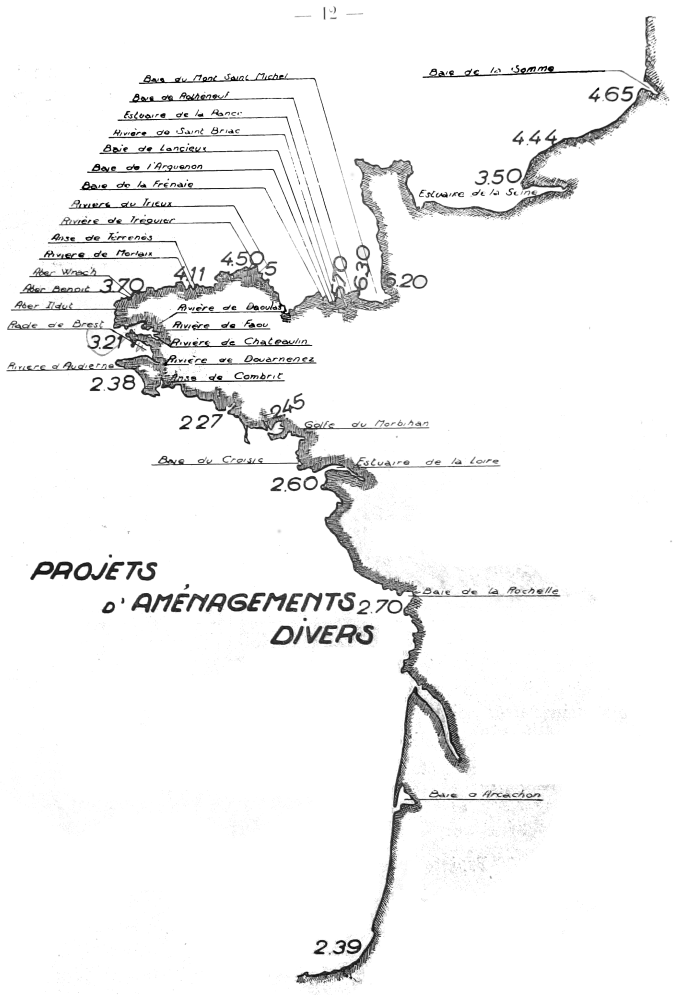



FIGURE 6.1 – Carte des sites ayant fait l'objet de projets d'aménagements marémoteurs, jugés les plus intéressants par Gibrat et Thibaudin en 1944 [31]

.

archives consultées, il semble que les réunions aient été plus nombreuses entre 1919 et 1921, et qu'elles se soient raréfiées au cours de la période [32]. Plusieurs indices montrent que la houille bleue perd de son intérêt au ministère des Travaux publics, comme dans la société en général, au cours des années 1930, dans une période où l'économie française est frappée par les effets de la dépression mondiale. D'abord, des projets continuent d'être formulés mais on en trouve moins d'échos dans les revues scientifiques et techniques, comme il l'a été montrée en 4.2.3, la Commission a donc dû étudier moins de propositions. La construction de l'usine marémotrice de l'Aber Wrac'h , annoncée comme imminente depuis plusieurs années, est interrompue faute d'une partie du financement promis par l'État. En juin 1936, André Coyne, ingénieur des Ponts et chaussées et spécialiste renommé de l'hydraulique,

32. Il y en a eu au moins neuf entre mai 1919 et juin 1921, trois entre mai 1926 et novembre 1926, un en juin 1930. Lors de la séance du 18 mai 1926, l'Amiral Moreau, alors président, précise que la Commission « n'a pas eu à être réunie depuis assez longtemps » (AN 1977 0313/46, p.d., PV de la séance du 18 mai 1926).

tient, devant la Société hydrotechnique de France, le discours suivant à propos de ses essais de captation de l'énergie de la houle qu'il a réalisés entre 1926 et 1929 avec les subventions de la Commission :

> « [C]'était le temps de la prospérité. La Commission de la houille bleue , sans doute soucieuse de parer à l'épuisement des sources d'énergie jusqu'alors exploitées, se préoccupait d'en trouver de nouvelles, parmi lesquelles la marée était à l'ordre du jour. Le crédit d'études et de recherches scientifiques, largement doté, permettait d'encourager à cet effet les initiatives les plus neuves et les plus hardies.
> Hélas, les temps ont bien changé. Il ne vient plus à l'idée de personne que l'on puisse manquer d'énergie en France, puisqu'au contraire on se plaint qu'il y en ait trop. Successivement, les vastes projets conçus pour exploiter industriellement le jeu des marées sur certains points des côtes de France, ou les tentatives plus modestes des prospecteurs d'énergie, ont perdu de leur intérêt. Puis l'argent venant à manquer, les recherches ont été interrompues, et tout est bien près aujourd'hui de tomber dans l'oubli.
> Que les électriciens se rassurent donc. Le moment n'est pas encore venu de jeter sur le marché des masses de kWh fourni par l'Océan (Coyne, 1939a, p. 78). »

La houille bleue a donc souffert de la crise financière au même titre que tout le secteur de l'électricité, dont l'équipement, en raison d'une surproduction et d'un manque de capitaux, subit une stagnation sur la période (1930-1936) (Lévy-Leboyer, 1994b, p. 30-31).

La houille bleue regagne cependant l'intérêt des inventeurs, des industriels et des ingénieurs de l'État, au moment du réarmement, où le secteur électrique se redresse et où de nouveaux programmes hydro-électriques sont élaborés (Lévy-Leboyer, 1994b, p. 20-21). La Société L'Énergie des marées, qui s'était vu refuser toute subvention et autorisation de concession pour deux projets d'usines marémotrices dans les années 1930 et avait cessé de proposer des projets, émet ainsi deux nouveaux projets en 1939. Ceux-ci seront pris en considération par le ministère de l'Industrie pendant la guerre (voir sous-section 6.3). La conférence de Coyne sur l'énergie des vagues et de la houle, qui, un peu plus de deux années plus tôt, était restée confidentielle, est publiée en 1939, à la demande de Coyne, dans la *Revue générale de l'hydraulique*. Le Comité de rédaction souligne en exergue qu'il est « assez piquant de constater à quel point, à deux ans d'intervalle, les réflexions de M Coyne sur la situation du marché de l'électricité ont perdu de leur actualité ». Alors que Coyne formulait des « allusions quelque peu désabusées » quant au « renversement de conjoncture qui avait eu pour effet d'interrompre les essais entrepris entre 1920 et 1930 pour découvrir et exploiter de nouvelles sources d'énergie, notamment dans la mer », la

conjoncture a depuis « beaucoup changé » : « les réserves d'énergie s'épuisent » [33] (COYNE, 1939a, p. 78), et « ses recherches en vue de parer à un épuisement plus ou moins éloigné des réserves d'énergie [ont] beaucoup gagné en actualité » (COYNE, 1939b, p. 141).

En temps de guerre, les marées suscitent à nouveau l'intérêt du gouvernement français, et le ministère de la Production industrielle supprime la Commission de la houille bleue pour la remplacer par un nouvel organisme consultatif « plus adapté aux circonstances actuelles » [34], le Comité technique de l'énergie des marées (CTEM), ce qui sera évoqué dans la Partie III.

## 6.2 Un intérêt presque exclusif pour les systèmes à bassins régulateurs et la production d'électricité par les marées

Il y a, dès les débuts de la Commission de la houille bleue (ministere des Travaux publics)@Commission de la houille bleue (ministère des Travaux publics), une ambiguïté dans les ressources dont le ministère des Travaux publics doit encourager l'exploitation, ainsi que dans le type de procédé à mettre en œuvre. Houille bleue signifie en effet l'ensemble contenant les marées, les vagues et la houle, et Legrand, représentant le Groupement de propagande, a bien insisté auprès du ministre des Travaux publics pour que toutes ces formes d'énergie soient prises en considération [35]. Cependant, les ingénieurs de la Commission ont globalement largement privilégié l'utilisation des marées, et ce, sous une forme particulière : à l'aide de grands bassins d'accumulation, et pour la production d'électricité. Trois raisons expliquent cette préférence, de type économique, technique et géographique, à savoir :

— premièrement (raison économique) : la volonté d'obtenir une puissance à la fois importante et au maximum continue, pour produire une puissance électrique de base qui puisse être distribuée à plusieurs clients — et ce, dans le cadre de l'électrification du territoire ;
— deuxièmement (raison technique) : la familiarité de la technique avec celle de la houille blanche, qui est, de même, utilisée grâce à des bassins d'accumulation régulateurs, pour la production d'électricité. Fichot, ingénieur hydrographe en chef de la marine et membre de la Commission, souligne ainsi que l'utilisation des marées

33. Comme si les réserves d'énergie avaient cessé de s'épuiser entre temps !
34. AN 1977 1457/42, p.d., Lettre de l'ingénieur en chef des Ponts et chaussées chargé par intérim de la Direction de l'électricité au ministre de la Production industrielle, 02/09/1943.
35. AN 1977 0313/46, p.d., Lettre de Legrand au ministre des Travaux publics, 18/03/1919.

« est, en somme, l'application aux marées du procédé couramment employé avec succès pour capter l'énergie des cours d'eau » (FICHOT, 1923) ;

— troisièmement (raison géographique, et océanographique) : les côtes bretonnes, où la houille noire et la houille blanche manquent, sont très adaptées à ce genre d'installations. Elles sont en effet très découpées et disposent d'un marnage important, il est donc possible d'y construire à moindre frais des barrages formant des réservoirs de grand volume.

Ceci explique, d'une part, qu'aucun autre type d'aménagement marémoteur n'ait été pris en considération par la Commission de la houille bleue , et d'autre part, que l'énergie des vagues et de la houle ait été très largement mise de côté, malgré de multiples initiatives dans ce sens. Une note de la Commission de la houille bleue de 1921 exprime explicitement ce point de vue :

« Le procédé qui apparaît actuellement le plus pratique [...] c'est la constitution d'un ou plusieurs réservoirs, isolés de la mer par un barrage, où des turbines entraînant des alternateurs sont actionnées par la chute variable des eaux en les bassins ainsi déterminés. Les autres procédés recourant à des flotteurs, des béliers hydrauliques [36], ou utilisant la vitesse des courants de marée, ou comportant une compression d'air comme intermédiaire (sans parler de l'utilisation de la force des vagues, peu pratique sur nos côtes et en dehors des régions de vents réguliers avec faible marée) apparaissent comme exigeant des appareils immenses, très coûteux, très fragiles, et d'un mauvais rendement mécanique ou financier eu égard à la faible puissance récupérée par unité de surface [37]. »

C'est aussi l'opinion que l'on retrouve dans le mémoire de l'ingénieur des Ponts et chaussées De la Brosse, qui a en quelque sorte été fondateur de la Commission. Celui-ci insiste sur l'importance d'un travail régulier, au maximum « constant » et « continu » (MAYNARD, 1918a, p. 653), contrairement à ce que permettent la majorité des nombreux brevets dont il donne la liste (MAYNARD, 1918b). Deux autre mémoires sur lesquels se sont appuyés les ingénieurs de la Commission de la houille bleue , vont également dans ce sens : celui de l'Amiral Amet, membre de la Commission [38] , et celui de Georges Boisnier, ingénieur des Ponts et chaussées du département de l'Ille et Vilaine, qui, par ses fonctions, a étudié la question en détails et a lui-même formulé un projet d'aménagement de la Rance (BOISNIER, 1921).

Ainsi la Commission ne prend-elle pas au sérieux des propositions pour l'utilisation

36. Pour le principe de fonctionnement du bélier hydraulique, voir les expériences d'André Coyne sur le « bélier du Minou » (cf 6.4.0.0.1).

37. AN 1977 0313/46, p.d., Note sur la houille bleue, 21/03/1921

38. Ce mémoire fut présenté par Amet, au nom de la Commission de la houille bleue , au Comité d'études et de recherches scientifiques pour l'aménagement et l'utilisation des forces hydrauliques, lors de la séance du 14 avril 1920. Il représente donc le point de vue des ingénieurs de la Commission (AMET, 1920a ; AMET, 1920b ; AMET, 1920c ; AMET, 1920d).

des marées par l'intermédiaire de flotteurs, de systèmes fondés sur la compression de l'air ou sur la transformation des courants de marées, qui ne « permettent de recueillir qu'une puissance motrice faible, intermittente ou trop variable » (MAYNARD, 1918d, p. 762). Pour les premiers, Boisnier souligne que le travail produit par un flotteur est « absolument insignifiant » et que le système aurait une taille démesurée pour fournir un minimum d'énergie : « [à] Saint Malo, en vive eau exceptionnelle, la mer monte de 12 mètres, mais elle met 6 heures pour faire cette ascension ; un flotteur de 20 000 tonnes – un cuirassé – ferait juste mouvoir une machine de 110 chevaux » (BOISNIER, 1921, p. 304). À propos de l'utilisation des courants de marées, il évoque de même les « immenses roues à aubes [qu]'il faudrait installer pour recueillir quelques dizaines de chevaux » (BOISNIER, 1921, p. 304). Enfin, à propos de la compression de l'air, les ingénieurs ne donnent pas d'arguments précis, même s'ils affirment avec autant de certitude qu'elle est à bannir pour la production de grandes puissances [39].

L'exigence de grandes puissances, de régularité et d'un passage par l'électricité est aussi une des raisons pour lesquelles ces ingénieurs parlent avec un certain mépris des moulins à marées de plus en plus rares mais encore en usage sur les côtes bretonnes, même si ceux-ci utilisent justement des systèmes d'accumulation dans des bassins. En effet, les moulins produisent tout au plus plusieurs dizaines de chevaux pour une utilisation localisée et intermittente, donc sans transport électrique. C'est ainsi que Boisnier traite d'« enfantins » les procédés d'utilisation des marées autres que ceux utilisant de grands bassins, disant que, « s'il s'agit de trouver quelques chevaux, le petit moulin à marées donne une solution satisfaisante du problème ». Insistant sur le caractère archaïque de ces installations, en 1919, le président de la Commission De la Brosse, qui a demandé aux ingénieurs des Ponts et chaussées des départements bretons des renseignements sur la puissance et le fonctionnement des moulins à marées encore en usage, en fait, en 1919, la synthèse suivante :

> « Quant aux moulins à marées actuellement existants, ils sont d'importance absolument minime, on peut même dire à peu près nulle. On en voit de vieux spécimens à Rothéneuf (en ruine), sur la baie de la Rance et en quelques autres points. Nulle part ils n'offrent aucun intérêt, il n'est pas possible d'établir un prix de revient de l'énergie discontinue qu'ils utilisent et que l'on ne saurait songer à transporter même à faible distance, elle se borne d'ailleurs à quelques

39. Pour Boisnier : « si l'on cherche une puissance importante, ce n'est ni en utilisant la force ascensionnelle d'un chaland, si grand qu'on puisse le fabriquer, ni en comprimant l'air dans une cloche, si vaste qu'on puisse la concevoir, qu'on la trouvera » (BOISNIER, 1921, p. 302). Pour De Rouville, secrétaire de la Commission, très évasif sur sa circonspection vis-à-vis de l'air comprimé : « si l'on recourt à l'intermédiaire de l'air comprimé pour transmettre l'énergie ainsi produite, on risque fort de n'ajouter qu'un mauvais rendement de plus, ce qui ne surprendra pas de la part de ce fluide (GERVAIS DE ROUVILLE, 1921, p. 628) ».

chevaux et le rendement est infime » [40] .

Ces moulins à marées sont ainsi, comme les moulins à vent de type hollandais depuis la fin des années 1880, associés à un passé désuet, remontant « au Moyen-Âge et peut-être au-delà » (Gervais de Rouville, 1921, p. 617), et donc incompatibles avec les exigences d'une installation moderne. Pourtant, de même que les moteurs à vent, les moulins à marées sont encore en usage. Ces deux types de convertisseurs de forces naturelles sont même les seuls qui trouvent un usage significatif de l'entre-deux-guerre. On constate, là encore, un décalage entre les discours sur la modernité et les installations effectivement opérationnelles. Le seul moulin à marées qui suscite l'intérêt d'un des ingénieurs liés à la Commission de la houille bleue est celui de Ploumanach, dont De la Brosse évoque la mention dans un article de 1898 : celui-ci produit quotidiennement 450 kg de glace pour le transport du poisson, et sert à l'éclairage de l'usine (Maynard, 1918c, p. 751). L'auteur considère, sans plus de commentaires, que ce genre d'installations pourrait se multiplier — cette exception est certainement due au caractère moderne de la production de glace et d'électricité.

En ce qui concerne les vagues et la houle, les moyens envisagés pour les utiliser sont globalement traités de la même façon que les systèmes d'exploitation des marées n'utilisant pas de grands bassins d'accumulation. En effet, ce dernier procédé ne peut pas leur être appliqué, et toutes les inventions les concernant ont la forme suivante : soit la compression d'air grâce au principe des coups de bélier, soit l'utilisation de flotteurs, soit celle de « plans inclinés en brise-lames et surmontés d'une rigole réceptrice amenant l'eau sur des turbines » (Gervais de Rouville, 1921, p. 627), soit, enfin, l'accumulation d'eau (dans des réservoirs de contenance plus faible que ne le permettent l'utilisation des marées). En effet, de Rouville, souligne que ces procédés ne sont pas applicables sur les littoraux à marnage important, car celui-ci augmente encore l'irrégularité et l'instabilité des systèmes. Cependant, cette forme de houille bleue a suscité un intérêt relatif de la part des ingénieurs de la Commission. En effet, ceux-ci, ayant reçu certaines propositions qui ont retenu leur attention, émettent l'avis, en décembre 1919, d'étudier et encourager certaines d'entre elles, car, malgré un rendement « médiocre » et une faible puissance, ces installations seraient peu coûteuses et pourraient être effectuées aux frais des inventeurs, ou, exceptionnellement, d'une petite subvention [41]. Ceci explique qu'une seule expérience pour l'exploitation des vagues ait été subventionnée par le ministère des Travaux publics : celle de Coyne, qui sera détaillée en 6.4.0.0.1.

40. AN 1977 0313/46, p.d., René de la Brosse, Note relative à l'utilisation de l'énergie des marées, 25/09/1919 (probablement destinée au Comité pour l'aménagement et l'utilisation des forces hydrauliques).

41. AN 1977 0313/46, p.d., de la Brosse, « Utilisation de l'énergie de la mer. Rapport de la Commission », 10/12/1919.

Les ingénieurs de la Commission de la houille bleue ont donc dressé une hiérarchie très nette entre petites puissances et grandes puissances, énergie régulière et énergie intermittente, transport ou non grâce à l'électricité. Cet imaginaire technicien est très imprégné des techniques de la houille blanche, familière aux ingénieurs des Ponts et chaussées, et d'une conception de la modernité associée au réseau électrique en construction. Elle explique que les marées aient été préférées au vagues et à la houle, et que les systèmes à bassins aient été les seuls étudiés par la Commission.

## 6.3 Les usines marémotrices : espoirs et échecs

La Commission de la houille bleue a encouragé plusieurs projets d'usines marémotrices sur les côtes de la Manche. L'usine marémotrice de l'Aber Wrac'h doit constituer un essai avant de construire d'autres usines de taille plus importante, et ceci s'explique par le caractère inédit d'un tel aménagement pour les ingénieurs de l'État comme pour les industriels qui devaient mettre en œuvre ces installations. Dans cette section, ces spécificités, ainsi que la manière dont elles ont été prises en considération, sont examinées, puis les projets qui ont été encouragés par la Commission sont étudiés.

### Les spécificités de la houille bleue par rapport à la houille blanche

Malgré la familiarité de la houille bleue, exploitée par le biais de bassins régulateurs et d'une production d'électricité, avec la houille blanche, les ingénieurs de la Commission de la houille bleue sont bien conscients de la spécificité de cette source d'énergie hydraulique. Loin de l'optimisme de Legrand, ou même de celui de De la Brosse, qui affirment que la houille bleue peut être exploitée dans des conditions souvent plus faciles et plus avantageuses que la houille blanche [42], Boisnier souligne qu'on ne cherche à exploiter la houille bleue que faute de mieux. Selon lui, la faible hauteur de chute que présentent les marées ainsi que leur intermittence, sont deux « tares originelles » qui permettent de les comparer « à la chaleur solaire, à la chaleur des sources thermales, à la force du vent » : c'est une « énergie dégradée » qu'on « n'emploiera qu'à défaut de sources meilleures ». Elles ont cependant l'avantage, outre le fait de pouvoir être utilisées de manière comparable à la houille blanche, d'être prévisibles et de ne pas être affectées par les sécheresses.

42. De la Brosse, avec trois études de cas pour les sites de La Rochelle, Rothéneuf et la Rance maritime, considère que « ce captage peut se faire à des conditions en général plus avantageuses que pour les hautes chutes de montagne » (Maynard, 1918i, p. 1007). Reprenant l'argumentaire de De la Brosse mais en amplifiant ses conclusions, Legrand, dans son plaidoyer pour la houille bleue auprès du ministère des Travaux publics, déclare que la houille blanche est une « force problématique », qu'on capte « à des conditions plus difficiles et beaucoup plus onéreuses, pour la houille bleue, que pour la houille blanche » (AN 1977 0313/46, p.d., Legrand, Lettre au ministre des Travaux publics, 18/03/1919.).

Les particularités de la houille bleue, par rapport à la houille blanche, que les ingénieurs de la Commission ont œuvré à prendre en compte sont les suivantes :

1. forme de l'énergie elle-même : intermittence, liée à la nature de la marée, qui monte et descend, et chute d'eau à grand débit et faible hauteur ;
2. conditions physiques de la mer et de l'interface mer-côte : chimie de l'eau, présence de houle, variabilité du niveau de la mer ;
3. spécificités physiques de chaque site : marnage, forme des anfractuosités utilisées comme bassin ;
4. conflits d'usages possibles avec la navigation et la pêche.

Ces paramètres ont une influence sur la mise au point des éléments suivants :

1. forme et fonctionnement de la turbine, taille du bassin à aménager et choix du cycle de fonctionnement ;
2. matériau de la turbine, forme et méthode de construction du barrage ;
3. choix du cycle, emplacement et forme du barrage ;
4. choix du site à aménager.

.

Il faut donc étudier de nouvelles formes de turbines, adaptées à la composition de l'eau de mer et au régime des marées ; identifier des sites où il serait possible de construire des bassins au moindre coût, et où la navigation et la pêche ne seraient pas trop gênées par un barrage ; connaître la forme des anfractuosités de côtes utilisées comme bassin ; choisir le « cycle de fonctionnement » le plus adapté à ces circonstances topographiques et à la production d'électricité escomptée.

La constitution de la Commission de la houille bleue (Annexe D) montre que le Comité pour l'aménagement et l'exploitation des Forces hydrauliques a bien pris en considération ces spécificités : il y a, dès le départ, en plus de spécialistes de l'hydraulique industrielle — autrement dit, de la houille blanche — (de la Brosse et Bouchayer) et de l'électrotechnique (Janet), des experts de l'hydrographie marine (Renaud) et du génie maritime (de Rouville). Au fur et à mesure d'autres membres viennent compléter la Commission, mais ces spécialités sont toujours représentées. S'y ajoutent en particulier deux vice-amiraux (Amet et Moreau), probablement en raison de leur connaissance de la navigation et de la mer en général — et, pour Amet, de l'intérêt qu'il manifeste personnellement à l'égard de ce sujet, étant donné le mémoire conséquent qu'il a publié à ce sujet en 1920.

Un premier choix de sites est effectué pendant l'été 1919 par De Rouville et Renaud. Ils commanditent ensuite une étude plus approfondie des sites aux ingénieurs des Ponts

et chaussées des départements d'Ille et Vilaine (Boisnier) et du Finistère (Lefort) [43]. Ces études doivent servir aux industriels pour la conception de leurs usines.

En effet, les particularités du site et, notamment la forme et la disposition des bassins naturels, associées au marnage, sont déterminants dans le choix du cycle de fonctionnement. Dans leurs mémoires, De la Brosse, et, de manière plus détaillée, Amet et Boisnier, résument les différentes possibilités envisagées pour obtenir une puissance au maximum continue et constante. Leurs mémoires sont ensuite pris comme références sur cette question par les ingénieurs de la Commission de la houille bleue . Ces possibilités peuvent se résumer de la façon suivante :

— *Système à un bassin et à double effet*

Le cycle à double effet fait travailler les mêmes turbines au remplissage et à la vidange. Le bassin est composé d'une anfractuosité de côte fermée par un barrage muni de vannes et de turbines. Lors de la marée montante, le bassin se remplit en actionnant les turbines dans un sens, finit de se remplir sans production de travail, puis, lors de la marée descendante, il se vide et actionne les turbines dans l'autre sens, et termine de se vider sans production de travail (voir Figure 6.2).

Pour que ce cycle soit possible, le fond du bassin doit se situer au niveau ou en dessous du niveau des basses mers de morte eau, car si ce n'est pas le cas, les turbines ne sont actionnées qu'à marée descendante, à la vidange - donc, comme dans un cycle à simple effet. Ce cycle présente l'avantage de récupérer le maximum de l'énergie disponible. Mais selon Boisnier, plusieurs inconvénients la rendent généralement moins intéressante que les autres cycles : d'abord, la production n'est pas continue. Ensuite, il nécessite des installations plus importantes et donc plus chères que les autres cycles. En effet, à cause de la contrainte du remplissage et de la vidange totale à chaque demi-cycle, l'important volume d'eau à écouler, *a fortiori* sans travail utile, oblige à installer des vannes d'autant plus grandes. Cependant, c'est ce cycle qui est choisi pour l'usine marémotrice de l'Aber Wrac'h .

— *Système à un bassin et à simple effet*

Les dispositions du bassin sont les mêmes qu'avec le cycle à simple effet, mais le cycle ne produit de travail qu'à la vidange du bassin. Lors de la marée montante, le bassin se remplit sans production de travail, et lors de la marée descendante et de l'étale, il se vide en actionnant les turbines.

— *Système à deux bassins conjugués (ou cycle « Decœur »)*

43. La teneur des informations demandées ainsi que les résultats de ces études ne sont pas présents dans les archives, mais il s'agissait très probablement de renseignements sur le marnage, la navigation, des relevés topographiques, etc.

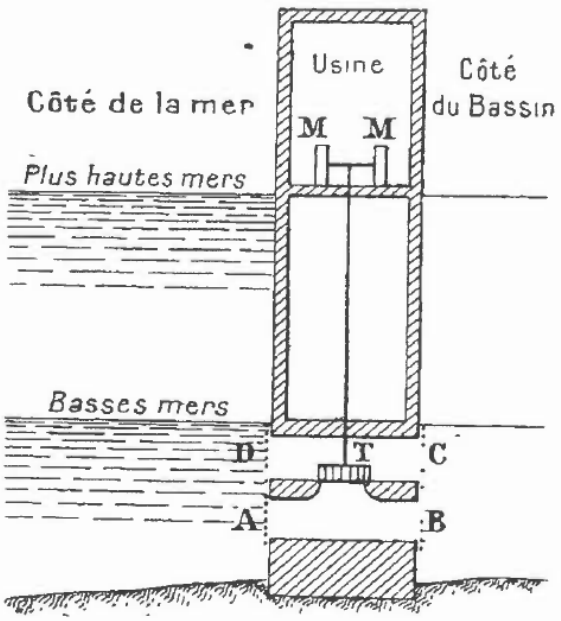



Fig 1. — Schéma du fonctionnement à double effet.

| | Vannes ouvertes | Vannes fermées |
|---|---|---|
| Bassin travaillant à la vidange. . . . . | C. A. | B. D. |
| Bassin achevant de se vider. . . . . | A B. | C D |
| Bassin au repos, mer montante . . . . . | Néant | A B C. D. |
| Bassin travaillant au remplissage . . . . | B. D. | A C. |
| Bassin achevant de se remplir . . . . . | A. B. | C. D. |
| Bassin au repos, mer baissante . . . . . | Néant | A B. C D. |

FIGURE 6.2 – Fonctionnement du cycle à double effet (BOISNIER, 1921, p. 308)

Il s'agit du « cycle Decœur », du nom de l'ingénieur des Ponts et chaussées qui a fait breveter ce procédé en 1890 pour l'appliquer à l'endiguement de la Seine (cf section 3.2 [44]. Il fait fonctionner, le long du cycle de la marée, successivement deux bassins à la vidange (donc, à simple effet) par un jeu d'ouverture et de fermeture de vannes. L'un, le bassin supérieur, est surélevé par rapport à l'autre mais il lui est aussi contigu. Le second bassin est en-dessous du niveau de la mer. Les deux bassins sont séparés par un barrage muni de turbines, et chacun d'eux est séparé de la mer par un barrage aussi muni de turbines (voir Figure 6.3). Lorsque la mer commence à descendre, le premier, rempli, se vide dans le second, jusqu'à ce que le niveau de la mer atteigne le niveau du second. Il se vidange à son tour, jusqu'à ce que la mer soit descendue puis remontée jusqu'à son niveau. Le bassin supérieur recommence alors à se vider dans le bassin inférieur, jusqu'à ce que la mer soit montée. Un nouveau cycle recommence alors .

Ce cycle n'a pas eu la préférence de Boisnier, De la Brosse et Amet. C'est, en effet, un cycle à fonctionnement continu, mais à hauteur de chute variable, et les auteurs lui

44. De la Brosse précise d'ailleurs que Decœur n'était en fait pas le premier à le breveter.

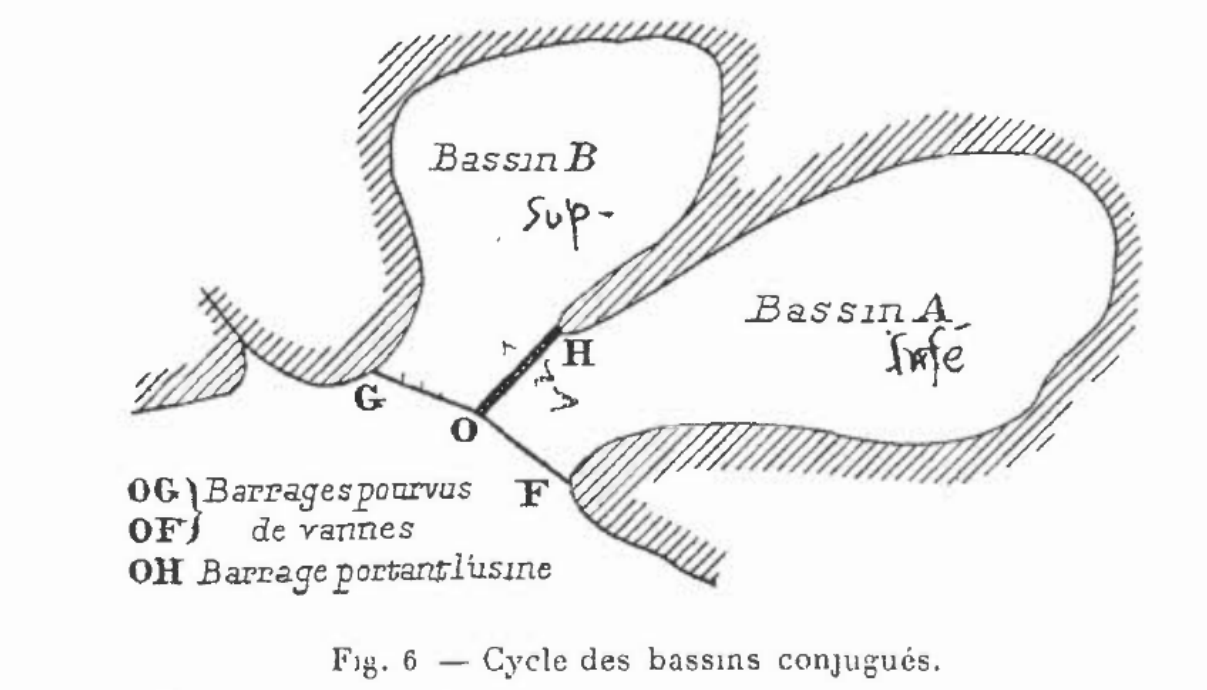



Fig. 6 — Cycle des bassins conjugués.

FIGURE 6.3 – Aménagement pour un cycle à bassins conjugués (BOISNIER, 1921, p. 323)

reprochent un mauvais rendement (MAYNARD, 1918c, p. 704 ; AMET, 1920b, p. 487 ; BOISNIER, 1921, p. 326). Boisnier souligne aussi que les conditions topographiques pour réaliser un tel aménagement sont particulièrement difficiles à atteindre : il faut trouver des anfractuosités de côte formant des réservoirs de tailles assez semblables ; l'un doit être est surélevé par rapport à l'autre ; le bas du bassin supérieur doit être au niveau de la mi-marée, tandis que le bas du bassin inférieur doit être au-dessous du niveau des basses mers. Enfin, le coût d'un tel système est grevé par le nombre de barrages munis de vannes et turbines qu'il faut construire : il en faut trois, contre deux pour le système de bassins associés. Ainsi, pour Boisnier, « si séduisant qu'il soit, le système des bassins conjugués [lui] paraît, en France du moins, destiné à demeurer dans le domaine de la théorie » (BOISNIER, 1921, p. 327).

— *Système à deux (ou plus) bassins associés*

Comme dans le cas du cycle Decœur, deux bassins fonctionnent successivement à simple effet, mais ils ne sont pas en communication. Il s'agit en fait de l'association de deux bassins à simple effet - il y a donc deux barrages et deux usines de production d'électricité. L'un, le bassin inférieur, fonctionne au remplissage, et l'autre, le bassin supérieur, à la vidange. Le fond du bassin inférieur doit donc être au-dessous du niveau des basses mers de morte eau, et celui du bassin supérieur au-dessus. La production est continue. C'est, selon Boisnier, la meilleure solution quand elle est possible.

On voit, pour toutes ces solutions, l'importance des contraintes topographiques des

sites, ainsi que du choix de la marche de l'usine : puissance, continuité, constance. Selon Jules Baré, ingénieur des Ponts et chaussées du Finistère qui a suivi de près le projet d'usine marémotrice de l'Aber Wrac'h , les considérations suivantes doivent ainsi guider le choix d'un site : la taille du bassin naturel, qui détermine la puissance de l'usine, le renfermement de l'anfractuosité de côte, qui influence la forme et la taille du barrage (et donc, le coût de ce dernier), le niveau du fond du bassin, qui doit « être à une altitude convenable pour faciliter l'installation des chambres des turbines, afin d'éviter des travaux sous-marins, toujours pleins de sujétions » (Baré, 1921, p. 255-256). À ceci s'ajoutent les possibilités de débouchés pour l'électricité produite, et qui dépendent à la fois des usagers potentiels et de la présence actuelle ou dans un avenir proche d'un réseau de distribution d'électricité entre l'usine et ces usagers.

Pour la mise au point de turbines adaptées au régime des marées, la Commission met au concours, en mai 1920, 10 000 francs auprès de neufs constructeurs de turbines pour les meilleures propositions [45]. Les trois seules entreprises qui ont répondu à temps sont primées : Leflaive et Cie [46], Teisset, Rose et Brault [47], et Singrün [48]. Escher-Wyss, un des principaux fournisseurs de turbines hydrauliques en France pendant le premier quart de siècle (Benoît, 1998, p. 95), et Neyret Beylier Piccard et Pictet (NBPP) [49], présentent ensuite leurs propres modèles de turbines, sans répondre à cet appel à prix qui déjà terminé [50]. Le constructeur anglais Boving and Co envoie spontanément une demande d'entretien à propos d'une turbine spéciale qu'elle aurait déjà mise au point. Par la suite, c'est Escher-Wyss qui mène le plus loin ses conceptions puisqu'elle participe au projet de construction de l'usine de l'Aber Wrac'h (voir sous-section 6.3), et qu'elle teste probablement son modèle de turbine.

On peut souligner que l'implication des constructeurs français pour la mise au point de turbines adaptées au régime des marées est restée modeste. Seules quatre d'entre elles

45. Les neufs constructeurs sollicités sont :
—Pour les Français : Leflaive et Cie ; Société alsacienne de constructions mécaniques (SACM) ; Bouvier ; Schneider et Cie ; Société de Commentry, Fourchambault et Decazzeville (cette société avait déjà proposé, en 1919, son expertise sur les aciers afin de résoudre le problème de la corrosion des turbines dans l'eau de mer) ; Singrün ; Gouverner ; Rambaud.
Ces quatre premières entreprises figurent alors parmi les plus importants constructeurs de turbines français (Benoît, 1998).
—Pour les étrangers : Escher-Wyss (AN 1977 0313/46, p.d., Lettre envoyée par Antoine Borrel, sous-secrétaire d'État des mines et des forces hydrauliques, aux constructeurs de turbines).

46. Société basée à Saint-Étienne, qui fusionne ensuite avec Schneider et Cie pour former la Société des forges et ateliers du Creusot (Benoît, 1998, p. 99)

47. Société basée à Chartres.

48. Société basée à Épinal.

49. Filiale créée en 1917 par l'entreprise suisse Piccard Pictet et l'entreprise française Neyret Beylier, qui a en 1925 « conquis une position dominante [dans le secteur de l'hydroélectricité], puisqu'elle a déjà équipé les 2/3 de la puissance hydroélectrique installée depuis 1919 » (Benoît, 1998, p. 98.). Elle devient en 1948 Neyrpic, qui construira les turbines de l'usine marémotrice de la Rance.

50. AN 1977 0313/46, p.d., Chemise « Études des constructeurs de turbines pour l'utilisation de l'énergie des marées 1920 ».

ont émis des propositions, et encore fut-ce, pour trois d'entre elles, parce qu'elles y ont été incitées par la Commission de la houille bleue . Il semble en outre qu'aucune d'elles n'ait fait l'objet d'applications pratiques ni même d'expérimentations.

À propos des conflits d'usage entre la pêche, la navigation et la production d'énergie, j'ai très peu d'éléments, mais, selon les procès-verbaux de la Commission de la houille bleue , les points privilégiés ont été choisis aussi en fonction de ce paramètre. Il aurait ainsi fait partie des premiers critères pour identifier les bons emplacements, « tous les points fréquentés par une navigation de quelque importance » ayant été d'emblée écartés [51]. Cependant, à ce sujet, le point de vue de Maynard à propos de l'intérêt général, en digne ingénieur d'un grand corps de l'État œuvrant dans ce but, est très intéressant. Selon lui, « il ne serait nécessaire de subordonner au captage de la force motrice tous les autres intérêts en présence », alors que « les populations maritimes, comme les commissions nautiques, composées de marins pratiques, ont [...] trop de propension à attacher plus d'importance qu'il ne faudrait à des intérêt locaux qui devraient, la plupart du temps, s'effacer devant l'intérêt autrement important qu'il y a à procurer au pays de la force motrice à bon marché, et à réduire par suite la consommation de charbon » (Maynard, 1918i, p. 1007). Des conflits d'usage avec la pêche et la navigation, mais également avec les habitants et les commerces dépendant du tourisme, ont en effet très certainement provoqué des oppositions locales aux projets d'usines marémotrices. Outre les propos de De la Brosse, plusieurs indices vont dans ce sens. L'association du Grand terrier, dédiée au passé historique et à la mémoire de la commune d'Ergué Gabéric (Finistère), a ainsi mis au jour, à partir des archives de la commune, l'organisation d'une opposition locale au projet d'usine marémotrice du Stangala, et ce pour des raisons économiques et esthétiques [52]. Cette controverse s'est terminée par l'inscription du site au répertoire des sites classés, et par l'abandon du projet. En 1930, Paul Gout, architecte en chef des monuments nationaux, suggère également que les différents projets d'aménagement Mont-Saint-Michel (en l'occurrence, celui de l'ingénieur Aimé Maire) sont l'objet d'inquiétudes et de controverses, au moins pour des raisons esthétiques mais probablement aussi économiques, avec les intérêts du tourisme :

Le bruit courait depuis quelques temps d'un fléau qui menaçait le Mont-Saint-Michel « au péril de la Terre ». Le mot « Usine » circulait : il éveillait aussitôt l'idée de hautes cheminées et de noirs bâtiments réalisant quelque grave conception industrielle au détriment des incomparables beautés du site Montois. Voici ce qui a donné naissance à de chimériques inquiétudes. [...] On peut, sans témérité, prévoir que les travaux projetés ne

51. AN 1977 0313/46, p.d., PV de la séance du 7 octobre 1919, Note du 25 septembre 1919

52. Site internet de l'association Le Grand terrier, p.d. Le projet était porté par la société Lebon, et devait voir barrer la rivière de l'Odet, avec pour conséquences de noyer de terres cultivées, de défigurer un site jugé pittoresque par ses habitants et de perturber le fonctionnement de la papeterie de René Bolloré (à l'origine du groupe actuel Bolloré). Ce dernier fut très actif dans l'opposition au projet.

seront pas sans porter quelque atteinte à la gravité du caractère sauvage de l'admirable baie. [...] mais l'usine marémotrice [...] sera peu perceptible à l'horizon pour le spectateur qui, du Mont, s'en trouvera distant de 20 km. [...] L'utilitarisme qui inspire la plupart des grandes conceptions de l'esprit moderne ne finira-t-il pas par créer chez l'esthète une mentalité susceptible de rendre sa sensibilité artistique plus accommodante, en faisant appel à sa raison pour effacer de sa pensée ce qui pourrait offenser ses regards ? »

Gout montre ici une conception de l'esthétique empreinte de celle d'intérêt général, proche de celle que De la Brosse a également exprimée. Des conflits liés aux intérêts locaux (pêche, agriculture, tourisme, navigation, industrie, mais aussi esthétique) et opposés à l'intérêt général (indépendance énergétique nationale) promu par les ingénieurs des Ponts et chaussées responsables des aménagements hydro-électriques ont ainsi pu naître des projets d'aménagement marémoteurs. Ceux-ci seraient alors proches des conflits décrits par Emmanuelle Heaulmé autour des aménagements hydro-électriques de montagne à la même période (Heaulmé, 2014), mais dans un contexte particulier qui est le milieu marin.

Les porteurs de projets d'usines marémotrices ainsi que la Commission de la houille bleue prennent donc en compte toutes ces spécificités par rapport à la houille blanche : spécificités techniques dues au régime de l'énergie des marées et aux contraintes topographiques des sites ; spécificités technico-économiques dues à la présence ou non de réseau électrique, de débouchés pour l'électricité produite ; de conflits d'usages possibles avec d'autres acteurs du milieu maritime. Pour les spécificités techniques, des mémoires ont été écrits, des choix et des mesures de sites effectuées, par des ingénieurs liés à la Commission de la houille bleue , et une turbine mise au point par Escher-Wyss. Pour les conflits d'usage, la navigation semble avoir été prise en compte dans le choix des sites, mais la prise en considération des autres paramètres (comme le tourisme ou l'esthétique) est moins certaine.

La construction d'une usine marémotrice d'essais doit permettre d'expérimenter ces conceptions, afin de mettre au point et multiplier de telles installations. La sous-section suivante examine les projets d'usines marémotrices étudiées par la Commission de la houille bleue .

## L'usine d'essais de l'Aber Wrac'h et l'usine de la Rance

La pénurie d'énergie de guerre puis l'intérêt de l'État pour les marées et les perspectives de subventions qu'il offre pour des projets jugés prometteurs stimulent la création de groupements privés dont le but est d'exploiter cette force naturelle. De ceux-ci, seuls quelques uns obtiennent le soutien de la Commission de la houille bleue . C'est le cas de la

Société technique d'études et d'entreprises pour l'industrie (STEPI), qui est finalement la seule à obtenir une concession, pour l'estuaire de l'Aber Wrac'h , et reçoit aussi des financements de l'État. Mais elle doit avant tout constituer une usine d'essais pour des projets de plus grande puissance, et, notamment, celui de l'aménagement de la Rance. Celui-ci intéresse particulièrement la Commission de la houille bleue [53]. Plusieurs projets sont proposés dans ce but, mais l'un d'entre eux, celui de la Société d'entreprises hydrauliques et d'utilisation des marées, attire particulièrement l'attention de la Commission, avant même que le projet de la STEPI ne soit formulé. Les deux projets sont, à partir de 1927, portés par une seule et même entreprise, la Société internationale pour l'exploitation de la houille bleue, fusion des deux entreprises initiales. Avant d'examiner ces deux projets, seront rapidement évoquées les propositions d'une autre société qui a retenu l'attention de la Commission, sans toutefois obtenir ni concession ni subvention, et dont les projet furent assez largement relayés dans la presse.

Le projet d'une usine marémotrice à Rothéneuf est en quelque sorte concurrent de celui de la Rance, pendant toute la durée de la Commission de la houille bleue . Il est porté par l'ingénieur André Defour, qui crée à cet effet la société L'énergie des marées dans les années 1920 [54]. L'ingénieur des Ponts et chaussées Albert CaquotCaquot est un ingénieur célèbre pour les ouvrages de génie civil qu'il a conçus à partir des années 1920, y compris des barrages d'aménagements hydro-électriques (plusieurs exemples sont donnés dans le Tome II de l'*Histoire de l'électricité en France* de Lévy-Leboyer et Morsel). s'adjoint à cette société à partir du milieu des années 1930 [55]. La Société formule, tout au long de l'entre-deux-guerres, plusieurs projets sur tout le littoral de la Manche, de la baie de la Somme à celle de Chateaulin, en passant par le havre de Rothéneuf. Tous utilisent un cycle à deux bassins associés à double effet breveté par Defour en 1920 [56]. Defour demande au moins deux concessions, l'une pour le havre de Rothéneuf (Le Génie civil, 1927), et l'autre pour la baie de la Somme (Le Génie civil, 1930a). Le gigantisme du projet de la baie de la Somme a certainement été rédhibitoire pour une prise en considération par la Commission de la houille bleue , qui veut avant tout commencer par une usine d'essais. Ce projet doit en effet voir édifier un barrage de 18 km, pour produire 100 000 ch (env. 74 300 kW) [57] (Le Génie civil, 1930a). Il a d'ailleurs été l'objet de contestations

53. AN 1977 0313/46, p.d.,

54. Cette société est créée au plus tard en 1925 puisqu'un brevet est pris au nom de cette société en août 1925 (brevet n ° 614.260). Elle devient, si elle ne le fut pas à la base, une filiale de la société américaine Thomson
AN 1977 0614/6, p.d., Note de Jean Dupin (président de la Chambre syndicale des forces hydrauliques) sur la constitution de la Société d'études pour l'utilisation des marées (SEUM), 12/06/1941.

55. À partir de 1935, le nom de Caquot est associé au nom de Defour dans les brevets de ce dernier (Caquot et Defour, 1935). Il est connu pour avoir ensuite porté un projet pharaonique de l'aménagement du Mont-Saint-Michel entre les années 1940 et 1970 (voir Partie III).

56. Defour, 1920

57. une puissance que n'atteindront certaines usines hydroélectriques de houille blanche qu'à partir des années 1930 (Lévy-Leboyer, 1994b, p. 40)

locales, à propos de gênes pour la pêche, la navigation, le tourisme et l'envasement de la baie, dont Caquot lui-même a reconnu la légimité (Dallery, 1955, p. 185-186). Mais la Commission porte attention au projet d'aménagement de Rothéneuf, d'une puissance comparable à celle de l'usine projetée de la Rance (10 000 ch, env. 7 500 kW). Elle ne le soutient cependant pas pour une concession ni pour toute proposition de subvention (Journal officiel de la république française, 1932), en raison d'un intérêt plus marqué pour l'aménagement de la Rance. Selon Louppe, le montage financier de la société L'énergie des marées n'est pas assez solide pour être pris au sérieux (Louppe, 1923, p. 10-11).

Les projets Defour, puis Caquot-Defour ont cependant une résonance dans de nombreuses publications scientifiques et techniques. Ils sont même présenté à deux reprises à l'Académie des sciences [58] , mais aussi dans une conférence à la Société des ingénieurs civils (Le Génie civil, 1930a), et dans des quotidiens locaux (Dolbert, 1927 ; L'Ouest-éclair, 1930). Defour ne manque pas d'argumenter sur la valeur supérieure de son cycle par rapport à ceux des projets d'aménagement de la Rance et de l'Aber Wrac'h , privilégiés par la Commission de la houille bleue . Dans deux articles du *Génie civil*, Defour compare ainsi le cycle Defour, le cycle Maire (projet de la Rance) et le cycle « État » (Aber Wrac'h ), qu'il attaque tout particulièrement en qualifiant ce choix de la Commission de la houille bleue d'« errements » — et le sien de « vraie solution au problème » de l'utilisation des marées. Appliquant ces trois cycles à un aménagement théorique dans la région de Saint-Malo (Defour, 1922), il montre que pour une puissance sensiblement constante, contrairement à la production variable des autres cycles, l'énergie annuelle récoltée est plus grande. La STEPI répond à cette attaque que pour le projet particulier de l'Aber Wrac'h , les aménagements nécessités par le cycle Defour ne sont tout simplement pas réalisables (Louppe, 1923, p. 10-11).
Contrairement au projet de l'Aber Wrac'h , les projets Caquot-Defour survivent à la crise financière des années 1930 et même à la Commission de la houille bleue . En 1939, Defour et Caquot formulent en effet deux nouveaux projets d'aménagement au nom de la Société, dans l'anse de Lancieux et dans la baie de l'Arguenon, avec le cycle Caquot-Defour (*Le Génie civil*), avant de proposer à leur tour l'aménagement du Mont-Saint-Michel. Ces projets sont à nouveau pris en considération par le ministère de la Production industrielle pendant la seconde guerre mondiale [59] (cf Partie III). Cependant, un projet d'usine marémotrice sur la Rance est à nouveau privilégié et l'usine de Rothéneuf ne voit jamais le jour.

Dans l'entre-deux-guerres, c'est bien le projet de l'Aber Wrac'h qui est le plus proche

58. Une fois, le 3 janvier 1921, par l'astronome Guillaume Bigourdan (qui a lui-même présenté en 1920 une cloche à marées de son invention) ; l'autre fois par Auguste Rateau, le 7 juin 1927 (Le Génie civil, 1927).
59. AN 1977 0614/6, p.d., Dossier « Société l'énergie des marées ».

d'aboutir à une installation opérationnelle. L'estuaire de l'Aber Wrac'h est demandé en concession en 1921 par la Société financière pour l'Industrie, dirigée par l'homme d'affaires Ferdinand Gros [60]. Le projet technique est essentiellement élaboré par l'ingénieur suisse spécialiste de l'énergie hydraulique Albert Huguenin [61], également directeur des établissements Escher-Wyss, alors une des plus importantes entreprises mondiales dans le domaine de l'hydrotechnique. Il prévoit une usine d'une puissance moyenne de 1 600 ch (env. 1 200 kW), avec un minimum de 1 300 ch (env. 1 000 kW). Cette puissance est faible par rapport aux usines hydroélectriques alors en construction [62], ce qui montre bien le caractère expérimental de l'installation [63]. L'usine doit être construite de manière à ce que divers tests puissent y être exécutés, comme des essais de nouvelles formes de turbines (Louppe, 1923, p. 11-12). Fonctionnant à double flux, l'usine marémotrice est constituée d'un barrage de 140 m de large fermant l'estuaire de l'Aber Wrac'h (voir Figure 6.4), muni de quatre groupes de deux turbines à vitesse variable et fonctionnant dans les deux sens. Ces turbines, conçues par Huguenin, sont testées dans les ateliers d'Escher-Wyss et leur bon fonctionnement peut être constaté par De la Brosse et de Rouville entre 1920 et 1923 (Louppe, 1923, p. 11). Dans le projet initial, la production proprement marémotrice étant intermittente, une usine hydroélectrique auxiliaire permet de régulariser cette production. Un autre barrage doit ainsi être construit sur la rivière le Diouris, à 6 km en amont du barrage marémoteur. En période de grand marnage, l'eau de l'Aber Wrac'h est pompée pour alimenter le réservoir du Diouris, qui restitue l'énergie en périodes de faible marnage. Cette technique s'apparente à celle du pompage en heures creuses appliquée dans certaines installations de houille blanche à partir des années 1920 [64]. Au total, l'usine du Diouris doit fournir environ le quart de la production d'énergie totale sur l'année (3 millions de kWh sur 11).

L'ensemble ainsi constitué doit permettre d'électrifier les communes alentours, et trouver sont principal débouché dans l'alimentation de la ville de Brest et dans son arsenal, moyennant la construction d'une ligne de transport électrique [65]. Par ailleurs, le barrage

60. Il était également administrateur d'autres sociétés et est présenté dans certaines revues comme un banquier, voire comme un escroc non recommandable.

61. C'est lui qui a breveté l'ensemble des dispositions techniques du projet. IL s'agit notamment d'un brevet pour une usine marémotrice à double effet (Huguenin, 1920), et, en 1923, pour une turbine à régime variable fonctionnant dans les deux sens (Huguenin, 1923), au nom de la Société financière pour l'Industrie (Baré, 1921, p. 276. Tous les brevets de la STEPI, créée après l'autorisation de concession (disponibles sur le site internet de l'INPI) sont à son nom.

62. D'après Lévy-Leboyer, entre 1924 et 1930, la majorité des centrales hydrauliques qui ont été construites en France (30 sur 50) avaient une puissance comprise entre 10 et 50 MW, donc au moins 10 fois plus grande que celle de l'usine de l'Aber Wrac'h (Lévy-Leboyer, 1994b, p. 40).

63. Les renseignements technico-économiques de ce paragraphe proviennent tous du mémoire écrit en 1921 par Jules Baré dans les *Annales des Ponts et chaussées* sur l'usine marémotrice de l'Aber Wrac'h . Ce dernier, ingénieur des Ponts et chaussées dans le département du Finistère a pu, par ses fonctions, « suivre de près tous les développements du sujet » (Baré, 1921, p. 252).

64. Selon Henri Morsel, « dès 1923, l'idée de pomper l'eau aux heures creuses avait été appliquée au lac de la Girotte par la société Ugine (Morsel, 1994, p. 734) ».

65. Sachant que l'emplacement projeté de l'usine est à une trentaine de kilomètres de Brest.

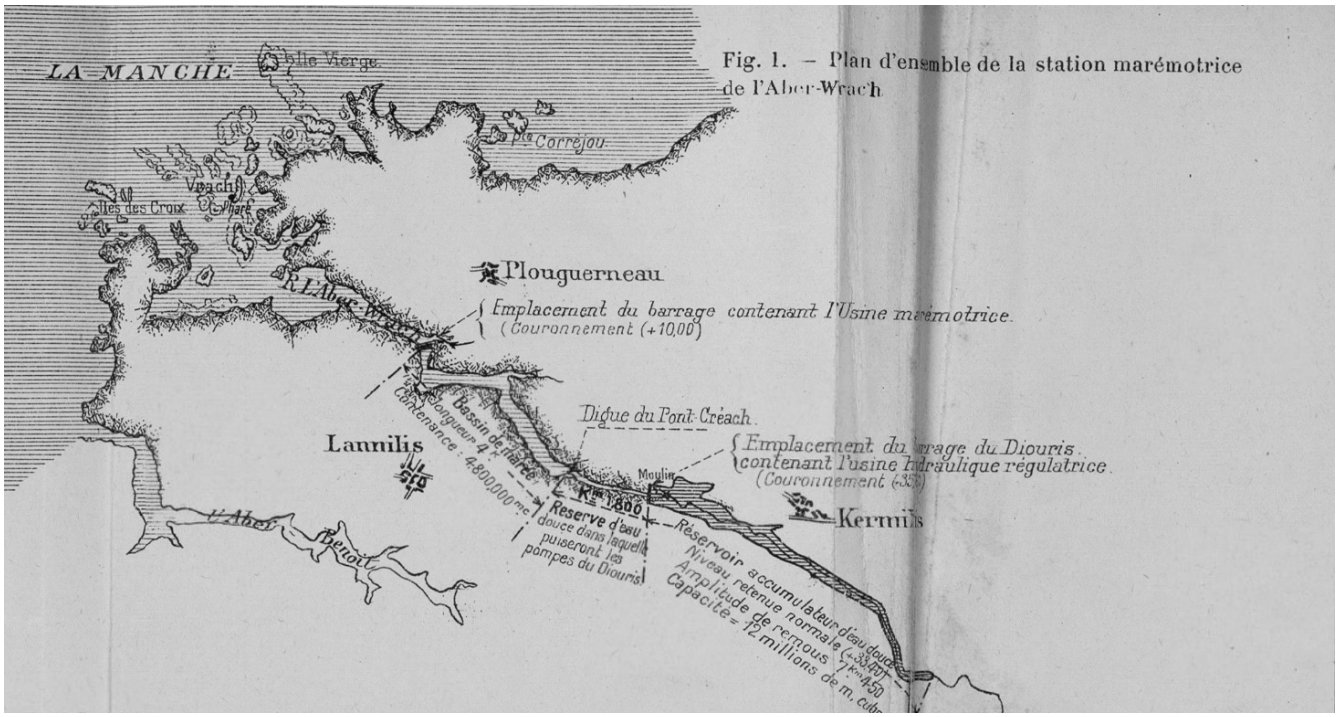



FIGURE 6.4 – Emplacement projeté de l'usine marémotrice de l'Aber Wrac'h en 1921 (BARÉ, 1921, Pl. 7)

constitue un nouveau pont reliant les communes de Plouguerneau et de Lannilis, remplaçant le vieux pont suspendu alors en usage - le Conseil général espère ainsi obtenir un accès comprenant une route et une voie ferrée (JOURNAL OFFICIEL DE LA RÉPUBLIQUE FRANÇAISE, 1932). Sur les 28 millions d'investissements, 18 millions sont nécessaires pour l'usine de l'Aber Wrac'h , 8 millions pour le Diouris et 2 millions pour la ligne de transport entre l'usine et Brest. Le prix de vente de l'énergie ainsi produite est évalué au maximum à 0.35 fr/kWh, ce qui est largement en-dessous du prix moyen de vente de l'électricité sur l'ensemble de la France [66]. Dans les années qui suivent, les dispositions techniques changent légèrement, et ce n'est plus une usine hydraulique régulatrice, mais un accumulateur d'air comprimé qui est envisagé pour régulariser la puissance ; le barrage est en outre décalé vers l'aval de la rivière, augmentant la production annuelle d'électricité [67].

Le projet est favorablement reçu non seulement par la Commission de la houille bleue , mais aussi par le Parlement, et la Société financière pour l'Industrie reçoit l'autorisation de concession pour les deux usines en 1924. Elle obtient également un engagement de l'État pour une subvention de 10 millions de francs [68]. Elle constitue la STEPI, au capital de 28

66. Il était, selon Lévy Leboyer, de 1.24 fr/kWh pour la force motrice, et de 1.58 francs/kWh pour la lumière, dans les villes de plus de 10 000 habitants, ce qui était la destination de l'électricité produite (LÉVY-LEBOYER, 1994b, p. 86).

67. AN 1977 0313/46, p.d., Commission de la houille bleue , Procès-verbal de la séance du 18/05/1926 ; Rapport de Georges Bricard à propos du projet d'usine marémotrice de l'Aber Wrac'h , 20/05/1930. La production annuelle de l'usine marémotrice est ainsi augmentée de 4 millions de kWh.

68. Décret du 22 août 1924, déclarant l'entreprise d'utilité publique, *Journal officiel de la République*

millions de francs, dont 10 millions doivent être couverts par la subvention de l'État, pour mener à bien le projet d'usine marémotrice de l'Aber Wrac'h . Huguenin en est nommé directeur [69]. Probablement en raison d'insuffisances dans les garanties financières de la STEPI [70], cette dernière est absorbée dans une nouvelle société, la Société internationale pour l'exploitation de la houille bleue (SIEHB), constituée de personnalités du monde politique, financier et industriel [71]. Elle devient la Société marémotrice de l'Aber Wrac'h . En 1928, elle entame des travaux de construction [72]. Cependant, malgré l'avis favorable de la Commission de la houille bleue sur le montage technique et financier du dossier [73], le soutien du Conseil général du Finistère [74] et des députés du Finistère Vincent Inizan et des Côtes du Nord Yves Le Trocquer, des oppositions au Parlement viennent retarder le versement de la totalité de la subvention, nécessaire à la continuation des travaux (Journal officiel de la république française, 1932). Ces retards provoquent l'enlisement, puis l'abandon du projet, matérialisé par dissolution de la SIHUB en 1932 [75]. La crise financière et la surproduction d'électricité ne favorisent pas un vote parlementaire pour le versement des subventions initialement promises.

Le projet d'aménagement de la Rance pris en considération par la Commission de la houille bleue est initialement porté par les ingénieurs Aimé Maire, Léon Parisot et Georges Aubert de Tregomain. Maire a pris un brevet en fin de guerre, en 1917, pour un cycle à deux bassins conjugués, fonctionnant à hauteur de chute constante, et régularisé par un bassin à simple effet (Maire, 1917). Avec Parisot et de Tregomain, également administrateurs d'une société de production et distribution d'électricité en Ille et Vilaine, Maire crée la Société d'entreprises hydrauliques et d'utilisation des marées, au capital de 500 000 francs, basée à Rennes, en 1920 [76]. Ils cherchent à aménager l'estuaire de la

*française*, 27/08/1924, p. 7931-7934.

69. AN 1977 0313/46, p.d., Rapport de Bricard à propos du projet d'usine marémotrice de l'Aber Wrac'h , 20/05/1930.

70. Une première opposition de la Commission des Finances s'est en effet exprimée en 1925 en raison de l'absence d'une « société qui devait se substituer aux négociateurs de la première heure » (1ère séance de la Chambre des députés du 3 décembre 1928).

71. Son conseil d'administration compte, outre Gros, l'ancien premier ministre et sénateur Frédéric François-Marsal, l'ancien ministre des Travaux publics et député des Côtes du Nord Yves Le Trocquer, qui fut un fervent soutien de la houille bleue pendant son mandat de ministre, Henri Zoelly, le directeur de la compagnie suisse Escher-Wyss, ou encore Max Bahon, directeur de la Compagnie universelle du canal maritime de Suez (Tholomé, 1929a).

72. Une voie d'accès de 1 km munis d'un mur de soutènement a été construite, ainsi que des hangars (Journal officiel de la république française, 1932).

73. AN 1977 0313/46, p.d., Rapport de Bricard à propos du projet d'usine marémotrice de l'Aber Wrac'h , 20/05/1930.

74. En 1931, celui-ci se dit prêt à verser une subvention de 500 000 francs dès que la décision de poursuivre les travaux est prise, et à condition que le barrage comporte une voie ferrée et une route (Journal officiel de la république française, 1932).

75. D'après le journal satirique *Bec et ongles*, cette liquidation s'est faite de manière douteuse (numéro du 10/08/1932), Gros et François-Marsal étant parvenus à récupérer l'ensemble du capital au détriment des autres actionnaires de la société, par des manœuvres malhonnêtes.

76. *RGE*, Note sur la création de la Société d'entreprises hydrauliques et d'utilisation des marées, 13/11/1920.

Rance, par la constitution de trois barrages : les deux bassins conjugués seraient installés au niveau de l'Île au Moine, et le bassin à simple effet au niveau de Port-Saint-Jean (voir Figure 6.5). Ce dernier constituerait une usine régulatrice grâce à l'accumulation de l'eau douce de la rivière, à la manière de l'usine du Diouris pour le projet de la STEPI. Les turbines sont des turbines Francis, utilisées pour les basses chutes et les hauts débits et proposées par les constructeurs français — lorsque la société fusionne avec la STEPI, les turbines Huguenin sont finalement choisies. L'ensemble produit une puissance comprise entre 12 300 ch (env. 9 200 kW) pour les marées les plus faibles et 35 000 ch (env. 26 100 kW) pour les grandes marées (Fredouët, 1923a), puissances comparables à celles de la majorité des usines hydroélectriques alors en construction (voir Table 9.1). Les ingénieurs prévoient également une deuxième étape au projet, où ils barreraient la Rance au niveau de Saint-Servan [77], en un cycle à double effet, d'une puissance de 110 000 ch (env. 82 000 kW) [78]. Une telle installation est ambitieuse puisque les premières usines hydroélectriques de houille blanche en France délivrant cette puissance sont construites entre 1924 et 1930, et qu'il n'y en eut alors que trois (Lévy-Leboyer, 1994b, p. 40).

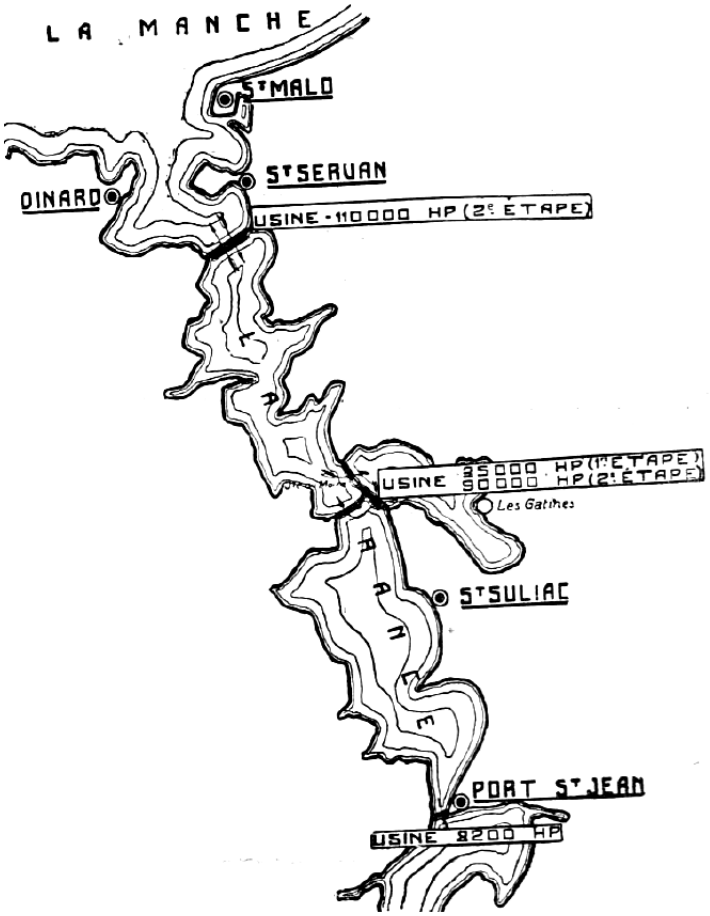



Figure 6.5 – Aménagement de la Rance, procédé Maire, prévu par la Société d'entreprises hydrauliques et d'utilisation des marées (Fredouët, 1923a)

77. À l'emplacement de l'actuelle usine marémotrice de la Rance.
78. Il s'agit probablement de la puissance maximale, par grande marée.

La Commission de la houille bleue , qui reçoit les ingénieurs en novembre 1919 [79], est favorable à ce projet. L'entreprise obtient 95 000 francs de l'État pour effectuer des sondages dans le lit de la Rance pour l'élaboration de la première partie du projet. Elle reçoit également le soutien des Conseils généraux des Côtes du Nord et de l'Ille et Vilaine — l'estuaire de la Rance étant situé à la limite entre les deux départements — et le département d'Ille et Vilaine lui alloue aussi 16 000 francs pour la mise en œuvre des sondage nécessaires à la première partie du projet (Fredouët, 1923b). Par la suite, l'entreprise doit aussi, probablement à la demande du Conseil général d'Ille et Vilaine, étudier la proposition de Boisnier, qui est alors ingénieur en chef des Ponts et chaussées du département. Celui-ci est réticent au projet de la Société d'entreprises hydrauliques et d'utilisation des marées, d'une part à cause du cycle à bassins conjugués qu'il juge trop coûteux et d'un trop mauvais rendement (cf 6.3), et d'autre part parce qu'il a lui-même formulé un projet d'aménagement de la Rance, à bassins associés qu'il juge plus intéressant (*L'Ouest-éclair*, 1921). Cependant, en 1923, la Société envoie pour examen, peut-être avec demande de concession, son projet initial au ministère des Travaux publics, dans l'idée de passer à l'exécution rapide du premier barrage, à Port-Saint-Jean (Fredouët, 1923c). En 1928, ils s'associent avec la STEPI pour former la Société internationale pour l'exploitation de la houille bleue, et l'entreprise devient la Société marémotrice de la Rance (SOMARA) (*L'Ouest-éclair*, 1928 ; Tholomé, 1929c). Mais la SOMARA, qui envoie une demande de concession en 1929, n'en obtient jamais (Micanel, 1931). Il semble que l'avancement des travaux en soit resté là, malgré quelques effets d'annonce de commencement imminent de travaux jusqu'en 1930. Les capitaux manquent probablement aux porteurs du projet : ils ont besoin, pour la construction de la première usine, de 50 millions de francs, et comptent, en vain, sur une aide en nature de l'État s'élevant à 20 millions (Tholomé, 1929b).

Dans le quotidien local l'*Ouest-éclair*, qui suit de près les deux projets de l'Aber Wrac'h et de la Rance, ainsi que dans certains débats parlementaires, on perçoit le grand espoir de certains acteurs des départements bretons vis-à-vis des aménagements projetés durant les années 1920, ainsi qu'une grande déception et une certaine amertume lorsque les projets sont abandonnés, dans les années 1930. En 1922, dans l'*Ouest-éclair*, Charles Frédouët, le secrétaire général de *L'Ouest-éclair*, n'hésite ainsi pas à affirmer, parlant du « miracle de la Rance », que, dans la région malouine et dinannoise, et même dans tout le Nord-Ouest de la France désormais électrifié, « des usines surgiront du sol », et que « partout la force et la lumière dispenseront leurs bienfaits ». Il imagine déjà « la modeste ménagère de la Touraine, de l'Anjou ou du Maine, ayant à repasser, au fer électrique, son linge fraîchement lessivé » et le « cultivateur des plaines de la Beauce, mettant en marche sa machine à battre », grâce à la même « source féérique que les sonneurs chargés de

79. AN 1977 0313/46, p.d., Lettre de de Rouville à Maire, Parisot et de Tregomain, 18/11/1919.

mettre en branle le carillon des églises de nos cloches bretonnes ou que les forgerons de Trignac ou Hennebont, ayant à actionner leurs soufflets » (Frédouët, 1923). En 1932, à la Chambre des députés, le député Vincent Inizan fait part de l'inquiétude du Conseil général du Finistère, « ému de l'indécision qui plane sur la poursuite des travaux de la station marémotrice de l'Aber Wrac'h » dont il attend à la fois l'électricité à bas coût et le nouveau pont escompté. Il craint qu'une « expérience si importante soit abandonnée au profit de l'étranger » (Journal officiel de la république française, 1932).

L'issue de ces trois projets a donc été déterminée bien plus par des paramètres économiques et financiers que par des paramètres techniques ou sociaux. Les deux projets qui ont reçu le soutien de l'État sont en effet les seuls dont le montage financier a été jugé suffisant pour être validé par la Commission des Finances et le Parlement, et pour recevoir à la fois subvention et autorisation de concession. Aucun groupement privé ne s'est d'ailleurs montré prêt à faire les travaux uniquement par ses moyens propres, en raison de l'important investissement nécessaire. On peut en outre constater que, dans les trois projets les plus remarqués par la Commission de la houille bleue , il s'agit de trois types de cycles différents, pour trois sites différents, donc qu'il n'y a finalement pas eu de préférence pour un cycle, mais bien une attention particulière pour chaque proposition technique. L'inachèvement des projets a probablement été largement déterminé par la crise financière des années 1930 et par les restrictions budgétaires de l'État qui rendaient inenvisageable le financement d'un projet à caractère expérimental comme celui de l'Aber Wrac'h , jugé déterminant avant tout autre aménagement de plus grande ampleur. Les grands espoirs dans l'électrification de la Bretagne par la houille bleue, manifestés par les acteurs des départements bretons comme les députés Inizan et Le Trocquer, ainsi que par les conseils généraux de ces départements ou le quotidien local *L'ouest-éclair*, ont ainsi été déçus. Finalement, à la fin des années 1930, la Bretagne est électrifiée, mais grâce à des usines thermiques. Tout compte fait, ce qu'il reste des travaux de la Commission de la houille bleue sur les marées, c'est l'étude des sites et des cycles, quelques aménagements au bord de l'Aber Wrac'h actuellement utilisés par l'association du Père Jaouen, et la mise au point des turbines Huguenin — qui ne seront d'ailleurs jamais utilisées. Le projet d'usine marémotrice de la Rance mis en œuvre par EDF après la seconde guerre mondiale ne reprend en effet pas les dispositions techniques envisagées dans le projet Defour.

## 6.4 Les appareils houlomoteurs : quelques expérimentations, un prototype opérationnel

Les ingénieurs de la Commission de la houille bleue n'ont pas condamné d'office l'utilisation de l'énergie des vagues et de la houle, mais ils ont explicitement privilégié l'encou-

ragement à l'exploitation des marées. Cependant, l'ambiguïté du nom de houille bleue et la position de ces ingénieurs par rapport à cette forme considérée comme inférieure, mais potentiellement intéressante dans certaines circonstances, ont incité certains inventeurs à créer des groupements privés, avec l'espoir de recevoir un soutien de l'État. C'est le cas de plusieurs groupements privés algérois, et de Paul Grasset, à Biarritz, qui ont tous mené des expériences par leurs propres moyens, et les ont stoppées faute du soutien escompté. La seule initiative à recevoir une aide financière de la Commission de la houille bleue est ainsi celle de l'ingénieur des Ponts et chaussées André Coyne au Service hydrographique de Brest, pour l'essai du procédé souvent proposé du bélier hydraulique. Un autre projet mérite d'être relevé, car il est le seul à avoir abouti à une installation opérationnelle : celui de Jules Richard au Musée océanographique de Monaco. Ce projet est un cas limite pour cette thèse puisqu'il s'agit d'un laboratoire monégasque. Il est cependant très lié à des institutions françaises : d'une part, le Musée dépend de l'Institut océanographique de Monaco, basé à Paris et dont le conseil d'Administration est constitué de personnalités françaises et monégasques ; d'autre part, Richard est français et publie très largement dans des revues françaises ; enfin, c'est le seul personnage qu'on trouve également dans les projets d'exploitation de la houille jaune, en lien avec l'ONRSI.

Cette section expose d'abord les arguments de ces inventeurs pour le développement d'installations houlomotrices, malgré le manque d'intérêt pour cette forme jugée inférieure de houille bleue. Elle relate ensuite successivement les études de cas suivantes : les entreprises créées pour mettre en place des usines houlomotrices et qui n'ont pas été soutenues par la Commission de la houille bleue , les expériences d'André Coyne sur le « bélier du Minou », et l'installation d'une « ondo-pompe Cattaneo » par Jules Richard.

## Une forme dégradée de houille bleue, mais potentiellement intéressante dans certaines circonstances

Les promoteurs de l'exploitation de la houle et des vagues soulignent deux avantages principaux à propos de cette forme de houille bleue par rapport aux marées. Le premier est le faible coût d'investissement des installations envisagées. Le second est l'impossibilité ou le moindre intérêt de construire des usines marémotrices dans de nombreuses zones littorales où la construction d'un réseau électrique est souhaitée. Ces arguments peuvent être résumés dans la citation suivante de Giannoni et Giry, ingénieurs à Algersa et auteurs d'un procédé d'exploitation des vagues qui ont demandé, en vain, le soutien de la Commission de la houille bleue :

« il y a lieu de remarquer que [les usines marémotrices] demandent de grosses dépenses, et des dispositions tout-à-fait particulières quant à la configuration du sol avoisinant la

mer. Au surplus, elles ne peuvent être installées que sur les bords de l'océan, là où la marée donne des différences de niveau appréciables. Donc, d'abord, difficulté de lieu, et ensuite édifications très coûteuses [80]. »

Pour le premier argument, il découle essentiellement de la seule forme envisagée par la Commission de la houille bleue et les entreprises créées pour utiliser les marées, à savoir l'accumulation dans de vastes bassins nécessitant l'onéreuse construction d'un barrage en mer. Au contraire, les seuls types d'installations houlomotrices dont il est question dans cette section sont de plus petite ampleur, donc moins coûteuses à l'investissement (cf section 6.2).

L'argument principal reste cependant que, dans de multiples points du littoral où manquent houille noire et houille blanche, la houle et les vagues sont la seule forme de houille bleue utilisable. C'est le cas des littoraux de mers sans marées, à savoir la Méditerranée, ou de petite amplitude, comme l'Atlantique. Le marnage y est en effet de moindre importance, et, de surcroît, le littoral moins découpé que dans la Manche, et donc défavorable à la construction de barrages. Ceci explique que les projets houlomoteurs aient concerné le sud de la France, l'Algérie et, de manière plus indirecte, le Maroc, deux territoires d'Afrique du Nord où le charbon manque particulièrement, et où le réseau électrique est, comme en Métropole, en construction. En revanche, dans la Manche, destination privilégiée pour les usines marémotrices, l'amplitude des marées augmente l'irrégularité et l'instabilité d'installations houlomotrices, aussi aucun des projets relevés pour l'entre-deux-guerres ne concerne ce littoral.

La construction d'usines houlomotrices est ainsi une façon de compléter l'arc-en-ciel des houilles, et la carte de Grasset présentée en 4.2.2 (Figure 4.3) en est une bonne illustration, pour ce qui concerne la Métropole. Cette carte est intéressante dans la mesure où les « usines hydromarines » regroupent indifféremment les usines marémotrices et les usines houlomotrices, comme deux formes aussi pertinentes d'exploitation de la houille bleue. Pierre Devaux présente ainsi le projet de Grasset dans *La Nature* en soulignant que, pour aménager tout le littoral français, métropolitain et colonial, avec des énergies marines, l'énergie thermique des mers peut s'appliquer aux régions tropicales, les marées à la Manche, mais que « les usines thermomaritimes et marémotrices présenteront toujours un caractère un peu exceptionnel et qu'elles laissent un large champ libre » où l'exploitation des vagues et de la houle pourrait être mise à profit (Pierre Devaux, 1934, p. 260).

Ces arguments technico-économiques (construction d'un réseau électrique) et géographiques (absence de houille noire et de houille blanche, marnage peu important) n'ont cependant pas suffi aux ingénieurs de la Commission de la houille bleue pour soutenir

80. AN 1977 0313/46, p.d., « Description du dispositif (breveté S.G.D.G.) sur l'utilisation de l'énergie de la vague dénommé « Vaguo-moteur » de MM Giannoni et Giry », 15/10/1932.

les initiatives privées. Au manque d'intérêt pour les techniques en elles-mêmes (cf section 6.2) s'est probablement ajouté le point de vue, exprimé par De Rouville, selon lequel non seulement un marnage important mais aussi un vent particulièrement régulier sont nécessaires aux procédés houlomoteurs. Or, ces conditions ne se trouvent, selon l'ingénieur, que dans les mers de certaines colonies françaises comme la Guyane, la Réunion, Madagascar ou certains archipels de l'Océanie, régions qui, d'une part, « n'intéressent guère directement » le ministère des Travaux publics, et où l'électrification ne « paraît pas encore au premier rang des préoccupations » (Gervais de Rouville, 1921, p. 617).

## Des groupements privés à Alger et à Biarritz

André Fusenot, ingénieur à Alger, crée en 1920 la Société méditerranéenne de la houille bleue, basée à Alger, dans le but d'exploiter le procédé qu'il a fait breveter en 1916 (Fusenot, 1916). Ses expériences sont relatées dans la presse algérienne, à partir de laquelle une partie des informations de cette sous-section est tirée. Son capital de 130 000 francs (L'écho d'Alger, 1926) est constitué d'une participation de « notabilités commerciales d'Alger » (Journal général de l'Algérie de et la Tunisie, 1921), mais aussi probablement des fonds personnels de Fusenot. Son procédé consiste à créer un mouvement d'oscillations verticales dans un bassin allongé dans le sens perpendiculaire à la côte, resserré vers le fond, et mis en communication avec la mer grâce à un tunnel. Les vagues s'engouffrent dans ce dernier, en provoquant un afflux d'eau au mouvement ondulatoire, et le flotteur en récupère la composante verticale et la transforme, par le biais de leviers reliés à un arbre, en mouvement circulaire.

Fusenot fait construire, en 1921, un dispositif d'essais de son procédé dans sa propriété de Guyotville (voir Figure 6.6), avec un flotteur cylindrique de 450 kg [81]. Celui-ci n'est pas relié à un dispositif de transformation du travail, mais il permet de constater que le flotteur est constamment en mouvement et que le dispositif présente une solidité suffisante. En effet, malgré des tempêtes qui ont agité le port de Guyotville, l'installation est restée en place. Or, le problème de l'équilibre entre la protection des ouvrages face aux vagues les plus fortes, qui atténue la puissance de toutes vagues arrivant sur le convertisseur, et la récupération d'une puissance importante et régulière, est considérée, y compris par les ingénieurs de la Commission de la houille bleue , comme un des un des principaux problèmes de l'utilisation de l'énergie des vagues et de la houle [82].

81. AN 1977 0313/46, p.d., « Utilisation de l'énergie des vagues. Procédé Fusenot. Rapport de l'ingénieur en chef », 11/03/1922.

82. De Rouville parle du « dilemne entre la fragilité très grande des appareils qu'on [...] expose trop directeur [aux vagues], ou la perte de rendement résultant de leu protection trop prudente ».
AN 1977 0313/46, p.d., Note de De Rouville à propos du projet de M. O. Harley de San Giorgio, directeur de la Société Bréda, 21/10/1924.

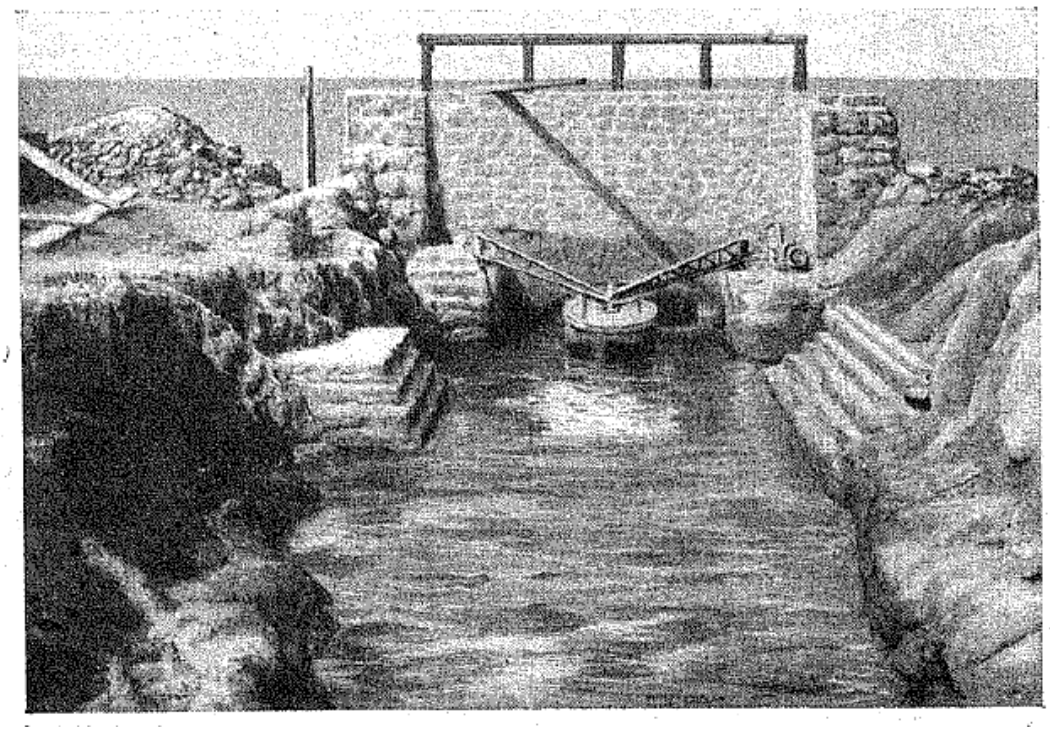


FIGURE 6.6 – Installation houlomotrice de Fusenot à Guyotville (LEGRAND, 1921, p. 431)

L'appareil est loué dans la presse locale mais aussi par Legrand dans *La Nature* (LEGRAND, 1921) comme l'élément d'un avenir radieux. Ils le décrivent comme le moteur du développement du réseau électrique, assurant richesse et prospérité aux habitants de l'Algérie, voire de toute l'Afrique du Nord. Un auteur du *Journal général de l'Algérie et de la Tunisie* n'hésite pas à comparer l'Afrique du Nord munie d'usines Fusenot à une « nouvelle Amérique », à l'instar de l'*Ouest-éclair* affirmant que des usines « surgiraient du sol » dans tout le Nord-Ouest de la France grâce à l'usine marémotrice de la Rance (cf 6.3) :

> [...] il lui manquait ce pain de l'industrie, le charbon, sans lequel tant de mines restaient inexploitées, les usines végétaient et les transports eux-mêmes, si nécessaires à l'agriculture, étaient insuffisants et trop chers. Aujourd'hui, l'agriculture va se transformer : elle aura à sa portée le transport facile et à bas prix ; l'Afrique du Nord deviendra une terre de prédilection de la grande industrie et, à tous les coins du sol, surgiront les acieries électriques, les usines de produits chimiques, les fabriques où tout ce que donnent le sol et le sous-sol seront travaillés et transformés à bas prix (MIGOT, 1922). »

Fort de ce succès technique et médiatique, Fusenot formule le projet d'une installation comportant six flotteurs de quatre tonnes, permettant selon lui d'obtenir une puissance de cinquante chevaux. Nécessitant pour cela une somme de 140 000 francs, il sollicite

à cet effet la Commission de la houille bleue , et reçoit la visite d'ingénieurs des Ponts et chaussées qui viennent constater le fonctionnement de son installation. Ceux-ci ne s'accordent pas sur l'intérêt du procédé : Paul Darche, ingénieur des Ponts et chaussées au département d'Alger (qui a ensuite travaillé sur l'utilisation de l'énergie éolienne), écrit un rapport enthousiaste sur les suites à donner à ces essais (LEGRAND, 1921 ; FUSENOT, 1922). En revanche, Pouyanne, ingénieur en chef des Ponts et chaussées du département d'Alger, est très sceptique sur la puissance (elle serait, selon lui, plutôt de l'ordre de douze chevaux) et le rendement de l'appareil. Il considère que les essais entrepris ne permettent pas d'aboutir à une conclusion précise sur l'intérêt du procédé. Il craint en particulier les effets de retour des ondulations sur les murs qui viendraient diminuer l'amplitude du mouvement du flotteur. Selon lui, le prix du cheval installé serait ainsi au moins dix fois plus important que celui que projette Fusenot ; il coûterait donc plus cher qu'une installation hydraulique sur un cours d'eau [83]. L'ingénieur en chef de la Marine, également sollicité par la Commission de la houille bleue au sujet du dispositif Fusenot, quoique n'ayant pas fait de visite de l'installation, est encore plus sceptique sur le rendement de l'appareil. Il ne considère ainsi l'installation projetée capable que de quelques chevaux [84]. La Commission de la houille bleue ne prend pas en considération des deux avis réservés, et aucune somme n'est allouée à Fusenot. La Société n'entreprend pas de nouveaux essais et se dissout officiellement en 1926 (L'ÉCHO D'ALGER, 1926).

Par la suite, toutes les propositions de groupements basées sur l'amplification du mouvement des vagues dans un réservoir grâce à canal convergent sont d'emblée écartés pour un éventuel soutien par les ingénieurs de la Commission de la houille bleue , au prétexte qu'ils n'offrent rien de nouveau par rapport au dispositif de Fusenot. Les protestations des inventeurs contre cet argumentaire n'y font rien. Les sociétés suivantes, toutes algéroises, ont en effet porté des projets similaires : l'entreprise de Pinard , Sala et Hatinguais, ingénieurs à Alger, créée en 1924 (celle-ci obtient pourtant le soutien moral de Jules Richard et de la SEIN (PINARD et SALA, 1925)) ; celle de Dain, avec le « maré-motor O Harley », en 1926 ; celle de Giannoni et Giry en 1932, avec le dispositif des « dièdres à houle » [85].

**6.4.0.0.1 Grasset et le « bélier maritime à chambre barométrique »(Laboratoire d'hydrodynamique maritime, 1925-1943)** Le cas de l'ingénieur Paul Grasset fait exception en ce sens que l'ingénieur civil obtient une subvention de l'État, mais ce, malgré l'avis de la Commission de la houille bleue . Grasset fonde une société d'études, le

83. AN 1977 0313/46, p.d., Pouyanne, "Utilisation de l'énergie des vagues. Procédé Fusenot. Rapport de l'ingénieur en chef", 11/03/1922.

84. AN 1977 0313/46, p.d., La Besneraie, "Note au sujet de l'utilisation de l'énergie des vagues proposé par M. Fusenot", 31/12/1922.

85. Ce dispositif fut cependant étudié, pendant et après la seconde guerre mondiale, par une société marocaine, la Société marocaine d'études de la houle et du vent, en lien avec Neyrpic et la Société hydrotechnique de France (voir Partie III) (AN 1977 0313/46, p.d.).

Laboratoire d'hydrodynamique maritime de Biarritz, constitué d'un groupe d'ingénieurs, d'architectes et d'entrepreneurs de la région de Biarritz (Pierre Devaux, 1934), dans le but d'exploiter son brevet d'un « bélier maritime à chambre barométrique » (Grasset, 1925). Le procédé utilise donc, aussi, l'amplification du mouvement des vagues grâce à une conduite de section décroissante. Mais les dispositions de l'installation sont par ailleurs tout-à-fait différentes de celles de Fusenot.

Il s'agit en effet d'élever l'eau dans un réservoir situé au-dessus du niveau des hautes mers, et relié à la mer par une conduite débouchant au niveau des plus basses mers, où cette conduite s'élargit en entonnoir (voir Figure 6.7). Grâce au vide créé dans le réservoir appelé « chambre barométrique », l'eau est aspirée à un certain niveau. La force issue des mouvements horizontaux intermittents de la mer provoque des impulsions au niveau du bas de la conduite dont chacune élève le niveau de la chambre barométrique. L'eau ainsi élevée et stockée est ensuite déversée sur des turbines en contrebas, qui, reliées à des alternateurs, produisent de l'électricité. Le procédé permet donc de récupérer l'énergie de la composante horizontale des ondes marines et de la régulariser.

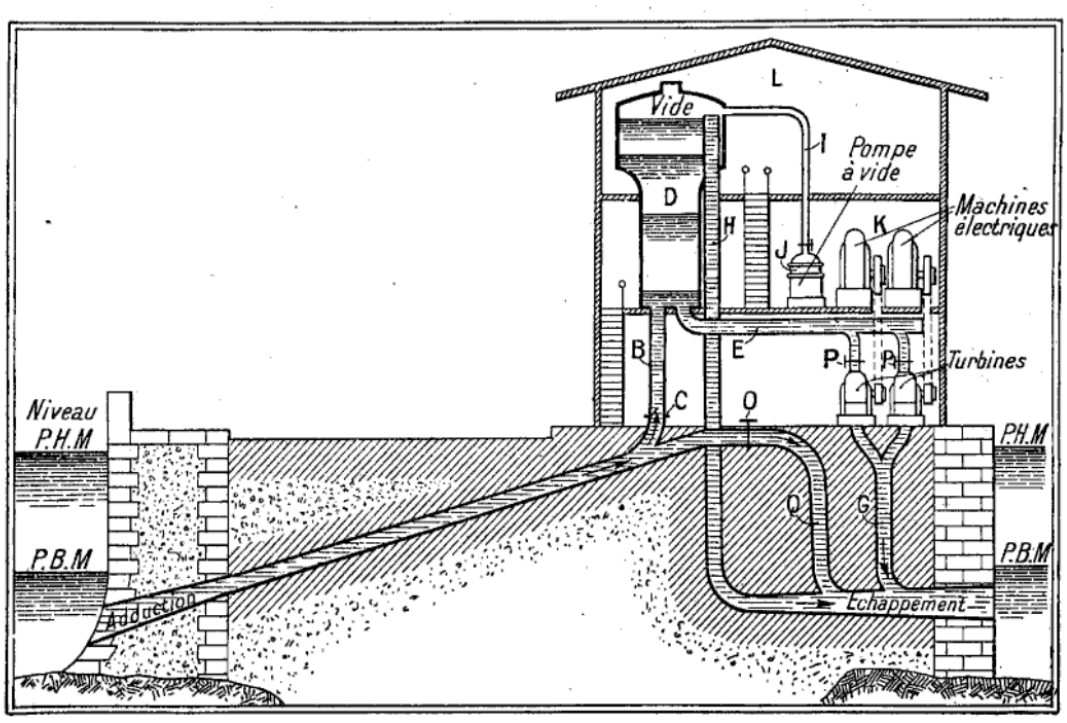



Figure 6.7 – « Bélier maritime à chambre barométrique, système Grasset » (Pierre Devaux, 1934, p. 264

Le nom de « bélier maritime » est dû à la parenté du procédé de pompage de l'eau avec celui du bélier hydraulique, également basé sur l'exploitation de différences de pression pour élever de l'eau dans des canalisations sans moteur intermédiaire. Le principe du bélier hydraulique, expérimenté par Coyne au Service maritime du Finistère, est explicité dans la sous-section suivante (6.4.0.0.1).

Grâce à l'argent du laboratoire privé, Grasset fait entamer des travaux de construction, au pied du phare de Biarritz. Tout le gros œuvre est construit avec un coût d'environ un million de francs. En période de crise financière, Grasset sollicite en outre, pour poursuivre ses travaux, une aide auprès de la Commission de la houille bleue . Celle-ci émet un avis défavorable, pour les mêmes raisons qui l'ont décidée à rejeter les propositions des autres inventeurs. Mais Grasset parvient tout de même à obtenir en 1936 une subvention de 166 666 francs, auprès du ministre de l'Économie nationale [86], qui, manifestement, n'est pas en lien ou ne suit pas les indications de la Commission de la houille bleue , organisme technique du ministère de la Production industrielle. Cette subvention ne suffit cependant pas à l'achèvement des travaux. En effet, en 1938, celle-ci nécessite encore 300 000 francs, ce qui pousse Grasset à multiplier les demandes auprès du gouvernement français. Pendant la guerre, il obtient le soutien du commissaire au pouvoir Migeon, ingénieur de l'École supérieure d'électricité , qui tente de faire pression auprès du ministre de la Production industrielle pour une subvention permettant l'achèvement des travaux. Migeon, convaincu de l'intérêt technique, économique et politique de l'installation de Grasset, invoque des raisons d'indépendance énergétique et de progrès de l'industrie française, d'autant que , selon lui, les autorités allemandes seraient prêtes à racheter les brevets de Grasset. Mais Rossignol de Fargues, l'ingénieur chargé par intérim de la Direction de l'électricité, manifeste un profond agacement vis-à-vis de cette demande. Il se plaint que Grasset aurait pratiqué en 1936, et serait encore en train de tenter de le faire, la « mise en interférence de plusieurs instructions d'une même affaire par des organismes différents, assez souvent exploitée par des inventeurs pour apporter des troubles dans les conclusions et provoquer des solutions favorables et injustifiées », et ceci en transposant la question « du plan technique et scientifique sur le plan politique » [87]. Le ministère de la Production industrielle s'oppose donc à cette demande, laissant le Laboratoire d'hydrodynamique maritime définitivement inachevé.

Les multiples refus de soutien de la part de la Commission de la houille bleue vis-à-vis des projets houlomoteurs sont donc en grande partie liés à une réticence de principe pour ces procédés, jugés *a priori* de trop petite puissance ou de trop faible rendement. En effet, les avis négatifs de la Commission à propos de tous ces projets sont systématiquement motivés par les points de vue réservés des deux ingénieurs sollicités à propos du projet Fusenot, en 1922. Or, ceux-ci, entre autres liés au manque de données sur la puissance obtenue, sont basés sur une supposition théorique défavorable au procédé Fusenot, lui

86. AN 1977 0605/5, p.d., Rapport n°62 du Commissaire du pouvoir Migeon, au sujet d'un projet d'utilisation de l'énergie de la mer, 25/10/1943.

87. AN 1977 0614/6, p.d., Rossignol de Fargues, Lettre au Secrétaire général à la Production industrielle, 18/12/1942.
En l'occurrence, Grasset s'est adressé à la fois aux deux services de la Production industrielle, mais aussi au Commissaire au Pouvoir, qui, au grand agacement de Rossignol de Fargues, a lui-même demandé de réunir le Comité technique de l'énergie des mers créé en 1943 pour remplacer la Commission de la houille bleue (voir Partie III, ce qui n'est pas sensé être dans ses attributions.

conférant un rendement trop faible et un coût trop élevé. L'argument récurrent de comparaison avec le procédé Fusenot est d'autant plus discutable que tous ces procédés sont, à part l'utilisation d'une conduite convergente pour amplifier l'oscillation des vagues, de nature assez différente.

À partir de 1929, une étude menée au service maritime du Finistère à la demande de la Commission de la houille bleue sur un procédé du même type que les précédents, contribue certainement à ces multiples refus. C'est la seule étude subventionnée grâce à la Commission pour l'exploitation de cette forme de houille bleue.

## André Coyne et le « bélier du Minou » (Service maritime du Finistère, 1925-1929)

Au milieu des années 1920, les ingénieurs de la Commission de la houille bleue se montrent désireux d'avoir des éléments chiffrés sur cette question à propos de laquelle ils ne sont pas encore tout-à-fait catégoriques : une utilisation « industrielle » de l'énergie des vagues et de la houle est-elle possible [88] ? Ils préfèrent confier cette étude, non pas par à un groupement privé, mais à leurs collègues d'un service technique de l'État, le Service maritime du Finistère à Brest. L'ingénieur des Ponts et chaussées André Coyne (1891-1960) dirige ainsi ces expériences qui commencent en 1925, avant d'être affecté, en 1928, en Haute Dordogne — où il se distingue dans la communauté des ingénieurs du génie civil comme concepteur de barrages hydrauliques (D. Barjot, 1994, p. 637) [89]. Cette sous-section montre que ses conclusions, sans être élogieuses, ne sont pas sans appel à propos du procédé expérimenté.

En 1925, la Commission de la houille bleue décide donc de confier à Coyne la construction et l'étude d'un procédé d'exploitation de la houle [90], pour lequel la Commission de la houille bleue accorde une subvention [91]. Ce procédé est breveté en 1921 par un inventeur

88. Car c'est bien ce que cherchent tous les protagonistes de cette expérience : par exemple, Coyne, qui a mené les expériences, pour qui la houle est, des effets du vent sur la mer, la « seule qui puisse se prêter à des tentatives d'exploitation industrielle » (Coyne, 1939a, p. 79) ; de la Brosse, à la Commission pour qui le procédé considéré serait « surtout susceptible[] d'applications industrielles dans les mers sans marées » (AN 1977 0614/6, p.d., Procès-verbal de la séance du 18/05/1926 de la Commission de la houille bleue ) ; Pétry, qui terminera les expériences au Service maritime, et pour qui finalement le procédé « ne paraît pas susceptible d'applications industrielles » (AN 1991 0305/6, 1929-1945, Rapport Rapport de Pétry, ingénieur des Ponts et chaussées au Service maritime de Brest, à propos de la destruction du bélier du Minou, 30/11/1929).

89. Ceci lui vaut d'être nommé chef du Service technique des grands barrages du ministère des Travaux publics en 1935 (D. Barjot, 1994, p. 637)

90. Selon les propos de Coyne, en 1956, c'est à l'invitation de De Rouville qu'il a commencé ces expériences (session), 1956).

91. Je n'ai pas trouvé d'informations sur ce montant. Il est probable qu'il ait été de plusieurs dizaines de milliers de francs, montant des subventions qui ont ensuite été accordées à nouveau (AN 1977 0614/6, p.d., Procès-verbal de la séance du 18/05/1926 de la Commission de la houille bleue ).

américain, Lybrand Smith (SMITH, 1921). Il ressemble beaucoup au procédé Grasset : il s'agit de pomper l'eau de mer vers un réservoir en hauteur grâce à l'exploitation du mouvement horizontal de la houle, et d'utiliser l'énergie potentielle de l'eau ainsi stockée en la déversant sur un convertisseur adapté [92]. De même, une canalisation dont l'extrémité est en forme d'entonnoir relie en permanence la mer au réservoir. Cependant, à la différence de Grasset, il s'agit de l'application même du bélier hydraulique à l'utilisation des vagues (voir Figure 6.8). Ce procédé est encore couramment utilisé dans certaines installations de distribution de l'eau et certains constructeurs en proposent des modèles. Il consiste à utiliser l'énergie d'un courant d'eau pénétrant une canalisation (10) située normalement à la direction du courant, pour comprimer l'air d'une cloche (17, élément de gauche) qui, par un jeu de valves, pousse à son tour l'eau emprisonnée dans la cloche vers un réservoir en hauteur via une canalisation verticale (18), puis se détend avant de recommencer un nouveau cycle. Ici, le courant incident dans la canalisation est obtenu grâce à l'ajout d'un entonnoir dans lequel s'engouffrent les lames d'eau de mer (9).

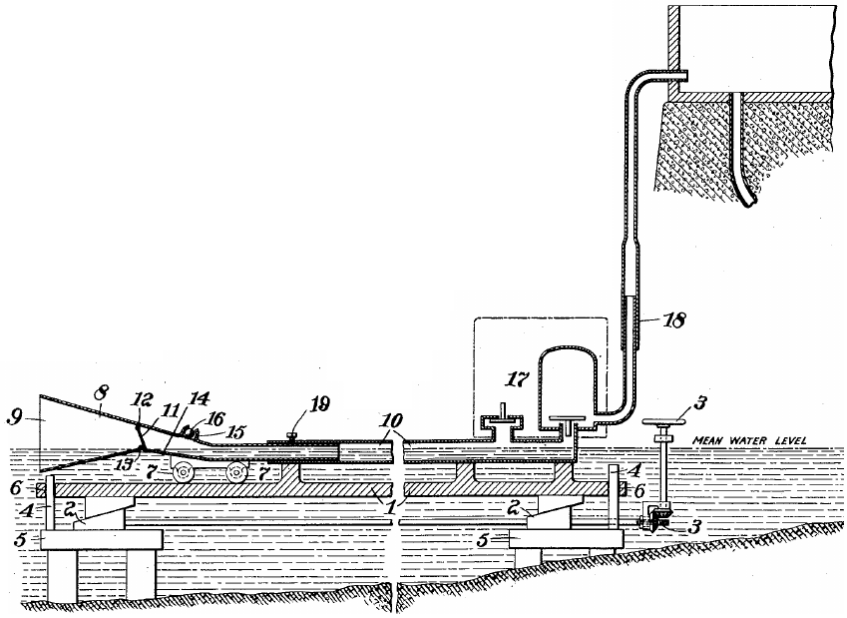



FIGURE 6.8 – Bélier hydraulique Lybrand Smith (SMITH, 1921)

La différence principale avec Grasset réside donc dans l'emploi du vide dans le réservoir en hauteur par Grasset, qui rend le procédé plus complexe mais facilite la régularisation de l'énergie récupérée.

Il est étonnant que les ingénieurs de la Commission de la houille bleue aient préféré prendre un brevet américain, et que, parmi la multitude des brevets français pour des machines houlomotrices, ils n'en aient pas choisi un. Peut-être ont-ils été séduits par la simplicité du procédé ; peut-être ont-ils voulu éviter toute revendication de priorité par des

92. Ni Lybrand Smith dans son brevet, ni Coyne ne précisent ce mode de conversion.

inventeurs français — Smith n'a probablement pas été en contact avec la Commission [93], qui est donc libre d'effectuer ses essais sans avoir de comptes à rendre. En tout cas, la construction du bélier Smith débute en 1925, la même année où Grasset brevette son invention. Le service maritime de Brest bénéficie, pour ces expériences qui s'échelonnent jusqu'en 1929, d'au moins quatre subventions successives, chaque année, pour un total qu'on peut évaluer à une centaine de milliers de francs [94].

Coyne choisit comme emplacement le pied du phare du Minou, dans le Goulet de Brest. Ce dernier est en effet « fréquemment battu par la houle du large », et la pointe du Petit Minou où il se trouve dispose d'un de ses « nombreux entonnoirs naturels où la mer se brise » (Coyne, 1939a, p. 85). La configuration de l'emplacement et son exposition à la mer sont en outre bien connus, pour avoir pu y construire le phare. Le premier « bélier du Minou », comme Coyne l'appellera quelques années plus tard, est progressivement constitué d'un bélier hydraulique entièrement conçu par Coyne (« les dimensions des béliers hydrauliques livrés dans le commerce étaient beaucoup trop faibles » pour les essais entrepris (Coyne, 1939a, p. 85)), d'une conduite et d'un entonnoir obtenus par le maçonnage d'une faille de roche. Après plusieurs ajustements, consistant principalement en l'agrandissement de la conduite et de l'entonnoir [95], les premières mesures sont effectuées en 1927 sur un appareil muni d'une conduite de 5 m de long, d'une chambre de compression d'air et d'un réservoir d'air comprimé, servant à évaluer la force emmagasinée.

Coyne, constatant une pression constamment significative dans la chambre, est satisfait, et en déduit que « l'emploi à la mer du bélier hydraulique permet de multiplier, par un coefficient fort important, la pression des lames et de rendre maniables, sous un potentiel relativement élevé et un volume assez restreint, les énormes masses d'eau que la mer met en jeu à faible pression » ; selon lui, « le premier résultat cherché [est] atteint » (Coyne, 1939a, p. 88). En 1928, Coyne est muté en Haute Dordogne, mais il confie à son successeur, Paul Pétry, le soin de reprendre la direction des expériences selon un programme qu'il a fixé [96]. En 1929, une nouvelle installation est construite, munie d'une conduite plus longue et plus large, (voir Figure 6.9) (Coyne, 1939b, p. 142), et mieux exposée à la mer grâce à des travaux de déroctage autour de la conduite [97]. Malgré une houle anormalement faible,

93. Il n'y en a en tout cas pas de traces dans les archives consultées.

94. La première, en 1925. La seconde, en 1926, pour pousser plus loin le tuyau de batterie, agrandir le clapet (rapport CHB 1926). La troisième, en 1927 et la dernière en 1928 et achevés en 1929, avec crédits de 25 000 francs (Rapport Lambert).

95. À un des stades de l'agrandissement de la conduite et de l'entonnoir, « la mer brisait avec fracas à l'intérieur » du dispositif, véritable « piège à vagues ». Le son de « jets stridents » s'entendait à plus d'un kilomètre à la ronde, mais l'énergie des vagues, s'échappant de tous côtés, n'était pas récupérée (Coyne, 1939a, p. 87-88).

96. AN 1977 0614/6, p.d., Pétry, Avis à propos d'une subvention pour de nouvelles expériences sur le bélier houlomoteur, 18/09/1929.

97. AN 1977 0614/6, p.d., Lambert, Rapport à propos de la destruction du bélier du Minou, 30/11/1929.

les mesures donnent une puissance comprise entre cinq et dix chevaux, correspondant à un rendement de 5 à 10% ce qui est conforme aux prédictions de Coyne. Pétry envisage ensuite de munir le bélier d'un réservoir supplémentaire d'air comprimé, et d'y installer des vannes plus performantes, afin d'améliorer le rendement de l'appareil [98]. Il obtient pour cela un avis favorable de la Commission de la houille bleue , et obtient une nouvelle subvention de 25 000 francs.

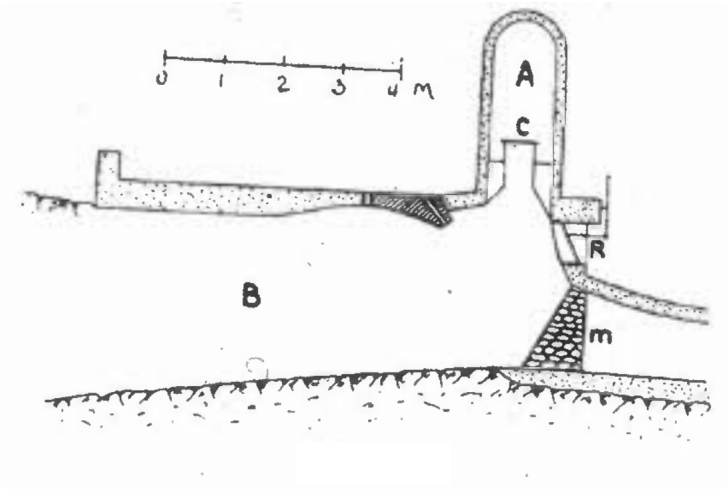



FIGURE 6.9 – Coupe du bélier du Minou installé en 1929 (COYNE, 1939b, p. 141)

Mais une nuit de novembre 1929, une violente tempête, lors d'une marée haute, vient interrompre ces expériences : « la mer poussée avec une violence inouïe a arraché le rocher, soulevé les deux réservoirs à air d'un seul bloc et les a projetés jusque sous les rochers du phare. » [99], cinquante mètres plus loin. « Ainsi mourut de sa belle mort le bélier du Minou », raconte Coyne (COYNE, 1939b, p. 142).

Lambert, ingénieur des Travaux publics de l'État qui a contribué à la mise en place et aux expériences du bélier depuis le début, note que la même nuit, « le mur du quai de Lampaul à Ouessant a été démoli, que des dégâts importants ont été causés aux ouvrages de Sein, et qu'une cale, en rade de Brest, a été en partie démolie » [100]. Pourtant, le vent enregistré n'est, pour un vent de tempête, pas exceptionnel (30 m/s) et c'est bien, selon Lambert, le bélier lui-même qui a pu donner une telle force à l'impulsion de la mer : « un coup de bélier bien franc que nous ne pourrons malheureusement jamais enregistrer ». Mais, au vu de la force ascensionnelle qu'il a fallu développer pour soulever d'aussi lourds blocs de béton, ce coup de bélier a dû être considérable. Pour l'ingénieur des TPE, comme pour Pétry, la conclusion est fatale : selon le premier, « cette avarie prouve que la mer

98. AN 1977 0614/6, p.d., Pétry, Avis à propos d'une subvention pour de nouvelles expériences sur le bélier houlomoteur, 18/09/1929.

99. AN 1977 0614/6, p.d., Lambert, Rapport à propos de la destruction du bélier du Minou, 30/11/1929.

100. AN 1977 0614/6, p.d., Lambert, « Rapport à propos de la destruction du bélier du Minou », 30/11/1929.

est une énergie inconstante, capricieuse et que son captage est un problème dont les données sont trop variables pour qu'il puisse être résolu pratiquement ». Selon le second, « capter la houle par coups de bélier serait toujours d'un mauvais rendement industriel, car la disproportion est trop grande entre la puissance des coups moyens et celle du coup maximum possible, nécessitant un équipement considérable pour une énergie moyenne très faible », aussi le brevet Smith n'est-il « pas susceptible d'application industrielle » [101]. Les deux ingénieurs demandent à annuler la subvention promise et les expériences sur le bélier du Minou s'arrêtent là.

Coyne, qui ne s'avoue que « momentanément » vaincu, conclut quant à lui, dans son rapport à la Commission de la houille bleue , de manière beaucoup plus optimiste à propos de l'intérêt du bélier hydraulique (Coyne, 1939a, p. 142-148). Selon lui, premièrement, l'accident aurait probablement pu être évité, et c'est l'imprudence d'agrandir successivement ses dimensions « sans renforcer en conséquence les attaches du bélier avec la roche » qui en a provoqué la démolition. Ensuite, la poursuite des expériences aurait certainement permis d'obtenir, non pas cinq à dix chevaux, mais une vingtaine de chevaux dans le réservoir d'air comprimé. Chose intéressante, pour Coyne, l'air comprimé est devenu, à terme, non un moyen de mesure, mais un moyen de conversion de l'énergie. Considérant le rendement global du procédé, Coyne n'imagine ainsi plus, comme dans le brevet de Lybrand Smith, l'élévation de l'eau pour utilisation *via* un convertisseur hydraulique, mais l'utilisation de l'air comprimé dans des turbines à air comprimé. Il juge faible mais pas rédhibitoire le rendement total qu'il évalue à 5 à 6%. En effet, en des littoraux mieux exposés que le Goulet de Brest (« en bordure des grands fonds », où la houle est moins amortie), et mieux découpés, la houle serait plus importante et plus régulière, et les frais d'installation seraient moindres — par exemple, dans des « criques naturelles ou des grottes ». La côte d'Ouessant s'y prêterait par exemple, mais le lieu de prédilection que désigne Coyne est le Maroc, où le marnage est en outre moins important. En se bornant ainsi à un rendement faible et à des appareils simples, « on peut espérer aboutir à un prix de revient acceptable », ce qui, dans un souci du rendement économique, qui est « le seul pour Coyne », est un résultat positif.

Malgré cet optimisme de Coyne, et même sans indice direct sur la réception de ces différents rapports par les ingénieurs de la Commission de la houille bleue , on peut soupçonner qu'ils ont contribué au rejet catégorique de toutes les demandes ultérieures de subvention de groupements pour l'utilisation de la houle et des vagues. D'une part, d'un point de vue technique, il s'agit de petites puissances, d'un faible rendement, de machines, selon les dires de Coyne, simples, et c'est l'air comprimé qui est utilisé, non l'électricité. Tous ces paramètres sont contraires aux directions insufflées par les ingénieurs de la Commission

101. AN 1977 0614/6, p.d., Paul Pétry, Avis à propos de la destruction du bélier houlomoteur, 05/12/1929.

pour l'exploitation de la houille bleue : grandes puissances, systèmes sophistiqués, rendement maximal (couplé certes avec des exigences de régularité et de coût d'installation) et enfin, point crucial, production d'électricité. D'autre part, si l'on considère les aspects géographiques et administratifs, les deux régions désignées par Coyne sont la Bretagne, où les marées ont été explicitement privilégiées par la Commission, et le Maroc, territoire pour lequel cet organisme du ministère des Travaux publics métropolitains ne se sent pas concerné.

De cette étude de cas, on peut tirer les conclusions suivantes : d'une part, que la Commission de la houille bleue a probablement nourri ses réticences envers l'utilisation de l'énergie des vagues et de la houle des résultats de ces expériences qu'elle a elle-même impulsées. Le rendement économique n'a manifestement pas été le plus important dans leur positionnement, mais ce fut plutôt leur imaginaire technicien d'ingénieurs aménageurs de grands corps de l'État, les poussant à privilégier de grandes puissances, et plus précisément de grandes puissances électriques. L'imaginaire technicien exprimé par Coyne est aussi caractéristique, puisqu'il veut, dans des réservoirs d'air comprimé, « emprisonner cette énergie mouvante et capricieuse qu'est celle de la houle » (Coyne, 1939b, p. 142), selon lui la « seule source d'énergie industrielle » de la mer (Coyne, 1939a, p. 79).
L'intérêt personnel de Coyne pour la question paraît avoir été essentiel jusqu'à son remplacement par Pétry, auquel le sujet semble avoir moins tenu à cœur. Pétry a en effet annulé les subventions qui étaient allouées pour de nouvelles expériences alors que des travaux auraient pu, et dû selon Coyne, être poursuivies pour être parachevées.
Il est aussi remarquable qu'en 1936, devenu célèbre pour comme concepteur de grands barrages hydrauliques de houille blanche, d'une tout autre ampleur que le bélier du Minou, Coyne s'excuse presque auprès des membres de la Société hydrotechnique de France de leur présenter ces travaux qu'il juge alors « sans grande portée » et qu'il assimile à un « péché de jeunesse » (Coyne, 1939b, p. 148). Il relativise ainsi l'importance qu'il a accordée à ces travaux, et qu'il ne juge plus à la hauteur de son envergure. Toujours est-il qu'en période de regain d'intérêt pour les forces naturelles, il juge opportun de publier ces résultats dans une revue dédiée à l'hydraulique. Coyne, célèbre chez les historiens de l'énergie hydraulique, a commencé sa carrière dans ce domaine par la forme la moins noble de houille bleue, avant de passer aux installations de houille blanche les plus ambitieuses.
Enfin, on peut constater que pour ce projet, la crise des années 1930 n'est pour rien dans l'arrêt des expériences : une subvention était à disposition, elle a été refusée par absence de foi envers l'intérêt des travaux menés.

Quoiqu'il en soit, le cadavre du bélier du Minou est encore, de nos jours, visible derrière le phare, presque un siècle après sa destruction (voir Figure 6.10). Il est fort probable que la majorité des promeneurs qui viennent y profiter du beau point de vue offert par la rade de Brest ne prêtent pas attention à cette espèce de cylindre de béton vermoulu d'où sortent

les armatures à nu, ni, à son pied, à cette canalisation comme fondue dans la roche, ni, enfin, à la forme particulière des roches environnantes, dont on aperçoit pourtant toujours la taille destinée à faciliter la pénétration des lames dans la conduite. Sûrement bien plus rares encore sont ceux qui savent que cet objet étrange a été un jour destiné à convertir l'énergie de la houle, et qu'il a connu le nom coquet de bélier du Minou.



FIGURE 6.10 – Photo des restes du bélier du Minou prise en décembre 2016

## Jules Richard, le rotor de Savonius, l'ondo-pompe Cattaneo (Musée océanographique de Monaco, 1929-1933)

Le cas de Jules Richard (1863-1945) est intéressant à plusieurs titres. D'abord, son ondo-pompe reste, à ma connaissance, et mis à part les différents aéromoteurs en usage dans les campagnes, le seul convertisseur innovant de forces naturelles (autre que certains aéromoteurs) qui soit devenu et resté durablement opérationnel dans l'entre-deux-guerres. Richard illustre en outre les liens que les acteurs des différents projets d'exploitation des forces naturelles ont pu avoir entre eux : acteur de la houille bleue, mais aussi de la houille jaune, il a également participé à la mise au point du distillateur solaire avec l'ONRSI. Mais s'il se disait lui-même promoteur de l'exploitation de la houille bleue dans sa volonté

de tester des appareils houlomoteurs, Richard a la particularité d'être resté à l'écart de la Commission de la houille bleue , dont il n'a pas eu besoin puisqu'il disposait des moyens financiers du laboratoire privé dont il était directeur. Dans la typologie des projets du Chapitre 5, l'ondo-pompe Cattaneo de Jules Richard ferait donc partie de la deuxième catégorie. Enfin, Richard n'est pas, comme la majorité des acteurs étudiés dans l'entre-deux-guerres, un ingénieur, et son appartenance revendiquée à une discipline scientifique en construction, l'océanographie, a été centrale dans ses travaux sur l'énergie des vagues et de la houle.

**6.4.0.0.2** ***Richard, océanographe et personnage central du Musée océanographique de Monaco*** Les profils scientifique et institutionnel de Richard (océanographe et directeur du Musée océanographique de Monaco) éclairent le travail qu'il a mené pour travailler sur l'énergie de la houle et des vagues dans l'entre-deux-guerres.

Richard est nommé en 1900 directeur du Musée océanographique de Monaco dès sa création par le Prince Albert Ier. Il est en effet secrétaire de ce dernier lors de ses campagnes océanographiques à partir de 1887, ce qui lui vaut toute la confiance du mécène [102]. L'océanographie est, pendant la deuxième moitié du XIX$^{e}$ s, une science en construction, et connaît un engouement au niveau international [103]. Par ses campagnes, puis par la création du Musée et, enfin, en 1906, de l'Institut océanographique à Paris, dont dépend le Musée, le Prince Albert cherche à participer activement à ce mouvement, et à y inscrire la France d'où elle est alors absente (Deacon, 1997, p. 90-91). Le Musée doit ainsi constituer un lieu de recherches scientifique, de diffusion des connaissances mais aussi de vulgarisation [104].

Directeur du Musée jusqu'à sa mort, Richard s'est, selon les dires de ses collègues, attelé à cette tâche avec une dévotion particulière, comme en témoignent certaines notices nécrologiques écrites par ses collègues [105]. Il est central dans le fonctionnement du Musée,

102. Autres signes de confiance du Prince envers Richard, relevés par son collègue océanographe Camille Vallaux : il le nomme en 1921 « conseiller privé », et le désigne, dans son testament, « le premier de ses quatre exécuteurs testamentaires » (Vallaux, 1946, p. 11).

103. Le terme *oceanography* s'est ainsi généralisé sur le plan international à la fin du siècle.

104. Selon Vallaux, Albert I$^{er}$ veut en fait un « temple de la science et même des arts de la mer, et à la fois un centre d'étude pour les hommes de science et un centre d'attraction pour la curiosité des publics des deux mondes » (Vallaux, 1946, p. 13).
D'après Richard, selon Carpine, l'ambition première d'Albert 1er est de « fonder un établissement destiné à recevoir et à mettre en valeur les collections plus spécialement zoologiques et très importantes qu'il a réunies pendant les campagnes scientifiques qu'il poursuit depuis 1885 [...] Mais ensuite une idée plus large est venue au Prince, traduite par le titre de Musée océanographique ; c'était dire que le nouveau Musée n'abriterait pas seulement les collections et l'instrumentation particulière du Prince, lais qu'il serait destiné à contenir tout ce qui, d'une façon générale, se rapporte à l'Océanographie » (Carpine, 2002, p. 179).

105. Voici en effet ce qu'en a dit Vallaux, un de ses collaborateurs à l'Institut océanographique, en 1945 : « Toute la vie de notre ami a été consacrée à l'Océanographie et au prince Albert 1er, qui nous a donné le Musée de Monaco et l'Institut Océanographique de Paris, où nous sommes ici. En 1921, il avait

à tel point que selon l'un de ses collègues, « le Musée est bien l'œuvre personnelle de Richard » (Alfred LACROIX, 1946), et, selon un autre, qu'il en est devenu le « maître artisan » (VALLAUX, 1946, p. 11). Sa vision de l'océanographie et de ses objectifs reflètent bien la vocation qu'il donne au Musée. Selon lui, l'océanographie est, d'une part, une science interdisciplinaire par essence [106] , et d'autre part, elle doit aussi servir à des buts industriels [107]. C'est ainsi que Richard, biologiste de formation, s'intéresse à l'exploitation de l'énergie des vagues, et qu'il considère que « l'utilisation de l'énergie de la mer » est tout à fait dans les attributions de [l'] Institut [océanographique de Monaco] » (J. RICHARD, 1931).

Un dernier aspect intéressant du profil de Jules Richard, du point de vue dont il est ici question, est son inclination pour la pratique et la mise au point d'instruments. Dans les notices nécrologiques de l'Académie des sciences, les auteurs dépeignent l'« esprit d'invention remarquable » (DURAND-VIEL, 1946) dont Jules Richard fait preuve tout au long de sa carrière. Une liste d' « instruments d'océanographie inventés par le docteur Richard ou dont il a favorisé la réalisation » est dressée dans le numéro spécial du *Bulletin de l'Institut océanographique*, et parmi cette vingtaine d'inventions on trouve le distillateur solaire, à l'élaboration duquel il a largement participé, et la « pompe à eau de mer utilisant la houle comme force motrice » [108]. Ces deux inventions sont ici présentées comme des « instruments d'océanographie », ce qui est révélateur de la façon dont Richard les considère. Le distillateur solaire peut en effet être utilisé entre autres pour distiller l'eau de mer, et l'ondo-pompe a un rapport évident avec la mer, d'une part car il exploite une énergie marine, et d'autre part, puisqu'elle sert finalement à alimenter l'aquarium des tortues du Musée.

**6.4.0.0.3** ***Premiers travaux sur l'énergie des vagues et de la houle*** Le premier signe d'un intérêt de Richard pour l'utilisation de la force des vagues se trouve dans l'ouvrage l'*Océanographie*, publié en 1907, dans lequel il fait un état de l'art des recherches océanographiques selon sa propre conception de la discipline. Il consacre un chapitre à l'étude des vagues, où il évoque leur puissance, citant un article de *La Nature* paru en 1906. Celui-ci étudie la mesure de l'intensité du choc des vagues sur des obstacles, notamment des parois verticales, à l'aide de « dynamomètres », dont celui d'un ingénieur

nommé Richard conseiller privé, et l'avait désigné dans son testament le premier de ses quatre exécuteurs testamentaires. ».

106. Voici la définition qu'il en donne en 1907, dans un ouvrage où il fait un état de l'art de l'océanographie : « L'océanographie étudie l'histoire naturelle de la mer, si l'on prend cette expression d'histoire naturelle dans son sens le plus large, c'est-à-dire que cette science étudie les phénomènes naturels qui se passent dans le sein des eaux marines tant au point de vue mécanique qu'aux points de vue physique, chimique et biologique. »

107. « L'océanographie n'est pas une simple spéculation scientifique [...] elle offre un intérêt immédiat et direct au point de vue des applications industrielles et des pêcheries (J. RICHARD, 1907). »

108. *Bulletin de l'Institut océanographique*, n°892, 24 janvier 1946.

anglais, Thomas Stevenson. Sa préoccupation concerne plutôt la résistance d'ouvrages d'art exposés au choc des vagues. Richard reprend ses résultats, et ajoute succinctement que « c'est un des grands problèmes qui restent à résoudre pour l'asservissement de la nature à l'homme, que celui de l'utilisation de l'énergie inépuisable dont la mer est le réservoir » et qu'« un jour ou l'autre il devra être résolu » [109] (J. RICHARD, 1907, p. 155-156). Quelques années plus tard, alors que les initiatives en faveur de l'exploitation de la houille bleue fleurissent en France, Richard détourne effectivement le dynamomètre de Stevenson non pour mesurer l'intensité des vagues mais pour l'exploiter.

C'est en effet dans les années 1920 que Richard s'attelle au problème de l'utilisation des vagues en tant que tel. Plusieurs raisons l'expliquent : évidemment, l'engouement pour la houille bleue ; mais aussi, peut-être, le désir d'assurer une place au Musée océanographique de Monaco parmi les nombreuses institutions alors consacrées à l'océanographie, dans une période où la discipline s'est largement institutionnalisée et où plusieurs laboratoires publics ont été créés en France [110]. La participation à la mise au point de machines houlomotrices pourrait ainsi assurer la place d'institution à vocation industrielle que Richard veut conférer au Musée.

D'abord, en 1924 et 1925, Richard entre manifestement en contact avec les ingénieurs algérois Pinard et Sala, à propos de la mise au point d'une station d'utilisation de l'énergie des vagues sur le littoral algérien. Dans le *Bulletin de la SEIN*, où ils font part des résultats des expériences effectuées par l'entreprise, ils citent en effet Jules Richard parmi les « spécialistes éminents » qui, « séduits par la nouveauté de [leur] système », « veulent bien [les] encourager et les aider de leurs conseils » (PINARD et SALA, 1925, p. 134). Richard en tant qu'océanographe est donc ici utilisé comme caution pour la qualité des travaux effectués.

C'est ensuite qu'il passe à la mise en pratique, testant trois appareils différents pour l'élévation de l'eau dans les aquariums du Musée : son idée est que, pour d'autres usages, l'accumulation d'eau de mer dans des réservoirs permet d'obtenir une « chute régulière » qui « pourra donner une énergie constante » (J. RICHARD, 1931, p. 5).

Un des premiers appareils qu'il expérimente est le dynamomètre de Stevenson. Donnant une réalisation à l'idée qu'il a évoquée dans son ouvrage de 1907, il teste ainsi en 1929

109. Il invoque un argument rare parmi les acteurs de l'exploitation des forces naturelles : grâce leur utilisation, « les mines de houille finiraient de faire des victimes » (J. RICHARD, 1907, p. 155-156).

110. Selon François Carré, l'océanographie, avec ses expéditions coûteuses, est passée d'une science encouragée par de riches mécènes, souvent amateurs devenus savants autodidactes (Albert de Monaco, Jean Charcot par exemple) pour la période fin XIX$^{e}$-début XX$^{e}$ à une science plus institutionnalisée. En effet, trop coûteuses pour être encouragées par des particuliers même fortunés, « la plupart des campagnes océanographiques sont financées par des fonds publics et les océanographes deviennent des professionnels, formés scientifiquement à l'université ou dans des instituts spécialisés » (F. CARRÉ, 2001, p. 189). René Taton mentionne ainsi que de nombreux « laboratoires maritimes » sont créés à cette période (TATON, 1983, p. 684).

un « petit modèle de démonstration » de cet appareil de mesure, détourné pour produire de l'énergie (J. RICHARD, 1930, p. 43). L'appareil est constitué « d'un disque faisant face à la mer porté par 4 tiges [...] fixées à sa partie postérieure », qui traversent un cylindre accroché à un mur ou à un rocher. Le cylindre est fermé par un couvercle auquel est fixé un ressort, lui-même également fixé au milieu des tiges. La force des vagues pousse le disque à l'intérieur du cylindre, et le ressort le rappelle dans l'autre sens pour qu'une lame le frappe à nouveau (BONNIN, 1906 [111]). Lorsque le dynamomètre est utilisé comme appareil de mesure, c'est la déformation du ressort qui est utilisée pour évaluer la force reçue par le disque. Les tiges servent à exercer sur le ressort la force des lames. Comme appareil d'exploitation de l'énergie, selon l'idée de Richard, la tige est utilisée cette fois-ci comme le piston d'une pompe qui élève l'eau dans un réservoir. Richard ne donne pas les détails de son installation mais se dit satisfait de ces expériences au point d'envisager la construction d'un modèle de taille plus importante. Il n'en fera cependant rien, se focalisant sur deux autres procédés.

Parallèlement, Richard expérimente en effet une autre invention. Le rotor de Savonius, du nom de son inventeur finlandais Sigurd Savonius, a fait l'objet d'un article en avril 1928 par l'ingénieur Raymond Sancery dans la *Science et la Vie* (SANCERY, 1925). Le rotor y est présenté comme un convertisseur exploitant, non la houille bleue, mais la « houille aérienne ». Il présente la particularité d'utiliser un phénomène de dynamique des fluides, « l'effet Magnus ». Selon celui-ci, « [s]i un cylindre tourne dans un courant d'air, une force apparaît, tendant à déplacer le cylindre perpendiculairement à la direction du vent » (SANCERY, 1925, p. 296). Savonius n'est alors pas le seul à vouloir tirer parti de l'effet Magnus grâce à un aéromoteur. En effet, au même moment, l'ingénieur allemand Anton Flettner est connu dans le monde entier pour avoir mis au point les « rotors Flettner » utilisés pour la propulsion partielle d'un navire grâce au vent, et celui-ci exploite l'effet Magnus (cf 5.4). Savonius a d'ailleurs testé, outre le pompage de l'eau et la production d'électricité, la propulsion d'un navire grâce à son rotor.

Le rotor de Savonius est constitué de deux demi-cylindres, constituant deux aubes, décalés latéralement l'un par rapport à l'autre. Sur chacun de ces cylindres, s'exerce non seulement la pression du vent mais également l'effet Magnus. En raison de sa forme, il tourne toujours dans le même sens, quelle que soit la direction du vent (voir Figure 6.11).

Sancery mentionne également la possibilité d'utiliser le rotor de Savonius comme « roue hydraulique », qui permettrait « une transformation directe de l'action des vagues en mouvement de rotation » [112]. Richard, qui a lu cet article, se propose d'explorer cette possibilité

111. Il s'agit de l'article cité dans J. RICHARD, (1907)

112. Selon ses propres dires, Sancery s'intéresse aux « sources d'énergie les plus variées », et mentionne les différents articles qu'il a écrits dans la même revue à ce sujet : deux articles sur la « houille bleue », et deux articles sur la « houille aérienne ».

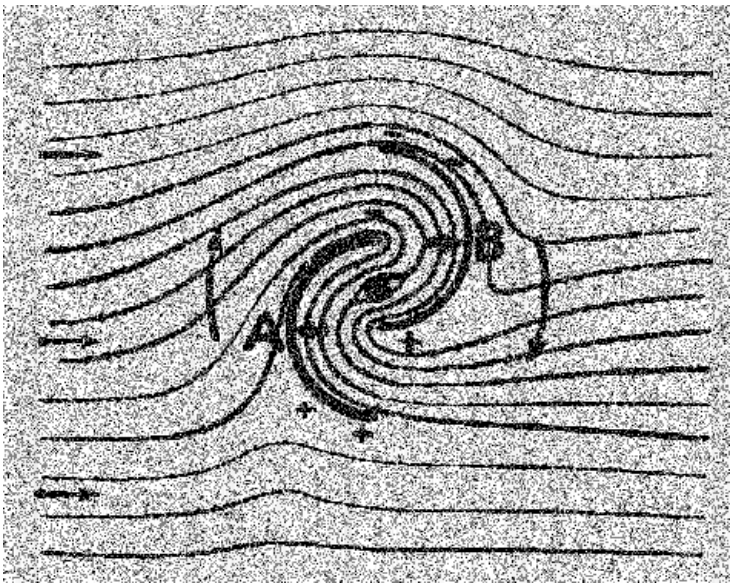


FIGURE 6.11 – Principe du rotor de Savonius (SANCERY, 1925, p. 296)

pour l'alimentation en eau des aquariums du Musée. Il argumente que « [l]'utilisation des vagues peut dans bien des cas être plus avantageuse que celle du vent », car « il peut y en avoir, même de très fortes, au bord de la mer, alors qu'il n'y a pas de vent » (J. RICHARD, 1931). Il souligne, à son tour, que l'utilisation de l'énergie des vagues est une solution intéressante pour les mers sans marées. Il contacte d'abord Sancery pour avoir des détails sur le rotor que Savonius a testé dans un courant d'eau douce. Ceux-ci le convainquent que ce système est « tout indiqué pour utiliser l'énergie des vagues qui viennent se briser sur les rochers au pied du Musée océanographique de Monaco » (J. RICHARD, 1931, p. 1-2). Grâce à l'aide de Savonius lui-même, avec lequel il est entré en correspondance par le biais de Sancery, il fait construire et tester au Musée, entre 1929 et 1931, deux prototypes de pompes à rotors de Savonius. Savonius l'encourage en effet, et lui fournit les plans d'une machine adaptée à la situation du Musée et à une élévation d'eau à 35 m.

Le plus grand d'entre eux, construit entre 1929 et 1930, est muni de trois rotors en acier d'1.20 m de long et 0.8 m de large, disposés sur un arbre horizontal. Celui-ci, scellé dans des rochers grâce à une structure métallique, est installé à 10 cm en-dessous du niveau moyen de la mer (voir Figure 6.12). L'appareil est en place entre août 1930 et mai 1931. En partie détruit et très corrodé, il est alors retiré.

Richard conclut de ces essais que « le rendement est [...] très mauvais sur les côtes rocheuses ». En effet, l'eau est élevée de façon très irrégulière en raison de la direction et de la force très variable des ondes qui se réfléchissent sur les nombreuses parois rocheuses, alors que le rotor ne fonctionne qu'avec de l'eau arrivant dans certaines directions. Mais, comme le bélier hydraulique de Coyne, il serait adapté aux littoraux sans marées et sans rochers (J. RICHARD, 1931, p. 9). Pour le Musée océanographique, Richard se tourne donc

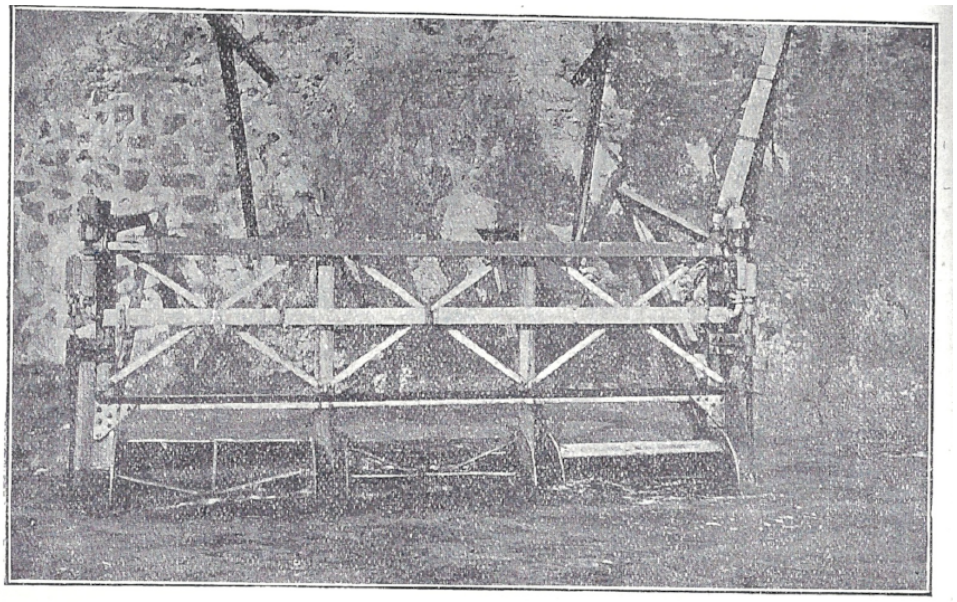


FIGURE 6.12 – Rotor de Savonius triple testé au Musée océanographique de Monaco entre août 1930 et mai 1931 (J. RICHARD, 1931, p. 8)

vers un autre type de pompe à vagues : l'ondo-pompe de Cattaneo.

#### 6.4.0.0.4 *Rencontre avec Francesco Cattaneo et installation de l'ondo-pompe*

En juin 1931, Richard reçoit en effet la visite de Francesco Cattaneo, un inventeur italien qui a pris connaissance de ses travaux et souhaite voir le rotor de Savonius [113]. Lui-même a installé près de Gênes, à Voltri, à quelques dizaines de kilomètres à l'Est de Monaco, une « station expérimentale des forces motrices marines » où il teste six appareils différents utilisant les marées, les vagues, les courants marins. Il a d'ailleurs présenté ces installations au XIII$^{ème}$ congrès international de navigation, qui a eu lieu à Londres en 1923, et où De Rouville, également présent, a prononcé une communication sur les travaux français concernant la houille bleue (CATTANEO, 1923). Un modèle de son « ondo-pompe », construit à ses frais, fonctionne depuis 1917 à Voltri, et produit de l'énergie électrique. Ses brevets pour l'exploitation des énergies marines (deux en 1918, deux en 1928) sont pris en France [114]. Il a en outre probablement contacté la Commission de la houille bleue [115], certainement pour obtenir un soutien financier — mais il n'en a pas plus obtenu que les inventeurs de machines houlomotrices français. Ces deux indices montrent qu'il en imaginait des applications de ses inventions plutôt en France qu'en Italie.

L'ondo-pompe Cattaneo qui intéresse Jules Richard est celle que Cattaneo appelle

113. Probablement par la lecture des articles de Richard sur le sujet dans les revues scientifiques et techniques

114. Brevets n°490.041 ; 490.085 ; 662.421 ; 662.453.

115. Dans les archives de la Commission de la houille bleue , son nom est mentionné à plusieurs reprises dans les notes de De Rouville, secrétaire de la Commission, sans que soit précisée la nature du lien entre lui et la Commission (AN 1977 0313/46, p.d.).

« ondo-pompe-flotteur ». Il s'agit d'un flotteur cylindrique (EF) installé dans un puits de même forme, dont le milieu est situé au niveau moyen de la mer et dont le fond communique avec la mer (J. RICHARD, 1933b) (voir coupe Figure 6.13). Des tubes plongeurs (Pp) formant les pistons de deux conduites de refoulement sont fixés verticalement au flotteur. Le niveau du puits oscille au gré des mouvements verticaux des vagues de la mer. Lorsqu'une vague s'engouffre, le flotteur, guidé par des tiges verticales, monte avec les pistons ; puis, lorsque le niveau redescend, le poids du flotteur l'entraîne vers le bas avec les pistons qui refoulent l'eau, par le biais des deux conduites, dans les réservoirs en hauteur. Afin que le poids du flotteur soit suffisant à cet effet, celui-ci est divisé en deux parties : l'une, supérieure, vide et fermée hermétiquement (F), et l'autre, en libre communication avec l'eau du puits et, de ce fait, remplie d'eau (E). Lorsque le niveau d'eau monte dans le puits, le seul poids à soulever est celui de la chambre d'air ; lorsqu'il redescend, le poids de l'eau de la chambre inférieure s'ajoute à celui de la chambre d'air, puisque le flotteur descend plus lentement que le niveau de l'eau en raison de la résistance de l'eau aux pistons dans les conduites de refoulement.

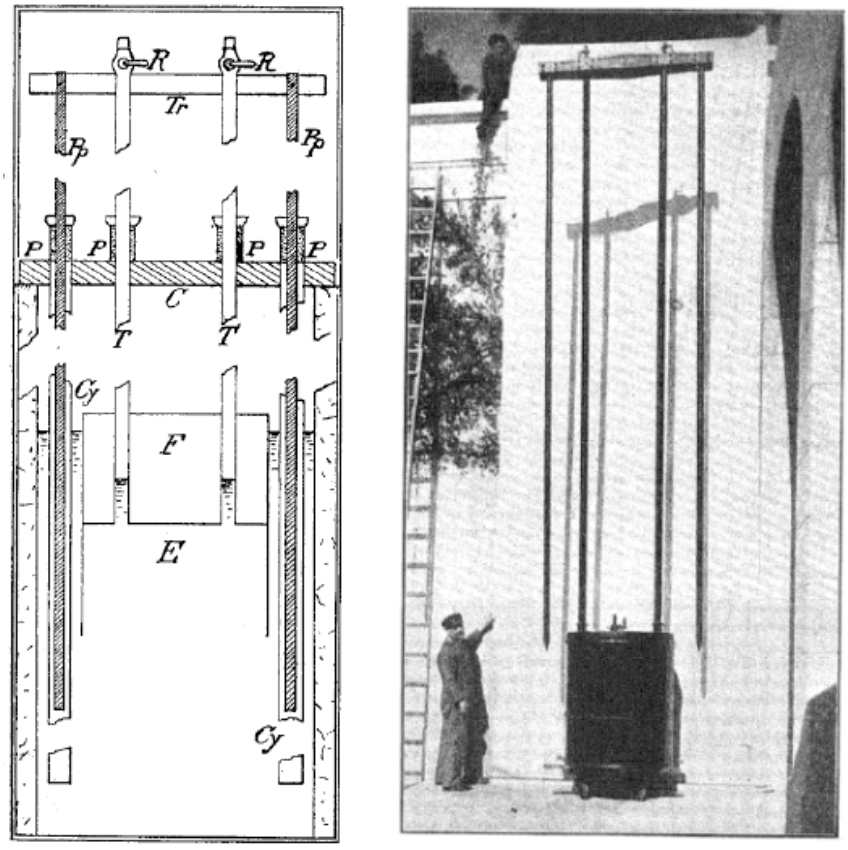



FIGURE 6.13 – Coupe et photo de l'ondo-pompe Cattaneo installée au Musée océanographique de Monaco en 1930-1931 (J. RICHARD, 1933a, p. 529-530)

Certainement d'abord convaincu par le caractère opérationnel de l'installation de Cattaneo (qui fonctionne alors depuis douze ans et actionne des appareils électriques) dans une situation géographique proche de celle de Monaco, Richard estime que l'ondo-pompe

pourrait être adaptée pour l'usage qu'il veut en faire. Il rend à son tour visite à Cattaneo en 1931 à Voltri et décide de faire construire une pompe similaire au Musée pour alimenter ses aquariums. Cattaneo conçoit pour lui un plan adapté à la situation du Musée océanographique. Un modèle, puis un autre, sont ainsi successivement construits entre décembre 1931 et mars 1933. Le dernier modèle est muni d'un flotteur en cuivre [116] d'1 m de diamètre et 1.20 m de hauteur (voir photo Figure 6.13). Le puits de 6 m dans lequel se meut le flotteur est creusé dans la roche, ce qui a représenté une opération particulièrement délicate. L'installation permet d'élever à 51 ou 64 m de hauteur une quantité d'eau comprise entre 500 et 2500 L d'eau par heure, ce qui répond parfaitement à ce qu'escomptait Richard (J. Richard, 1933b). À la mort de Richard, en 1945, la pompe alimente toujours l'aquarium (Durand-Viel, 1946, p. 6).

Selon Richard, l'ondo-pompe remplit ainsi les missions du Musée à de nombreux titres. Du point de vue des applications industrielles, il conclut en effet que l'ondo-pompe « pourrait être installée en une foule de points de la Méditerranée », pour la production de grandes puissances électrique dans cette mer sans marées, grâce à des installations comme celles de Voltri où l'eau emmagasinée est ensuite turbinée et convertie en électricité (J. Richard, 1933b, p. 14-17). La contribution du Musée est d'avoir montré l'exemple et rendu visibles les résultats pratiques positifs de cette invention. En outre, elle sert directement au fonctionnement du Musée, d'une part en puisant une eau plus saine pour les animaux des aquariums qu'auparavant, car puisée plus en profondeur, d'autre part en minimisant le recours à l'utilisation de l'électricité, de plus en plus coûteuse. Afin d'assurer à ces résultats la plus grande visibilité, Richard publie ces résultats dans les *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences* (il était correspondant de l'Académie des sciences), *Le génie civil*, *La Nature*, le *Bulletin de l'Institut océanographique de Monaco*.

L'étude du travail de Jules Richard sur l'exploitation de l'énergie des vagues montre donc le cas particulier d'un océanographe qui, sensible aux questions industrielles du moment, a cherché à contribuer à la mise au point de machines houlomotrices. Le contexte de pénurie énergétique, et l'engouement national, en France, pour la houille bleue, ont été déterminants dans ces expérimentations, dont Richard avait déjà émis l'idée en 1907, mais qu'il ne choisit de mettre en pratique que dans les années 1920. Mais tout aussi important dans ces travaux a été son regard d'océanographe, et notamment celui du praticien, qui imagine détourner un instrument de mesure de l'énergie des vagues pour exploiter ces dernières. En outre, sa position de directeur d'une institution privée dédiée à une discipline dont il revendique la vocation d'applications à l'industrie, lui permet de justifier la pertinence de ces expérimentations au sein du Musée et d'obtenir les moyens

116. Le cuivre est laqué avec un produit spécial pour le protéger de l'action chimique de l'eau de mer. Il s'agit de la « laque d'Indochine », dont Richard semble avoir pris connaissance par le *Bulletin de la SEIN* ; et qu'il recommande vivement pour la protection des métaux en mer (J. Richard, 1933a, p. 7-8).

financiers pour les mener. Un dernier aspect intéressant est le fait que Richard n'ait pas été inventeur de ses procédés mais qu'il ait mis en pratique des procédés imaginés par d'autres inventeurs, en l'occurrence tous étrangers. Ceci met en évidence, d'une part, l'importance des revues scientifiques et techniques, qui, pour chacune des trois inventions, avaient mis au courant Richard de leur existence. D'autre part, l'existence de liens internationaux entre acteurs, et donnent raison à David Edgerton dans sa critique des histoires nationales des techniques qui selon lui ne se justifieraient pas dans la majorité des cas (Edgerton et Pestre, 1998).

## 6.5 Synthèse Chapitre 6

La houille bleue a donc fait l'objet d'une véritable dynamique d'innovation en France dans l'entre-deux-guerres, avec une volonté de la part du ministère des Travaux publics d'inscrire cette houille colorée dans le programme d'électrification du territoire au même titre que la houille blanche, mais aussi une mobilisation de nombreux acteurs de plusieurs types. Ont ainsi été rencontrés dans cette dynamique : ministère des Travaux publics, ingénieurs des services techniques de l'État, (très nombreux) inventeurs, nouvelles entreprises spécifiquement créées, grandes entreprises du secteur de l'énergie, conseils généraux des départements du Nord-Ouest, sans parler de la presse, scientifique et technique ou locale. Le rapport de force a été très clairement en faveur des ingénieurs de la Commission de la houille bleue , qui ont orchestré cette dynamique dans le cadre d'une politique énergétique qui se dessine comme celle de la construction d'un réseau national interconnecté alimenté par des centrales électriques puissantes.

L'étude de la Commission de la houille bleue a ainsi montré l'ambition de la part du ministère des Travaux publics et de ses ingénieurs des Ponts et chaussées de mailler l'ensemble de la France avec le réseau électrique et d'équilibrer au maximum l'approvisionnement par l'utilisation de ressources locales. En cela, elle témoigne, à la fois, de la part de ces ingénieurs, d'une vision globale du territoire français en termes de ressources énergétiques, et d'autre part, d'une certaine percée de l'électricité dans l'imaginaire technicien français. En effet, les ingénieurs de la Commission se basent sur la possibilité supposée d'exploiter cette nouvelle source d'énergie en poursuivant le modèle de développement du système énergétique tel qu'il se dessine en France : une production d'électricité répartie en zones stratégiques, l'allongement et la densification du réseau de distribution. Le pic d'activité de la Commission de la houille bleue , ainsi que de l'activité inventive menant à des propositions de projets, a justement lieu entre 1919 et 1923, au moment de l'entre-deux-guerres où la construction du réseau électrique suit le rythme le plus important (Lévy-Leboyer, 1994b, p. 30-31). Cependant, au sein du Comité technique chargé du

programme d'électrification hydraulique du ministère des Travaux publics, la houille bleue n'est finalement restée qu'une petite partie expérimentale et prospective : elle est minoritaire en termes de budget et de personnel impliqué, et elle est finalement nulle en termes de réalisations. La crise financière met en effet un terme au projet d'usine marémotrice de l'Aber Wrac'h déjà retardé par des réticences parlementaires.

D'un point de vue technique, deux éléments sont remarquables : d'une part, donc, la prépondérance de l'électricité dans tous les projets proposés, qu'ils concernent les marées ou les vagues ; d'autre part, le choix de la Commission de valoriser les grandes puissances et les systèmes à vastes bassins de rétention, et donc les marées. Pour être utilisable comme la houille noire, la houille bleue, comme la houille blanche, doit ainsi être stockée et régulée au moyen de retenues d'eau et distribuée à distance grâce au réseau électrique. Ceci explique la faveur qu'ont obtenue les marées par rapport aux vagues, en plus des dispositions géographiques favorables par lesquelles d'une part les marées sont d'une remarquable importance là où manquent houille noire et houille blanche, et d'autre part le découpage de la côte facilite la construction de bassins de rétention.

Le désintérêt du ministère des Travaux publics pour la houle et les vagues n'a pas été pas total puisque les expériences de Coyne à la pointe du Minou ont été subventionnées par l'État. Mais malgré l'optimisme de cet ingénieur vis-à-vis de ses expériences sur le bélier du Minou, celles-ci ont confirmé les réticences des ingénieurs de la Commission à propos de l'exploitation de la houle. Selon moi, cette expérience a davantage constitué la justification bien commode d'un avis *a priori* défavorable des ingénieurs de la Commission, qu'un argument ayant véritablement pesé dans leur jugement sur la validité des procédés houlomoteurs. Ceci n'a cependant pas découragé des inventeurs de former des groupements pour exploiter cette forme plus irrégulière et considérée comme inférieure de houille bleue. Ils inventent et expérimentent des convertisseurs de formes diverses (flotteurs, roues, pistons), montrant qu'aucun système n'est privilégié, mais ils font très souvent appel à une accumulation d'eau pour la régulation. Les promoteurs de ces projets imaginent une complémentarité spatiale des houilles noire, blanche et bleue grâce au réseau électrique, les deux formes de houille bleue étant également complémentaires entre elles. C'est bien le cas des porteurs de projets ayant pour application le littoral algérien, où quelques expérimentations sont menées mais abandonnés faute de l'aide escomptée.

Si l'on fait le bilan de l'action de la Commission de la houille bleue , on peut constater qu'elle a à la fois été un stimulant pour des projets d'utilisation de la houille bleue, par l'intérêt manifeste du ministère des Travaux publics et la possibilité de subventions qu'elle représentait, mais qu'elle a surtout découragé la majorité d'entre eux, en refusant la concession de beaucoup de sites et en accordant parcimonieusement quelques subventions. Ainsi, la foison de propositions visant à exploiter cette houille colorée, non seulement n'a,

la majorité du temps, pas été soutenue (refus de subvention), mais ces initiative ont aussi souvent été carrément empêchées (refus de concession), car ne correspondant pas à la vision par les ingénieurs du ministère des Travaux publics de ce que doit être le développement idoine du système énergétique français — grandes puissances, régularité, passage par l'électricité, selon un modèle conforme à l'imaginaire de la civilisation thermo-industrielle.

Paradoxalement, c'est la houle, cette forme « dégradée » de houille bleue, qui a donné lieu aux seules mises en œuvre pratiques, et ce sans l'aide de la Commission, comme le montrent le laboratoire de Grasset, dont une bonne partie d'un imposant bâti a été construite, ou l'ondo-pompe Cattaneo, invention italienne installée à Monaco avec les moyens du Musée océanographique dans le but de multiplier les usines houlomotrices sur les côtes méditerranéennes. Ce paradoxe n'est qu'apparent et s'explique de plusieurs manières, qui tiennent majoritairement à l'inertie du système énergétique, s'appliquant de manière différente aux deux formes de houille bleue. Je suggère la série de propositions suivantes.

Les marées, ont été assimilées à la houille blanche, pour des raisons historiques : existence ancienne de moulins à marées/moulins à eau ; physico-géographiques : gros débits d'eau réguliers et présence de bassins naturels ; sociales : connaissances et valeurs des acteurs du système électrique ; techno-politiques : existence et construction en cours du système électrique par un groupe restreint d'acteurs (ministère des Travaux publics, grandes entreprises du secteur de l'énergie). Ces acteurs se sont ainsi approprié cette ressource, et ont considéré les usines marémotrices comme des convertisseurs à part entière du système électrique. Cette assimilation, dont le paramètre comparatif est économique (prix du kWh), est une force en situation économiquement favorable à l'innovation, mais une vulnérabilité en situation économiquement défavorable. Les usines marémotrices, jugées intéressantes et accaparées dans les années 1920, ont été rangées dans les placards du ministère des Travaux publics dans les années 1930.

La houle n'a historiquement jamais été exploitée et est par nature plus éloignée des chutes d'eau que les marées. Les houlomoteurs sont plus difficilement assimilables aux convertisseurs du système énergétique tel qu'il se construit. Ils sont aussi plus indéterminés. Ceci explique la variété des convertisseurs imaginés, due à une plus grande liberté (ou une moins grande détermination) dans la forme donnée à ces machines. Cette variété concerne aussi les porteurs de projets, auxquels les acteurs du système électrique laissent plus de place. Enfin, le fait qu'aucun convertisseur de houle n'ait jamais été construit, au contraire des convertisseurs de marées dont on sait déjà qu'on peut l'exploiter, justifie la nécessité de construire des petites machines, pour lesquelles les porteurs de projets peuvent se passer de soutiens (techniques, financiers) conséquents. Ceci explique les multiples expérimentations de houlomoteurs effectuées, contrairement au cas des usines marémotrices.

En revanche, dès qu'une montée en puissance est envisagée dans le sens d'une assimilation aux centrales hydro-électriques, les mêmes freins sont rencontrés que pour les usines marémotrices, d'autant plus forts que la houle est considérée comme inférieure aux marées.

# Conclusion Partie 2

Tout d'abord, d'un point de vue institutionnel, on constate une multiplication du nombre et du type d'acteurs impliqués dans la mise en œuvre de convertisseurs innovants exploitant les forces naturelles. La figure de l'inventeur est toujours centrale, et ce pour toutes les forces naturelles. Mais s'y ajoute la présence d'acteurs publics au niveau national, pour la Métropole comme pour les colonies, de conseils généraux de départements, de communes, de grandes entreprises du secteur de l'énergie, de nouvelles entreprises ou groupements privés.
On ne peut pas parler de politique nationale des forces naturelles pour l'entre-deux-guerres, dans la mesure où l'ensemble de ces acteurs n'a pas agi de manière coordonnée pour le développement au niveau national d'un ensemble de forces naturelles. Mais plusieurs cohérences dans les ambitions politiques, économiques et sociales des acteurs qui ont œuvré en faveur de ces sources d'énergie (marées, vagues, vent, énergie thermique des mers, soleil) permettent de parler d'une dynamique nationale d'innovation.

Ainsi, l'imaginaire des forces naturelles est toujours cohérent dans le discours des acteurs et des promoteurs des projets. On retrouve celui, déjà présent lors de la période précédente, de sources d'énergie abondantes, illimitées, et disponibles, au contraire de la houille noire, qu'il faut exploiter pour contribuer au progrès économique et social. Mais il se complète d'une vision géographique de la répartition des forces naturelles et de leur contribution à l'approvisionnement national, avec le dessin d'un arc-en-ciel des houilles. Chaque zone géographique se voit affecter une houille colorée : houille bleue dans le Nord-Ouest de la France et sur le littoral méditerranéen (France et Afrique du Nord), houille jaune en Afrique du Nord, houille azur sur toutes les mers ventées. La dénomination par les différentes déclinaisons de houilles colorées montre que la houille, toujours prépondérante dans le bilan, reste la référence en termes énergétiques, et cette cartographie illustre la recherche de ressources qui lui seraient complémentaires sur l'ensemble du territoire français.

L'arc-en-ciel des houilles se combine avec une hiérarchisation des couples machines-énergie qui se manifeste chez les ingénieurs chroniqueurs des revues scientifiques et techniques étudiées et les acteurs de projets. Ceux-ci valorisent globalement les grandes puis-

sances, la régularité, et le passage par l'électricité, qui a pris de l'importance dans l'imaginaire technicien des forces naturelles au point de devenir l'horizon de modernité de chacune d'entre elles. Cette hiérarchisation est un facteur de répartition géographique des convertisseurs, couplé avec caractéristiques des territoires d'implantation : ressources disponibles, mais aussi infrastructures en présence (réseau électrique, routier, matériaux...), usagers potentiels (citadins/ruraux, européens/indigènes) et usages (industriel, domestique, agricole, transports...). La houille bleue est ainsi particulièrement prisée sous forme de marées car elle permet la production de grandes puissances électriques régularisées, technique parente de celle utilisée pour la houille blanche, synonyme de modernité. Elle est destinée à approvisionner le réseau électrique métropolitain. La parente pauvre de l'énergie des marées est celle des vagues, énergie également hydraulique, mais irrégulière et avec laquelle il est difficile de mettre en place des installations régularisées pour la production de grandes puissances électriques. Des porteurs de projets en envisagent l'utilisation pour le réseau électrique là où manquent les marées. Un industriel comme Georges Claude cherche à construire des usines maréthermiques, et suscite l'enthousiasme d'un public louant le progrès scientifique et technique, car, constante, l'énergie thermique des mers promet de produire en quantité de l'électricité, mais aussi de mettre en valeur des matières inexploitées dans les régions tropicales. L'énergie solaire est à cet égard bien différente . Des projets comme ceux de Gandillon ou de Dubos, qui exploitent l'énergie solaire pour la production de très grandes puissances électrique dans le désert, ne se raccrochent à aucun système technique ou énergétique, et créent tout (infrastructures, ville...) *ex nihilo*. Ils relèvent en cela de l'*hybris* technologique et sont déjà qualifiés de « grandioses » par leurs contemporains, qui les suivent tout de même avec attention en raison de leur inscription dans l'imaginaire de la modernité énergétique et dans la rhétorique coloniale. Quant au distillateur solaire, ses protagonistes le considèrent bien plus comme un outil de conquête et de mise en valeur agricole du désert que comme un outil de développement industriel. L'absence de réseau électrique et de clients européens, une visée non directement industrielle, expliquent la diffusion de ce convertisseur « simple et robuste » dans l'Afrique du nord française. L'énergie éolienne est perçue de manière plus ambiguë et multiple : les éoliennes américaines, considérées comme modernes par les ingénieurs pendant lors de la période (1880-1918), ne sont plus valorisées, au profit des perspectives de production d'électricité que de nouvelles machines pourraient permettre. Pour beaucoup, l'électricité est une condition *sine qua non* de la modernité d'un convertisseur éolien, tout comme l'aérodynamique par laquelle plusieurs ingénieurs tentent de concevoir de nouveaux modèles de roues éoliennes. Les navires de Joëssel et Constantin sont équipés de turbines aériennes profilées aérodynamiquement, dans le but de moderniser la navigation à voile.

La force naturelle qui a mobilisé le plus grand nombre d'acteurs est ainsi la houille bleue, et en particulier les marées, avec l'apparition d'acteurs publics au niveau natio-

nal (ministère des Travaux publics) et local (Conseils régionaux et communes), dans le cadre d'une politique énergétique d'aménagement des forces hydrauliques dans laquelle est incluse la houille bleue. Le rôle des départements et communes est resté faible devant celui du ministère des Travaux publics, qui dispose, comme ces institutions locales, d'un pouvoir de financement, mais, plus important, d'un pouvoir législatif, celui de concession. Quelques constructeurs de turbines se sont impliqués, mais modestement, en réponse à la sollicitation du ministère des Travaux publics. En outre, de nouvelles entreprises sont créées pour exploiter les marées et les vagues. Celles-ci restent les concepteurs et les réalisateurs des projets, contrôlés par les ingénieurs de la Commission de la houille bleue , pour la majorité appartenant aux grands corps de l'État. Pour cette source d'énergie en particulier, il s'agit bien de politique énergétique, mais prise, de manière plus large, comme celle de l'aménagement des forces hydrauliques en France pour la production d'électricité, dont elle n'est qu'une petite partie. En outre, l'encouragement effectif du ministère des Travaux publics pour l'exploitation de la houille bleue sur le territoire est ambiguë : si la Commission de la houille bleue a été un stimulant pour la proposition de projets émanant d'inventeurs ou de groupements privés, la majorité d'entre eux, qui ont été pourtant nombreux, ont aussi été empêchés par le refus d'une concession ou de l'aide financière escomptée.

Pour les autres sources d'énergie, on trouve quelques entreprises ou acteurs industriels (la Compagnie électro-mécanique et l'énergie éolienne, Claude et l'énergie thermique des mers), mais aussi des acteurs publics : pour le solaire aux colonies, résidence générale de France en Tunisie et services techniques d'Algérie et de Tunisie, mais aussi ministère de la Guerre pour le solaire et l'ONRSI. L'ONRSI a également contribué à des projets d'exploitation de l'énergie éolienne, de manière ponctuelle, et, non dans une vision d'ensemble des forces naturelles et du problème de l'énergie, mais en tant que soutien aux inventeurs.

Les facteurs déterminant l'émergence et l'issue de ces projets sont multiples. Cela tient à l'hétérogénéité des acteurs impliqués, des types de convertisseurs qu'ils veulent développer et des territoires où ils veulent les implanter. Deux éléments contextuels ont une forte influence sur beaucoup de ces projets et leur répartition spatiale : le maillage en cours du territoire par le réseau électrique, et la rhétorique de mise en valeur des colonies à l'issue de la première guerre mondiale. Globalement, l'histoire de la houille bleue, assimilée à la houille blanche par les acteurs du système électrique, suit ainsi la même évolution que celle du secteur de l'électricité et, en général, celui du secteur de l'énergie : un grand intérêt et des initiatives dans les années 1920, un ralentissement dans les années 1930 avec un regain d'attention vers 1936-1937, en période de réarmement. Le distillateur solaire naît d'une volonté de rendre habitable et fertiliser le désert sud-tunisien, et l'échec des installations relève de problèmes techniques liés davantage à un manque de suivi des inventions mises au point et installées, et à de faibles moyens logistiques et techniques, qu'à un obstacle

technique insurmontable, étant donné la simplicité des installations et leur caractère opérationnel. Pour les bateaux éoliens Joëssel et Constantin, le manque d'ancrage des acteurs de ces projets dans les secteurs concernés par la fabrication (constructeurs de bateaux et d'aéromoteurs) et l'utilisation (marine marchande) de ces bateaux, ainsi que, peut-être, la concurrence internationale du navire Flettner, ont stoppé le processus d'innovation à la mise au point d'un prototype.

Ainsi, le rôle de la crise financière des années 1930 dans la dynamique nationale d'innovation est certain mais il est à nuancer en fonction des projets. De manière globale, les projets de convertisseurs les plus ancrés dans le système énergétique, et plus précisément électrique, sont ceux qui ont été les plus affectés par cette crise : usines marémotrices, projet houlomoteur (Grasset), aérogénérateurs de la , centrale maréthermique de Georges Claude, et ceci, pour les mêmes raisons qui ont fait naître ces projets. En effet, ces convertisseurs ont été assimilés à des centrales électriques, et comparés aux autres types de centrales. Le coût du kilowattheure déterminant l'intérêt d'une centrale électrique, les usines marémotrices, houlomotrices, maréthermiques, éoliennes sont encouragés en situation économique favorable (coût important du charbon) mais abandonnés en situation économique défavorable. Le distillateur solaire, les navires éoliens, le bélier du Minou, ne trouvent pas de pérennité, mais pour des raisons autres que la crise économique des années 1930. Celle-ci, accompagnée d'une surproduction en énergie, joue cependant très certainement en la défaveur de nouveaux projets.

Finalement, il est amusant de constater que la seule réalisation effective et durable est l'ondo-pompe de Jules Richard. Ce projet constitue un exemple emblématique, en creux, de la dynamique d'innovation pour l'utilisation des forces naturelles dans l'entre-deux-guerres. Il s'agit en effet d'un scientifique français mais dépendant d'une institution monégasque, resté à l'écart de la Commission de la houille bleue bien qu'ayant les mêmes visées de développement des énergies marines sur le littoral français. Son appareil, a été conçu par un ingénieur italien, utilise les vagues, et ce, pas pour produire de l'électricité mais pour une application très particulière : l'alimentation des aquariums du Musée océanographique de Monaco.

La seconde guerre mondiale amène des ruptures d'ordre politique, économique et technique dans la dynamique de l'entre-deux-guerres, qui justifient le passage à une autre période. La défaite militaire française, une nouvelle pénurie énergétique, la mise en place d'institutions centralisées pour l'électricité, et un changement de stratégie dans la politique coloniale, suscitent un nouvel engouement pour les forces naturelles et la mise en place de nouveaux projets.

# Troisième partie

# Les « énergies naturelles » pour la modernisation et le rayonnement de la France (1940-1970)

# Introduction

Cette partie traite les « énergies naturelles » (marées, vent, soleil, vagues, énergie thermique des mers, géothermie) sur une période allant de 1940 à la fin des années 1960. Cette période voit une reconfiguration des acteurs menant des projets de convertisseurs innovants exploitant les énergies renouvelables, et un changement dans la catégorie de « forces naturelles ». Des institutions publiques et des entreprises du secteur de l'énergie s'ajoutent ainsi à l'ensemble des acteurs de l'entre-deux-guerres. Ils mènent des études sur toutes ces sources d'énergie avec quatre enjeux principaux en fonction des territoires d'application, dont dépendent la forme des convertisseurs : l'approvisionnement en électricité du réseau électrique métropolitain (marées, vagues) ou de certains territoires de l'Union française (Maroc, Algérie : vent, soleil), l'exploitation de richesses agricoles et minières d'Outre-mer (vent, énergie thermique des mers, soleil), le prestige technologique (marées, énergie thermique des mers, soleil), le marché international (énergie thermique des mers). Dans les discours de ces acteurs, les forces naturelles sont en outre éclatées en un ensemble de catégories proches mais moins bien identifiées. J'utiliserai l'expression d'« énergies naturelles » qui a été couramment employée.

Cette introduction donne les éléments de contexte déterminants de la période (1940-1970) : pendant la seconde guerre mondiale, l'occupation allemande et l'« économie de pénurie » qui en résulte, ainsi que des remises en questions (internes et externes) du régime impérial ; après la guerre, un sentiment d'humiliation nationale lié à une position de soumission de la France vis-à-vis de nations étrangères en période d'occupation (Allemagne) mais aussi à la Libération (États-Unis). Ces éléments déterminent la mise en place par le gouvernement de Vichy de pratiques dirigistes de planification économique et d'équipement nationaux, et d'une nouvelle politique coloniale, qui trouvent des prolongements à la Libération. Les gouvernements successifs investissent en outre les technosciences d'enjeux (productiviste sous Vichy, puis de prestige technologique à la Libération) qui ont des répercussions sur les acteurs des énergies naturelles.

Dans un premier temps, cette introduction précise le mouvement de centralisation des institutions énergétiques et la planification qu'elles mettent en place. Elle explicite ensuite la nouvelle organisation de la recherche nationale, puis la stratégie de « développement »

adoptée par l'État français face au mouvement de décolonisations, ainsi que la position de l'énergie dans cette stratégie. Après cela, elle indique les tendances globales dans la production et la consommation françaises d'énergie. Enfin, elle fait un résumé des nouveaux acteurs publics impliqués dans de projets d'exploitation des énergies naturelles ainsi que des enjeux qui y sont associés et annonce le plan.

## Planification et centralisation comme outils de « modernisation »

### De la Direction générale de l'Équipement national au Commissariat général au Plan

Le gouvernement de Vichy met en place une politique dirigiste de « modernisation » du pays par l'intensification de la production agricole et industrielle, dans le but de rattraper un « retard » technologique et économique vis-à-vis des nations étrangères, mais aussi en réponse à une « économie de pénurie » au profit de la nation allemande. Il introduit pour ce faire des « outils technocratiques de gestion à grande échelle » (Denord et Rosenthal, 2013). Parmi ceux-ci, la planification économique est assurée par la Délégation générale à l'économie nationale (DGEN) créée en 1942. Composée d'une dizaine d'experts, le DGEN dresse un plan décennal d'équipement national qui concerne l'aménagement d'infrastructures urbaines, énergétiques, de transport (Denord et Rosenthal, 2013). À la Libération, au terme d'une reconfiguration administrative, le Commissariat général au Plan succède à la DGEN en tant qu'institution planificatrice, et fixe les objectifs de dix-huit secteurs économique au moyen de plans quinquennaux « de modernisation et d'équipement » (Woronoff, 1994, p. 499). Ces institutions nouvelles et leurs administrateurs œuvrent à faire de la croissance économique un but national, en fixant des objectifs quantitatifs de production à des secteurs jugés fondamentaux (Woronoff, 1994, p. 498-500). Les acteurs du Commissariat général au Plan, appelés « modernisateurs », sont des hauts fonctionnaires d'un genre nouveau qui parviennent à mener à bien une « stratégie de conquête du pouvoir administratif et politique [...] couronnée de succès avec l'avènement de la v$^{e}$ république (Bonneuil, Pessis et Topçu, 2015, p. 7) ». Ils imposent à l'administration française une vision avant tout économique de la politique, avec de nouveaux outils économétriques ainsi que la mise en place d'une « comptabilité nationale » (Dard, 1998), tels que la « production industrielle totale » (Woronoff, 1994, p. 504), ou le « produit intérieur brut » (PIB), indicateur de puissance et de richesse nationale toujours en vigueur aujourd'hui.

Ces modernisateurs ont pour nouveau mot d'ordre la « productivité », terme inventé par l'un d'entre eux, Jean Fourastié [117], et qui représente le « prix de revient exprimé en heures de travail » (Boulat, 2015). Cet indicateur devient la « mesure du progrès technique », nécessaire au progrès social, et son accroissement s'érige en priorité dans la « croisade modernisatrice », condition de l'avènement d'une « société de loisirs et d'abondance ». Sur le modèle du standard de vie américain, le rêve des modernisateurs est en effet celui de l'avènement d'une « civilisation humaniste tertiaire », dont le progrès serait mesuré en termes du « niveau de vie » (« consommation de tous les biens et services appréciables en monnaie ») et du « genre de vie » (hygiène, médecine, loisirs) (Boulat, 2015, p. 85 ; 87). L'examen des trois décennies d'après-guerre selon le critère de la productivité en France mène en effet au constat de son accroissement, ce qui les a fait qualifier de « Trente glorieuses » par Fourastié lui-même [118].

Le projet modernisateur bouleverse la société française. Les décennies qui suivent la guerre voient en France l'apparition d'une « société de consommation », et une extension de l'« *american way of life* ». L'exode rural vide les campagnes au profit des villes. Les campagnes, de moins en moins peuplées, se voient rapidement dominées par de grandes exploitations agricoles mécanisées. Selon Dubois, (1996, p. 615), entre 1950 et 1975, « le système autarcique de polyculture familiale disparaît progressivement », et « l'agriculture se concentre, l'exploitation type devient une unité de production spécialisée intégrée dans un système d'échanges ». En termes de convertisseurs énergétiques, l'usage du tracteur se répand [119]. En ville, un nouveau mode de vie est incarné par le « techno-couple urbain », son appartement fonctionnel, propre, électrique, et son automobile rutilante (Ross, 2006). Ce mode de vie, très consommateur en marchandises de toutes sortes, l'est aussi en énergie. Ainsi, les ménages deviennent un poste important de consommation énergétique (automobiles, électroménager). La consommation de pétrole importé à bas prix par des cartels américains (Mitchell, 2011), mais aussi l'« électrification du quotidien », sont à la base de ce changement. Alors qu'en 1949, 63% des ménages français n'avaient pas l'eau courante, en 1969, 75% possèdent un réfrigérateur et la moitié une machine à laver (Debeir, Deléage et Hémery, 2013, p. 249-250). Les appareils électroménagers, possédant le « double sceau du modernisme et de l'égalité » (puisqu'ils ne se différencient pas selon les classes sociales) sont emblématiques de la consommation de masse (Beltran et P. Carré, 2016, p. 272-273).

117. Fourastié présida en particulier, dans le giron du Commissariat général au Plan, un « programme d'accroissement de la productivité ».

118. Reprise par certains historiens sans regard réflexif, elle a été critiquée récemment par un groupe d'historiens en appelant à un « autre histoire » des décennies d'après-guerre (Bonneuil, Pessis et Topçu, 2015).

119. On passe ainsi de 137 000 tracteurs en 1950 à 1 330 000 en 1975 (Dubois, 1996, p. 615).

## Planification et centralisation du secteur énergétique

L'entreprise de modernisation est menée au moyen d'une forte intervention de l'État dans la gestion et la construction de l'outillage national, en collaboration avec les industriels. La planification et la centralisation de secteurs économiques stratégiques en sont les outils, et le secteur de l'énergie en est une des cibles notables. En effet, une forte consommation d'énergie, synonyme de forte production, devient non seulement la base, mais aussi la mesure, de la modernité d'une nation. Ainsi, les objectifs productivistes, pour l'économie de guerre puis pour l'avènement d'une société de confort et de loisirs, vont de pair avec la croissance énergétique. De nouvelles institutions nationales centralisées sont ainsi créées pour organiser la production et la consommation d'énergie nationales dans l'objectif d'une croissance énergétique. Elles détiennent un pouvoir considérable sur les choix énergétiques de toute la France et influent sur la reconfiguration des acteurs impliqués dans l'exploitation des énergies naturelles.

Un mouvement de centralisation des institutions liées à l'énergie et de prise en main par l'État des ressources énergétiques a été amorcé pendant l'entre-deux-guerres, avec une concentration des entreprises du secteur de l'électricité et une nouvelle législation faisant de toutes les ressources énergétiques hydrauliques une propriété de l'État (cf II). Il s'affirme en période de réarmement, avec le programme hydraulique national de 1938, et prend une nouvelle tournure sous le régime de Vichy : le pétrole, le charbon, l'électricité, sont pris en charge par des institutions publiques ou semi-publiques.

La Société nationale des pétroles d'Aquitaine est ainsi créée en 1941 pour exploiter les gisements découverts dans le Sud-Ouest de la France. Elle est détenue à la fois par l'État et par des sociétés pétrolières (Demagny-Van Eyseren, 2009, p. 359). Pour le charbon, « le régime de Vichy et l'occupant national-socialiste déterminent une cartellisation autoritaire et centralisée du marché du charbon » : à partir de 1940, un « Comité d'organisation des combustibles minéraux solides encadre la production, les prix, le transport et les cadres de la consommation » à tel point que le charbon, « totalement rationné à tous les stades, est distribué de manière presque uniquement administrative » (Chélini, 2009, p. 118).

En ce qui concerne l'électricité, le gouvernement de Vichy crée en 1940 un Comité d'organisation de l'énergie électrique (COEE) au ministère de la Production industrielle et du Travail, dirigé par l'ingénieur des Mines Robert Gibrat. Le COEE est chargé dans un premier temps de « gérer la répartition de la pénurie », puis de poursuivre le développement du réseau électrique et de la production en particulier hydro-électrique (Lévy-Leboyer, 1994b, p. 117-127). Ces deux aspects sont dans l'intérêt de l'occupant allemand, qui exige qu'une partie de l'électricité soit réservée à l'industrie nécessaire à l'économie de guerre et à l'exportation vers le réseau électrique allemand, ce qui provoque d'importantes restrictions

aussi bien auprès des populations que des industries non stratégiques pour l'occupant. Par le biais de ce Comité, la direction de l'Électricité du ministère de la Production industrielle « renfor[e] ses liens avec la profession ». En outre, en septembre 1941 est promulguée une loi exigeant que la totalité du réseau de haute tension à 220 kV, appartenant à dix-sept sociétés différentes, soient « regroupée entre les mains de trois sociétés », elles-mêmes soumises au Bureau central d'exploitation et de coopération du COEE (Lévy-Leboyer, 1994b, p. 122). Celui-ci, dirigé par le polytechnicien Pierre Ailleret, a pour rôle d'organiser la distribution de l'électricité sur le réseau national en répondant aux priorités des Allemands. De cette manière, avant les nationalisations qui ont suivi la Libération, l'industrie privée et l'administration publique agissent de concert pour une gestion centralisée de tout le secteur de l'électricité.

À la Libération, les nationalisations et la création d'institutions nationales poursuivent ce mouvement de gestion centralisée et de planification de l'économie entre l'État et les industriels. Elles concernent toutes les sources d'énergie majoritaires dans le bilan énergétique : charbon, hydraulique (uniquement sous forme d'électricité), pétrole, gaz [120]. Sont ainsi créés les Charbonnages de France le 17 mai 1946, Gaz de France (GDF) et Électricité de France (EDF) le 8 avril 1946 et, en 1945, le Bureau de recherche pour le pétrole (BRP). L'entreprise publique Charbonnages de France issue de la fusion de toutes les entreprises charbonnières précédentes, « poss[ède] un monopole presque total sur l'extraction et conserv[e] ses centrales électriques, administrées avec EDF dans un comité mixte (Varaschin, 2009b, p. 130) ». Elle reste « en relation étroite avec son ministère de tutelle, celui de la Production industrielle puis ses successeurs », et est chargée de coordonner « la politique d'ensemble dans les domaines de la production, du financement, de la recherche et de la formation » (Varaschin, 2009b, p. 131-133). Gaz de France, établissement public à caractère industriel et commercial dont l'État est actionnaire, réunit les compagnies gazières les plus productives [121]. Le Bureau de recherches des pétroles (BRP) est un établissement public chargé de la prospection pétrolière sur le territoire français dans le but de trouver de nouveaux gisements pour atteindre une indépendance pétrolière (Demagny-Van Eyseren, 2009, p. 359). Le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) voit le jour en 1945 dans le but de « poursuivre les recherches scientifiques et techniques en vue de l'utilisation de l'énergie atomique dans les divers domaines de la science, de l'industrie et de la défense nationale » (Hecht, 2014, p. 37). Les dirigeants du CEA investissent la technologie d'enjeux d'abord avant tout militaires, mais aussi énergétiques, et dans tous les cas de prestige technologique national, propre à rendre à la France son rayonnement terni par l'Occupation et le délitement de l'empire colonial. Il dépend directement

120. Comprenant le gaz de houille, qui sera petit-à-petit substitué par le gaz naturel (cf suite de cette introduction).

121. Celles dont la « production annuelle moyenne de 1942 et 1943 était inférieure à six millions de $m^3$ » (Williot, 2009, p. 50).

du Premier ministre et, dirigé par des hauts fonctionnaires issus de l'École polytechnique, experts de l'énergie atomique, dispose d'une importante autonomie institutionnelle.

EDF obtient le monopole, en France métropolitaine, du transport et de la distribution de l'électricité, ainsi qu'une grande partie de la production, par la fusion de 1 450 entreprises. Le reste demeure la possession de la Compagnie nationale du Rhône (CNR) (hydroélectricité), de la SNCF, des Charbonnages de France [122], de certaines entreprises auto-productrices, moyennant un accord avec EDF ou le ministre chargé de l'électricité, ainsi que de petits producteurs, dont les installations ont une puissance de moins de 8 000 kVA (Maleville, 1996, p. 64-67) [123]. Pour ce qui concerne les énergies naturelles, ce dernier point est important dans la mesure où théoriquement, il était toujours possible, pour tout organisme public ou privé extérieur à EDF de produire de petites puissance électriques.
EDF est sous la double tutelle, technique et financière, de la direction du Gaz et de l'Électricité du ministère de l'Industrie, et des directions du Trésor et du Budget du ministère des Finances. Son conseil d'administration est composé de représentants de l'État, des collectivités locales et du personnel. La puissance publique est ainsi très présente (Morsel, 1996a, p. 9-15). Cependant, progressivement, « la direction va acquérir une très grande liberté de manœuvre et assumer pleinement la responsabilité de la politique de l'établissement » (Morsel, 1996a, p. 15). Les dirigeants d'EDF, gigantesque entreprise très hiérarchisée, contrôlent désormais la gestion et le développement du système technique français, à l'aide d'importants financements publics, de moyens techniques conséquents et de nouveaux outils économétriques compatibles avec le modèle de comptabilité nationale adopté par les planificateurs modernisateurs.
Aussi la création d'EDF ne fait-elle « que reprendre toutes les obligations de service public inscrites depuis un certain temps dans les textes, au point d'apparaître comme un instrument au service de la tutelle étatique » (Morsel, 1996a, p. 15).

Les nouvelles institutions centralisées des différentes branches du secteur énergétique (EDF, GDF, CEA, etc.) acquièrent un fort pouvoir décisionnel sur l'avenir énergétique de la métropole, et prennent en main une partie considérable du système énergétique. EDF prend une place centrale pour l'approvisionnement énergétique de la métropole, car elle maîtrise la quasi-totalité du système électrique, et monopolise les moyens techniques et financiers de l'État qui y sont consacrés. En ce qui concerne les énergie naturelles, l'entreprise impose, par cette place monopolistique, un imaginaire technicien de la modernité

122. Pour ces deux derniers cas, le service de l'électricité est cependant géré par un comité mixte comportant des représentants d'EDF (Maleville, 1996, p. 39).
123. Ces deux dernières éventualités ont été rendues possibles par la loi Armengaud, datant du 2 août 1949, qui a en fait restreint le domaine de la nationalisation de la production d'électricité revenant à EDF. Celle-ci n'excluait initialement que la CNR, les Charbonnages de France, la SNCF et les entreprises ayant produit moins de 12 MWh par an en 1942 et 1943.

énergétique dominé par l'électricité, et les centrales de forte puissance reliées par un réseau national interconnecté, qui impacte les projets français d'exploitation du vent et des marées.

De la même manière, la centralisation du secteur de la recherche, avec la création du CNRS, de l'Office de recherches scientifiques coloniales (ORSC), puis de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique (DGRST), implique une concentration des moyens techniques et financiers accordés à la recherche sur les énergies naturelles.

## Organisation de la recherche nationale. CNRS, ORSC/ORSTOM, DGRST

La recherche scientifique et technique française est l'objet de réorganisations nationales pendant la guerre, que ce soit en métropole ou aux colonies, puis sous le gouvernement de Pierre Mendès-France. Ces réorganisations sont motivées par diverses ambitions dont les gouvernements investissent successivement les technosciences : enjeux militaires, enjeux productivistes, enjeux de rayonnement international par l'empire colonial et le prestige technologique. C'est ainsi qu'en octobre 1939, le gouvernement de la IIIe République crée le Centre national de la recherche scientifique (CNRS), qui regroupe plusieurs institutions de l'entre-deux-guerres dont le Centre national de la recherche scientifique appliquée (CNRSA), lui-même issu entre autres de l'ONRSI. En 1942, le gouvernement de Vichy crée l'Office de recherche scientifique coloniale (ORSC), qui devient Office de recherche scientifique des Territoires d'Outre-mer (ORSTOM) en 1953. En 1961, le gouvernement gaullien ajoute à cette organisation nationale la Délégation générale à la recherche scientifique et technique (DGRST). Toutes ces institutions se sont impliquées, plus ou moins fortement, dans des recherches sur les énergies naturelles.

En octobre 1939, le gouvernement Daladier crée le CNRS pour répondre à une volonté immédiate de mettre la science et la technique au service de l'effort de guerre. Cette création résulte également d'une volonté exprimée dans l'entre-deux-guerres par des décideurs politiques, dont faisaient partie des scientifiques réputés groupés autour du physicien Jean Perrin, de coordonner et de piloter les recherches nationales autour d'un organisme central qui décide de la politique scientifique et technique française et dispose de moyens financiers pour la mettre en œuvre. Placé sous tutelle du ministère de l'Éducation nationale, il possède au départ deux directions dévolues, l'une à la recherche fondamentale, à la tête de laquelle se trouve le physicien Henri Longchambon, et l'autre à la recherche appliquée, dont la responsabilité est confiée au professeur Henri Laugier (Guthleben, 2009). En plus de « l'octroi d'allocations aux chercheurs, l'attribution de subventions pour les mis-

sions scientifiques, l'encouragement des recherches de science pure ou appliquée du service public », le CNRS agit par le biais du « recrutement d'aides techniques et la réalisation de recherches « par ses moyens propres » ». Il constitue ainsi « un organisme de recherches à part entière, qui ne se contente pas de « faire effectuer », mais « effectue également lui-même » (Guthleben, 2009, p. 30-31). Après la défaite militaire et sous occupation allemande, le gouvernement de Vichy place à la tête du CNRS le géologue Charles Jacob, qui fait disparaître les deux directions, et privilégie les « recherches appliquées et urgentes », qui répondent à une situation de pénurie (Guthleben, 2009, p. 66). Enfin, à la Libération, Frédéric Joliot-Curie puis le biologiste Georges Teissier sont placés à la tête du Centre et accordent à nouveau une place importante à la recherche fondamentale.

Malgré ces changements successifs, les missions et les moyens d'action du CNRS restent globalement les mêmes, à savoir « l'encouragement, le financement et la réalisation des recherches » (Guthleben, 2009, p. 111). Le CNRS doit répondre aux préoccupations de grandeur de la France, et, selon les mots de Frédéric Joliot-Curie lui-même à l'issue de la guerre, il est considéré comme nécessaire pour que le pays ne devienne pas lui-même une « colonie » (Guthleben, 2009, p. 91). Si le CNRS ne fait pas partie des priorités du premier Plan de modernisation et d'équipement (1947), essentiellement focalisé sur la reconstruction de la France, il est ensuite largement doté par le second (1952) et connaît dans les années 1950 une forte augmentation de tous ses moyens : budget, personnels, nouveaux laboratoires (Guthleben, 2009, p. 152-154).

La création de l'ORSC a également lieu en période de conflit. En effet, sous le gouvernement de Vichy, la DGEN met en place un plan décennal « très nettement impérial par ses ambitions », car, « [d]ans une France mutilée, c'est plus que jamais par l'empire colonial que l'on cherche le salut, la grandeur et la prospérité » (Bonneuil, 1991, p. 83). Aussi les recherches scientifiques coloniales bénéficient-elle d'une part significative de son budget [124]. Le secrétariat d'État aux colonies est doté d'une direction des Recherches scientifiques en 1941 qui s'individualise à partir de 1942 pour laisser place à un Service des recherches scientifiques coloniales en 1942, puis à l'ORSC en 1943 (Bonneuil, 1991, p. 83-88). Le but de ce dernier est d'« orienter, coordonner et contrôler les recherches scientifiques aux colonies » (Bonneuil, 1991, p. 89). Sa création est d'ailleurs très mal perçue par le directeur du CNRS, qui aurait souhaité maintenir la recherche scientifique coloniale dans le giron de son institution. L'ORSTOM est de fait mieux doté que le CNRS pendant la guerre, et, même après l'armistice, les « crédits de l'Office iront croissants, permettant de déployer une grande activité » (Bonneuil, 1991, p. 90). En 1944, il se transforme en Office des recherches scientifiques d'Outre-Mer (ORSOM) puis, en 1953, en Office des recherches scientifiques et techniques d'Outre-mer (ORSTOM).

124. 57 milliards de francs y sont ainsi alloués (Bonneuil, 1991, p. 84).

La création de la DGRST est liée à l'échec d'une des missions incombant au CNRS, la coordination de la recherche scientifique et technique au niveau national. Le gouvernement du général de Gaulle décide ainsi de fonder cette nouvelle institution interministérielle (Guthleben, 2009, p. 191-198), débouchant sur une « réorganisation majeure de la recherche française et la constitution d'un modèle national » (Duclert, 2004, p. 655). Issue de deux instances complémentaires créées en 1958, le Comité interministériel et le Comité consultatif de la recherche scientifique et technique (CIRST et CCRST), elle est instituée en 1961 pour répondre à la volonté réaffirmée de faire de la science et de la technologie le fer de lance d'une nouvelle grandeur de la France. Elle est placée sous la tutelle directe du Premier ministre. Ce sont désormais ces Comités puis la Délégation, composés de représentants des ministères, de scientifiques (les « douze sages ») et d'économistes reconnus pour leurs compétences sur l'organisation de la recherche, qui sont chargés de gérer cette dernière au niveau national. Sans posséder de laboratoires propres, ils disposent pour ce faire d'un Fonds de développement, et mettent en place des « actions concertées » qui définissent des lignes directrices pour la recherche française, parmi lesquelles figurent les recherche sur l'énergie. Selon Duclert, (2004, p. 656), « [l]'existence de la DGRST et la réalisation d'une politique de coordination ont amené le CNRS, d'une part à se recentrer sur la recherche fondamentale et d'autre part à définir des responsabilités en matière de prospective ». La DGRST devient ainsi un instrument essentiel d'organisation de la recherche en France, du moins dans les années 1960. À la fin de cette décennie, « son équipe de scientifiques et d'administrateurs perd [en effet] une partie de ses principes qui avaient assuré son succès au cours de la décennie », après quoi elle est « progressivement réduite à n'être qu'un instrument de l'action des ministres de la Recherche » (Duclert, 2004, p. 648).

Ces trois institutions se sont impliquées dans les recherches sur les énergies naturelles, d'une manière qui, comme on le verra, répond globalement à ces rapides chronologies générales. C'est ainsi que, isolément, simultanément ou successivement, elles soutiennent des projets d'exploitation de l'énergie solaire (CNRS, ORSC, DGRST), de l'énergie thermique des mers (CNRS, ORSC) ou de l'énergie éolienne (ORSC).

## Décolonisations. Le « développement » comme nouvel outil de domination

La seconde guerre mondiale amène une reconfiguration générale des empire coloniaux, qui précède l'indépendance de la plupart des territoires colonisés. En interne, les populations, qui ont participé à l'effort de guerre des puissances colonisatrices, revendiquent en effet de nouveaux droits et contestent la légitimité du pouvoir colonial. À l'interna-

tional, les États-Unis, ainsi que l'Organisation des nations unies (ONU), créée en 1945, s'opposent à cette forme de domination au nom d'une nouvelle Déclaration universelle des droits de l'homme (Rist, 2013, p. 131-149) [125]. Pour répondre à ces pressions, les puissances coloniales adoptent un nouveau projet colonial basé sur le « développement » : celui-ci s'appuie sur le financement de « moyens de communication et de transport, de[] logements, [d']écoles, d'[]équipements de santé, [de] projets agricoles » dans le but « d'augmenter le niveau de vie des populations colonisées, d'offrir de meilleures conditions de travail aux travailleurs et de permettre des améliorations à long terme de la productivité ». Le développement permet ainsi aux empires coloniaux d'être « à la fois plus riches et plus légitimes » (Cooper, 2013, p. 403).

En France, cette conversion au développement se traduit par la création de l'Union française qui se substitue à l'empire, et où les sujets coloniaux acquièrent de nouveaux droits. Le ministère de la France d'Outre-mer remplace le secrétariat d'État aux colonies. Mais, à la fin des années 1950, face au coûteux financement du « développement » et aux revendications croissantes des peuples colonisés pour plus d'égalité, le gouvernement français choisit de proposer l'indépendance politique aux territoires de l'Union. En 1960, la majorité de ces territoires deviennent des États autonomes, à l'exception de l'Algérie qui arrache en 1962 son indépendance au terme d'une lutte sanglante (Cooper, 2013).

Malgré l'indépendance politique des nouveaux États-nations, les anciennes puissances coloniales trouvent dans le développement un nouveau moyen de domination, plus subreptice et plus puissant, d'ordre technique, économique et culturel davantage que politico-administratif. (Rist, 2013). Le développement induit en effet une vision progressiste des civilisations selon laquelle les peuples du monde suivent, de manière universelle, un même processus d'accroissement, des biens et du confort matériels (du « niveau de vie »). Selon ce point de vue, certains pays, moins développés que les autres ou « sous développés », sont « en retard » et doivent le rattraper. Une hiérarchie entre les pays subsiste donc, mais elle est en quelque sorte naturalisée par l'universalisation du même processus à l'humanité entière. La pratique de la comptabilité nationale et la mise en place de nouveaux indicateurs rend possible une comparaison d'aspect objectif.

Les pays industrialisés justifient ainsi « la possibilité — ou la nécessité — d'une intervention », présentée« comme une œuvre commune, un « effort mondial », une « entreprise collective » fondée sur la croissance de la production, une meilleure utilisation des ressources naturelles et humaines du monde » (Rist, 2013, p. 142-143). Cette hiérarchie justifie ainsi l'action des peuples développés envers les peuples sous-développés, *via* de nouvelles institutions et des organismes de « coopération » florissants à l'issue de la guerre, tels que l'UNESCO.

125. Les États-Unis « ont évidemment intérêt au démantèlement des empires coloniaux pour avoir accès à de nouveaux marchés » (Rist, 2013, p. 142).

La création du ministère de la Coopération en 1959, à la suite du ministère de la France d'Outre-mer, reflète cette stratégie de maintien des intérêts économiques dans ces territoires, et, plus globalement, de rapports de pouvoir déséquilibrés au profit de l'ancienne puissance coloniale [126].

## Aide au développement par l'énergie : hiérarchies des convertisseurs et des populations

Parmi les outils de quantification du développement d'un pays, le bilan énergétique est fondamental, et la classification des nations en fonction de leur consommation d'énergie justifie également la position de subalterne donnée aux pays « sous-développés ». Cette nouvelle expression d'une vision évolutionniste de l'histoire des sociétés est incarnée par la théorie de Leslie White, anthropologue néo-évolutionniste américain qui relie directement le niveau d'évolution d'une société à la quantité d'énergie qu'elle consomme. On la retrouve dans les discours d'acteurs de l'énergie en France, qui utilisent ainsi la « sous-consommation » d'énergie pour justifier une aide technico-économique à la croissance énergétique. Un personnel d'EDF, J. Apertet [127] , affirmant qu'« il existe, dans les pays à développement industriel déjà marqué, une corrélation entre la consommation d'énergie d'un pays et le niveau de vie de ses habitants », illustre cette corrélation par un graphe (Figure 6.14) représentant la consommation d'énergie par habitant, qu'il considère comme un « indice sûr du développement industriel », et le revenu par habitant qu'il assimile au « niveau de vie », pour plusieurs nations du monde. D'une part, il suggère ainsi la co-construction harmonieuse d'une société industrielle et d'une société d'abondance (dont les fruits seraient partagés par tous), et d'autre part, il figure de manière chiffrée et imagée une classification de toutes les nations, où les États-Unis gagneraient la course de la modernisation, où la France serait « en retard » par rapport aux autres nations industrialisées. Loin derrière, les pays « sous-développés » sont à l'aube de la civilisation. Maneklal Sankalchand Thacker, directeur de l'Indian institute of science, auteur du rapport « The role of energy in under-developped areas » publié en 1951 pour l'UNESCO dans le cadre du thème « Energy in the service of man », va encore plus loin en affirmant que ce n'est pas seulement la quantité d'énergie par habitant, mais la quantité d'énergie électrique par habitant, qui détermine le degré d'avancement industriel d'un pays, lui-même garant d'une prospérité souhaitable pour l'ensemble de l'humanité [128].

126. En ce qui concerne l'Algérie, Annick Lacroix, (2014) dit ainsi qu'« au début, la coopération fut sans doute pensée comme un moyen pour la France de maintenir son rayonnement en Algérie et d'y conserver ses intérêts » (Annick Lacroix, 2014).

127. Apertet est chef de la division « Programmes et études techniques » de l'Inspection générale pour la Coopération hors métropole d'EDF (cf suite de cette introduction).

128. Il le dit en ces termes : « It is no wonder that one of the most fundamental criteria of industrial advance today is the quantum of electrical energy produced and utilized per occupied person in a coun-

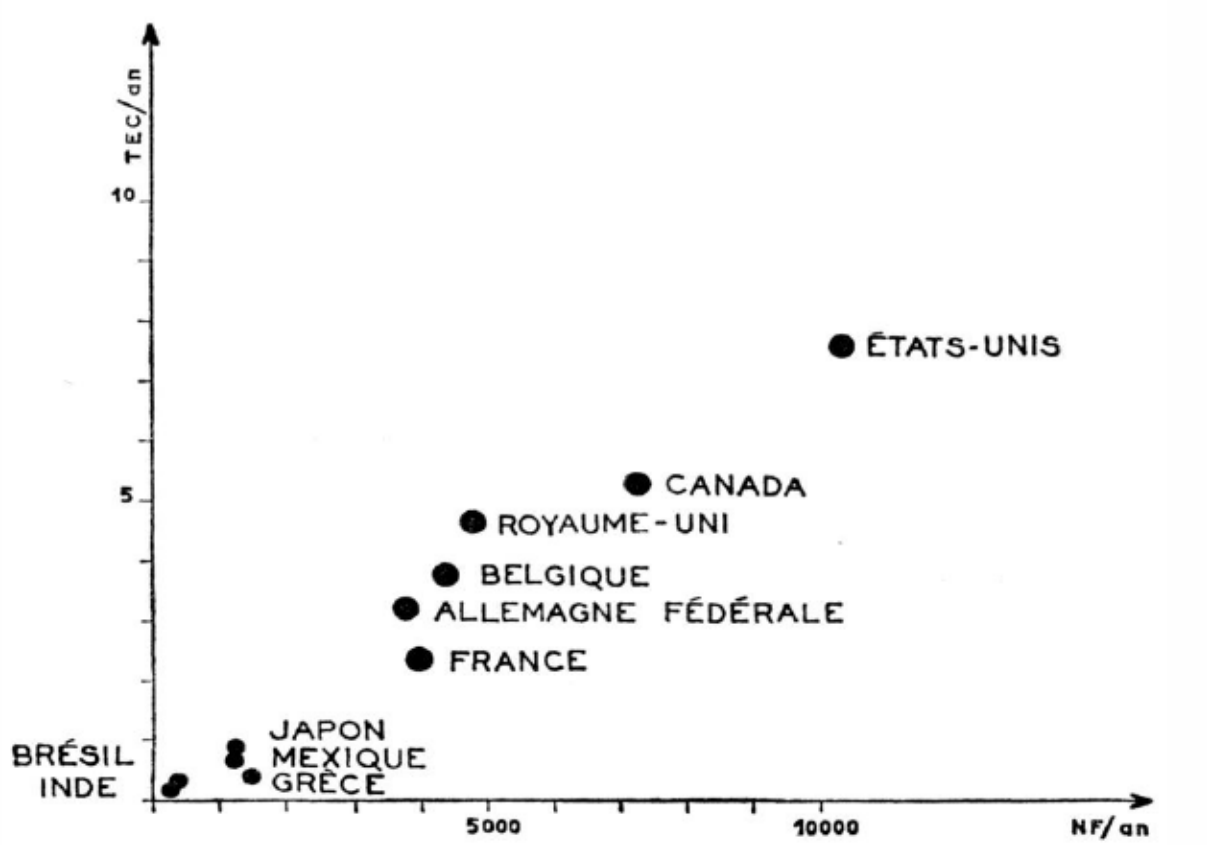



FIG. 1. — Relation entre la consommation individuelle d'énergie (en T.E.C./an) et le revenu national par habitant (en NF/an)

FIGURE 6.14 – Corrélation entre le « niveau de vie » et le « développement industriel » de plusieurs nations du monde par un représentant de l'Inspection générale pour la Coopération hors métropole d'EDF (APERTET, 1961, p. 2)

L'aide au développement motive, au début des années 1950, plusieurs programmes et travaux de recherche internationaux sur l'utilisation des énergies naturelles, auxquels participent des chercheurs français. Le sujet est ainsi abordé à l'ONU, à l'OECE, à l'UNESCO, mais aussi au sein d'associations spécifiquement dédiées au sujet telles que la Coopération méditerranéenne de l'énergie solaire (pays méditerranéens), créée en 1962 à l'instar de l'Association for applied solar energy (AFASE) (États-Unis) sous l'impulsion de chercheurs français ayant fui l'Algérie indépendante. Un colloque international sur les « énergies des mers » (marées, énergie thermique des mers, houle et vagues, courants marins) est en outre organisé en France en 1956 par la Société hydrotechnique de France. Pour les acteurs de ces institutions internationales, il s'agit d'augmenter les disponibilités énergétiques des pays industrialisés, dont les possibilités s'amenuisent, mais aussi d'aider les régions dites « sous-développées » du globe au développement économique et social dont l'énergie est un élément crucial. La nécessité de la croissance énergétique, avec un objectif philanthropique à vocation universelle et tout ce qu'il peut impliquer d'impérialisme culturel, et l'épuisement des ressources fossiles sont ainsi le fondement des discours de légitimation de ces recherches.

À l'UNESCO, le programme « zones arides », « piloté au départ par un conseil représentant sept pays (Égypte, États-Unis, France, Inde, Israël, Mexique et Royaume-Uni), [...] vise ainsi, avec l'aide des bureaux régionaux de coopération scientifique, à développer les potentialités des zones arides et semi-arides par la coopération internationale et le soutien aux projets innovants » (Teissier, 2013, p. 10). Il s'appuie sur une « représentation multiforme et polysémique du manque d'eau » et devient le « noeud de tout un développement scientifique et discursif global sur les ressources naturelles, la nature et l'environnement », qui justifie l'intervention des États « développés » (Fernandez, 2014). Le programme organise et finance des colloques, rapports et projets tout au long de la décennie 1950, y compris à propos de l'exploitation des énergies solaire et éolienne. À l'ONU, un « groupe de l'énergie éolienne » est constitué en avril 1950 et publie une étude sur « l'utilisation de l'énergie éolienne dans les régions désertiques » [129]. Sous l'égide de l'ONU, un rapport sur les « Sources nouvelles d'énergie et [le] développement économique » est en outre publié en 1957, et une conférence sur les « nouvelles sources d'énergie » a lieu à Rome en 1962.

À l'OECE, un groupe de travail sur la distillation des eaux saumâtres organise des journées d'études portant entre autres sur la distillation solaire, et impulse un programme d'équipement du Sahara algérien en distillateurs solaires par les services techniques co-

try ».
Archives UNESCO, p.d., M. S Thacker, « The role of energy in under-developed areas », rapport publié dans le cadre du thème de discussion « Energy in the service of man », 24/05/1951 (p. 10).
129. Archives UNESCO, p.d., E. W. Golding, « Rapport sur les aspects économiques et pratiques de l'utilisation de l'énergie éolienne dans les zones arides », Rapport publié dans le cadre du programme de la zone aride, 03/09/1953.

loniaux français. À l'issue des décolonisations, la COMPLES est créée, dans le but de fédérer les recherches sur l'énergie solaire dans le bassin méditerranéen, et un des objectifs premiers est l'« aide au développement » des pays « sous-développés » (Pehlivanian, 2014). On trouve, dans ces événements internationaux, des chercheurs français en tant que spécialistes [130], tels que, pour le solaire, Félix Trombe [131] , Henri Masson [132] , Charles Perrot [133] ; pour l'éolien, G. Lacroix [134], Louis Vadot [135] ; pour l'énergie thermique des mers, André Nizery [136] et Christian Beau [137] ; ou encore, pour les marées, Robert Gibrat [138].

Bouvier, (2016) et Teissier, (2013) ont souligné chacun à leur façon que deux types de développement, deux types de relations internationales, associés à deux types de couples machine-énergie, étaient à l'œuvre dans cette dynamique. Teissier, (2013, p. 25) a mis en évidence, à propos de l'énergie solaire, l'articulation entre deux types d'enjeux internationaux et à deux types de technologie : coopération et domination des pays du Nord vis-à-vis des pays du Sud, avec la mise au point de convertisseurs de « basse technologie » ; et compétition internationale entre pays du Nord, avec des travaux sur des convertisseurs de « haute technologie ». Ainsi, selon cet auteur, « à l'instar de la France, les pays industrialisés ont eu tendance, par leurs politiques énergétiques, à favoriser la haute technologie sur la basse technologie : le nucléaire plutôt que le solaire ; le photovoltaïque plus que le solaire passif », car « [l]a haute technologie correspond mieux à l'impératif de « modernité » après lequel courent les politiques » ;« les pays riches, en revanche, conseillent la basse technologie aux pays pauvres ». Les convertisseurs de « basse technologie » dont il est question dans l'article sont des procédés d'une construction et d'une utilisation simples

130. En ce qui concerne le solaire et l'éolien, les spécialistes les plus présents dans les colloques et rapports internationaux de l'UNESCO et l'ONU ne sont pas français. L'Anglais Edward W. Golding, pour l'éolien, et l'Américain Farrington Daniels, pour le solaire, y sont le plus représentés. Il n'y a pas de spécialiste de l'énergie géothermique français.

131. Professeur au CNRS, responsable du programme solaire ; présent dans tous les colloques internationaux sur l'énergie solaire (UNESCO, ONU, Association for applied solar energy (AFASE), colloques de la COMPLES...

132. Professeur à l'Université d'Alger et responsable d'un programme solaire, Vice-président de la section « énergie solaire » du colloque « Wind and solar energy » de l'UNESCO.

133. Professeur à l'Université d'Alger puis de Marseille ; fondateur de la COMPLES.

134. Ingénieur à la Compagnie électro-mécanique ; il est chargé de rédiger un rapport technique sur les éoliennes dans le cadre du programme zone aride de l'UNESCO.
Archives UNESCO, p.d., Lacroix, « Structure of wind-driven machines », 12/10/1953.

135. Ingénieur à Neyrpic, spécialiste des éoliennes de pompage ou productrices d'électricité ; spécialiste de l'énergie éolienne à la conférence de Rome sur les nouvelles sources d'énergie.

136. Ingénieur des Ponts et chaussées, Directeur adjoint des études et recherches d'EDF et Directeur général de la société L'énergie des mers.

137. Inspecteur général des Travaux publics des Colonies puis de la France d'Outre-mer, président de la société L'énergie des mers ; à la mort de Nizery, le remplace dans les colloques internationaux, comme au colloque Wind and solar energy de l'UNESCO en 1956, ou, la même année, aux Journées de l'hydraulique sur l'énergie des mers.

138. Ingénieur-conseil EDF pour les usines marémotrices ; chargé de rédiger le rapport sur l'énergie des marées dans le rapport « Sources nouvelles d'énergie et développement économique » de l'ONU. Organisateur et auteur de trois rapports pour les Journées de l'hydraulique sur l'énergie des mers en 1956.

et peu coûteuses, de petite puissance, directs, à usage domestique, tels que le chauffage de l'air et de l'eau, la cuisson, la climatisation ; les convertisseurs de « haute technologie » sont des procédés sophistiqués et coûteux, mettant en jeu soit de grandes puissances, soit l'électricité comme vecteur énergétique, et à usages très spécifiques, tels que le solaire photovoltaïque ou les fours solaires. Selon Bouvier, (2016, p. 233-234), traitant plus particulièrement les institutions européennes, celles-ci auraient instauré « une séparation franche [...] entre énergies de la civilisation industrielle (charbon, pétrole, atome, hydraulique) et les énergies des pays qu'Alfred Sauvy regroupa sous le nom de « Tiers-Monde » en 1952 (solaire, hydraulique, énergie thermique des mers) », qui auraient été ainsi « reléguées dans les espaces extra-européens ». L'auteur évoque également l'importance d'un marché international des convertisseurs d'énergies naturelles, car « les technologies étant développées dans les pays industrialisés, des liens commerciaux et industriels devaient être établis entre pays du Nord et du Sud, que ce soit dans un contexte colonial ou dans celui de la coopération technique » (Bouvier, 2016, p. 233-234).

Ces propositions de Teissier, (2013) et Bouvier, (2016) à propos de la dynamique internationale sur l'ensemble des énergies naturelles et de la position qu'y ont tenue les institutions françaises envers les pays du Sud peut être étendue aux colonies françaises en quête d'indépendance. En effet, les territoires de l'Union française sont l'objet d'une planification économique qui se justifie en partie par la rhétorique du développement des populations indigènes, et dont il est maintenant question.

## Politique énergétique dans l'Union française : discours du développement, réalisations productivistes

Une Commission de modernisation et d'équipement des Territoires d'Outre-mer (TOM) ainsi qu'une Commission de modernisation de l'Algérie, de la Tunisie et du Maroc sont chargées de cette planification. Les réalisations préconisées par la Commission des TOM s'appuient sur deux organismes financiers créés en 1946 : le Fonds d'investissement pour le développement économique et social de l'Outre-mer (FIDES) et la Caisse centrale de la France d'outre-mer (CCFOM). Dans les discours, la Commission des TOM annonce l'objectif du développement des populations indigènes ainsi que celle d'une intensification de la production de richesses sur territoires. Cependant, dans les faits, les réalisations ont plutôt été dans le sens de du productivisme et d'une modernisation des infrastructures pour les populations blanches.

Le premier Plan de modernisation des TOM (1948-1952) préconise ainsi deux directions : « [d]'une part et par priorité, satisfaire aux besoins des populations autochtones et généraliser les conditions les plus favorables à leur progrès social. D'autre part, en

concordance avec les plans établis par le Commissariat général au Plan, concourir à l'exécution des programmes de reconstitution et de développement de l'économie de l'Union française » (Meyhong et Ndong, 2011, p. 94-95). Par la suite, cependant, le second objectif prime sur le premier. En effet, les réalisations à but social pour ces populations sont moindres que ce qui était prévu, alors que l'objectif d'exploitation des richesses est plus largement soutenu que ne le prévoyait le Plan. En outre, le second Plan de modernisation et d'équipement des TOM (1954-1957) exprime clairement que cette « politique sociale, généreuse certes », est « beaucoup trop lourde pour des économies encore peu développées et vulnérables » et que la priorité était donc donnée « au développement de la production » [139].

Deux auteurs, contemporains de ces Plans, de la revue *Présence africaine* [140], démentent ainsi la priorité proclamée dans le premier Plan au bien-être des populations indigènes (Présence africaine, 1956, p. 50 ; Dumaine, 1955). Celle-ci n'aurait été qu'une réponse opportuniste « aux attaques de l'opinion internationale alors anticolonialiste » (Présence africaine, 1956, p. 50), ainsi qu'une formule démagogique visant à apaiser ces populations qui réclamaient la reconnaissance de leur contribution décisive à l'effort de guerre français par une « cessation de l'oppression colonialiste qui pesait sur eux ». Aussi, dès le départ, l'ambition de ce Plan, élaboré par une Commission composée uniquement de hauts fonctionnaires, de banquiers et d'industriels, a été d'exploiter les richesses agricoles et minières pour le compte de l'industrie française, mais aussi de « surmonter le déficit politique en dynamisant les liens économiques » (Varaschin, 2002, p. 388).

Cette stratégie se retrouve dans la politique énergétique menée par les acteurs du développement de l'Union française. Les planificateurs et administrateurs de l'Outre-mer mènent une politique énergétique dans les TOM, pour remédier à la « sous-consommation » d'énergie et à la vétusté de l'appareil productif. Mais elles sont différenciées en fonction des territoires d'application et, en leur sein, des populations visées (blanche ou autochtone). L'équipement électrique mobilise ainsi la plus grande partie du budget consacré à la politique énergétique des TOM, mais l'électrification « refl[ète] plus qu'elle ne transform[e] les structures économiques et sociales coloniales » (Varaschin, 2002, p. 403). À EDF, l'Inspection générale de l'Union française et de l'étranger à EDF (IGUFE), doit contribuer à l'électrification des territoire de l'Union française [141] . Elle est créée dans un

139. Commissariat général au Plan. Commission de modernisation et d'équipement des TOM, 1954.

140. Cette revue est créée pendant la seconde guerre mondiales par des militants noirs africains pour « redonner à la culture africaine sa place dans le concert des nations » (site internet de la revue *Présence africaine* : www.presenceafricaine.com/info/9-revue).

141. Cette activité consiste à « participer plus ou moins minoritairement au capital des SEM [Sociétés d'économie mixte], à assurer auprès d'elle un rôle d'ingénieur-conseil et à leur apporter un appui administratif » (Varaschin, 2002, p. 396).

but affiché d' « aide au développement des populations indigènes », mais surtout « au nom de l'héritage, d'intérêts politiques et économiques [et seulement] accessoirement, du devoir d'aide au développement des populations indigènes » (Varaschin, 2002, p. 389). Ainsi, « la forte expansion d'une consommation électrique le plus souvent très faible en 1946 ne doit pas faire illusion » : cette croissance de la consommation fut focalisée sur les grands centres industriels et concerna très peu le monde rural, et elle s'est adressée à une clientèle essentiellement blanche, qu'elle soit industrielle, domestique ou commerciale. La politique énergétique a ainsi majoritairement consisté à « améliorer le rendement des centrales thermiques peu fiables (diesel fonctionnant au fuel lourd) puis [à] mettre en valeur le potentiel hydraulique » (Varaschin, 2002, p. 389-396). En 1953, B. Deglaire, ingénieur en chef aux Études d'Outre-mer d'EDF, mentionne ainsi deux types d'électrification : celle des « grands centres industriels » qui « engendre un accroissement de productivité générateur d'enrichissement et de civilisation » ; et celle des « centres secondaires et des centres ruraux » qui « favorise le développement de l'artisanat, le pompage de l'eau, l'irrigation et les cultures vivrières et, par là, le maintien d'une certaine stabilité démographique des populations rurales ». Selon l'auteur, le second type d'industrialisation est bien moins coûteux que le premier. Pourtant, lorsqu'on regarde le plan de financement préconisé par la sous-commission de l'énergie, c'est le premier secteur qui monopolise presque tout le budget.

Le même constat peut être fait pour l'Algérie. La création d'EDF y fournit un modèle pour celle d'Électricité et gaz d'Algérie (EGA), entreprise nationale qui poursuit les efforts entrepris par le service des Travaux publics algériens à partir de 1936, pour interconnecter le réseau et valoriser au maximum l'énergie hydraulique du territoire (Lefeuvre, 2002). Mais cette énergie est destinée à une population très majoritairement urbaine et blanche.

Certaines énergies naturelles (énergie thermique des mers, soleil, vent) ont fait l'objet de programmes dans l'Union française, de manières différentes en fonction des territoires et des usagers visés.

## Tendances énergétiques globales (métropole). Du protectionnisme à l'ouverture au marché

La période voit globalement, conformément aux ambitions des planificateurs et des responsables des nouvelles institutions nationales chargées du développement du système énergétique, une augmentation fulgurante de la consommation d'énergie. La consommation totale en France passe ainsi de 52.6 Mtep en 1938 (Lévy-Leboyer, 1994a, p. 14) à 175 Mtep en 1973 (Commissariat général au Plan. Commission de l'énergie,

1975). S'appuyant dans un premier temps sur la production hydroélectrique et charbonnière, dans une période de protectionnisme, cette croissance énergétique se base, à partir des années 1960, sur l'augmentation fulgurante de la consommation de pétrole importé.

## La fin du charbon-roi

Dans les années qui suivent directement la guerre (1945-1948), le charbon est d'abord prioritaire dans les politiques de reconstruction et de modernisation de l'appareil énergétique. Les Charbonnages de France reçoivent ainsi d'importantes aides financières de la part de l'État. Après une nouvelle pénurie de charbon âprement ressentie par les populations et l'industrie, l'objectif, promu à la fois par les représentants de l'État et par les dirigeants du parti communiste et les syndicats ouvriers, est, dans une « ambiance « stackhanoviste » », qu'il faut extraire un maximum de charbon « à tout prix », afin d'assurer l'indépendance énergétique nationale. Ainsi, le charbon reste « une énergie-clef [en France] jusqu'au milieu des années 1950 », avec une apogée de production en 1958 (Chélini, 2009, p. 126 ; 142). D'immenses efforts de la part des ouvriers sont sollicités, avec un allongement du temps horaire et hebdomadaire de travail ainsi qu'un « retour à des pratiques anciennes pourtant dénoncées » telles que le « salaire à la pièce » (Varaschin, 2009b, p. 137-138). Cette mobilisation intense et autoritaire est, malgré de nouveaux statuts et avantages concédés aux mineurs à la Libération en raison du rôle crucial qu'ils ont joué pendant l'Occupation et du poids du Parti communiste et de la Confédération générale du travail (CGT) à l'issue de la guerre, à l'origine d'un grand mécontentement de la part des mineurs, qui mènent une grève « d'une rare puissance et d'une rare violence » à l'automne 1948, durement réprimée par les autorités (Fontaine et Vigna, 2014).

Sur la période (1949-1958), un glissement s'opère de la recherche d'une ressource nationale à « tout prix » à la recherche de l'énergie « au moindre prix » (Varaschin, 2009b, p. 139-141). Il répond à l'injonction à la productivité promue par les acteurs de la modernisation. Les responsables de la politique énergétique décident la fermeture des houillères jugées les moins rentables, mais aussi la mécanisation de l'extraction. Mais malgré ces efforts de « modernisation », le charbon peut de moins en moins, dans le contexte d'ouverture du marché des années 1950 [142] et d'abandon du protectionnisme, concurrencer le charbon étranger, dont la productivité est plus grande, ou les autres sources d'énergie comme le gaz, l'électricité et le pétrole (Chélini, 2009, p. 113 ; 124 ; Varaschin, 2009b, p. 140-142). En effet, les gisements français en cours d'épuisement sont de plus en plus difficiles à exploiter. Mais surtout, la part du salaire des ouvriers et des charges sociales, dues à des décennies de luttes ouvrières, couplée à l'abondance de la main d'œuvre nécessaire

142. Notamment, avec la création de la Communauté européenne du charbon et de l'acier (CECA) en 1953 (Chélini, 2009, p. 124).

à l'extraction minière, est devenue telle que « le prix de revient de la tonne de charbon français extrait semblait insupportable pour une économie qui s'ouvrait à l'Europe et au monde » (Varaschin, 2009b, p. 148). Associé aux objectifs du moindre coût et de productivité maximale, c'est l'argument qui justifie le « plan d'adaptation des houillères », annoncé par le ministre de l'Industrie en décembre 1959. Il prévoit le déclin progressif de la production houillère française, et est appliqué malgré de nombreuses grèves de mineurs.

Ainsi, les Charbonnages de France font « les frais du passage de l'« économie abritée » à « l'ouverture au monde » » (Varaschin, 2009b, p. 152). Pour Timothy Mitchell, la volonté de saper le pouvoir des mineurs est la raison principale de l'abandon délibéré du charbon par les sociétés occidentales après la seconde guerre mondiale, au profit du pétrole, qui, par ses propriétés géologiques et physiques, nécessite une main d'œuvre moins nombreuse et plus disséminée, plus facile à surveiller, donc moins organisable, et passe par des réseaux maritimes bien plus aisément contournables que les chemins de fer rigides et faciles à bloquer (Mitchell, 2011). Pour Louis Puiseux, le plan de régression des houillères, associé à l'ouverture aux importations massives de pétrole, signe la victoire des « productivistes » sur les « autonomistes », récurrente dans les controverses énergétiques françaises d'après-guerre (Puiseux, 1982).

Base du développement industriel depuis la fin du XIX^e^ s, le charbon est donc relégué à une énergie du passé dans les années 1960. De ce fait, les houilles colorées disparaissent progressivement des discours des porteurs de projets d'exploitation des énergies renouvelables.

## Expansion et hégémonie du pétrole (et de l'« *americain way of life* »)

Les politiques pétrolières suivent la même logique que les politiques charbonnières (priorité à l'indépendance nationale puis ouverture sur le marché international), avec des conséquences inverses sur sa consommation. À l'issue de la guerre, dans le but d'une autonomie énergétique, le BRP et la Société nationale des pétroles d'Aquitaine sont chargées de développer une production nationale. En 1953, du pétrole est trouvé à l'Est de Paris, et en Algérie, mais il est largement insuffisant pour la consommation (Morsel, 1996c, p. 200-201). À la fin des années 1950, et malgré la crise du canal de Suez, la consommation [143] et les importations françaises de pétrole augmentent considérablement. Comme le reste de l'Europe, la France est en effet l'objet d'une stratégie américaine de transition énergétique vers une société consommatrice de pétrole. Le Plan Marshall finance ainsi largement l'importation de pétrole, mais aussi la création de raffineries, l'achat d'auto-

143. 13.5 MTEC en 1949, 44.2 MTEC en 1961, 176.3 MTEC en 1973 (Morsel, 1996a, p. 201).

mobiles américaines et la construction de pipelines du Moyen-Orient vers l'Europe. Les État-Unis encouragent également la construction de routes et d'usines automobiles. (Mitchell, 2011, p. 47-48). En outre, dans les années 1960, les multinationales exploitant le pétrole de Moyen-Orient abreuvent l'Europe de pétrole à bas coût, exportation bien accueillie en France par le ministère de l'Industrie qui choisit de ne prendre aucune mesure protectionniste — décidant en même temps le Plan de régression des houillères (Puiseux, 1982, p. 611). Ceci explique un « mouvement de ciseau entre pétrole et charbon » entre 1950 et 1973 : le bilan énergétique est composé, en 1950, de 75% de charbon et 18% de pétrole et, en 1973 de 17.5% de charbon et 66.5% de pétrole (Woronoff, 1994, p. 841). La consommation de pétrole passe, quant à elle, de 8 Mtep en 1938 (Lévy-Leboyer, 1994b, p. 18) à 116 Mtep en 1973 (Commissariat général au Plan. Commission de l'énergie, 1975).

Cette dépendance croissante au pétrole en France est un facteur d'abandon des projets d'exploitation des énergies naturelles, mais elle explique aussi l'important impact du choc pétrolier de 1973 sur l'histoire des énergies renouvelables, qui sont alors l'objet de nouvelles politiques énergétiques et de recherche.

## Électricité : politique de l'offre et explosion de la consommation

À la centralisation des institutions de l'électricité par la création d'EDF correspond une homogénéisation du système électrique. EDF finalise ainsi l'interconnexion nationale amorcée pendant l'entre-deux-guerres, couplée au développement du réseau électrique. Ceux-ci se font par la construction de nouvelles centrales, de nouvelles liaisons et d'une standardisation technique des réseaux à haute, moyenne et basse tension (Morsel, 1996a, p. 16-17). Si le développement du réseau se fait selon des disparités régionales — des régions comme la Bretagne et la Sarthe seront électrifiées plus tardivement que les autres (Beltran et P. Carré, 2016, p. 268-272)— l'issue de la période voit l'ensemble de la population française desservie par le réseau électrique.

EDF mène en outre une politique de croissance exponentielle de la production d'électricité. Celle-ci est telle que l'objectif d'un doublement de la consommation d'électricité tous les dix ans est dépassé tout le long de la période. La consommation d'électricité en France passe ainsi de 19 milliards de kWh en 1939 à 159 milliards de kWh en 1973 (Dubois, 1996, p. 578).

Jusqu'aux années 1960, EDF répond à une demande d'électricité croissante, suscitée par la conversion de certaines industries, l'électrification des chemins de fer, la mécanisation de l'agriculture, et, en moindre mesure, l'électrification des ménages (Dubois, 1996, p. 629). Cette dernière est largement attisée par la diffusion de l'idéal de l'*american way*

*of life via* par la publicité de certains constructeurs d'appareils ménagers, qui mènent aussi des opérations d'« éducation » aux appareils électro-ménagers, mais également par les images de modernité propagées dans les revues, la radio, le cinéma, etc. Des « crédits aux ménages » devaient aussi susciter cette conversion au « confort électrique » (Morsel, 1996c, p. 190). EDF ne participe alors pas significativement à la promotion de l'utilisation de l'électricité. Mais, à partir des années 1960, l'entreprise passe à une politique de l'offre et développe une activité commerciale. Celle-ci doit répondre aux objectifs du quatrième Plan qui « assignait au secteur de l'électricité des objectifs ambitieux, qui n'auraient pu être atteints spontanément ». L'argument de l'infériorité française dans la course à la modernité est à nouveau brandi : « la France [est] très en retard pour la consommation des ménages » (Dubois, 1996, p. 629). Un « département des applications de l'électricité » est ainsi créé en 1962 à la direction des Études et recherches, muni d'un important budget. Ils suscite la demande dans les ménages par de vastes campagnes promotionnelles combinant des prestations pour l'adaptation des installations électriques domestiques afin que celles-ci soient capables de délivrer une puissance plus importante, des tarifs attractifs, de la publicité chez les constructeurs d'appareils, dans les journaux locaux et les foires puis dans les médias de grande audience. Cette publicité, « orientée autour de l'abondance des objets » (Bouvier, 2012a), tourne la population vers l'utilisation des appareils électro-ménagers de plus en plus nombreux — lave-vaisselle, chauffe-eau, cuisinières, téléviseurs... Cette activité commerciale se révèle efficace vis-à-vis de l'objectif affiché d'une augmentation de la consommation d'énergie : entre 1963 et 1973, « les ventes [d'électricité] à l'industrie avaient progressé de 70%, celles au tertiaire de 20%, celles aux ménages de 190% », et cette « poussée vigoureuse » a été « fortement accentuée par l'action commerciale de l'EDF » (Dubois, 1996, p. 652). Le choc pétrolier stoppe la campagne de promotion de l'électricité d'EDF, qui se termine par la promotion du chauffage électrique résidentiel. Une interdiction de faire de la publicité dans le but de promouvoir la consommation d'énergie est en effet alors promulguée (Bouvier, 2012a).

La croissance énergétique se fait par le biais d'une intense activité de construction de nouvelles centrales. À l'issue de la guerre, une « mystique » de la houille blanche, énergie nationale et inépuisable, est ravivée. Le programme de construction de nouveaux barrages hydro-électriques gigantesques amorcé pendant la guerre est poursuivi. En outre, de nouvelles centrales thermiques de grande puissance sont construites — et les plus petites et « vétustes » fermées. Elles se basent sur l'augmentation de la production houillère nationale et l'importation de charbon américain à bas prix. Mais c'est, dans un premier temps, essentiellement sur la production hydro-électrique que se fonde l'augmentation de la production d'électricité : entre 1946 et 1960, 60% de l'électricité provient de la houille blanche (Morsel, 1996a, p. 18-19). Cependant, le programme hydro-électrique

est ralenti dans les années 1950, en raison d'une « saturation » technico-économique [144], prévue dès le début du programme d'équipement électrique. Celui-ci est alors continué par la construction de centrales thermiques au charbon, au gaz, mais, de plus en plus, au pétrole. La part du pétrole dans la production électrique devient ainsi majoritaire au début des années 1970 (elle est de 46% en 1973).

L'énergie nucléaire est, dès le premier Plan, envisagée pour contribuer à l'accroissement de la production d'électricité, mais le programme nucléaire civil met du temps à porter ses fruits. Après le renvoi de Frédéric Joliot-Curie en 1950, l'objectif principal des dirigeants du CEA, qui construit les premiers réacteurs de conception française G1 et G2 entre 1955 et 1958, est de construire une bombe atomique française, et la production d'électricité n'est que secondaire dans ce programme (Hecht, 2014, p. 47-61). En 1959, le réacteur nucléaire G2 est ainsi couplé au réseau électrique, mais il est surtout voué à la production de plutonium. Une production en grand d'électricité nucléaire n'est ainsi envisagée que dans les années 1960. En 1965, le cinquième Plan prévoit un vaste programme d'équipement électronucléaire (Morsel, 1996a, p. 20). Le « tournant nucléaire » français commence donc avant les chocs pétroliers, et, comme le souligne Sezin Topçu, « la crise pétrolière fut « considérée à tort comme un moment décisif dans la nucléarisation de la France » (Topçu, 2015, p. 190). Il est déterminant pour l'abandon de plusieurs projets d'exploitation des énergies naturelles.

## Les énergies naturelles en contextes : synthèse

En France, sur la période (1940-1970), l'énergie, la recherche scientifique et les territoires coloniaux sont investis par les gouvernements successifs de diverses ambitions. Elles déterminent la reconfiguration ou la création d'institutions centralisées qui s'impliquent dans des projets d'exploitation des énergies naturelles. Globalement, une accumulation de ces enjeux, et des continuités institutionnelles, amènent une continuité des projets d'exploitation des énergies naturelles sur la période (1940-1970) et justifient la cohérence de la période. Ces enjeux sont les suivants : productivisme (augmentation de la production de richesses nationales et du « niveau de vie »), maintien d'une position de domination sur les territoires du Sud, prestige technologique. Je résume ici ces enjeux chronologiquement, puis synthétise les principaux changements dans les acteurs et les convertisseurs par rapport à la période de l'entre-deux-guerres.

144. C'est-à-dire, une augmentation du prix de revient de l'électricité produite selon des critères précis

## Nouvelles institutions et accumulation des enjeux

Lors de la seconde guerre mondiale, le gouvernement de Vichy opère une modernisation de l'appareil productif qui passe par la mise en place d'une organisation centralisée et dirigiste de l'économie nationale. Celle-ci vise à accroître la production nationale pour alimenter le pays et répondre aux réquisitions de l'occupant allemand. L'électricité et les matières premières coloniales font partie des ressources stratégiques dont la production doit être accrue. Pour ce qui concerne l'empire, à l'objectif de production coloniale s'ajoute un enjeu de légitimation de la présence française que les populations colonisées remettent en cause. Ainsi, de nouvelles institutions centralisées sont créées pour rationaliser et augmenter la production de richesses nationales : le Comité d'organisation de l'énergie électrique (COEE) pour l'électricité métropolitaine, et l'Office de recherche scientifique colonial (ORSC) pour la production coloniale. Ce dernier doit en outre contribuer à légitimer le maintien de l'empire colonial. Pour répondre à ces enjeux, le COEE (productivisme) et l'ORSC (productivisme et légitimation de l'Empire) s'impliquent dans des projets d'exploitation des énergies naturelles (COEE : marées, vent ; ORSC : énergie solaire, énergie thermique des mers).
Le gouvernement de Vichy perçoit également la recherche scientifique comme outil au service du productivisme. Le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) abandonne les visées d'applications militaires qui lui incombaient à sa création en 1939, sous la Troisième république, pour servir cet objectif. Dans ce but, il participe à des projets d'exploitation de l'énergie solaire et de l'énergie thermique des mers pour la production coloniale.

À la Libération, la souveraineté nationale retrouvée, les projets d'exploitation des énergies naturelles mis en place pendant la guerre trouvent une certaine continuité. Celle-ci est rendue possible par le prolongement des institutions créées sous le gouvernement de Vichy, malgré quelques reconfigurations : du COEE à EDF, de l'ORSC à l'Office national de recherche scientifique d'Outre-mer (ORSTOM). Les objectifs productivistes du gouvernement de Vichy se prolongent au service de la modernisation de la France, qui passe par l'augmentation de la productivité et du standard de vie de la population française, basée sur la croissance énergétique. De nouveaux enjeux apparaissent en outre : un sentiment d'humiliation dû à la défaite militaire et à l'Occupation allemande, à la dépendance militaire et économique vis-à-vis des Alliés (en premier lieu les USA), et aux menaces de démantèlement de l'empire colonial dues à des pressions internes et externes. La politique coloniale se mue en coopération pour le développement afin de maintenir des rapports de domination technico-économiques sur ces territoires. Les acteurs de la modernisation cherchent le nouveau rayonnement de la France dans le prestige technologique. Une rupture institutionnelle concerne ainsi le CNRS, auquel ses nouveaux dirigeants donnent une

nouvelle orientation vers la recherche fondamentale au service du prestige technoscientifique. Cela induit un changement dans la dynamique des énergies naturelles : le Centre soutient toujours l'énergie solaire mais les projets prennent une forme radicalement différente, en terme d'acteurs et de convertisseurs.

Dans les années 1960, les acteurs de la politique énergétique décident une ouverture aux importations de combustibles fossiles, en particulier de pétrole, face à la baisse du prix à l'international, ainsi qu'un programme nucléaire favorisé par la mise en service des premiers réacteurs. Les décolonisations donnent un coup d'arrêt à plusieurs projets portés par l'administration coloniale. Ce contexte est défavorable aux énergies naturelles et la majorité des projets sont abandonnés.

## Reconfiguration des acteurs et types de convertisseurs

Du point de vue des acteurs, les années (1940-1970) se distinguent de l'entre-deux-guerres par la prise en considération de presque toutes les énergies naturelles (marées, vent, soleil, énergie thermique des mers) au sein d'organismes publics ou semi-publics à l'échelle nationale, ce qui n'était que le cas que de l'énergie des marées pendant l'entre-deux-guerres. Plusieurs grandes entreprises du secteur de l'énergie s'impliquent en outre dans ces projets. Ce mouvement commence pendant la guerre, de la même manière que celui de la nationalisation et de la centralisation de toutes les formes d'énergie classiques. Les moyens techniques et financiers sont distribués de manière plus coordonnée que dans l'entre-deux-guerres. Cela est vrai pendant la guerre en métropole et aux colonies, et cela reste vrai en métropole après la guerre. Dans les territoires d'Outre-mer, différentes dynamiques naissent autour d'acteurs variés qui, tout en étant en lien, ne se coordonnent pas.

Du point de vue des types de convertisseurs étudiés et de l'imaginaire technicien, une répartition territoriale des convertisseurs est toujours à l'œuvre, comme pendant l'entre-deux-guerres : les conditions techniques (présence ou absence de réseau électrique, routier ou ferroviaire, d'industries, de main d'œuvre spécialisée...), socio-économiques (pays « développés » ou « sous-développés »), géographiques (forte densité de population ou dispersion des lieux d'habitation) induisent une répartition des types de convertisseurs en fonction des territoires. Mais cette logique spatiale se modifie en fonction des transformations du système énergétique. En métropole, le réseau électrique interconnecté maille désormais l'ensemble du territoire. Ce réseau de plus en plus étendu est de moins en moins pensé selon une logique de complémentarité spatiale, à laquelle se substitue une logique de complémentarité temporelle. En outre, l'imaginaire de la puissance électrique, forme particulière de l'imaginaire de la civilisation thermo-industrielle, monopolise désormais les

projets d'exploitation des énergies naturelles en métropole. Dans les territoires coloniaux, plusieurs réalités territoriales et plusieurs enjeux déterminent une variété de formes de convertisseurs.
Deux grands types de convertisseurs sont ainsi associés à deux grands types d'imaginaires : celui de la grandeur, associant des convertisseurs, de préférence puissants et électriques, ou tous autres procédés indirects à caractère sophistiqué, à l'impératif de modernité ; et celui de la simplicité, associant des convertisseurs de petite puissance, potentiellement directs, à des usages rustiques. L'enjeu d'approvisionnement énergétique métropolitain et de grandeur nationale fait exclusivement appel au premier type de convertisseurs. L'enjeu impérial mobilise une palette large entre le premier et le second type d'imaginaire. Ces territoires sont considérés comme des marchés pour des technologies françaises, des terres à mettre en valeur ou des zones urbaines habitées par des Blancs.

## Plan de la Partie III

Cette partie s'articule autour de trois chapitres.

Le chapitre 7.1 étudie l'imaginaire technicien des énergies naturelles dans les discours des ingénieurs et des acteurs de la planification. Il montre que l'expression de forces naturelles est de moins en moins utilisée, et que s'y substituent de nouvelles expressions dont « énergies naturelles » est la plus générique. Il examine aussi l'intérêt des ingénieurs pour les énergies naturelles de façon chronologique, et met en évidence deux grands pôles dans l'imaginaire technicien : celui de la grandeur, associant des convertisseurs puissants, de préférence électriques, ou autres procédés indirects, à l'impératif de modernité ; et celui de la simplicité, associant des convertisseurs de petite puissance, le plus souvent directs, à des usages rustiques.

Les chapitres 8 et 9 relatent des projets d'exploitation des énergies naturelles au cours de deux grandes sous-périodes : la seconde guerre mondiale et la période allant de la libération à la fin des années 1960. De fortes continuités existent entre ces deux périodes : des projets marémoteurs, éoliens et maréthermiques initiés pendant la guerre sont poursuivis. La rupture de 1945 se justifie de deux manières. D'une part, du point de vue des projets, une dynamique autour de l'exploitation de l'énergie solaire, où plusieurs inventeurs sont soutenus par le gouvernement de Vichy (secrétariat d'État aux colonies) et le CNRS dans l'objectif de mettre en valeur les colonies, est stoppée, et laisse place à d'autres projets portés par d'autres acteurs. Après guerre, le CNRS soutient alors des projets de convertisseurs solaires, mais ceux-ci n'ont aucun rapport avec les recherches menées sous le gouvernement de Vichy. Productiviste sous le régime de Vichy, le Centre change ensuite de vocation pour soutenir la recherche fondamentale au service de la grandeur de la France.

Ainsi, ce ne sont pas les mêmes acteurs (les chercheurs professionnels se substituent aux inventeurs), ni les mêmes convertisseurs (les centrales solaires se muent en fours solaires), ni les mêmes enjeux (de l'industrialisation des colonies au prestige technologique). De nouveaux acteurs de l'énergie solaire apparaissent par ailleurs (Universités de Dakar et d'Alger). Une deuxième raison pour cette rupture est méthodologique : les projets menés pendant la guerre, dont j'ai trouvé les traces dans des archives (ministère de l'Industrie et ministère de la France d'Outre-mer) sont très largement méconnus dans l'historiographie, ce qui justifiait de leur laisser une place assez large. Cette attention portée à la période de la guerre permet justement d'insister sur son importance dans les dynamiques qui ont eu lieu lors des décennies suivantes.

Pour chaque sous-période, les projets sont catégorisés selon les territoires de destination des convertisseurs : le territoire métropolitain, et les colonies puis territoires d'Outre-mer. En effet, pour chaque type de territoire, les acteurs des projets nourrissent différents types d'ambitions qui déterminent la forme des convertisseurs, c'est-à-dire :

— pour la métropole de grandes productions d'électricité et, exceptionnellement, de petites puissances électriques pour des usages très spécifiques tels que la signalisation des phares ou l'alimentation des satellites artificiels,
— pour les colonies, de grandes puissances électriques pour les populations blanches ; de grandes puissances, non nécessairement électrique, pour l'exploitation de différentes ressources ; de petites puissances sous des formes diverses pour les populations « sous-développées ».

Plusieurs projets d'après-guerre ont déjà été étudiés par des historiens (notamment, l'usine marémotrice de la Rance, l'usine maréthermique de la société L'énergie des mers et les projets solaires du CNRS et de l'Université d'Alger). La dynamique qui s'est déployée sous le gouvernement de Vichy est par contre largement méconnue, ainsi que certains projets de la période (1946-1970). En outre, certains éléments importants pour mon analyse (notamment, activité inventive, discours sur les énergies naturelles, sur la modernité des convertisseurs) sont absents de ces travaux. Pour cette Partie 3, les sources que j'ai utilisées sont donc, en plus des publications scientifiques et techniques, les suivantes : les rapports de la Commission de l'énergie du Commissariat général au Plan, les archives du ministère de l'Industrie et du service des Phares et balises (Pierrefitte-sur-Seine) et d'EDF (Blois) pour tout ce qui concerne l'énergie des marées (par exemple, projets autre que les usines marémotrices de la Rance et des Îles Chausey, ou encore oppositions à ce dernier) du vent (comme la campagne de jaugeage de l'énergie éolienne avec le Comité technique de l'énergie des vents, ou les projets d'aérogénérateurs autres que ceux des entreprises B.E.S.T-Romani et Neyrpic) et du solaire (position d'EDF sur les convertisseurs solaires). Les archives nationales d'Outre-mer m'ont donné des renseignements à propos des projets solaires menés pendant la guerre par le gouvernement de Vichy et de projets

éoliens menés par le gouvernement d'Algérie entre la fin de la seconde guerre mondiale et l'indépendance de l'Algérie.

Le Chapitre 8 étudie la seconde guerre mondiale, où les énergies naturelles sont mobilisées pour répondre à deux ambitions du gouvernement de Vichy : l'extension et l'approvisionnement du réseau électrique métropolitain, et le maintien des territoires coloniaux ainsi que leur mise en valeur. Pour le premier enjeu, les projets d'exploitation des marées et du vent sont menés par le COEE en lien avec les industriels du secteur de l'électricité et des inventeurs. Le CNRS, l'ORSC et l'administration coloniale participent à des projets d'exploitation de l'énergie solaire et de l'énergie thermique des mers dans les colonies. Les grandes entreprises du secteur de l'énergie participent aux projets marémoteurs, maréthermiques et, pour certains, éoliens.

Le Chapitre 9 étudie la période (1945-1970). En métropole, les projets de production d'énergie électrique par les énergies naturelles sont poursuivis par EDF avec ses partenaires industriels. Le CNRS met au point différents convertisseurs solaires qui contribuent au prestige technologique national. Dans les territoires d'Outre-mer, une société d'économie mixte poursuit le projet d'usine maréthermique sous l'égide de l'ORSTOM. Cette usine doit contribuer à mettre en valeur les ressources coloniales et constituer une vitrine pour un marché international. Enfin, l'administration coloniale met en œuvre des projets de convertisseurs éoliens et solaires de toutes les formes, pour l'approvisionnement du réseau électrique à destination des colons, et pour la mise en valeur agricole de certains territoires de l'Union française.

# Chapitre 7

# Les énergies naturelles au service du productivisme

Ce chapitre examine les nouvelles cohérences des énergies naturelles dans les discours et l'imaginaire technicien des ingénieurs qui en ont fait la promotion. Cette analyse se basera à nouveau, et pour la dernière fois, tout particulièrement sur les relevés systématiques d'articles et notes de *La Nature* et *Le Génie civil*. L'analyse de *La Nature* est tronquée car la revue a cessé de paraître en 1961, mais elle reste intéressante à étudier dans la continuité des deux périodes précédentes.

Cette analyse des discours d'ingénieurs est complétée par celle des rapports de la Commission de l'énergie du Commissariat général au Plan, publiés pour chaque plan quinquennal. Ils montrent l'évolution de l'intérêt de cette Commission, composée d'experts des principales institutions du système énergétique français, sur les énergies naturelles, et donnent des indications sur les orientations officielles qui leur ont été données.

On peut tout d'abord remarquer un glissement sémantique : le terme de « forces naturelles » disparaît peu à peu au profit d'expressions disparates qui ne se sont pas généralisées. Je les appellerai commodément « énergies naturelles », même si cette expression a été moins générale que « forces naturelles » pendant la période (1880-1939) (ou qu'« énergies nouvelles » ou « énergies renouvelables » pendant la période (1970-1990)).

La section 7.1 analyse cette rupture sémantique. Elle montre que ces sources d'énergie ont été considérées comme des relais possibles à la houille blanche en attendant l'énergie atomique, qui constituait un grand espoir des responsables de la politique énergétique française pour l'avenir du pays. En effet, la houille blanche est toujours valorisée comme source d'énergie nationale mais n'est plus décrite comme inépuisable. Ensuite, la section 7.2 examine l'évolution de l'intérêt pour chaque énergie naturelle. Elle montre que l'énergie solaire est celle qui a reçu le plus d'écho dans la presse scientifique et technique, en

particulier dans les années 1950, et que, globalement, l'engouement pour les énergies naturelles se tarit au milieu des années 1960, alors que le pétrole s'impose comme source d'énergie principale et que se précise la possibilité et l'ambition d'un vaste programme nucléaire. La section 7.3 montre la prépondérance dans les discours étudiés des grands projets d'exploitation des énergies naturelles : transformation de grandes puissances, au moyen de grands convertisseurs sophistiqués, et, pour la majorité d'entre eux, produisant de l'électricité pour alimenter le réseau national. Corrélativement, une moindre valeur accordée aux petites installations, *a fortiori* celles n'utilisant pas le vecteur électrique, mis à part dans les discours prônant le « développement » de populations jugées, justement, « sous-développées », liés à des programmes internationaux de coopération. Ces observations rejoignent deux des propositions émises par Teissier, (2013) : celle qui concerne les deux logiques de développement prônées par les pays industrialisés en fonction du pays de destination (industriel ou « sous-développé »), et celle selon laquelle « l'électrification du territoire et la centralisation du réseau par EDF depuis 1945 ont poussé à valoriser l'unicité technique des solutions, en particulier le « tout électrique » à partir des années 1980 », mouvement à mon avis commencé dès les décennies précédentes, et, comme on le verra dans la Partie 4, inversé pour la métropole dans les années 1970-1980.

## 7.1 Énergies naturelles, énergies de remplacement : faire flèche de tout bois

Subsiste-t-il une cohérence dans un ensemble de sources d'énergie qu'engloberait une expression comme « forces naturelles » (1880'-1930'), ou encore « arc-en-ciel des houilles » (1920'-1930') ? Rappelons que « forces naturelles », largement utilisée pendant les deux périodes précédentes, renvoyait au caractère illimité, national, abondant, mais aussi irrégulier et dispersé de ces sources d'énergie.

L'analyse de *La Nature* et du *Génie civil* ne révèle pas d'expression similaire. Celles-ci sont nommées par plusieurs expressions génériques. Les Tables 7.1 et 7.2 montrent celles qui ont été trouvées dans les deux revues. D'abord, on voit que celle de « forces naturelles » disparaît progressivement [1]. Dans le même registre de sources d'énergie qui seraient prodiguées par la nature, « énergies naturelles » ou « sources d'énergies naturelles » sont plus souvent employées. « Énergie » remplace donc « forces ». Leur caractère abondant et inépuisable est toujours mis en avant, et le mot « renouvelable » fait son apparition

1. Les dernières occurrences sont, dans *La Nature*, dans un article de 1946 par Paul Basiaux, chantre de l'utilisation de l'énergie du vent, qui promeut son développement dans l'Aude (Basiaux-Defrance, 1945), et en 1947 par Lucien Perruche qui, parlant plus précisément de « forces naturelles inépuisables », promeut leur utilisation grâce aux pompes à chaleur, dont l'emploi se répandait alors dans d'autres pays (Perruche, 1947).

dans certains discours, comme dans cette définition, donnée par Louis Serra de la Division énergie du vent d'EDF (cf sous-section 9.1.3) de l'« énergie d'origine naturelle » (énergie du vent et énergie hydraulique) : « l'énergie produite par le mouvement naturel de l'air et de l'eau, et par conséquent, indéfiniment renouvelable » (Serra, 1953, p. 291).

On trouve aussi de plus en plus des expressions, plus vagues sur la qualité de ces sources d'énergie, mais montrant le caractère nouveau de l'emploi de ces sources (« nouvelles sources d'énergie »), ou leur fonction qui serait de remplacer ou de suppléer aux sources d'énergie classiques (« énergies de remplacement », « autres sources/ressources d'énergie », « autres formes d'énergie »).

Table 7.1 – Occurrences des expressions « énergies naturelles » et leurs dérivés dans *La Nature* (1940-1961)

| Expressions utilisées | Occurrences | Sources d'énergie désignées |
|---|---|---|
| Énergie(s) naturelle(s) | 3 | Marées ; ETM ; Énergie atomique |
| Forces naturelles | 1 | Marées ; Vent ; Chutes d'eau |
| Forces naturelles inépuisables | 1 | Marées ; Vent ; Chutes d'eau ; Chaleur interne ; Atomique |
| Minerais de chaleur naturels extrêmement abondant | 1 | ETM ; Soleil ; Chaleur interne |
| Nouvelle(s) source(s) d'énergie | 2 | Marées ; ETM ; Atomique |
| Autres sources d'énergie | 1 | Marées ; Soleil ; Chutes d'eau ; Atomique |
| Énergies de remplacement | 1 | Marées ; Vent ; Solaire ; Atomique |
| Autres formes d'énergie | 1 | Marées ; Vent ; Solaire ; Atomique |

Table 7.2 – Occurrences des expressions « énergies naturelles » et leurs dérivés dans *Le Génie civil* (1940-1973)

| Expressions utilisées | Occurrences | Sources d'énergie désignées |
|---|---|---|
| Source(s) d'énergie(s) naturelle(s) | 2 | Marées ; Vent |
| Énergies sauvages | 1 | Vent ; Soleil |
| Autres ressources/autres sources d'énergie | 2 | Vent ; Soleil ; Marées ; Chaleur interne ; Végétaux ; Atomique [3] |
| Nouvelles sources d'énergie | 2 | Marées ; Soleil ; ETM ; Chaleur interne |

3. Dans un article sur la cinquième conférence mondiale de l'énergie, il est question des « autres sources

Pour désigner chacune de ces sources d'énergie, les auteurs utilisent de plus en plus les expressions d'énergie des marées, énergie du vent, énergie solaire, énergie géothermique, plutôt que celles de force des marées, force du vent, chaleur solaire, chaleur interne. Enfin, une nouvelle venue parmi ces sources d'énergie est l'énergie atomique [4]. Ces changements sémantiques suggèrent plusieurs interprétations sur de nouvelles tendances dans la manière de considérer ces sources d'énergie.

D'abord, l'utilisation du mot « énergie », regroupant les manifestations de l'énergie sous toutes ses formes, plutôt que celle de « forces » ou de « chaleur », indique une unification de toutes ces formes dans une même catégorie, justement celle de l'énergie. Cela peut être mis en lien avec la pratique devenue systématique des bilans énergétiques nationaux, associés à la planification et à la comptabilité nationale, l'énergie étant reconnue comme élément crucial et quantifiable de la modernisation et du progrès des nations. Ce progrès, justement, ne se mesure plus seulement sur la puissance industrielle, forte consommatrice d'énergie sous forme de force motrice, mais aussi sur le confort domestique, où la lumière et chaleur sont des éléments essentiels. On peut aussi faire l'hypothèse que cette unification est facilitée par le vecteur électrique qui affirme son hégémonie sur l'imaginaire des énergies naturelles lors de cette période, comme le développera la section 7.3, et qui réunit, dans un même réseau national, l'électricité issue de toutes les formes d'énergie.

Par ailleurs, l'idée de sources d'énergie qui se substitueraient ou s'additionneraient aux autres évoque la recherche frénétique de l'accroissement du bilan énergétique. Elle ne précise pas le caractère de ces autres sources d'énergie. C'est pourquoi le nucléaire, qui ne présente pas le même caractère inépuisable, fait souvent partie de ces catégories. Une idée revient cependant régulièrement : celle que non seulement les énergies fossiles manquent à la France (surtout, pendant et dans les années qui suivent directement la guerre) et qu'elles vont s'épuiser ; mais aussi que l'équipement de nouvelles centrales de houille blanche va rapidement arriver à sa limite technico-économique. Aussi, en attendant la mise au point de l'exploitation de l'énergie atomique, qui promet beaucoup mais qui est encore incertaine, ces autres sources d'énergie seraient le meilleur relais à la houille blanche. Selon les mots de Christian Beau, président de la société d'économie mixte L'énergie des mers, chargée de la mise au point des procédés d'utilisation de l'énergie thermique des mers, « [i]l semble donc qu'il devienne impératif de faire flèche de tout bois et qu'aucune nouvelle source d'énergie ne soit négligée » (Beau, 1957). Pour Apertet, les énergies naturelles s'imposent « sous l'angle du bilan énergétique mondial » (Apertet, 1961, p. 25). Cette

d'énergie » étudiées par une section d'études spéciale : celles-ci réunissent l'énergie géothermique, l'énergie solaire mais aussi les « dégagements de gaz carbonique sous pression du méthane dans les mines » (Le Génie civil, 1956).

4. L'expression d'« énergie nucléaire » a été petit-à-petit imposée par les acteurs du développement du nucléaire civil, justement pour dissocier ce dernier du nucléaire militaire, que connotait l'expression « atomique » (Topçu, 2015, p. 203).

dispersion de la catégorie de « forces naturelles » va dans le sens d'une multiplication des expressions.

Malgré la présence de l'énergie atomique dans beaucoup des catégories identifiées, j'ai préféré, pour cette partie, l'expression d'« énergies naturelles » à celle de « nouvelles sources d'énergie » : la première a été plus spécifique aux sources d'énergies dites aujourd'hui renouvelables, et exclut l'énergie nucléaire.

Les auteurs étudiés valorisent donc les énergies naturelles comme un appoint plus ou moins important pour l'approvisionnement énergétique national. Par exemple, en pleine guerre, Paul Pétry, ingénieur en chef des Ponts-et-Chaussées, est chargé par la Direction générale à l'équipement d'écrire une note sur les « énergies de remplacement », qu'il appelle aussi « énergies de récupération ou sauvages », désignant ainsi l'énergie éolienne, les énergies marines, l'énergie solaire et l'énergie récupérée dans les industries de chauffage (cf sous-section 8.1.2). Cette étude vise à examiner dans quelle mesure ces sources d'énergie « pourraient se substituer au charbon pour l'économiser, dans quelle mesure elles pourraient s'ajouter à l'électricité distribuée » [5]. Pour Pétry, qui n'évoque pas encore la possibilité de produire de l'électricité nucléaire, toutes les chutes d'eau seront équipées d'ici trente ans, et à court terme, c'est l'énergie éolienne qui sera le plus à même de suppléer aux chutes d'eau et au charbon [6]. En 1952, Georges Claude, qui laisse le problème de l'énergie thermique des mers à la société d'économie mixte créée à cet effet (cf sous-section 8.2.1), affirme quant à lui répondre au « problème de la conquête de nouvelles sources d'énergie capables de suivre la cadence du développement industriel », posé en particulier en France par « l'insuffisance des forces hydrauliques et l'étale, dès à présent en vue, de la houille et du pétrole », grâce à ses recherches sur l'énergie géothermique (Claude, 1952). Pour certains auteurs, les marées, source d'énergie hydraulique considérable en France, sont les premières appelées à la relève de la houille blanche. Ainsi, en 1954, pour un auteur du *Génie civil*, « les marées pourraient fournir dans les baies à fortes marées et certains estuaires un contingent d'énergie considérable », « avant que l'énergie atomique commence à apporter son appoint » (Granboulan, 1954). C'est aussi, bien entendu, la position de Robert Gibrat, ingénieur-conseil auprès d'EDF pour les usines marémotrices, et le grand concepteur de l'usine marémotrice de la Rance, pour qui, en 1957, il faut « ménager une ère de transition » vers l'utilisation de l'énergie atomique, car « rien ne laisse prévoir que d'ici 1975 l'atome pourra remplacer la totalité des sources d'énergie classiques ». Il ajoute, en outre, que « les caractéristiques techniques et économiques très différentes des deux sortes d'énergie, marémotrice et atomique, apparaissent complémentaires l'une de l'autre » (Gibrat, 1957). En 1955, selon Félix Trombe, acteur du développement de l'utilisation

5. AN 1991 0305/1, 1941-1957, Lettre de Pétry à Louis Fischer, directeur des Voies navigables et des Ports maritimes, Avril 1942.

6. AN 1991 0305/1, 1941-1957, lettre de Pétry à Louis Hermitte, directeur de la société Rateau, avril 1942.

de l'énergie solaire reconnu internationalement , il faut, en attendant l'énergie atomique, se tourner vers les « énergies de remplacement » : « lorsque le pétrole d'abord, le charbon ensuite seront épuisés, il faudra, de toute nécessité, pallier l'insuffisance des chutes d'eau par l'exploitation d'autres formes d'énergie », à savoir le vent, les marées, mais surtout « cette formidable quantité de kilowatts que le soleil déverse sur la terre » (Trombe, 1955). Enfin, pour compléter le panel des énergies naturelles présentées comme les plus intéressantes, Beau affirme que dans une « perspective impérative d'utilisation de toutes les sources d'énergie rentables doit être placée en bonne place l'énergie thermique des mers dont les possibilités de production sont quasi-illimitées » (Beau, 1957).

Une nouvelle expression, « énergies sauvages », rappelle le caractère indompté, mais aussi capricieux, que certains auteurs attribuaient aux forces naturelles, en opposition aux forces artificielles, à la fin du XIX^e^ siècle. Pendant la guerre, elle est employée par Pétry qui qualifie ainsi le vent : celui-ci est « disponible partout mais son potentiel est faible et son intensité varie beaucoup » [7] ; son utilisation est cependant nécessaire dans la conjoncture de pénurie. De même, Pierre Ailleret, directeur des Études et recherches d'EDF qui a travaillé en particulier sur l'énergie éolienne (voir section 8.1.2) l'utilise dans une conférence à la Société des ingénieurs civils résumée dans *Le Génie civil*, pour désigner les énergies solaire et éolienne. Selon Ailleret, rappelant « la corrélation qui existe entre la puissance économique d'un pays et sa consommation d'énergie », une mission des ingénieurs serait ainsi de civiliser ces énergies sauvages, pour les rendre exploitables, et « écarter les craintes à très long terme » de manque d'énergie (Ailleret, 1955). Marcel Perrot, directeur de l'Institut de l'énergie solaire d'Alger [8], parle également de ces « sources sauvages que sont les vents, les marées, la chaleur terrestre, le soleil » (Perrot, 1963, p. 3).

Un autre argument que la nécessité d'augmenter le bilan énergétique national, original par rapport à ceux qui ont été identifiés dans ce corpus pour cette période, est avancé dans deux articles, pour l'exploitation de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne. En 1950, dans *La Nature*, celle-ci est en effet proposée comme alternative sans risque au nucléaire par le biologiste, physicien et chimiste Jacques Duclaux, membre de l'Académie des sciences, pour qui « l'énergie solaire — elle aussi de nature nucléaire — pourrait rendre inutile l'énergie atomique, en n'offrant aucun de ses dangers » ; ceux-ci seraient ainsi « reportés sur le soleil, qui peut les supporter bien mieux que nous » (Duclaux, 1950). Neuf ans plus tard, Louis Vadot, ingénieur chez Neyrpic qui a mis au point plusieurs aéromoteurs au sein de l'entreprise, affirme qu'il est « bon d'insister [...] sur le fait que la mise en valeur des ressources en énergie éolienne n'entame pas le capital énergétique national comme le fait l'énergie thermique [le charbon] » et « ne produit pas de résidu nuisible comme

7. AN 1991 0305/1, 1941-1957, Notes de Pétry, v. 1941-1942.
8. Celui-ci fut créé en 1959 (voir 9.2).

l'énergie atomique » (Vadot, 1959, p. 14). L'opposition entre énergies solaire et éolienne et énergie nucléaire alimenta largement en France les contestations contre le nucléaire et la promotion des « énergies nouvelles » à partir des années 1970 (Pehlivanian, 2014). Je n'en ai pas trouvé de traces avant, et ces prises de position précèdent les contestations contre le nucléaire civil, pour des raisons sanitaires et environnementales, qui auraient, selon Sezin Topçu, émergé en France dans les années 1960, après des luttes anti-nucléaire visant essentiellement les applications militaires de l'atome (Topçu, 2015).

Pour compléter avec la vision d'une politique énergétique officielle, les expressions utilisées dans les rapports de la Commission de l'énergie sont intéressantes (voir Tableau 7.3). Elles donnent en outre une chronologie de l'intérêt porté par les membres de la Commission aux énergies naturelles, dont le détail sera analysé dans la section suivante (7.2).

Table 7.3 – Occurrences des expressions « nouvelles sources d'énergie » et leurs dérivés dans les rapports de la Commission de l'énergie du Commissariat général au Plan (1946-1971)

| Plan | Expression | Sources d'énergie désignées |
|---|---|---|
| 1 (1947-1953) | Nouvelles sources d'énergie | Marées, houle, vent |
| 2 (1953-1957) | Nouvelles sources rentables d'énergie | Vent, ETM, soleil, grisou, gazéification souterraine |
| 3 (1957-1961) | Ressources énergétiques diverses | Vent, ETM, soleil, grisou, gazéification souterraine |
| 4 (1962-1966) | Rien | Rien |
| 5 (1966-1970) | Techniques autres que l'énergie nucléaire | Soleil, vent, magnétohydrodynamique, piles à combustible |
| 6 (1971-1975) | Rien | Rien |

Il y est question, pour le premier Plan, de « nouvelles sources d'énergie », qui, dans le second Plan, doivent être « rentables », puis, de manière de plus en plus vague, il s'agit de « ressources énergétiques diverses » et, finalement, de « techniques autres que le nucléaire », renvoyant à la fois à la source d'énergie et au convertisseur. Pour le premier Plan, la Commission ignore « les possibilités d'utilisation industrielle » de l'énergie atomique et estime que, les « ressources [françaises] en énergie étant limitées », il faut encourager les études sur de nouvelles sources d'énergie, même si elles ne sont pas « suffisamment avancées pour permettre des réalisations certaines dans le délai imposé de cinq

ans »[9]. Ces nouvelles sources d'énergie (les marées, la houle et le vent) correspondent encore à ce qui était appelé « forces naturelles » dans les six décennies précédentes. Le coût n'est pas pris en considération : il s'agit, conformément à la politique énergétique globale, d'une recherche de l'augmentation à tout prix des disponibilités françaises en énergie. Les rapports pour le second et le troisième Plan considèrent également les nouvelles sources d'énergie comme un moyen d'augmenter le bilan énergétique, mais l'impératif économique est souligné : la France « n'a pas le droit de négliger un moyen quelconque d'accroître, d'une façon rentable, son potentiel énergétique » (Commissariat général au Plan. Commission de l'énergie, 1953, p. 11)[10]. Le grisou et la gazéification souterraines, énergies non encore exploitées, sont aussi rangées parmi les « nouvelles sources d'énergie », qui ne correspondent déjà plus aux « forces naturelles ». Dans le rapport pour le troisième Plan, l'expression de « ressources énergétiques diverses » amène l'idée d'hétérogénéité des éléments de cette catégorie, dont seul compte le caractère rentablement exploitable en quantités industrielles. Dans le quatrième rapport, il n'est question que d'énergies « classiques ». Enfin, pour le cinquième Plan, l'énergie solaire et l'énergie éolienne sont considérées au même titre que les générateurs magnétohydrodynamiques et les piles à combustible, deux nouveaux types de convertisseurs à l'étude dans certains laboratoires français[11], comme des « techniques autres que le nucléaire ». Elles ne sont rangées ensemble qu'en tant qu'innovations potentielles dans le domaine de l'exploitation de l'énergie, à propos desquelles « il n'est pas possible de faire une hypothèse sur le[s] chances de réussite et les conséquences probables dans un avenir prévisible », et qui, « en cas de succès, [...] ne modifieraient que d'une façon marginale » le bilan énergétique français[12]. Ainsi, tout au long de la période, ces nouvelles sources d'énergie ne sont considérées que comme un appoint possible au bilan énergétique français, et l'espoir de la Commission de l'énergie pour l'avenir de leur utilisation va en décroissant au cours de la période - mis à part le cas particulier des marées, comme il le sera développé dans la sous-section suivante (7.2).

D'un point de vue sémantique, on peut enfin souligner que l'arc-en-ciel des houilles disparaît petit-à-petit. Dans une période où la production nationale de houille atteint son apogée[13], avant de suivre un déclin programmé par les planificateurs, cette source d'énergie emblématique de la révolution industrielle est de moins en moins considérée

9. Commissariat général au Plan. Commission de l'électricité, 1946, p. 26.

10. Une phrase quasiment identique est écrite dans le rapport pour le troisième Plan : « notre pays ne peut se permettre de négliger un moyen quelconque d'accroître, d'une façon rentable, sa production énergétique » (p. 28).

11. Les générateurs magnéto-hydro-dynamiques, sur lesquels des chercheurs français travaillèrent dans les années 1960, devaient permettre de transformer directement l'énergie cinétique des fluides (liquides ou gazeux) en énergie électrique ; les piles à combustible, de convertir l'hydrogène en électricité. Ces deux types de recherches étaient encouragées par la DGRST

12. Commissariat général au Plan. Commission de l'énergie, 1966.

13. C'est le cas en 1958 (Varaschin, 2009b, p. 142).

comme un vecteur potentiel de modernité. Ainsi, malgré la part importante qu'elle continue de garder dans l'économie nationale, elle n'est plus une référence pour la recherche de nouvelles sources d'énergie. À l'issue de la période, pour le septième Plan (1971-1975), l'utilisation, dans les rapports de la Commission de l'énergie, du TEP au lieu du TEC, marque le passage de l'hégémonie du charbon à celle du pétrole [14]. L'expression de houille bleue est de moins en moins utilisée [15], et la transformation, en 1943, de la Commission de la houille bleue en un Comité technique de l'énergie des marées, sensé mieux « adapté aux circonstances actuelles », en est symbolique (voir section 8). Subsistent quelques survivances : l'expression de « houille d'or », forgée par Gandillon en 1926, est par exemple utilisée en 1943 dans un article du *Génie civil* sur les différentes applications de l'énergie solaire, puis par Perrot, dans le titre de son ouvrage de vulgarisation sur le même sujet (Perrot, 1963). Une nouvelle houille colorée fait ainsi figure d'exception : la « houille rouge » désigne, sous la plume de Pierre Devaux, l'énergie géothermique (Pierre Devaux, 1949c, Pierre Devaux, 1950).

Pour synthétiser, il n'existe pas, sur la période (1940-1970) d'expression similaire à « forces naturelles » dans *La Nature*, *Le Génie civil*, et les rapports de la Commission de l'énergie du Commissariat général au Plan. Les énergies naturelles (marées, vent, énergie thermique des mers, soleil, géothermie) ont parfois encore été regroupées par des expressions rappelant leur abondance et leur caractère illimité. Leurs défauts (inconstance, dispersion) sont aussi rappelés. Mais ce qui prime est qu'elles ne sont pas exploitées et qu'elles constituent un appoint possible pour l'approvisionnement national. Elles sont ainsi « nouvelles » car elles induisent la mise au point de nouveaux convertisseurs, et elles sont en cela parfois regroupées avec des énergies fossiles (grisou, gazéification), l'énergie nucléaire, voire, en tant que techniques, avec des convertisseurs innovants comme les piles à combustible ou la magnétohydrodynamique.

## 7.2 Un intérêt soutenu puis une désaffection pour les énergies naturelles

Cette sous-section étudie l'évolution de l'intérêt des ingénieurs pour les énergies naturelles, de façon générale et pour chacune d'entre elles, en particulier à partir de l'analyse de *La Nature* (jusque 1961, date d'arrêt de la parution de la revue), du *Génie civil* et des rapports de la Commission de l'énergie missionnée par le Commissariat général au Plan. Globalement, les discours étudiés montrent un intérêt décroissant pour les énergies

14. Commissariat général au Plan. Commission de l'énergie, 1975.

15. Une seule occurrence dans *Le Génie civil*, à l'inauguration de l'usine marémotrice de la Rance (Hugues, 1966) ; une occurrence également dans *La Nature*, en 1947, dans un article sur l'utilisation de l'énergie géothermique dans les pompes à chaleur (Perruche, 1947).

naturelles : tant que l'énergie nucléaire est une source d'énergie au potentiel incertain, les énergies naturelles semblent promettre une contribution fiable au bilan énergétique national. Puis, à partir de la fin des années 1950, elles sont de plus en plus déconsidérées.

Tout d'abord, contrairement à l'entre-deux-guerres, il n'y a pas eu de pic d'articles et notes sur le sujet, ni à l'issue de la guerre, ni tout au long de la période (1940-1970), dans *La Nature* et *Le Génie civil* (voir Figures 7.1, 7.2). Comparé aux deux décennies précédentes, le nombre d'occurrences est faible (voir Figures 7.3, 7.4). Cependant, ceci ne montre pas un manque d'intérêt des ingénieurs pour ces sources d'énergie, dont l'étude est au contraire institutionnalisée, mais plutôt une focalisation sur certains grands projets. Corrélativement, la figure de l'inventeur disparaît ainsi que la fascination pour de petites installations ingénieuses dont faisait preuve *La Nature* (cf 7.3). Ainsi, on ne retrouve pas le foisonnement d'inventions de la période précédente.

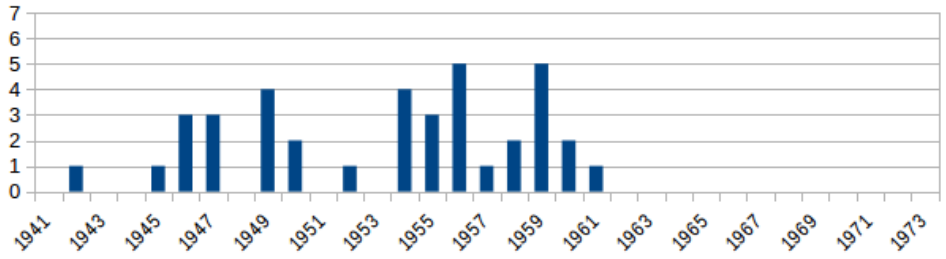



FIGURE 7.1 – Occurrences d'articles et notes sur les énergies naturelles dans *La Nature* entre 1940 et 1961

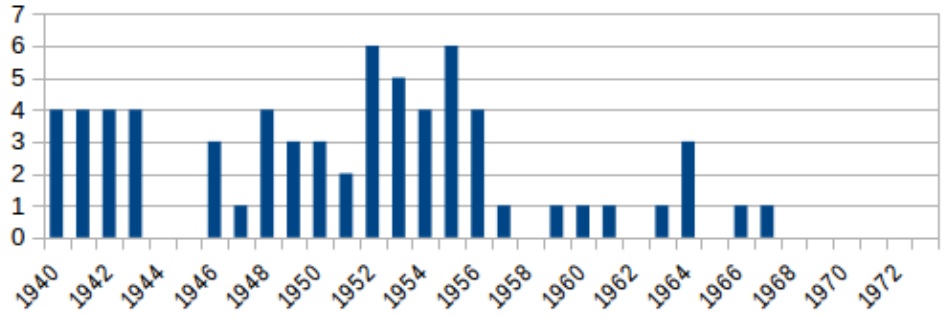



FIGURE 7.2 – Occurrences d'articles et notes sur les énergies naturelles dans *Le Génie civil* entre 1940 et 1973

On constate par ailleurs une diminution du nombre d'articles à partir de 1957 dans le *Génie civil*, date à partir de laquelle il n'est plus question que d'énergie solaire et de l'usine marémotrice de la Rance (voir Figure 7.5). Puis, peu après l'inauguration de cette dernière, en 1966, il n'y a plus une ligne sur les énergies naturelles dans la revue. Au moment où les recherches sur l'énergie atomique commencent à fournir des applications à

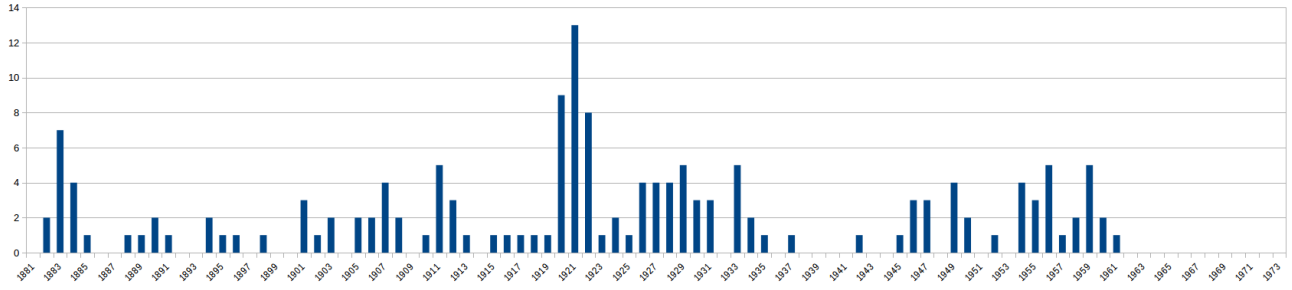


FIGURE 7.3 – Occurrences d'articles et notes sur les énergies naturelles dans *La Nature* entre 1880 et 1961

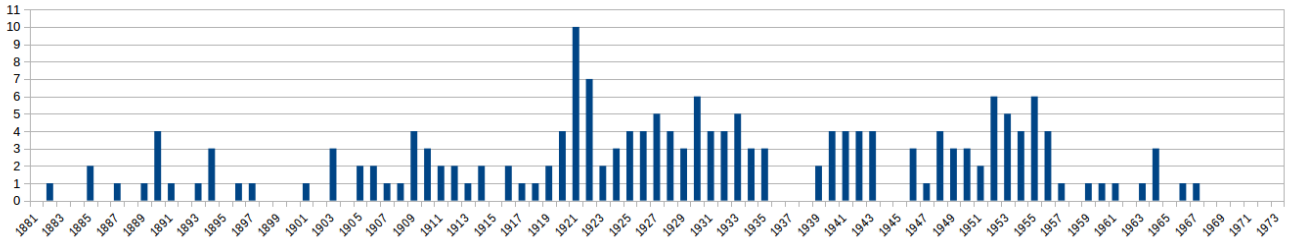


FIGURE 7.4 – Occurrences d'articles et notes sur les énergies naturelles dans *Le Génie civil* entre 1880 et 1961

la production d'électricité, et où le pétrole arrive en masse à bas coût dans toute l'Europe, le besoin en énergies de substitution se fait moins criant.

L'évolution des discours d'acteurs importants de l'électricité à trois moments différents des années 1950 montre cette progression vers la considération que l'énergie nucléaire est la meilleure des nouvelles sources d'énergie. Ainsi, en 1952, dans une conférence à Société des ingénieurs civils de France dont il est le nouveau directeur, Darrieus, connu pour ses travaux sur les aérogénérateurs (cf 5.3 et 8.1.2) liste les « ressources qui pourront [...] indéfiniment pourvoir » au « développement incessant des applications de l'électricité », et mentionne les ressources hydrauliques, dont les marées, mais aussi l'énergie thermique des mers, qui « semble beaucoup plus facile à utiliser » que l'énergie nucléaire (DARRIEUS, 1952). La même année, Pierre Massé, directeur général adjoint d'EDF, estime que « parmi les techniques nouvelles envisagées pour favoriser l'augmentation de la production [d'électricité], l'utilisation de l'énergie des marées semble la plus favorable » (LE GÉNIE CIVIL, 1952).
Trois ans plus tard, Ailleret, affirme, à la Société des ingénieurs civils, que « l'abondance des énergies « sauvages » : le rayonnement solaire et le vent, doivent écarter les craintes à très long terme » de pénurie d'énergie, mais que « prochainement [...] l'énergie nucléaire pourra vraisemblablement relayer les énergies classiques et nous délivrer des craintes de disette » (AILLERET, 1955). En 1957, le même, au même endroit, devenu président de la Société des ingénieurs civils, ne considère plus que l'énergie nucléaire comme « relais

avant la fin de l'hydraulique et avant que l'on ait épuisé les hydrocarbures » (Ailleret, 1957).
Dix ans plus tard, dans *Le Génie civil*, un commentateur de l'inauguration de l'usine marémotrice de la Rance témoigne de la fierté qu'EDF soit parvenue à cette première mondiale. Mais il affirme également que la multiplication de ce type de centrale hydro-électriques en France, escomptée dans les deux décennies qui ont suivi la guerre, n'est plus à l'ordre du jour :

« Au terme de tous ces efforts, il y a une usine unique au monde, une houille bleue que la France a été la première à utiliser. Et si, même, elle devait ne pas avoir de descendance, elle resterait, indépendamment de sa production, le symbole d'une course au progrès remportée par l'Électricité de France (Hugues, 1966). »

Dans les rapports de la Commission de l'énergie, on trouve la même désaffection croissante tout au long de la période pour les énergies naturelles. Les experts de la Commission de l'électricité ont ainsi d'abord recommandé d'encourager les recherches sur les nouvelles sources d'énergie (vent, houle et marées). Il ne s'agit que de prescriptions de principe, étant donné que les applications imaginées ne peuvent avoir lieu qu'au-delà de la période quinquennale concernée par le Plan. Ces acteurs estiment cependant ne pas pouvoir négliger la moindre possibilité d'augmenter le bilan énergétique national. Pour les deux Plans suivants, les nouvelles sources d'énergie sont mentionnées comme potentiellement intéressantes, mais les considérations de coût sont soulignées. Pour le quatrième Plan, ce sont le nucléaire et le pétrole qui doivent assurer l'approvisionnement énergétique national à long terme. Dans le cinquième plan, les énergies solaire et éolienne sont tout juste mentionnées pour mémoire, comme des ressources qui, dans un horizon très lointain, pourront éventuellement contribuer à l'approvisionnement énergétique. Dans le sixième Plan, il n'est plus du tout question de ces sources d'énergie.

Si l'on regarde plus en détails les sources d'énergie dont il est question dans *La Nature* et *Le Génie civil*, on peut constater que celle qui a connu le plus d'écho est, de loin, l'énergie solaire, suivie par les marées et la géothermie (voir Tableau 7.4 et Figure 7.5). L'énergie solaire est particulièrement discutée au moment d'une dynamique internationale pour l'exploitation de cette source d'énergie. En 1955, un de ses acteurs, Farrigton Daniels, parle ainsi de « décennie solaire » (Teissier, 2013). Elle est également mentionnée parmi les autres sources d'énergie potentiellement intéressantes à long terme dans les rapports de la Commission de l'énergie pour les deuxième (1953-1957) et troisième (1957-1961) Plans. Les types de conversion décrits sont très divers (cf 7.3). Mais le solaire n'est pas perçu que comme une potentielle contribution à l'approvisionnement énergétique français. L'énergie des marées, est souvent montrée comme l'énergie naturelle la plus immédiatement utilisable pour alimenter le réseau électrique français, au point qu'elle est parfois

même qualifiée de « classique ». En 1949, avant la construction de l'usine marémotrice de la Rance, elle l'est, pour Pierre Devaux, « depuis longtemps » (Pierre Devaux, 1949b, p. 111) ! En outre, même s'il en est question dans les rapports de la Commission de l'énergie pour les deuxième et troisième Plans, les marées n'y sont pas classées parmi les nouvelles sources d'énergie, mais comme élément du programme hydro-électrique.
À propos de la géothermie, des articles relatent les nouveaux travaux de Georges Claude et son fils sur le sujet, en particulier dans *Le Génie civil*. Dans *La Nature*, ils mentionnent aussi des installations étrangères. Il n'en est pas question dans les rapports de la Commission de l'énergie : cette source d'énergie n'est pas considérée par ces acteurs de la planification comme pouvant augmenter le bilan énergétique national.

, capables d'accroître le bilan énergétique national,

Table 7.4 – Répartition des articles sur les énergies naturelles dans *La Nature* et *Le Génie civil* entre 1940 et 1973

| | Source d'énergie | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Revue | Marées | Vent | ETM | Chaleur interne | Solaire |
| *La Nature* | 8 (21%) | 2 (5%) | 1 (3%) | 9 (24%) | 14 (37%) |
| *Le Génie civil* | 12 (18%) | 7 (10%) | 3 (4%) | 9 (13%) | 32 (48%) |

L'énergie éolienne est moins discutée dans les deux revues que lors des décennies précédentes, même si elle est mentionnée dans tous les rapports de la Commission de l'énergie du Plan où il est question d'énergies naturelles potentiellement utilisables. Chose remarquable, *La Nature*, qui avait accueilli dans ses pages tant d'articles sur de nouveaux aéromoteurs, n'en parle ainsi qu'à trois reprises, en 1945, en 1946 et en 1953, et encore n'est-ce, pour la deuxième occurrence, que pour annoncer brièvement la tenue du Congrès du vent à Carcassonne [16]. Même dans cette revue de vulgarisation, une moindre place est accordée à de petites installations émanant d'inventeurs qui ne seraient pas associés à des institutions reconnues dans le secteur de l'énergétique. Globalement, on peut constater une dévalorisation des petites puissances et des inventeurs individuels (cf 7.3). Ainsi, les constructeurs d'aéromoteurs, encore nombreux pendant l'entre-deux-guerres et dont les prouesses étaient alors vantées comme des progrès, semblent disparaître ; tout du moins, leur activité n'est plus du tout valorisée. Dans *Le Génie civil*, les articles et notes relatent des travaux français et étrangers sur l'énergie éolienne, mais la dernière occurrence pleinement consacrée au sujet est de 1951. Il n'est question que d'aérogénérateurs : l'électricité est le seul moyen moderne d'utiliser l'énergie du vent (cf 7.3).
L'utilisation de l'énergie thermique est aussi très peu examinée : le projet-phare de la

16. Celui-ci, réunissant plusieurs promoteurs de l'utilisation de l'énergie du vent, au premier rang duquel André , un ingénieur du Génie rural, visait à faire le point sur les travaux concernant l'utilisation de l'énergie éolienne et à promouvoir les recherches et les initiatives pour la production d'électricité éolienne.

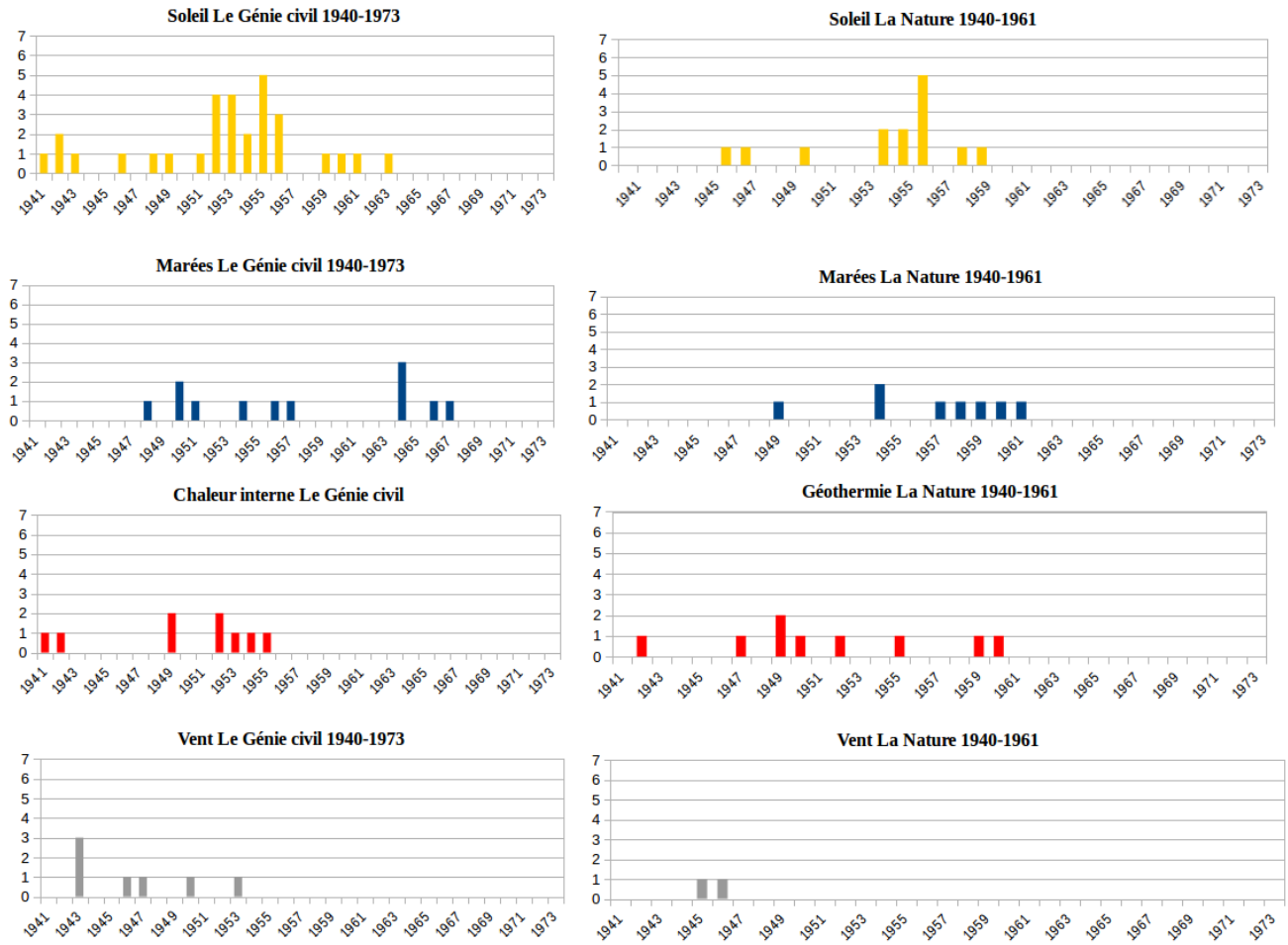



FIGURE 7.5 – Occurrences d'articles et notes sur les énergies naturelles dans *La Nature* et *Le Génie civil*entre 1940 et 1973. Détail par source d'énergie

société L'énergie des mers n'est mentionné qu'à une reprise dans *La Nature* et trois dans *Le Génie civil*, probablement en raison du fait que des applications ne sont imaginées que dans les DOM-TOM.
Enfin, l'énergie de la houle n'est plus du tout mentionnée dans aucune des deux revues. Cette énergie naturelle a été étudiée pendant la guerre et juste après par certains ingénieurs d'EDF (d'où, probablement, sa présence parmi les « nouvelles sources d'énergie » mentionnées dans le premier rapport de la Commission de l'énergie du Plan). Il semble cependant qu'elle ait été considérée assez unanimement comme faisant partie de celles « mettant en jeu des puissances considérables, mais trop coûteuses à équiper pour être rentables » (GRANBOULAN, 1954, p. 367).

Les discours des publications scientifiques et techniques, d'articles et de rapports d'ingénieurs responsables de l'aménagement énergétique de la nation, comme Ailleret, dépeignent les énergies naturelles comme des ressources d'avenir durant la période (1940-1970), après quoi ils ne s'y intéressent plus. Le programme nucléaire et le pétrole à bas

coût ont raison des projets nés en période de pénurie et de reconstruction. Trois grands projets français connaissent un écho particulier : l'usine marémotrice de la Rance, les fours solaires du CNRS, et, quoiqu'en moindre mesure, l'usine géothermique de Georges Claude. Pour l'énergie solaire et l'énergie éolienne, le grand nombre d'articles reflète une dynamique internationale dans les années 1950. Les projets français d'exploitation de l'énergie éolienne (cf 8.1.2, 9.1.3 et 9.2.2) sont très peu relayés. Ce peu d'intérêt traduit une désaffection pour les petits aéromoteurs, déjà engagée pendant l'entre-deux-guerres. C'est ce dont il est question dans la section suivante (7.3).

## 7.3 Deux pôles de l'imaginaire technicien : modernité et simplicité

De manière plus marquée que pendant la période précédente, ce sont les installations de grande puissance, et de préférence productrices d'électricité pour un réseau régional ou national interconnecté, développées par des institutions également puissantes, qui sont désormais considérées comme vecteurs de modernité dans les discours des ingénieurs. En contrepartie, ils ne considèrent les inventions ou expérimentations d'appareils de petites puissances, isolés d'un réseau, que comme une solution pour des populations qu'ils jugent sous-développées. Ces convertisseurs trouvent moins d'écho dans les revues scientifiques et techniques. Elles ont en revanche une place importante dans les discours sur la coopération internationale. Dans le rapport sur les « Sources nouvelles d'énergie et [le] développement économique » commandité par l'ONU et publié 1957, qui aborde à la fois les pays industriels et les pays « sous-développés », les seules applications envisagées pour les pays du Nord sont celles de la première catégorie. Il est ainsi affirmé que les énergies maréthermique, géothermique et dans une certaine mesure éolienne peuvent être appelées à jouer un rôle important là où elles sont susceptibles d'être exploitées sur une grande échelle en vue de la production d'électricité, c'est-à-dire « surtout dans les régions économiques développées du monde ». En revanche, les applications de la seconde catégorie, les convertisseurs de petites quantités d'énergie, « appareils simples et d'emploi facile », à des fins diverses sont réservées à « presque toutes les régions sous-développées dont la population vit surtout de l'agriculture et de quelques formes d'industrie rurale » [17].

Un partage entre convertisseurs puissants et/ou sophistiqués (les plus modernes) et convertisseurs de faible puissance et/ou simples (les moins modernes) se retrouve dans les discours tout le long de la période, et ces types de convertisseurs correspondent à des types de territoires, d'usages et d'usagers. D'une manière générale, plus un convertisseur est puissant, plus il est décrit comme moderne. Cette modernité peut également être

17. Nations-Unies, département des affaires économiques et sociales, 1957.

conférée par la sophistication ou le caractère novateur d'un mode de conversion interne au convertisseur. Il s'agit la majorité du temps de la conversion d'une forme d'énergie en une autre forme d'énergie (chaleur —> force mécanique ou lumière —> électricité). Certains de ces modes de conversion sont particulièrement novateurs, comme la conversion de la lumière en électricité par l'effet photoélectrique. Les photopiles de l'espace font ainsi exception parmi les convertisseurs de petites puissance pour leur caractère novateur, à savoir l'utilisation de l'effet photoélectrique pour convertir le rayonnement solaire en énergie utile. C'est ainsi que j'ai construit, d'une manière schématique, le tableau représenté en Figure 7.6, qui représente la répartition des convertisseurs qui ont été construits pendant la décennie (1940-1970) en deux pôles de l'imaginaire technicien allant des convertisseurs les plus « simples » aux convertisseurs les plus « modernes ».

Puissance

sophistication

| | Petites puissances | Moyennes puissances | Grandes puissances |
|---|---|---|---|
| Utilisation directe | distillateurs solaires<br>chauffe-eau solaires<br>mur Trombe<br>pompes éoliennes (< 10 kW) | fours solaires (~100 kW) | fours solaires (~1000 Kw) |
| Électricité : pas de réseau<br>Électricité : réseau<br>Conversion thermodynamique | aérogénérateurs (< 10 kW)<br>Aucun<br>pompes solaires ( < 10 kW) | aérogénérateurs (10 kW<<100 kW) | Aérogénérateurs ( ~ 1000 kW)<br>centrales maréthermiques, marémotrices (> 10 MW)<br>centrales maréthermiques (~ 1000 kW) |
| Conversion photoélectrique | Photopiles | | |

FIGURE 7.6 – Deux pôles de la modernité en fonction de la puissance et de la « sophistication » des convertisseurs

La modernité des photopiles solaire leur est conférée non par leur puissance mais par le caractère novateur de la conversion photoélectrique. Celle du four solaire de 1 000 kW, à l'inverse, l'est par sa puissance. Les convertisseurs reliés au réseau électriques sont modernes par le fait qu'ils soient connectés au réseau, mais aussi par les fortes puissances

qu'ils peuvent développer grâce à ce réseau.

L'heure est ainsi au bâtissage de « cathédrales industrielles » [18]. En outre, les idées d'installations parfois grandioses, mais portées par des individus non spécialement rattachées aux nouvelles institutions consacrées à l'aménagement énergétique de la France, se raréfient. Elles disparaissent des discours des auteurs de revues scientifiques et techniques comme *La Nature* et *Le Génie civil*, mais, elles sont aussi très probablement moins nombreuses dans les faits (voir 9). Il n'est ainsi presque plus question de ces multiples inventeurs des décennies précédentes, tels Barjot, Gandillon, Pasteur ou encore Legrand.

C'est clairement le cas pour les énergies marémotrice, maréthermique et éolienne, comme le suggère l'analyse de *La Nature* et du *Génie civil*. Pour les deux premières, il n'est presque question que des projets d'usines marémotrices de la Rance et du Mont-Saint-Michel portés par EDF, et de l'usine maréthermique d'Abidjan par la société d'économie mixte L'énergie des mers. Pour l'énergie éolienne, quelques inventeurs-expérimentateurs individuels français trouvent encore une audience dans les revues scientifiques et techniques, mais la majorité des occurrences traitent de travaux étrangers ou de grandes institutions françaises liées au domaine de l'énergie (EDF, la Compagnie électro-mécanique). Comme le montrent les Tables 7.5 et 7.6 [19] , pour ces trois sources d'énergie, l'électricité est toujours envisagée comme moyen de conversion. En outre, il s'agit presque exclusivement d'alimenter le réseau électrique national.

Ainsi, dans les deux revues, toutes les occurrences sur l'énergie des marées concernent la production en grand d'électricité pour le réseau national. Dans *Le Génie civil*, dix sur douze sont consacrées au projet d'usine marémotrice de la Rance d'EDF, et, parfois, à l'aménagement du Mont-Saint-Michel, qui fut également étudié par l'entreprise publique. Deux seulement parlent d'autres projets. Ceux-ci émanent de l'ingénieur Louis Kervran, qui, en 1950, propose une technique de construction des barrages alternative à celle qu'EDF privilégiait pour l'usine marémotrice de la Rance (Kervran, 1950), et, en 1956, un projet d'aménagement marémoteur dans le Cotentin (Kervran, 1956). Kervran est associé à l'administration française puisque membre de la Commission de l'électricité du ministère du Travail. Mais, malgré ses demandes réitérées il ne parvient pas à intégrer le Comité technique de l'énergie des mers (CTEM), qui, succédant à la Commiission de la houille bleue au ministère de l'Industrie, est chargé d'orienter les choix en termes d'amé-

18. Ce terme est utilisé tout autant pour les immenses barrages hydro-électriques construits lors de cette période, que pour les premières centrales nucléaires. Sophie Pehlivanian utilise elle-même ce terme pour désigner le four géant de Mont-Louis-Odeillo inauguré en 1966 par le CNRS (Pehlivanian, 2014, p. 33 ;94) .

19. Comme pour les Parties 1 et 2, il arrive que plusieurs modes de conversion soient envisagés pour la même force naturelle dans le même article (par exemple : dans les différents articles de Georges Claude sur l'énergie thermique des mers, l'inventeur parle parfois à la fois de production d'électricité et de production de glace, ce qui fait pour le même article une occurrence dans la case "Électricité" et une occurrence dans la case "Refroidissement".). Cela explique que la somme des pourcentages soit différente de 1.

TABLE 7.5 – Mode de conversion envisagé pour chaque force naturelle dans *Le Génie civil* (1940-1970)

[20]

| Type source | Source | Électricité | Élévat° de l'eau | Autre ut° dir. force mot. | Air comprimé | Ut° dir. chaleur | | | Froid | Nb total articles |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Chauffage/cuisson | Distillat° eau | Chimie de pointe | | |
| Mécanique | Vent | 100% | 14% | 0% | 14% | 0% | 0% | 0% | 0% | 7 |
| | Marées | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 12 |
| Thermique | Soleil | 31% | 0% | 3% | 0% | 19% | 13% | 50% | 9% | 32 |
| | ETM | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 2 |
| | Chal. int. | 56% | 0% | 11% | 0% | 0% | 11% | 11% | 11% | 9 |
| Total | | 52% | 1% | 1% | 1% | 12% | 6% | 6% | 24% | 67 |

nagements marémoteurs français. Comme beaucoup d'autres, Kervran n'obtient aucun soutien du CTEM, mais il est le seul à voir ses conceptions transcrites dans *Le Génie civil* (cf 8.1.1). Dans *La Nature*, sur huit articles, trois d'entre eux concernent les projets de la Rance et du Mont-Saint-Michel, portés par EDF [21] ; trois autres des projets étrangers [22] ; l'un, les études de Gibrat sur l'influence des usines marémotrices sur le régime des marées et la rotation de la Terre (LA NATURE, 1954) ; le dernier résume les articles de Kervran du *Génie civil* (MÉRIEL, 1958). De même que dans *Le Génie civil*, le seul projet français autre que les deux projets-phares portés par EDF est donc celui de Kervran.

Le projet d'aménagement du Mont-Saint-Michel, qui connaît plusieurs variantes dont certaines ont été portées par EDF, est emblématique du gigantisme technologique ambiant. Il doit faire suite à l'usine de la Rance, considérée comme un essai à petite échelle. Il ambitionne de barrer plusieurs dizaines de kilomètres d'eau de mer dans la Manche (voir Figure 7.7), et de pourvoir le réseau électrique français en milliards de kilowatts, soit plus de la moitié des besoins énergétiques de l'époque.

Même certains des plus fervents défenseurs du progrès technologique ont exprimé leur scepticisme à son sujet, tels, dans *La Nature*, Pierre Devaux, polytechnicien et vulgarisateur qui a écrit plusieurs autres articles sur les énergies naturelles dans les années 1930-1950. Son opposition au projet d'aménagement du Mont-Saint-Michel n'est pas sans rappeler les oppositions contre les aménagements hydro-électriques de montagne à la

21. Pierre DEVAUX, 1949b ; GRANBOULAN, 1954 ; GIBRAT, 1957
22. Deux en URSS et un aux USA et au Canada.

TABLE 7.6 – Mode de conversion envisagé pour chaque force naturelle dans *La Nature* (1940-1970)

| Type source | Source | Électricité | Élévat° de l'eau | Autre ut° dir. force mot. | Air comprimé | Ut° dir. chaleur | | | Froid | Nb total articles |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Chauffage/cuisson | Distillat° eau | Chimie de pointe | | |
| Mécanique | Vent | 100% | 50% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 2 |
| | Marées | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 8 |
| Thermique | Soleil | 43% | 7% | 21% | 0% | 50% | 21% | 7% | 14% | 14 |
| | ETM | 100% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | 1 |
| | Chal. int. | 100% | 0% | 33% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 9 |
| Total | | 61% | 5% | 5% | 0% | 32% | 8% | 5% | 8% | 38 |

même époque (HEAULMÉ, 2014). Parlant de deux variantes, représentées Figure 7.7, dont l'une fut portée par Albert Caquot, il manifeste sa défiance quant aux conséquences esthétiques et économiques du barrage, ainsi qu'à propos de sa faisabilité même :

> « Il faut avouer que ces deux projets, également titanesques, peuvent à bon droit laisser les techniciens rêveurs. Trente kilomètres de digues construites en pleine mer, dans des parages balayés par des courants violents de marée, sur un fond dont la résistance, pour le moment est mal connue, cela ne s'entreprend point comme le barrage d'un torrent de montagne ou même d'un grand fleuve. Au point de vue esthétique et touristique, les précautions oratoires ne rassurent guère. [...] Le mal paraît sans remède ; il faudra choisir entre la beauté d'un site unique au monde et l'autorité des kilowatts (Pierre DEVAUX, 1949b, p. 115). »

Par « précautions oratoires », Devaux fait probablement référence à l'astuce adoptée par les porteurs du projet de la baie du Mont-Saint-Michel, qui ont préféré, pour ne pas émouvoir d'éventuels détracteurs, le baptiser du nom de « projet des Îles Chausey » (voir 9.1).

À propos de l'énergie thermique des mers, les seules occurrences concernent les travaux pilotés par la société d'économie mixte L'énergie des mers en vue de la construction d'une usine maréthermique à Abidjan. Mobilisant également la Compagnie électro-mécanique, Rateau et la Société de condensations et d'applications mécaniques, le projet est évoqué à une reprise dans *La Nature* (Pierre DEVAUX, 1949a) et à deux reprises dans *Le Génie civil* (SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS, 1948 ; LE GÉNIE CIVIL, 1948). Il projette la construction d'une usine d'une puissance installée de 15 000 kW, prodiguant l'électricité

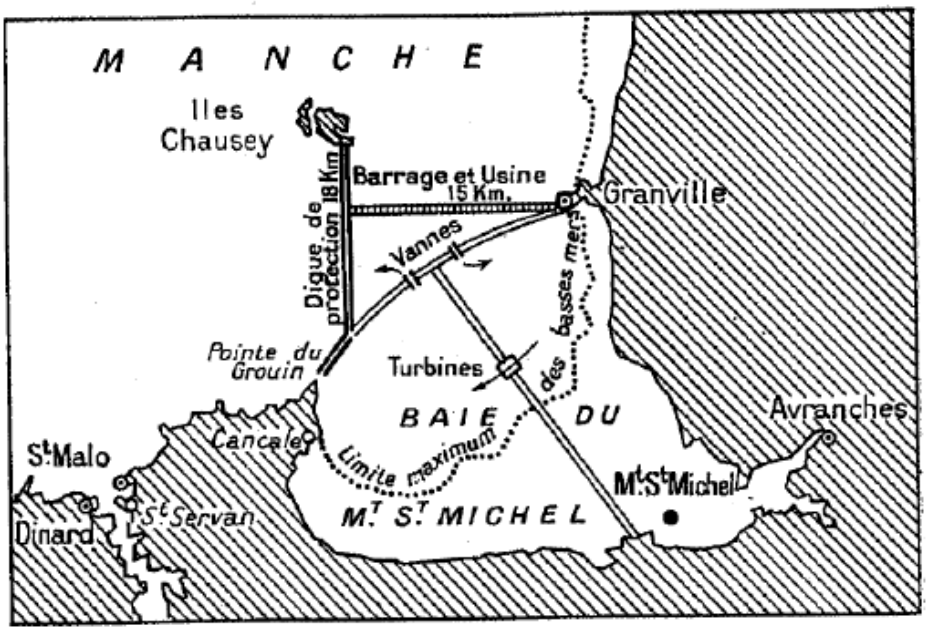



**Fig. 10. — *Carte de la baie du Mont Saint-Michel, montrant les projets de barrages prévus pour l'établissement d'une usine marémotrice.***

Le premier projet comporte deux digues rectilignes perpendiculaires, le bâtiment des turbines se trouvant dans la digue est-ouest, longue de 15 km, qui aboutit à la pointe de Granville. Le second projet, dû à M. Caquot, comporte une digue en arc de cercle et une seconde digue, contenant le bâtiment des turbines et partageant la baie en deux pour obtenir une production d'énergie continue, suivant le principe du « double bassin ».

FIGURE 7.7 – Deux projets d'aménagement marémoteurs au Mont-Saint-Michel (Pierre DEVAUX, 1949b, p. 114)

et le froid à cette région, selon Devaux, « arriérée et fort peu industrielle » (Pierre DEVAUX, 1949a). Selon cet auteur, le réseau électrique français pourrait cependant à terme en bénéficier, grâce à une « « interconnexion » gigantesque de la planète, permettant à l'énergie des usines maréthermiques tropicales d'arriver jusque dans les grands centres civilisés de la zone tempérée » (Pierre DEVAUX, 1949a, p. 141). Plus généralement, de rares articles sont publiés à propos de l'utilisation des gradients naturels de température. Il n'y a qu'un autre article, dans *La Nature*, sur l'utilisation, dans le monde et plus particulièrement aux États-Unis et en Suisse, des pompes à chaleur, capables d'utiliser toutes les « sources naturelles de chaleur » pour le chauffage et la climatisation (PERRUCHE, 1947).

Enfin, les occurrences sur l'utilisation de l'énergie éolienne sont quasi-nulles dans *La Nature*, et s'arrêtent en 1951 dans *Le Génie civil*. Dans cette revue, les sept occurrences concernent des projets étrangers sur les aérogénérateurs (Suisse [23], États-Unis [24], URSS [25]),

23. Les expérimentations sur des aérogénérateurs à l'Institut aérotechnique de Saint-Cyr (n°du 27 janvier 1940)

24. Les aérogénérateurs de petite puissance de la société Windcharger et l'aérogénérateur de 1000 kW construite dans le Vermont, à Grandpa's Knob (n°du 15 février 1943).

25. L'installation d'un aérogénérateur de 100 ch à Balaklava (n°du 15 février 1943).

les travaux d'EDF sur la campagne de mesures de l'énergie éolienne (Le Génie civil, 1946), ainsi que ceux de Lacroix à la Compagnie électro-mécanique (G Lacroix, 1943). Seuls deux inventeurs, Gustave Deparis (« ancien ingénieur du Génie maritime ») et Houdet, non rattachés aux grandes institutions du secteur énergétique, présentent leurs inventions, des aérogénérateurs, et, pour Houdet, ses expérimentations (Deparis, 1947 ; Houdet, 1951). En 1943, un article de la revue *Le Nord industriel et le Nord charbonnier* est résumé, dans lequel l'auteur promeut le développement des « centrales océanes » (ou usines marémotrices) et de « centrales éoliennes » pour produire de l'électricité à injecter de le réseau et économiser le charbon (Le Génie civil, 1943). Enfin, comme dans *La Nature*, un bref article annonce la tenue du Congrès du vent en 1946. Dans *La Nature*, le seul article, en 1945, de Paul Basiaux-Defrance, promeut l'utilisation de l'énergie du vent, vantant son abondance et sa gratuité face à la pénurie de charbon, et évoque seulement certaines expérimentations françaises (celles de la Compagnie électro-mécanique en particulier) et étrangères pour montrer que des travaux ont déjà été réalisés.

Ainsi, les constructeurs d'aéromoteurs français à destination du pompage et des petites productions électriques dans les campagnes disparaissent des deux revues. Les seules occurrences rencontrées mentionnent le caractère sinon archaïque ou vétuste, du moins traditionnel et séculaire de ces machines, et dépeignent l'avenir de ces machines dans la production de grandes puissances électriques. Dans une conférence à la Société des ingénieurs civils, en 1943, un ingénieur en vient même à effacer de l'histoire et du présent ces hommes et ces machines reléguées à un passé lointain, et à assimiler les modèles d'éoliennes de pompage dont l'utilisation s'est répandue à la fin du XIX$^{e}$ siècle en France aux moulins de type hollandais dont l'utilisation s'est raréfiée à la même période : « [a]près avoir végété pendant de longs siècles sous la forme vétuste qu'a illustrée Cervantès, les moulins à vent [se disposeraient] à prendre part à la production d'énergie en grande quantité, à l'instar de la vapeur et de la houille blanche » et ce, sous forme d'énergie électrique (Monney, 1943). On passe directement des moulins hollandais aux aérogénérateurs, en occultant la case éoliennes de pompage ! De manière un peu moins caricaturale, un spécialiste international de l'énergie éolienne, Edward W. Golding, associe les aéromoteurs en usage à une utilisation traditionnelle et séculaire : « [j]usqu'au début de la deuxième guerre mondiale, seules de petites éoliennes dont le rotor avait la forme d'une hélice ou d'une roue à pales étaient encore utilisées pour alimenter en courant ou en eau des bâtiments isolés : ces machines avaient, pour ainsi dire, maintenu le cours des siècles la tradition de l'énergie du vent. » (Golding, 1957). De même, Louis Serra, ingénieur à la Division énergie du vent d'EDF (voir sous-section 9.1.3), affirme que « [l]es petits aérogénérateurs de quelques kilowatts utilisés seulement pour le pompage de l'eau ou l'éclairage de fermes isolées, et installés de façon plus ou moins empirique, n'avaient été considérés au début que comme des moyens de dépannage. Mais peu à peu, les besoins en énergie allant toujours croissant, on en est venu à la conception de supercentrales éoliennes pouvant être raccordées

au réseau général (Serra, 1953, p. 273). »

Deux modes de production d'énergie électrique sont ainsi décrits : ceux de petite puissance, qui seraient, à défaut de mieux, destinés à alimenter en électricité les campagnes françaises et les territoires des colonies isolés du réseau interconnecté, et ceux de moyenne et grande puissance, solutions modernes, dans un avenir proche, pour l'alimentation du réseau national métropolitain. Pour indication, deux ingénieurs spécialistes des aéromoteurs (Edward William Golding et Louis Vadot [26]) lors de cette période les classent de la manière suivante en fonction de leur puissance :

— petites puissances : < quelques kW [27]
— moyennes puissances : [quelques kW-100 kW] [28]
— grandes puissances : > 100 kW [29].

Dans *Le Génie civil*, les installations envisagées sont majoritairement de cette dernière catégorie, que ce soient les « centrales éoliennes » que J. Mathivet imagine voir construire au nombre de 1 700 pour une production annuelle de 8 milliards de kilowattheures par an (Le Génie civil, 1943), ou les éoliennes brevetées par Deparis, d'une puissance projetée allant de 23 à 520 kW [30], ou encore l'aérogénérateur d'une cinquantaine de kilowatts étudié dans l'entre-deux-guerres par Darrieus et Lacroix (G Lacroix, 1943). Les aérogénérateurs de petites puissances (0.250 à 10 kW) expérimentés par Houdet, également pendant l'entre-deux-guerres, sont ainsi les seuls de ce type à être décrits dans *Le Génie civil* ; l'auteur souligne à propos de ceux-ci, destinés à l'alimentation en électricité dans les campagnes non reliées au secteur, que le marché est étroit car « la clientèle n'est pas encore assez évoluée ».

Dans *La Technique moderne*, Lacroix déclare que « l'aéromoteur autonome de petite et moyenne puissance n'apparaît [...] viable que dans des pays à caractère colonial, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit de fournir de la force motrice à des exploitations rurales très éloignées des grands centres, et où le transport du combustible sur de grandes distances en augmente de beaucoup le prix de revient . » En effet, « [d]ans les pays évolués comme le nôtre, il ne peut [...] guère entrer en concurrence avec d'autres sources d'énergie comme le secteur électrique ou le moteur à combustion interne » (G. Lacroix, 1949, p. 107-108). Dans un rapport écrit en tant qu'expert des aéromoteurs pour le programme de la zone aride de l'UNESCO, il précise que, dans les pays « pauvres », la production décentralisée de petites

26. Golding est un ingénieur britannique expert de l'énergie éolienne à l'ONU et à l'UNESCO. Vadot est ingénieur à Neyrpic. Il a conçu un aérogénérateur construit pour EDF dans les années 1950 (cf 9.1.3).

27. Vadot : < 5kW (Tiers Monde, 1962) ;
Pour Golding : < 3 kW (Golding, 1957).

28. Pour Vadot : 5 kW< < 20 kW (Tiers Monde, 1962)
Pour Golding : [3 kW-100 kW] (Golding, 1957).

29. Pour Vadot : > 100 kW (Tiers Monde, 1962) ;
Pour Golding : 100< < 1000 kW (Golding, 1957).

30. Pour le plus petit modèle imaginé, dont la roue verticale devait avoir un diamètre de 15 m : 23.4 kW par vent de 6.70 m/s et de 260 kW par vent de 15 m/s ; pour l'appareil de 20.60 m de diamètre, 45 kW pour un vent de 6.70 m/s et 520 kW pour un vent de 520 m/s.

puissances électriques est même la seule solution envisageable, pour des usages comme la distillation de l'eau ou la production de petites puissances électriques [31].

L'utilisation de l'énergie géothermique est évoquée à neuf reprises dans chacune des deux revues, et la majorité des occurrences [32] traitent les études de Georges Claude, aidé de son fils André-Georges. Claude étudie le potentiel français en énergie géothermique, et conçoit des usines de plusieurs dizaines de milliers de kilowatts, utilisant des jaillissements artificiels de vapeur souterraine, et pouvant produire électricité, chaleur industrielle, eau douce. Ces geysers seraient provoqués par des forages de plusieurs kilomètres, rendus possibles selon Claude grâce aux techniques du secteur pétrolier. L'ambition de Claude va jusqu'à envisager, dans les régions de nappes aquifères profondes, des forages de 8 000 m de profondeur pour extraire des eaux dont la température serait comprise entre 200 et 400°C. Une des applications pratiques présentées dans *La Nature* est la construction d'une usine géothermique à proximité du tunnel du Simplon pour l'alimentation en électricité des trains du réseau ferré (Pierre Devaux, 1949b) [33]. Claude cherche à susciter des campagnes de mesures à Péchelbronn où, selon lui, des forages moins profonds (« seulement » 4 000 m !) permettraient d'obtenir de la vapeur d'eau à 400°C. Ces études sont exposées à l'Académie des sciences par Caquot, évidemment peu gêné par l'ampleur des travaux envisagés, et par le géologue Emmanuel de Margerie, entre 1949 et 1953 [34]. Les articles de *La Nature* et *Le Génie civil* reprennent les notes publiées aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, ou y apportent des précisions, parfois de la plume de l'auteur lui-même. Le vieil inventeur déchu, dont l'image est ternie par une condamnation à l'emprisonnement pour des raisons de collaboration, et, pour le même motif, par un renvoi de l'Académie des sciences, continue malgré cela à recevoir le soutien de certains collègues scientifiques et ingénieurs et l'audience de revues scientifiques et techniques. Ce cas d'un inventeur cherchant à mobiliser l'industrie pour mettre en œuvre son idée par le biais des revues scientifiques et techniques et des cercles scientifiques et industriels tels que l'Académie des sciences est devenu rare pour l'époque et ressemble à une survivance de l'image de

31. Archives UNESCO, p.d., Lacroix, « Structure of wind-driven machines », 12/10/1953.

32. Deux dans *La Nature* et cinq dans *Le Génie civil*.

33. Dans cet article, je n'ai pas réussi à savoir quelle part de l'idée revient à Devaux et laquelle revient à Claude. Mais Devaux exprime le projet d'une combinaison d'une sorte d'usine hydro-électrique avec une usine thermique utilisant la vapeur d'eau dans une turbine adaptée. Un puits creusé au niveau du tunnel du Simplon extrait l'eau souterraine et serait relié, par une canalisation, à une usine thermique située quelques kilomètres plus loin, au bord du Rhône qui constitue une source froide. L'eau d'un cours d'eau déviée dans un puits d'injection, profond de 7 000 km, permet de restituer aux nappes profondes l'eau extraite ; l'énergie de la chute d'eau est récupérée dans une turbine hydraulique de haute chute. La construction du puits d'injection fait l'objet d'un dispositif audacieux : pour que les ouvriers foreurs puissent travailler sous des températures inhumaines (plus de 200°C au fond d'un puits), une « sphère-cloche » suspendue à des câbles d'acier et évoluant dans les profondeurs est calorifugée et refroidie grâce à de l'air liquide. À l'extérieur de cette sphère, les ouvriers utilisent des « scaphandres réfrigérants » (Pierre Devaux, 1950).

34. Séances du 14 février 1949 ; du 4 avril 1949 ; du 30 mai 1949 ; du 21 janvier 1952 ; du 19 mai 1952 ; du 16 février 1923 ; du 10 novembre 1953.

l'inventeur de la période (1880-1940).
Sur l'énergie géothermique, on trouve par ailleurs dans les deux revues essentiellement des traces de projets étrangers d'exploitation de grandes puissances géothermiques [35]. Pendant la guerre, en pleine pénurie de charbon, il est aussi ponctuellement question de chauffage domestique grâce à l'eau des nappes souterraines [36] .

Enfin, l'énergie solaire, qui a connu le plus grand écho dans *La Nature* et *Le Génie civil*, échappe au constat fait à propos des autres énergies naturelles. D'une part, plusieurs types de conversions et de puissances, associés à différents usages, sont présentés : il est question de chauffage et de distillation de l'eau, de cuisson, de pompage, de production d'électricité, ou encore de fusion des métaux, comme le montrent les Tables 7.5 et 7.6. D'autre part, on constate une concentration d'occurrences dans les années 1950. La diversité des convertisseurs solaires décrits reflète les multiples travaux menés en France et à l'international sur l'énergie solaire. En France, cette recherche est effectuée sur trois sites principaux : le Laboratoire de recherches sur l'utilisation de l'énergie solaire (LES), laboratoire du CNRS inauguré en 1950 et dirigé par Félix Trombe, qui étudie tant les fours solaire pour fabriquer et tester des matériaux à hautes températures, que l'architecture et le refroidissement solaires. Il construit successivement à Odeillo deux fours solaires les plus puissants du monde en leur temps (l'un de 75 kW, inauguré en 1954, et un de 1 000 kW, inauguré en 1969) (Teissier, 2013, p. 15-16). À Alger, à l'issue de la guerre, une équipe de scientifiques et d'ingénieurs mène à la création de l'héliodyne de l'Observatoire de la zaréah au début des années 1950. Ces études sont poursuivies par l'Institut de l'énergie solaire de l'Université d'Alger (IUESA) créé en 1959, qui poursuit ces études en travaillant sur « les transformateurs thermomécaniques, l'hélioélectricité, le chauffage solaire, les synthèses chimiques, les applications biologiques », bref, toutes les applications alors imaginées de l'exploitation de la chaleur solaire (Pehlivanian, 2014, p. 122). À l'Université d'Alger, une petite équipe met au point des pompes solaires à partir des années 1960 (Girardier, 1995).
À l'exception notable des années de guerre et de pénurie, la tendance relevée par Teissier, (2013) à valoriser les applications de « haute technologie » se vérifie : four solaire pour la chimie des hautes températures, production d'électricité, plutôt que les distillateurs,

35. En 1952, *La Nature* publie une courte note sur des recherches et projet aux État-Unis, en Italie et des installations en Islande, pour la production d'électricité (La Nature, 1952). Un article de 1955 mentionne un projet de production d'électricité et d'eau lourde, en vue du programme nucléaire britannique, en Nouvelle-Zélande (La Nature, 1955a) En 1959, une centrale électrique y serait en effet opérationnelle (Mériel, 1959). Selon *Le Génie civil*, en 1955, une entreprise chilienne projette la production d'aluminium dans la Cordillère des Andes à partir de l'énergie géothermique (Le Génie civil, 1955c).

36. En 1942, *La Nature* publie un article à titre documentaire, sur le « chauffage central naturel et gratuit » de la ville de Chaudes Aigues, « ville chauffée naturellement » qui fait « rêver les Parisiens par les froides journées de [l'hiver 1942] » (V. Romanovsky, 1942). Selon *Le Génie civil*, la même année, la revue *Combustibles énergie* fait paraître l'article d'un certain F. Ghiraldi à propos de l'extraction thermodynamique de la chaleur des nappes artésiennes de Paris, qui permettrait de chauffer 300 à 400 immeubles de la capitale (Le Génie civil, 1942).

chauffe-eau et maisons solaires, et, dans les seules occurrences sur les utilisations directes (ou de « basse technologie »), à les décrire comme solution au rabais pour les populations « sous-développées ». La lecture des deux revues permet aussi de confirmer le constat de Sophie Pehlivanian selon lequel le Laboratoire de l'énergie solaire, pour ses expériences à vocation de recherche scientifique, a eu un rayonnement beaucoup plus large que les équipes algériennes et leur ambition plus marquée d'arriver à des applications concrètes permettant de remplacer le combustible manquant dans les pays chauds [37]. La lecture du *Génie civil* le confirme, ainsi que celle de *La Nature*, de manière toutefois moins marquée puisqu'il y est plus largement question de travaux étrangers. La grandeur technologique cultivée au LES reçoit ainsi le plus grand écho. On peut sentir une certaine fierté nationaliste à la lecture d'un article comme celui de Trombe dans *La Nature* en 1955, introduit de la manière suivante par un auteur de la revue : « le « four solaire » le plus puissant du monde, installé dans la forteresse de Mont-Louis [...], véritable usine-pilote pour l'utilisation industrielle du rayonnement du soleil, a placé la France au premier rang des nations dans cette technique riche de promesses pour une humanité de plus en plus avide d'énergie » (La Nature, 1955b). Dans *Le Génie civil*, le grand nombre d'occurrences des années 1950 est essentiellement lié aux travaux dirigés par Félix Trombe, en collaboration avec Marc Foëx et Charlotte Henry-La Blanchetais au LES. Dans la seule décennie 1950, treize occurrences sur seize concernent ainsi des synthèses, sans plus de commentaires, des notes de ces chercheurs à l'Académie des sciences, ou d'articles de Trombe lui-même. De plus, il s'agit majoritairement de leurs travaux sur les fours solaires. En comparaison, les travaux algérois ne sont cités qu'à cinq reprises et très brièvement, en 1952 et 1963 [38]. Les pompes solaires étudiées et construites à l'Université d'Alger ne sont pas du tout signalés. Des travaux français, les plus valorisés dans *Le Génie civil* sont donc ceux qui concernent la chimie des hautes températures au LES. Dans *La Nature*, les travaux du Laboratoire de l'énergie solaire ne sont mentionnés que deux fois (sur quatorze occurrences), mais ils font l'objet d'un article de Trombe lui-même, qui vante en particulier les fours et réfrigérateurs solaires étudiés par son équipe du Laboratoire de l'énergie solaire (Trombe, 1955). Il n'est jamais question des travaux algérois ou dakarois.

La production d'électricité par la chaleur solaire trouve aussi de l'écho, à partir des années 1950, dans *Le Génie civil*, même si des chercheurs français comme Trombe, Perrot ou encore Gaston Remenieras, à EDF, ne considèrent cette application que pour un avenir lointain. On trouve aussi la description de certains projets techniques, comme les installations « hydro-solaires », exposées dans *La Houille blanche* par Vadot, qui semble avoir étendu ses études sur les aérogénérateurs à des réflexions sur l'exploitation de la chaleur

37. Ainsi, « on trouve davantage de publications scientifiques et techniques sur le sujet de l'énergie solaire émanant des équipes de Félix Trombe au CNRS, que des universités d'Algerpuis de France » (Pehlivanian, 2014, p. 160).

38. À trois reprises, les études de Guillemonat et Bétier, puis Savornin et Lejeune, sur des distillateurs solaires ; à deux reprises, l'héliodyne de l'Observatoire de la Bouzaréah.

solaire. Il reprend ainsi le concept de « houille d'or » de Gandillon (sans toutefois le citer), pour des puissances installées allant jusqu'au millier de mégawatts (VADOT, 1954, cité dans LE GÉNIE CIVIL, 1955b) [39]. Les possibilités d'utilisation de photo-piles pour tous les usages de l'électricité sont développées trois fois [40]. Des recherches sont en effet amorcées en France dans les années 1950 à propos de ces dernières , et en particulier, dans les années 1960, au CNES, pour des applications spatiales (RODOT, 1993). Dans *La Nature*, un article sur les « convertisseurs thermo-électroniques » mentionne deux applications possibles : l'énergie solaire et l'énergie nucléaire (ROSSET, 1962).
Enfin, les autres articles du *Génie civil* concernent le chauffage et la distillation solaires, mais ce, presque uniquement pendant la guerre. On trouve ainsi un article présentant les chauffe-eau solaires commercialisés en France par la société La Thermique naturelle (GENDRON, 1940), les travaux de Félix Pasteur sur ses installations en Algérie (PASTEUR, 1942), et l'article d'un autre médecin, Maurice d'f, promouvant le chauffage d'appoint par la chaleur solaire dans le Sud de la France (D'HALLUIN, 1942). Ce n'est donc qu'en période où le charbon manque pour les usages les plus basiques que l'utilisation de l'énergie solaire est envisagée pour les assurer.

## 7.4 Synthèse Chapitre 7

Les énergies naturelles (marées, vent, soleil, énergie thermique des mers, houle) ont donc été considérées, dans les discours des ingénieurs étudiés dans cette section, comme de potentielles contribution à un bilan énergétique national toujours insuffisant en comparaison des pays voisins. Leurs caractéristiques de gratuité et d'inépuisabilité sont moins souvent mises en valeur, et c'est plutôt leur potentiel de croissance énergétique (donc leur abondance) qui est pris en considération, ce qui explique qu'il n'y ait pas eu d'expression aussi clairement consacrée que « forces naturelles » pour les désigner. De manière plus marquée que pendant l'entre-deux-guerres, ce sont les unités de grande puissance qui sont valorisées comme des moyens de modernisation de la France, et, plus particulièrement, celles produisant de l'électricité pour un réseau électrique interconnecté. Ce mouvement concerne désormais toutes les énergies naturelles : comme dans l'entre-deux-guerres, les marées et l'énergie thermique des mers, mais aussi, de manière généralisée, le vent, la géothermie. Seul le soleil fait exception. Il n'y a globalement, plus de place pour les petites expérimentations individuelles dans les revues scientifiques et techniques, et la figure de l'inventeur s'efface pour celle de chef de (grand) projet, ou ingénieur d'études, au sein de grandes entreprises, tels Ailleret, Gibrat, Darrieus, Lacroix, ou de laboratoires publics

39. L'idée de Pierre Gandillon est également reprise dans une note synthétisant l'article de Mario Dorning dans la revue italienne *L'ingegnere*, pour une installation utilisant la Mer Morte.
40. En 1955, 1960 et 1961.

comme Trombe. Les projets géothermiques de Georges Claude, l'inventeur déchu, constituent davantage des survivances d'une période révolue que des projets d'avenir au profit de la modernité de la France. Quant aux petites productions d'énergie et applications directes, elles sont réservées aux populations « sous-développées » ; elles ne sont associées à la grandeur de la nation française que dans la mesure où elles mettent la métropole en position de pourvoyeur d'aide au « développement ». On peut enfin relever, à propos des grands aménagements marémoteurs l'expression d'un scepticisme par rapport à leurs conséquences esthétiques de la part d'un ingénieur pourtant globalement enthousiaste quant aux bienfaits du progrès technique, Pierre Devaux.

# Chapitre 8

# Les « énergies de remplacement » pour l'économie de guerre (1940-1945)

Pendant la guerre, le gouvernement de Vichy met en place une organisation dirigiste de l'économie nationale incluant la planification, la rationalisation et l'intensification de la production industrielle, d'énergie et de matières premières. La nouvelle Délégation générale à l'économie nationale (DGEN) élabore un plan décennal qui détermine des objectifs chiffrés de secteurs économiques stratégiques. En situation de pénurie, deux ambitions impliquent une prise en considération des énergies naturelles : celle de développer le réseau électrique métropolitain et celle d'intensifier la production (agricole et industrielle) des colonies. En métropole, le Comité d'organisation de l'énergie électrique (COEE), placé sous la tutelle du nouveau ministère de la Production industrielle [1], est chargé de la gestion et de l'organisation du secteur électrique, avec la collaboration étroite de grandes compagnies du secteur. Ses dirigeants choisissent d'encourager les recherches sur la production d'électricité éolienne et marémotrice pour une mise en application rapide à l'alimentation du réseau électrique français. Par ailleurs, le gouvernement de Vichy met en place un programme de mise en valeur agricole et industrielle des colonies. En 1941, il crée une société, le Réseau de chemins de fer de la Méditerranée au Niger, sous la tutelle du secrétariat d'État aux Communications, afin de mettre en œuvre un coûteux et ambitieux projet de chemin de fer transsaharien [2] validé par le maréchal Pétain la même année. Totalisant une longueur de 2 000 kilomètres en plein désert, reliant les ports les plus importants de l'empire colonial, le transsaharien doit apporter à la fois prestige, avantages commerciaux et militaires à la France : flux de marchandises, et en particulier transport de charbon vers la métropole ; déplacement des troupes d'un point à l'autre de l'Empire (Gaida, 2014,

1. Ce ministère remplace le ministère du Commerce et de l'Industrie, et absorbe les départements issus de l'ancien ministère des Travaux publics, dont le secrétariat général à l'Énergie (Margairaz et Rousso, 1992, p. 346).

2. Il devait totaliser une somme de 5.7 milliards de francs (Gaida, 2014, p. 49).

p. 42-61). En 1942-1943, il crée en outre l'ORSC sous la tutelle du secrétariat d'État aux colonies dans le but d'organiser une recherche coloniale pour l'exploitation rationnelle de ces territoires (Bonneuil, 1991). Dans le même temps, le CNRS est voué à une recherche utilitariste (Picard et Pradoura, 1988, p. 14-15) et cherche également à se positionner sur ce créneau. Pour permettre cette nouvelle politique coloniale, ces institutions impulsent ou soutiennent des projets d'exploitation de l'énergie thermique des mers et de l'énergie solaire.

La Figure 8.1 synthétise les institutions identifiées et l'organisation de leurs recherches.

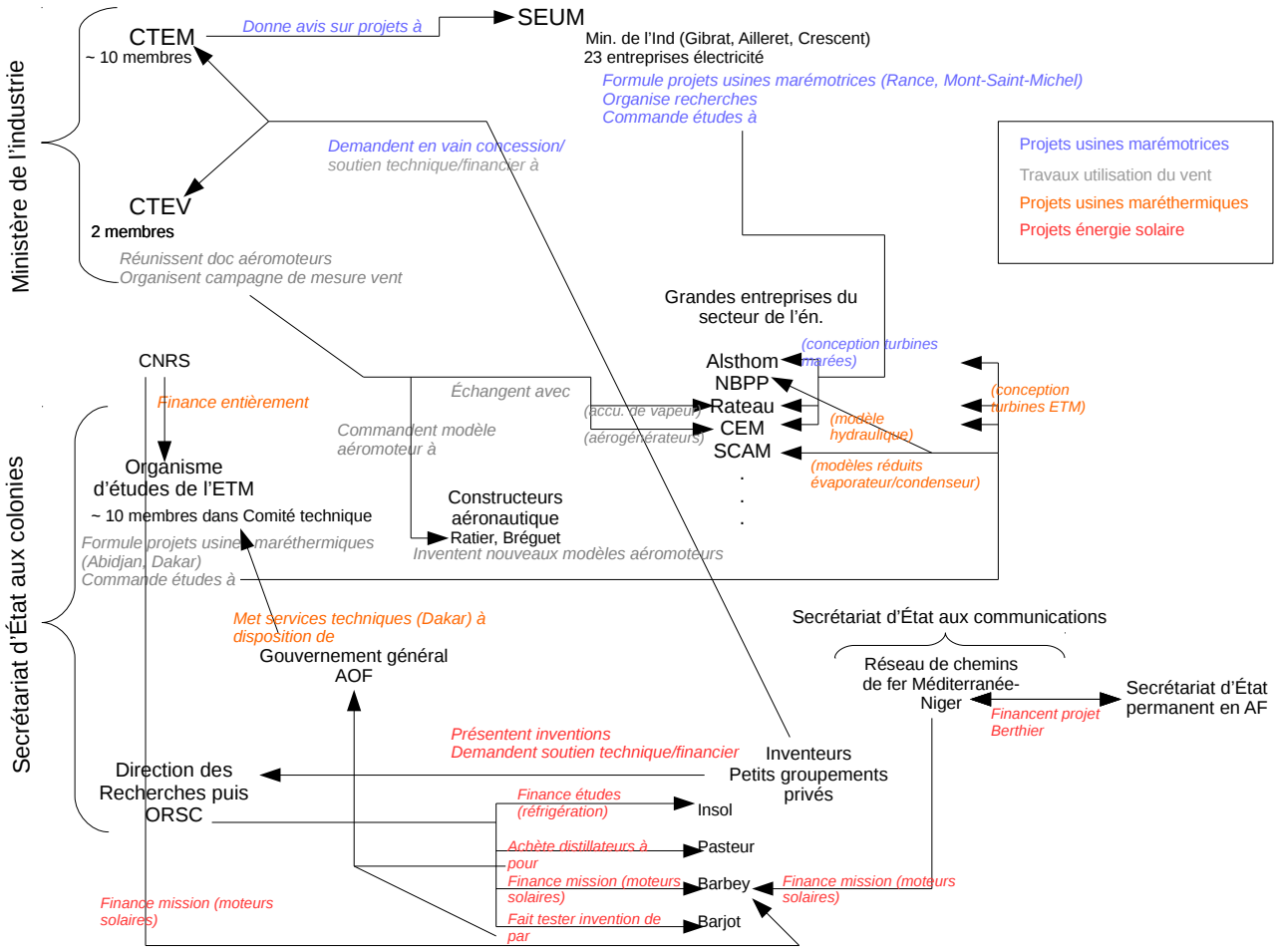



Figure 8.1 – Diagramme synthétique des acteurs impliqués dans des projets d'utilisation des énergies naturelles portés par des institutions publiques (1940-1945)

Une grande part des énergies naturelles (marées, vent, énergie thermique des mers, soleil) se voit ainsi prise en considération par des institutions publiques qui souhaitent la mise en service rapide de nouveaux convertisseurs. Pour la majorité de ces projets (marées, vent et énergie thermique des mers), de grandes entreprises du secteur de l'énergie sont mobilisées, telles que l'Union d'électricité (usines marémotrices), la Compagnie électro-mécanique (aérogénérateurs, usines maréthermiques), Alsthom (aérogénérateurs,

usines marémotrices et maréthermiques), Neyret-Beylier et Picard-Pictet (NBPP, future Neyrpic) (usines marémotrices et maréthermiques, récupération de l'énergie des vagues) ou encore Rateau (aérogénérateurs, usines maréthermiques). Une dynamique similaire à celle qui n'avait concerné que les marées à l'issue de la Première guerre mondiale s'étend donc au vent et à l'énergie thermique des mers, c'est-à-dire l'organisation de la recherche par une institution étatique qui mobilise des industriels du secteur de l'électricité pour la mise en place de centrales puissantes. Ces recherches centralisées prennent cependant des formes différentes en fonction des énergies naturelles. Elles sont poursuivies après guerre par EDF (marées et vent) et par une société d'économie mixte, L'énergie des mers, associant EDF et des industriels du secteur de l'électricité (énergie thermique des mers). Les projets marémoteurs et éoliens répondent en effet à l'enjeu d'approvisionnement électrique national particulièrement visé par les acteurs de la modernisation. Les ambitions qui avaient motivé le secrétariat d'État aux colonies pour la mise au point de stations maréthermiques subsistent en effet au ministère de la France d'Outre-mer, et les industriels mobilisés y voient toujours des débouchés.
L'énergie solaire fait exception : la recherche sur de nouveaux convertisseurs s'apparente encore à celle qui était pratiquée dans l'entre-deux-guerres, à savoir le financement, par des institutions publiques (au centre desquelles le secrétariat d'État aux colonies), d'inventeurs qui mettent au point le convertisseur de leur conception. Ces projets sont stoppés pour des raisons de conflits internes entre les inventeurs et les institutions financeuses.

Ce chapitre étudie d'abord les projets d'alimentation du réseau électrique métropolitain par les marées et le vent autour du COEE, puis les recherches coloniales pour l'exploitation de l'énergie thermique des mers et de l'énergie solaire.

## 8.1 Métropole : approvisionnement du réseau électrique

### 8.1.1 Le Comité technique de l'énergie des mers et la Société d'études de l'énergie des marées

En 1940, Robert Gibrat, ingénieur des Mines et directeur de l'Électricité au ministère de la Production industrielle, met en place un nouveau programme national pour l'exploitation de l'énergie des marées. Avec le ministre de la Production industrielle Jean Bichelonne, il cherche à distinguer l'action du nouveau ministère de celle de la Commiission de la houille bleue en la matière. Celle-ci, peu active depuis les années 1930, n'est effectivement parvenue à la mise en œuvre d'aucune usine marémotrice. Ainsi, Bichelonne considère que l'œuvre de cette institution fut « surtout de prospection et d'études pré-

liminaires » [3]. Bichelonne et Gibrat reprochent à l'action de la Commission d'avoir été trop dispersée, de ne pas avoir assez mobilisé les industriels, et d'avoir laissé trop de place à des inventeurs. Ainsi, selon le ministre, si aucune réalisation n'a finalement jamais été effectuée, malgré une réelle volonté de mise en application, c'est que « l'utilisation des marées a, sans doute, souffert jusqu'ici d'avoir trop d'« inventeurs » et peu de réalisateurs ». Il ajoute que « les Pouvoirs publics, si disposés qu'ils fussent à accorder leur concours, voyaient en face d'eux des organismes trop nombreux, ne disposant pas, en général, de grands moyens, et qui, au lieu d'examiner quel pouvait être le système le meilleur pour l'équipement des points les plus favorables des côtés, cherchaient plutôt quelle était la région du littoral qui permettrait l'utilisation de tel ou tel procédé particulier et l'application de tel ou tel brevet » [4].

Gibrat souhaite au contraire que les études soient désormais pilotées au niveau national entre l'Administration et des entreprises puissantes, qui élaboreraient et mettraient en œuvre conjointement les aménagements qu'ils estimeraient les plus opportuns. La place n'est plus aux inventeurs ou aux petits groupements privés dont les pouvoirs publics décideraient d'encourager les meilleures propositions. Il décide donc d'orienter l'action de l'État dans deux directions. La première est la création d'une société à laquelle participeraient l'État français et certaines des plus grandes entreprises du secteur de l'électricité. Le 8 octobre 1941, la Société d'études pour l'utilisation des marées () est créée [5], au capital de 2 500 000 francs, composée de vingt-trois entreprises du secteur électrique parmi les plus importantes en France [6] et dirigée par R. Thibaudin. Gibrat en est ingénieur-conseil. Son Conseil d'Administration comporte des représentants de ces entreprises, mais aussi de l'Administration [7]. Charles Crescent, inspecteur général des Forces hydrauliques, est

3. AN 1977 1457/42, p.d., Lettre de Bichelonne à Crescent, 08/05/1943.

4. AN 1977 1457/42, p.d., Lettre de Bichelonne à Crescent, 08/05/1943.

5. AN 1977 0614/6, p.d., Charles Crescent, « Note sur la Société d'études pour l'utilisation des marées », 11/03/1944.

6. Ces entreprises sont les suivantes, classées en fonction de leur participation au capital de la :
- 200 000 francs chacune : Union d'électricité ; Énergie industrielle ; Compagnie du littoral méditerranéen ; Énergie électrique du Sud-Ouest ; Cie des produits chimiques Alais Froges et Camargue ; Électro-chimie, électro-métallurgie d'Ugine,
- 150 000 francs chacune : Cie électrique de la Loire et du Centre ; Forces motrices de la Truyère ; Compagnie générale d'électricité () ; Union des producteurs d'électricité des Pyrénées occidentales,
- 100 000 francs chacune : Compagnie hydro-électrique d'Auvergne ; Mines de Béthune ; Société d'électricité de l'Ouest ; Pyrénéenne d'énergie électrique ; CPDE ; Électricité et gaz du Nord,
- 50 000 francs chacune : Forces motrices de la Vienne ; Société de transport d'énergie du Rhône, des Alpes et du Centre ; Compagnie centrale d'énergie électrique ; Gaz et eau ; Société Lebon ; Le Bourdonnais (AN 1977 1457/42, p.d., Lettre du ministre, secrétaire d'État à l'économie nationale et aux Finances au secrétaire d'État à la Production industrielle, 30/07/1941.).

7. Y siègent ainsi douze membres :
- Pierre Ailleret ; Jean Dupin (président de la chambre syndicale des Forces hydrauliques), Président ; Edmond Roux (président du Syndicat professionnel des Producteurs et des distributeurs d'énergie électrique) ; Charles Crescent, inspecteur général des Forces hydrauliques au ministère de la Production industrielle ;
- un « représentant des distributeurs régionaux » (Société Lebon),

ainsi chargé de représenter le ministère de la Production industrielle. Parmi ces membres, certains sont étroitement liés à l'organisation centralisée du secteur électrique mise en place sous Vichy autour du COEE : son président, Jean Dupin, fait partie de la direction du Comité, et Pierre Ailleret est ingénieur-conseil auprès du Comité, « chargé de toutes les questions de transport et d'interconnexion » (Lévy-Leboyer, 1994a, p. 121 ; Bouneau, 1994b, p. 790). Le capital de la SEUM devait au départ être constitué avec une participation des industriels et de l'État, mais il est finalement prévu que l'État ne participe que par le biais d'avances sans intérêt dans les études entreprises par la Société et les travaux de construction.

Dès le départ, la SEUM a un caractère monopolistique, même si Bichelonne tente justement de l'en défendre. Selon ce dernier, elle doit ainsi « rester unique, car, en l'espèce, l'État ne saurait disperser son concours ». Mais, « si d'autres groupes industriels, ne faisant pas actuellement partie de la Société d'études, présentaient des demandes de concessions d'usines marémotrices comportant des dispositions heureuses ou nouvelles [...], la solution consisterait alors à les faire participer à la Société, de façon que celle-ci, comme conséquence d'accords à intervenir, prenne en main l'élaboration des projets » [8]. Les industriels, le ministre de la Production industrielle et le ministre des Finances se mettent d'accord sur la mission de la SEUM : celle-ci doit mettre au point des projets d'usines marémotrices qui seront réalisées dans les plus brefs délais. Elle ne se focalisera donc que sur un petit nombre de projets. Un programme en trois volets est élaboré : étude des cycles, étude des ouvrages de génie civil par des ingénieurs du Génie maritime, études hydrauliques sur modèles réduits [9], pour lequel un versement d'un million de francs est alloué en 1943.

Gibrat entreprend en outre de remplacer la Commiission de la houille bleue par un nouvel organisme, le Comité technique de l'énergie des mers (CTEM), toujours au sein du ministère de l'Industrie. Cet organisme consultatif doit être « plus adapté aux besoins du moment », c'est-à-dire à la mise en œuvre rapide d'usines prodiguant de l'électricité au réseau électrique national. Il est créé par le 19 octobre 1943, et est chargé, comme l'était la Commiission de la houille bleue, de « fournir des avis sur toutes les questions concernant l'énergie des mers qui lui sont soumises par le secrétaire d'État chargé de l'électricité » [10]. Cependant, selon le souhait du ministère de l'Industrie explicitement

— un « représentant des principaux actionnaires » : Union d'électricité, Énergie industrielle, EELM-Energie du Sud-Ouest, Société d'électro-chimie, d'électro-métallurgie d'Ugine, CGE, Stés Loire et Centre et Truyère.
AN 1977 1457/42, p.d., Lettre de Dupin à Gibrat, 05/08/1941.).

8. AN 1977 1457/42, p.d., Lettre de Bichelonne à Crescent, 08/05/1943.

9. AN 1977 1457/42, p.d., Direction de l'Électricité, « Rapport justificatif concernant la passassion d'une convention avec la Société d'études pour l'utilisation des marées », 25/09/1943.

10. AN 1977 0614/3, 1941, Arrêté du 19 octobre 1943 constituant le Comité technique de l'énergie des mers.

exprimé par Bichelonne, le CTEM est tout particulièrement destiné à collaborer avec la SEUM, en donnant un avis sur ses travaux au ministre de l'Industrie, et en lui soumettant éventuellement, au nom de ce dernier, des recherches. Ainsi, d'une part, le CTEM ne serait qu'exceptionnellement consulté pour donner son avis sur d'autres projets que ceux de la SEUM, et suggérerait aux sociétés dont les projets seraient jugés dignes d'intérêt de s'associer avec la SEUM. La question des autres énergies marines (vagues, houle et énergie thermique des mers), n'est pas à l'ordre du jour, même si le CTEM peut, à l'avenir, avoir à les étudier, dans la mesure où elles pourraient « contribuer un jour à subvenir aux fournitures nécessaires d'énergie électrique » [11].

Le CTEM est constitué, de la même manière que l'était la Commiission de la houille bleue, d'ingénieurs des grands corps de l'État, en particulier des Ponts et chaussées, et spécialistes de l'énergie hydraulique, de l'hydrographie ou du génie maritime, de l'électrotechnique. On retrouve ainsi certains anciens experts de la Commission, comme son président, André Gervais de Rouville, ingénieur en chef des Ponts et chaussées et directeur du service des Phares et balises, qui en fut le secrétaire pendant presque toute sa durée, ou son secrétaire, Besson, ingénieur des Ponts et chaussées attaché au Service des forces hydrauliques [12], (cf tableau Annexe E.1) [13]. En 1944, ce Comité est divisé en sept sous-commissions, répondant au programme élaboré par la SEUM, qui se résument par les sujets suivants : cycles, station d'essais, génie civil, installations électriques et mécaniques, vannages, régularisation, hydrographie (voir Annexe G.1 pour les objets de recherches et la composition des sous-commissions).

C'est ainsi la SEUM qui, avec la collaboration, mais aussi la surveillance des ingénieurs de l'Administration par le biais du CTEM, se charge de la mise au point des projets d'usines marémotrices susceptibles d'être approuvés par l'État (donc, d'obtenir une concession) et de recevoir son concours financier. Dès le début, ses ingénieurs étudient l'aménagement des sites jugés les plus intéressants. Ce sont aussi ceux qui ont été les plus étudiés dans l'entre-deux-guerres :

— trois sites pour des usines de petites et moyennes puissances : l'Aber Wrac'h (5 000 kW), la Rance (24 000 kW) et Rothéneuf (15 000 kW)
— un site pour une usine de très grande puissance : le Mont-Saint-Michel (3 000 000 kW) [14].

Au départ, l'idée est, conjointement, d'étudier un projet de petite ou moyenne puissance, qui, comme le voulait la Commiission de la houille bleue à propos de l'usine marémotrice

11. AN 1977 1457/42, p.d., Lettre de Bichelonne à Crescent, 08/05/1943.
12. Mais aussi : Ailleret (qui est partout !) ; Rossignol de Fargues, inspecteur général des Ponts et chaussées ; Courtier, directeur du Service hydrographique ; Bricard, ingénieur en chef du Génie maritime.
13.
Je n'ai pas trouvé la composition précise du Comité à sa création, mais en 1949. Il est cependant fort probable qu'elle n'ait pas beaucoup évolué entre 1943 et 1949.
14. AN 1977 1457/42, p.d., Rapport de Crescent (en tant que membre du Conseil d'administration du SEUM), 13/04/1943.

de l'Aber Wrac'h, permette de tester la technique sur une petite échelle ; et d'élaborer en même temps l'aménagement de la baie du Mont-Saint-Michel. Ce projet, bien que présentant pour les industriels et les ingénieurs de l'administration des incertitudes financières, semble techniquement abordable [15]. Finalement, le CTEM et la SEUM se mettent d'accord que, compte tenu des spécificités d'aménagement propres à chaque site, la première usine à construire ne doit pas être une usine d'essais mais doit pouvoir directement pourvoir le réseau électrique en une quantité significative d'énergie. C'est ainsi que les sites de l'Aber Wrac'h et de Rothéneuf sont rejetés au profit de l'estuaire de la Rance. Aussi les travaux sur l'usine marémotrice de la Rance, poursuivis après la guerre, débutent-ils dès 1942 à la SEUM. Le site du Mont-Saint-Michel fait également l'objet d'études approfondies, selon les sept axes du programme de recherches du CTEM. Des relevés hydrographiques sont effectués, des modèles réduits construits et testés, plusieurs modèles de turbines spéciales expérimentés par les sociétés Alsthom, Neyret-Beylier et Piccard-Pictet (NBPP) et la Compagnie électro-mécanique — c'est finalement un des modèles de NBPP, le fameux « groupe bulbe », qui sera choisi pour l'usine marémotrice de la Rance.

Malgré le caractère monopolistique de la SEUM, des inventeurs ou d'autres groupements continuent d'envoyer des propositions de projets, dans le but d'obtenir concession et/concours financier, sont toujours envoyées au ministère de la Production industrielle. L'un de ces groupes, formé dans l'entre-deux-guerres et auquel avait eu affaire la Commiission de la houille bleue, est resté très actif et participe à plusieurs réunions du CTEM. Il s'agit de la société L'énergie des marées, fondée par Defour dans les années 1920, dont Caquot est devenu ingénieur-conseil et porte-parole dans les années 1930. Pendant la guerre, Caquot porte, au nom de cette société, un projet d'aménagement du Mont-Saint-Michel, que l'Énergie des marées demande en concession. Par ailleurs, Caquot et Defour sont associés à une autre société, les Ingénieur-conseils coopérateurs (ICCO) [16], qui demande en concession l'anse de Rothéneuf pour un aménagement marémoteur préalable à celui du Mont-Saint-Michel. Ces différentes demandes ne trouveront jamais de réponse positive. Pour le premier projet, le CTEM considère qu'il faut préalablement construire une usine de taille plus modeste ; pour le second, l'argument est, cette fois, la trop petite

15. En 1943, Dupin pense ainsi que d'ici quinze ans, « la question de l'installation d'usines marémotrices sur une vaste échelle sera tout-à-fait à l'ordre du jour ». Crescent, représentant le ministère de l'Industrie au SEUM, estime de son côté que « la grande digue de 25 kilomètres [prévue pour l'aménagement du Mont-Saint-Michel] représente un travail moins important que l'ensemble des digues et quais du port de Marseille ». L'optimisme de Dupin, qui est à la fois président de la SEUM et de la Chambre syndicale des forces hydrauliques, conforte en outre son avis sur la faisabilité à moyen terme de la gigantesque usine marémotrice.
AN 1977 1457/42, p.d., Rapport de Crescent (en tant que membre du Conseil d'administration du SEUM), 13/04/1943.

16. Cette société est composée de quatorze ingénieurs-conseils, dont Edmond Aubert, ingénieur des Arts et manufactures et de l'École supérieure d'électricité , ancien directeur général de la Cie Ouest-Lumière ; Paul Fourault, ingénieur en chef des Ponts et chaussées en retraite ; Léon Melot, ingénieur de l'Institut industriel du Nord, ancien directeur général de Omnium régional d'électricité (AN 1977 0614/6, p.d., Lettre des ICCO au ministre de la Production industrielle, 10/04/1946).

puissance de l'usine projetée. Caquot et les sociétés auxquels il est associé se plaignent à plusieurs reprises du caractère monopolistique des études de la SEUM. Le plaidoyer d'un des dirigeants des ICCO vis-à-vis du projet de Rothéneuf et ses attaques envers le SEUM sont tout-à-fait révélateurs de cette situation. Dans la lettre suivante, Aubert se plaint que, dans une synthèse à propos des travaux français sur usines marémotrices, présentée au Syndicat professionnel des producteurs et distributeurs d'énergie électrique, Gibrat ait sous-estimé la puissance de l'usine projetée à Rothéneuf :

> « Quand nous avons décidé de nous intéresser à l'utilisation des marées, en nous associant aux études et travaux de Monsieur André Defour, nous ignorions l'existence de la SEUM. Dès que nous l'avons connue, apprenant [...] que son capital de 2 500 000 francs était souscrit par 23 des plus puissantes sociétés d'électricité françaises, totalisant boursièrement quelque 20 milliards ; que celles-ci s'étaient attaché comme conseil Monsieur Gibrat, le ministre de l'Électricité de la veille ; que le Conseil d'Administration comprenait Monsieur l'inspecteur général Crescent, comme représentant de Monsieur le ministre de la Production industrielle, nous avons naturellement été pénétrés d'un sentiment de déférence pour un organisme aussi puissamment armaturé ; et nous avons tenté, mais sans succès, de prendre avec lui des contacts utiles aux desseins que nous lui prêtions, que nous poursuivions nous-mêmes [...] Si la SEUM n'était qu'une société privée ; qu'elle ait, de propos délibéré, considéré notre demande, non pas comme un greste d'émulation pour le bien public, ce qu'elle était à nos yeux, mais comme une concurrence en un domaine qu'elle tentait de monopoliser, nous ne vous aurions pas saisi, monsieur le Ministre, de la lettre du 5 juin ci-dessus. Mais la SEUM participe de la puissance publique, non seulement par la présence en son Conseil d'administration, de Monsieur l'inspecteur général Crescent, mais par son président, Jean Dupin, que votre choix a appelé au Comité d'organisation de l'industrie de l'énergie électrique et au Comité de l'énergie des mers et des vents. Nous craignons que ces deux hautes personnalités soient influencées, malgré elles et à leur insu, par l'état d'esprit de la SEUM, état d'esprit qui nous inquiète, et dont nous avons cru, monsieur le Ministre, devoir nous faire juge. » [17]

Aubert reproche ainsi la collusion entre les industriels qui sont ses concurrents, et les organismes publics pourvoyeurs de fonds et dispenseurs des autorisations de concession. Plus globalement, il déplore le caractère monopolistique de la SEUM et l'impossibilité pour d'autres entreprises d'entreprendre des projets d'usines marémotrices.

Un glissement est ainsi palpable à propos de l'organisation de la recherche nationale

17. AN 1977 0614/6, p.d., Lettre de E. Aubert au ministre de la Production industrielle, 02/07/1944.

sur les marées à partir des années 1940 par rapport à l'organisation de la recherche autour de la Commiission de la houille bleue, c'est une centralisation et une monopolisation de la ressource par un puissant consortium d'industriels de l'électricité associés à l'État. Elles rendent caduques toutes les autres initiatives privées pour des aménagements marémoteurs, et, *a fortiori*, les propositions d'inventeurs indépendants. Ainsi, la SEUM, qui regroupe les plus grandes entreprises françaises du secteur de l'électricité et certaines personnalités associées au ministère de la Production industrielle (Gibrat, ancien directeur de l'électricité et ingénieur-conseil de la société ; Crescent, inspecteur général des forces hydrauliques au ministère de l'Industrie ; Ailleret, responsable d'une entité du COEE), est au centre des décisions concernant les aménagements marémoteurs français. En lien avec le CTEM, elle élabore les seuls projets susceptibles d'obtenir autorisation de concession et soutien financier de l'État. Du point de vue de la recherche, elle est maître d'ouvrage de l'ensemble des travaux de mise au point des projets. Elle commande ainsi aux grands constructeurs du secteur de l'énergie NBPP, la Compagnie électro-mécanique et Alsthom de nouveaux modèles de turbines. Elle fait également construire par NBPP un modèle hydraulique de la Rance (Bonnefille, 1976b, p. 97). À l'inverse, dans les années 1920, la Société financière pour l'industrie avait conçu son propre modèle de turbine (brevet Huguenin : cf 6).

Malgré ce glissement vers une organisation centralisée et monopolistique, on peut constater des continuités dans les travaux et la manière de concevoir l'utilisation des énergies de la mer par les ingénieurs du CTEM par rapport à ceux de la Commiission de la houille bleue. Premièrement, les travaux de prospection effectués autour de la Commiission de la houille bleue ont été largement utilisés pour le choix des sites à aménager. En outre, seuls les aménagements marémoteurs avec barrages sont envisagés, et l'idée est à terme d'arriver aux puissances régularisées les plus importantes, en commençant par une installation à petite échelle. Il est inimaginable de ne pas passer par le vecteur électrique puisque le but est d'approvisionner le réseau électrique national. Enfin, il n'est même plus question d'une éventuelle utilisation de l'énergie des vagues et de la houle, probablement jugées trop irrégulières, trop difficiles à utiliser à grande échelle. Le projet Grasset engendre des conflits de pouvoir entre le Commissaire au pouvoir et le ministre de la Production industrielle, ce dernier refusant catégoriquement de soutenir ce type de technologies (cf 6.4).

À la suite de la guerre, les travaux du SEUM sont repris par EDF au sein d'un service spécial, ce qui sera évoqué dans la section 9.1.

### 8.1.2 Le Comité technique de l'énergie des vents

En pleine guerre, l'énergie du vent est de même que les marées, et pour la première fois, l'objet d'une tentative d'organisation nationale des recherches, pour la production d'électricité. En 1943, le ministère de la Production industrielle se dote ainsi d'un Comité technique de l'énergie des vents (CTEV), qui lance un programme d'études sur les possibilités d'injection d'électricité éolienne dans le réseau national. Les acteurs de ce programme perçoivent l'énergie éolienne, plus encore que les marées, comme une énergie « sauvage », qui ne servira probablement qu'à économiser le charbon, et, dans le meilleur des cas, à augmenter légèrement la puissance installée grâce à une corrélation heureuse avec l'énergie hydraulique.

En 1941, deux ingénieurs des Ponts et chaussées initient ce mouvement : Paul Pétry, ingénieur des Ponts et chaussées à Compiègne attaché au Service spécial de la navigation, et Eugène Freyssinet, également ingénieur des Ponts et chaussées, et industriel, devenu célèbre pour l'invention du béton précontraint. Pétry a déjà travaillé sur l'énergie de la houle, succédant à Coyne dans ses expériences sur le Bélier du Minou, à la fin des années 1920 (cf 6.4.0.0.1). C'est probablement de cette manière qu'il fut sensibilisé à la question des énergies naturelles. De son côté, Freyssinet est persuadé que la technique du béton précontraint peut servir à une amélioration notable dans la construction des pylônes de grands aérogénérateurs. Dans les archives, leur correspondance, à partir de décembre 1941, témoigne d'un intérêt commun pour le sujet au plus tard à cette date [18]. Leur but premier est de contribuer à « la réalisation sur une vaste échelle [...] de la captation de l'énergie du vent » pour la production d'électricité [19].

Rapidement, c'est Pétry qui est le plus actif dans ces recherches, Freyssinet ayant surtout contribué à nouer des contacts avec des personnalités de la haute administration et à les intéresser à la question des aérogénérateurs. C'est ainsi qu'en décembre 1941, Freyssinet entretient le délégué général à l'Équipement national Henri Giraud pour l'informer des études entreprises par lui et Pétry [20]. Giraud commande alors à Pétry une étude sur les « énergies remplacement », qui vise à examiner « dans quelle mesure les énergies de récupération ou sauvages pourraient se substituer au charbon pour l'économiser, dans quelle mesure elles pourraient s'ajouter à l'électricité distribuée » [21]. Ces énergies de remplacement sont : « l'énergie disponible dans les industries de chauffage ; les gaz de hauts fourneaux ; l'énergie thermique des mers ; le rayonnement solaire ; la puissance des ma-

18. AN 1991 0305/1, 1941-1957, Correspondance entre Pétry et Freyssinet.
19. AN 1991 0305/1, 1941-1957, Lettre de Freyssinet à Pétry, 16/06/1943.
20. AN 1991 0305/1, 1941-1957, Lettre de Freyssinet à Pétry, 18/12/1941.
21. AN 1991 0305/1, 1941-1957, Lettre de Pétry à Louis Fischer (directeur des Voies navigables et des ports maritimes), 04/05/1942.

rées ; la force des lames ; l'énergie du vent » [22]. On voit que le caractère « naturel » ou non importe peu pour Giraud : l'idée est bien de faire flèche de tout bois, afin de répondre à une directive gouvernementale ambitionnant une diminution par deux de la consommation de charbon, en parallèle d'une augmentation de la production d'électricité [23]. Pour rédiger cette note, Pétry entre en contact avec plusieurs personnalités liées à ces sujets : ingénieurs des Ponts et chaussées associés au SEUM pour ce qui concerne les marées, l'Organisme d'études d'une station d'énergie thermique des mers en Côte d'Ivoire pour ce qui concerne l'énergie thermique des mers (voir section 8.2.1), la société Alsthom à propos de la récupération des chaleurs perdues de l'industrie. À propos de la houle, il utilise ses propres expériences sur le bélier du Minou. Mais le plus gros de son travail porte sur l'énergie éolienne. En effet, le SEUM s'occupe déjà de la question des marées ; l'énergie thermique des mers n'a pas sa place dans cette étude sur les énergies de remplacement en métropole, car elle n'est applicable uniquement aux colonies. De plus, elle est déjà étudiée par l'Organisme spécial dépendant du ministère des Colonies (cf section 8.2.1). Il en est de même de l'énergie solaire, étudiée à parallèlement sous l'égide du ministère des Colonies et sous celle du gouvernement d'Afrique occidentale française (voir 8.2.2).

Pétry entre en lien plusieurs constructeurs d'aéromoteurs, afin de connaître les caractéristiques technico-économiques de leurs machines (prix, puissance, rendement) [24]. Il sollicite également des spécialistes des machines et du réseau électrique : les industriels Alsthom et Rateau pour les machines, et Ailleret ainsi que des services de l'administration responsables du réseau électrique. Il cherche par ailleurs des informations sur les statistiques de l'énergie éolienne en France, qui s'avèrent inexistantes ou, tout du moins, inexploitables pour évaluer la puissance utilisable pour la production d'électricité. Enfin, il entreprend une vaste collecte bibliographique, comprenant beaucoup d'articles étrangers (allemands, américains, anglais, suisses, russes), le sujet des énergies de remplacement étant également à l'ordre du jour dans ces pays où sévit aussi la pénurie d'énergie. Toutes ces informations lui permettent d'évaluer les possibilités d'utilisation de l'énergie éolienne et les mesures qui seraient à prendre pour permettre son développement.

Pétry achève cette étude en mai 1942, et sa note est transmise à différentes composantes de l'administration, dont le COEE. Il y prône en particulier la production de grandes puissances électriques à l'aide de séries d'aérogénérateurs d'une centaine de kilowatts connectés au réseau électrique. Pour lui, la force du vent est l'énergie naturelle dont il faut développer en priorité l'utilisation, en particulier par rapport aux marées : d'une part, la

22. AN F14 20 832, p.d., Note sur les énergies de remplacement.

23. Elle devrait ainsi passer de 50 millions de tonnes par an à 25 millions de tonnes par an.
AN 1991 0305/1, 1941-1957, Lettre de Petry à Freyssinet, avril 1942.

24. Il reçoit entre autres des renseignements de A. Masure et Fils et de la Société anonyme des ateliers de construction de Paimboeuf. Ceux-ci leur transmettent une brochure vantant particulièrement la solidité de leurs aéromoteurs, en prenant pour caution l'ancienneté de certaines installations, reproduite en Annexe F.1.

mise au point et la construction d'aérogénérateurs de moyenne puissance serait plus rapide que celle d'usines marémotrices ; d'autre part, la production en série de ces appareils est envisageable, contrairement à celle d'usines marémotrices [25]. Il juge ainsi « plus opportun d'équiper 100 éoliennes » que de construire une usine marémotrice d'essais, solution alors privilégiée au ministère de la Production industrielle en lien avec la SEUM (cf 8.1.1).

Au COEE, Ailleret s'intéresse à la question de la génération d'électricité éolienne suite à cette note. Il y est ingénieur-conseil depuis 1940, et spécialiste de la gestion et de la conception technique des réseaux (Bouneau, 1994b, p. 790). Aussi, pour lui, contrairement à ce que pense Pétry, les aménagements marémoteurs et les aménagements éoliens pourraient être complémentaires et non concurrents. Dans le meilleur des cas, l'énergie éolienne serait ainsi disponible lorsque l'énergie hydraulique ne l'est pas, et les deux énergies naturelles pourraient se compléter remarquablement. Il s'agirait donc, non plus d'une complémentarité spatiale, telle que celle qui était souhaitée dans l'entre-deux-guerres entre houille blanche, houille noire et houille bleue, mais d'une complémentarité temporelle, permise par l'existence d'un réseau national interconnecté. La Figure 8.2 illustre cette complémentarité espérée par Ailleret, entre houille blanche et énergie éolienne. Comme Pétry, Ailleret souligne en outre l' « avantage économique des aéromoteurs sur les usines marémotrices, sur les usines hydrauliques et même sur les centrales thermiques : si l'aéromoteur est viable, il se construira en série », aussi, « une fois un prototype mis au point et une première série fabriquée, la réalisation d'une série supplémentaire représentera des délais très courts » [26] et l'injection d'électricité éolienne dans le réseau pourra intervenir rapidement.

Pour Ailleret, des études doivent donc être entreprises au niveau national afin d'évaluer les possibilités d'utilisation en grand de l'énergie éolienne. Elles permettraient de savoir dans quelle mesure l'énergie éolienne permettrait d'économiser le charbon, ou, mieux, si une corrélation intéressante existait effectivement entre énergie hydraulique et énergie éolienne, d'augmenter la puissance installée en électricité en France. Il définit ainsi un programme d'action qu'il juge souhaitable car l'énergie du vent a selon lui « une chance de succès qui justifie que l'on tire la question au clair », et communique à ce sujet auprès du COEE et des industriels du secteur de l'électricité lors d'une conférence au Syndicat des

25. Je n'ai trouvé, dans les archives, que la partie de cette note qui concerne l'énergie éolienne. Mais ses échanges avec Ailleret et d'autres interlocuteurs montrent bien que Pétry souhaitait privilégier les recherches sur l'énergie éolienne par rapport à celles sur l'énergie des marées. Dans une lettre à Le Bourhis, directeur d'Alsthom, après avoir exprimé qu'il trouve « amusant de voir que plus les usines marémotrices sont grandes, moins elles sont chères, du moins quant au prix unitaire des kWh », il lui confie ainsi : « Croyez m'en, Monsieur le Président, mieux vaut bâtir des moulins à vent ! ».
AN 1991 0305/6, 1929-1945, Lettre de Pétry à Le Bourhis, 28/06/1943 ; AN 1991 0305/3, p.d., Lettre d'Ailleret à Pétry, 27/04/1942 ; Lettre de Pétry à Ailleret, 09/09/1943.

26. AN 1991 0305/1, 1941-1957, Ailleret, « L'énergie du vent — Position actuelle du problème — Recherches à faire », Rapport présenté aux journées d'information syndicale du Syndicat professionnel des producteurs et distributeurs d'énergie électrique, p. 9.

producteurs et distributeurs d'énergie électrique en septembre 1943 [27]. Il divise le problème en quatre axes : questions aérodynamiques (forme des ailes, pylône) et électrotechniques (transformation optimale : génératrices synchrones/asynchrones, présence de moyens de régulation/stockage comme des accumulateurs électriques ou à vapeur), « coordination économique avec les autres sources d'énergie », et étude du régime du vent, c'est-à-dire de ses caractéristiques énergétiques en fonction du temps, dans tout la France, afin de déterminer les sites les plus intéressants à équiper.

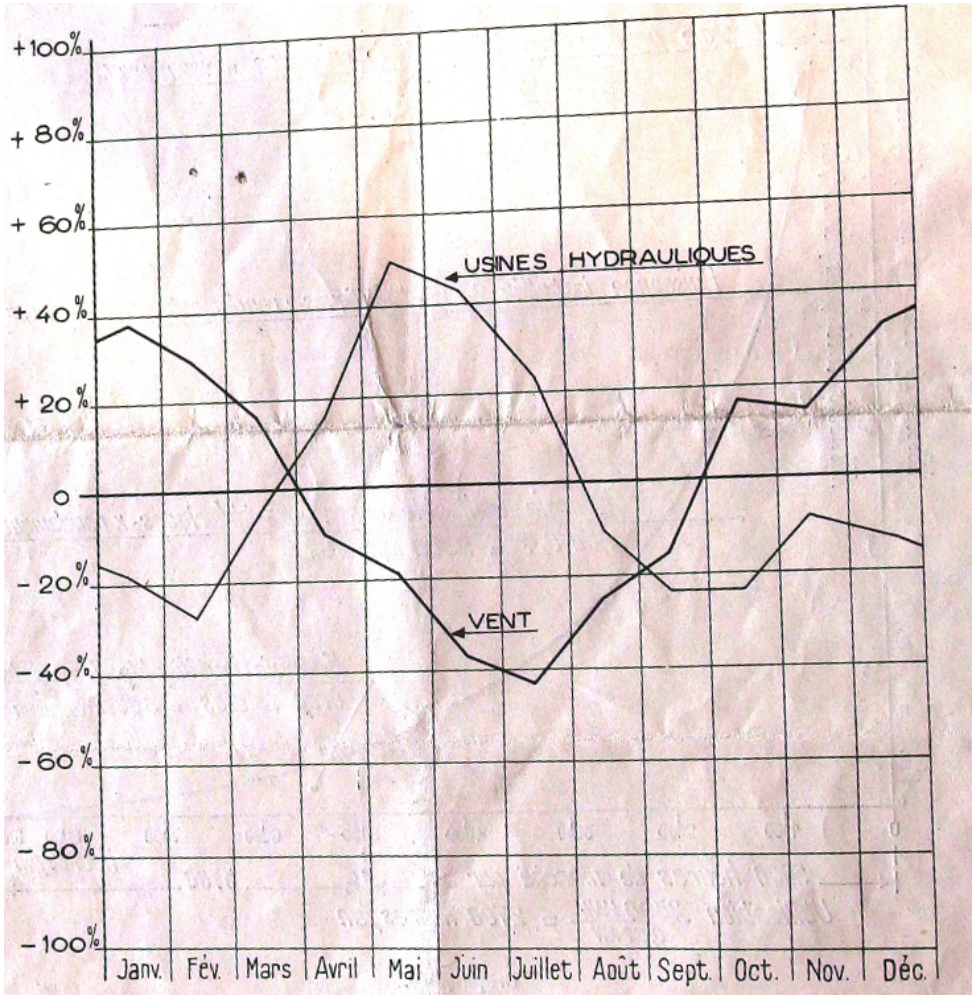



FIGURE 8.2 – « Comparaison de la répartition saisonnière du vent et de l'ensemble des usines hydrauliques françaises sans jeu des réservoirs » [29]

Ailleret estime que les efforts les plus importants à faire pour l'évaluation technico-économique de la production d'électricité éolienne concernent l'aérodynamique : il faut déterminer le meilleur prix de revient de l'énergie mécanique récupérée au niveau de l'arbre en fonction de la valeur et de la régularité de la puissance des aéromoteurs [30]. Selon

27. AN 1991 0305/1, 1941-1957, Ailleret, Note sur l'énergie du vent, 28/09/1943.

29. AN 1991 0305/1, 1941-1957, Ailleret, « L'énergie du vent — Position actuelle du problème — Recherches à faire », Rapport présenté aux journées d'information syndicale du Syndicat professionnel des producteurs et distributeurs d'énergie électrique, p. 4.

30. AN 1991 0305/1, 1941-1957, Ailleret, Note sur l'énergie du vent, 28/09/1943.

l'ingénieur, les questions électrotechniques suivront la résolution de ces problèmes aérodynamiques, et les difficultés se poseront principalement au niveau des aérogénérateurs eux-mêmes plutôt qu'au niveau du réseau. En effet, Ailleret imagine déjà l'implantation de « batteries d'aéromoteurs » [31] réparties sur le territoire, qui aurait pour effet d'atténuer les irrégularités, à l'échelle de la minute, liées au vent, ces variations étant essentiellement locales. Les difficultés se posent, donc, au niveau des puissances en jeu [32] et du choix des appareils de connexion au réseau (machines synchrones, asynchrones ?). Ailleret pense que la puissance installée optimale d'une unité serait le millier de kilowatts, contrairement à Pétry pour qui la centaine de kilowatts serait la limite technico-économique. Mais tous deux estiment que, grâce au réseau, la régularité de l'énergie produite n'est pas la contrainte la plus importante.

Selon Ailleret, des études doivent en outre être menées en parallèle pour évaluer si, d'un point de vue global, le vent peut s'accorder de façon satisfaisante avec les autres sources d'énergie, notamment l'hydraulique : le vent est-il présent pendant les périodes de sécheresse, où l'énergie hydraulique fait défaut ? Est-il régulier d'une année à l'autre ? Afin d'établir une corrélation entre énergie hydraulique et énergie éolienne, Ailleret souhaite ainsi que soient effectués, sur un grand nombre de sites, des relevés de la puissance éolienne utilisable, comparables aux relevés de la puissance hydraulique en France alors effectués mois par mois depuis plusieurs années (le « modèle hydraulique » [33]). Pour ce faire, de nouvelles méthodes de mesures sont nécessaires : il existe des séries de relevés météorologiques des vitesses du vent dans certaines stations, mais ceux-ci ne sont pas adaptés à une évaluation de la puissance éolienne en lien avec le modèle hydraulique. En effet, il existe deux types de séries de mesures annuelles dans les stations météorologiques, que réalisent les anémomètres utilisés pour la météorologie et l'aviation : des relevés de la vitesse instantanée du vent en continu, ou des relevés de la vitesse instantanée du vent à plusieurs heures de la journée. Or pour obtenir l'énergie au $m^2$, il faut intégrer le cube de la vitesse instantanée du vent [34], ce qui est beaucoup trop fastidieux avec le premier type de relevé, et trop grossier avec le second. En outre, les anémomètres installés dans les différentes stations sont placés, selon Ailleret, plus près du sol que ne le seraient les

31. AN 1991 0305/1, 1941-1957, Ailleret, « L'énergie du vent — Position actuelle du problème — Recherches à faire », Rapport présenté aux journées d'information syndicale du Syndicat professionnel des producteurs et distributeurs d'énergie électrique, p. 9.

32. Notamment, en fonction de la taille des installations : plus la taille de l'éolienne est grande, plus la puissance en jeu est grande, mais plus les efforts à supporter par la structure sont grands ce qui pose des problèmes de résistance et de coût. En outre, la vitesse de rotation de l'arbre décroît en fonction de la taille de l'hélice, et une hélice de grand diamètre suppose une vitesse plus lente à l'arbre, donc le besoin de « générateurs lourds ou de[] multiplicateurs onéreux ».
AN 1991 0305/1, 1941-1957, Ailleret, Note sur l'énergie du vent, 28/09/1943.

33. « le « modèle hydraulique » reconstitue ce qu'aurait été la production de l'ensemble de toutes les usines génératrices hydrauliques françaises actuellement existantes si elles avaient fonctionné avec les débits des rivières tels qu'ils ont été relevés, mois par mois, depuis 1921. (Ailleret, 1946, p. 3) »

34. Ailleret estime la puissance disponible au $m^2$ par la formule suivante : $P = 0{,}37(v/10)^3$ [kW :$m^2$]. Pour obtenir l'énergie au $m^2$, il faut donc intégrer ce terme par rapport au temps (Ailleret, 1946, p. 3).

aérogénérateurs, qui seraient installés plus haut, où le vent souffle plus fort et plus régulièrement. Enfin, les sites où la vitesse du vent est actuellement mesurée ne correspondent pas forcément aux endroits où le vent est exploitable dans les meilleures conditions. Ailleret propose donc de concevoir un appareil enregistrant directement la puissance du vent, et d'en équiper différents sites présumés intéressants sur des pylônes plus hauts que ceux des anémomètres classiques. Ces mesures permettraient également de déterminer les lieux les plus intéressants du point de vue de la puissance récupérée, c'est-à-dire ceux où les vents moyens, au plus près du sol, sont les plus importants et les plus réguliers.

En octobre 1943, Pétry parvient à convaincre, par le biais de Gibrat, le ministre de la Production industrielle d'établir un Comité technique de l'énergie des vents (CTEV) [35] . Celui-ci est inspiré de la création, à l'étranger, de tels organismes centraux, de la prise en main par des institutions publiques de la question et, plus généralement, d'importantes recherches à l'international sur le sujet [36]. Aux USA et au Royaume-Uni, des campagnes de jaugeage éolien ont ainsi été entreprises ; dans le Vermont, la réalisation du plus puissant aérogénérateur jamais construit (1000 kW) à Grand Pas' Knob est en cours [37]. Le CTEV est donc créé, comme le CTEM, le 10 octobre 1943 au sein du ministère de la Production industrielle. Son rôle est de « fournir des avis sur toutes les questions concernant l'énergie des vents qui lui sont soumises par le secrétaire d'État chargé de l'électricité » [38]. En réalité, la constitution du Comité n'a lieu qu'en janvier 1945 [39], et son règlement intérieur n'est établi qu'en décembre 1945 [40] ; sa première réunion a lieu en mars 1946. Le CTEV est constitué, comme le CTEM, d'ingénieurs des grands corps de l'État, hauts fonctionnaires ou industriels, dont une grande partie d'ingénieurs des Ponts et chaussées (dans ou hors de l'Administration), pour certains aussi membres du CTEM, tels que Besson, Lamothe ou Nizery, mais aussi d'ingénieurs de l'Aéronautique [41], de professeurs de l'Université et d'industriels. On y trouve des spécialistes de l'électrotechnique, de l'aéronautique, de la météorologie, de l'hydrotechnique (voir en Annexe H, la composition du Comité.). Son président est Crescent, qui représente par ailleurs le ministère de la Production industrielle

35. Dans une lettre à Gibrat, Pétry, invoquant l'exemple du Danemark, lui demande ainsi d'insister auprès de Rossignol de Fargues (Service central des Forces hydrauliques) – ou de Bichelonne (ministre délégué à la Production industrielle et aux Télécommunications)– de « décider une première série d'expériences ».
AN 1977 0614/3, 1941, Lettre de Pétry à Gibrat, 10/06/1943.

36. Pétry dit ainsi vouloir convaincre Gibrat de « faire comme M Gunnar Larsen », le ministre des Communications danois qui a impulsé la mise en place d'installations d'aérogénérateurs. De tels instituts sont créés en Russie et en Allemagne : en Russie, un « Institut central de l'énergie du vent », et en en Allemagne un « Office d'Empire pour l'énergie aérienne ».
AN 1991 0305/1, 1941-1957, Ailleret, Note sur l'énergie du vent, 28/09/1943.
AN 1991 0305/3, p.d., Lettre Pétry à Vaubourdolle, 31/03/1943 ; Lettre de Pétry à Gibrat, 10/06/1943.

37. À ce sujet, voir Righter, (1996, p. 126-145).

38. AN F14 20 902, p.d., Extrait du Journal officiel du 16/11/1943, p. 2940.

39. AN F14 20 902, p.d., Arrêté constituant le Comité technique de l'énergie des vents, 27/01/1945.

40. AN F14 20 902, p.d., Règlement intérieur du CTEV, approuvé par le directeur de l'Electricité.

41. Albert Caquot, Gérardin, Roussel.

à la SEUM, Étienne Génissieu en est vice-président [42], Pétry secrétaire général, et son collègue au service des Phares et balises, Roger Ginocchio, secrétaire (voir Annexe H, tableau Figure H.1). Par la suite, la composition du Comité sera assez stable (voir Annexe H)

Malgré la constitution tardive du CTEV, Pétry, devenu ingénieur en chef du service des Phares et balises, et qui se dit déjà secrétaire du Comité, et Ailleret, au nom du COEE, entreprennent la mise en œuvre du programme établi par ce dernier.

Ce programme par Ailleret suggère que les aérogénérateurs soient le fruit de nouvelles conceptions, d'abord aérodynamiques. C'est pourquoi les échanges entre Pétry, Ailleret et les constructeurs d'aéromoteurs pendant la guerre se limitent à quelques renseignements demandés par Pétry aux alentours de 1943. En plus d'être bloquées dans leur activité par la guerre, ces entreprises ne répondent probablement pas aux attentes des deux ingénieurs des Ponts et chaussées : étude amont du meilleur compromis technico-économique d'un point de vue aérodynamique, puis adaptation à l'injection d'électricité sur le réseau, et non dans des accumulateurs individuels. En revanche, pendant la guerre, Pétry échange avec au moins deux constructeurs d'hélices d'avion. Entre 1943 et 1945, il correspond ainsi avec un ingénieur en aéronautique travaillant pour le constructeur d'hélices Ratier, Louis Arsandaux, inventeur d'un nouveau modèle d'aéromoteur [43]. Celui-ci, muni d'une hélice à pas variable [44], est spécialement conçu pour obtenir un travail optimal avec des variations de vitesse importantes telles que celle du désert saharien. Les premières applications envisagées de ces aéromoteurs sont en effet de deux types : d'une part, le balisage des terrains de secours de l'aéronautique, probablement dans un but militaire, et d'autre part l'aménagement des point d'eau du chemin de fer Méditerranée-Niger, dont une compagnie reprend alors le projet et qui subventionne par ailleurs des travaux sur l'énergie solaire (voir section 8.2.2) [45]. Mais selon Arsandaux, ces machines sont aussi très bien disposées pour la production d'électricité. Un prototype d'aéromoteur bipale de 4 m de diamètre est déjà en fonctionnement aux ateliers de Ratier, à Gramat (voire Figure 8.3), et Arsandaux ambitionne la construction d'un modèle de 10 m de diamètre, adapté au raccordement au réseau électrique. Pétry, intéressé par la possibilité de produire de l'électricité, parvient à convaincre Ailleret de faire commander par le COEE un modèle de cet aéromoteur de 4 m de diamètre pour la production d'électricité. Cette commande est effectuée en décembre

42. Selon Bouneau, (1994b, p. 777), Génissieu « représente parfaitement durant les années trente et durant la guerre, les ingénieurs organisateurs du ministère des Travaux publics, puis de la Production industrielle, qui prennent en charge la définition d'une politique énergétique nationale et exaltent en particulier les bénéfices d'une interconnexion étendue. »

43. AN 1977 0614/3, 1941, Correspondance entre Pétry et Ardandaux, 1943-1945.

44. Deux brevets protègent les dispositions spéciales de l'invention, et ceux-ci concernent tous deux la transmission mécanique de la roue à l'arbre moteur : en particulier, le pas variable permet de maintenir la vitesse de rotation de l'hélice à une certaine vitesse, quelle que soit la vitesse du vent.

45. AN 1991 0305/3, p.d., Lettre d'Arsandaux à Leroux, directeur général technique au sous-secrétariat à l'Aéronautique, 11/02/1943.

1943 [46], et la construction achevée en octobre 1945 pour le compte de l'Union d'électricité, dans sa centrale d'Arrighi à Vitry-sur-Seine [47]. Un peu plus d'un an après l'arrêt du conflit, la machine est cependant endommagée, et semble n'avoir jamais été réparée ; selon Pétry, Ratier lui-même se désintéresse alors de la question [48].
Pétry échange également avec le constructeur d'avions Louis Bréguet, qui se dit prêt, en 1943, à construire des aérogénérateurs d'un diamètre allant jusqu'à 50 m [49]. Pétry a échangé à ce sujet avec René Dorand, ingénieur de l'entreprise, mais je n'ai pas davantage trouvé de traces d'études ou de réalisations de la part de cette société.
Pour la partie électrique, Pétry reste en contact avec Rateau et Alsthom.

Ailleret de son côté travaille à la mise au point d'appareils enregistrant directement l'énergie du vent par mètre carré, afin de pouvoir entamer une campagne de mesures de l'énergie éolienne disponible sur le territoire français. Il cherche à concevoir un appareil qui intègre directement le cube de la vitesse du vent, grâce à un dispositif électrique, pour mesurer l'énergie éolienne par unité de surface à plusieurs moments de la journée. Il soumet ce problème à la Compagnie pour la fabrication des compteurs et matériel d'usines à gaz (Compagnie des compteurs), qui met au point un appareil répondant à ces critères. Il s'agit d'un moulinet d'1 m de haut, 20 cm de large et pesant 30 kg (Ailleret, 1946, p. 4-6), à disposer sur un pylône aussi haut que possible, et relié à un compteur électrique spécifiquement réglé pour enregistrer directement la puissance du vent (voir Figure 8.4). En janvier 1945, le COEE amorce ainsi une campagne de mesure de l'énergie éolienne, et décide l'installation en métropole de cent cinquante de ces « Ailleret », comme ils seront alors couramment nommés. La campagne de mesure implique des relevés hebdomadaires par les personnels de ces stations, le COEE est chargé de centraliser les résultats. Ces mesures doivent permettre, en l'espace de seulement deux ou trois ans, d'identifier les sites qui « paraissent se prêter le mieux à un équipement éolien », avant de passer à des mesures plus précises (Ailleret, 1946, p. 5). Le ministère des Colonies décide d'étendre les mesures à tout l'Outre-mer, « en vue de rechercher les énergies captables dans les sites les plus ventés et les plus pauvres en énergies d'autres sortes ». Il commande à cet effet cinquante appareils [52]. Les mesures ne commencent cependant qu'à l'issue de la guerre, les cent cinquante Ailleret n'étant livrés qu'en juin 1946.

46. 500 kg d'acier sont ainsi commandés à destination de Ratier pour la construction de cet aéromoteur. AN 1991 0305/1, 1941-1957, Lettre de Petry à Freyssinet, 05/1943.
47. AN 1991 0305/1, 1941-1957, Lettre du Comité d'organisation de l'énergie électrique à Petry, 12/01/1944.
AN 1991 0305/3, p.d., Lettre de Ratier à Pétry, 07/12/1945.
48. AN 1991 0305/3, p.d., Notes de Pétry, 27/01/1947
49. AN 1991 0305/2, 1941-1957, Lettre de Pétry à Ailleret, 20/10/1943.
51. AN 1991 0305/3, p.d., Photographie transmise par Arsandaux à Leroux, directeur général technique au sous-secrétariat à l'Aéronautique, 11/02/1943.
52. AN 1991 0305/2, 1941-1957, Lettre de Pétry à Portier, directeur du Service des télécommunications du ministère de l'Air, 23/01/1945.



FIGURE 8.3 – Prototype d'aéromoteur Arsandaux construit par Ratier (Gramat, décembre 1942) [51]

Comme ce fut le cas, pour ce qui concerne les marées, avec la Commiission de la houille bleue puis le CTEM, la création du CTEV stimule des propositions d'inventeurs qui souhaitent voir leurs conceptions mises en œuvre grâce aux moyens techniques et financiers du ministère de la Production industrielle. Ainsi, entre 1943 et 1950, ce dernier reçoit au moins dix-huit propositions de ce type [53]. C'est le cas de Bernard-Jean Dubos, qui avait inventé, dans l'entre-deux-guerres, un procédé consistant à créer, grâce à la chaleur solaire, des tourbillons artificiels exploités dans des « usines atmosphériques » pour produire de l'électricité (cf section 2). Il s'adresse au Comité pour lui présenter les différents articles qu'il a publiés sur le sujet, « au cas où le Comité technique de l'énergie des vents [...] ne craindrait pas d'étudier l'érection d'une première usine atmosphérique susceptible de contrôler plusieurs millions de mètres cubes d'air » [54]. Mais les seuls inventeurs à retenir l'attention de Pétry et Ailleret pendant la guerre sont, à ma connaissance, les deux ingé-

53. AN 1977 0614/6, p.d.
54. AN 1977 0614/6, p.d., Lettre de Dubos au directeur de l'Électricité, 26 décembre 1943.

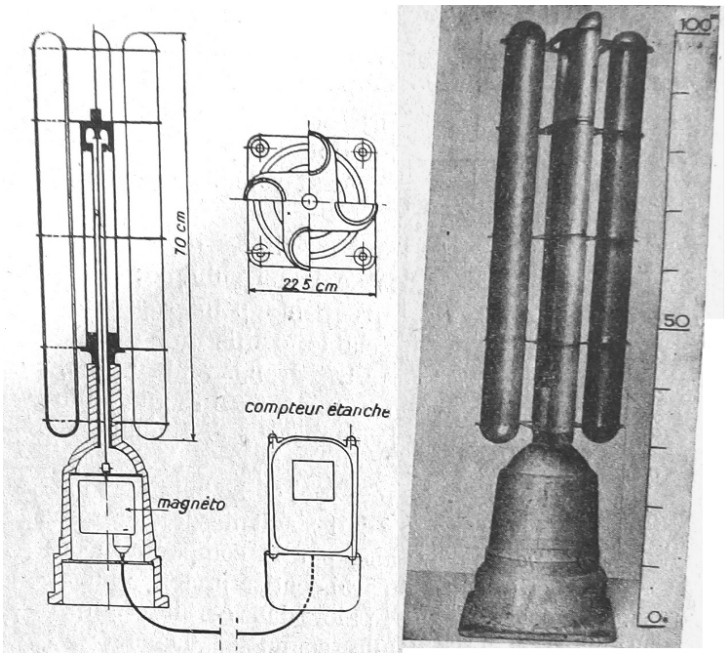



FIGURE 8.4 – Appareil compteur de l'énergie éolienne « Ailleret » : schéma et photo (AILLERET, 1946)

nieurs en aéronautique Arsandaux et Dorand, répondant ainsi à leur ambition de prendre le problème des aérogénérateurs en premier lieu par les aspects aérodynamiques.

Malgré les efforts fournis par Pétry et Ailleret pour encourager la mise au point de nouveaux aérogénérateurs, en collaboration avec l'industrie aéronautique et électrotechnique, aucun aérogénérateur français n'est au point à l'issue de la guerre, et aucun aérogénérateur, même étranger, ne débite de courant sur le réseau français. Cependant, la campagne de mesures de l'énergie éolienne est préparée, et la veille technologique et les diverses études des deux ingénieurs mises à profit par le CTEV, mais aussi par la Division énergie du vent créée au sein du service des Études et recherches d'EDF, dirigé justement par Ailleret. Après la guerre, la campagne de mesures de l'énergie éolienne est ainsi poursuivie conjointement par le CTEV et par la Division énergie du vent. De nouveaux travaux de mise au point d'aérogénérateurs sont en outre amorcés (voir section 9.1.3).

En période de pénurie, le vent devient ainsi, comme les marées, une source potentielle d'énergie électrique, complémentaire de la houille blanche et de la houille noire, aux yeux des ingénieurs hauts fonctionnaires de l'État associés au ministère de la Production industrielle. Cette nouvelle vision de l'énergie éolienne est rendue possible par l'achèvement de l'interconnexion nationale, qui étend l'idée de complémentarité entre énergies naturelles, jusqu'alors spatiale, à une dimension temporelle. Grâce à celle-ci, les irrégularités du vent pourraient ainsi être atténuées, et le vent contribuer à l'approvisionnement énergétique national. De la même manière que la Commiission de la houille bleue avait identifié les sites les plus intéressants pour l'établissement de station marémotrices, la campagne de

mesures de l'énergie éolienne témoigne en outre d'une volonté de cartographier les ressources en énergie éolienne sur tout le territoire métropolitain, puis dans l'Empire français. D'un point de vue de l'organisation de la recherche, deux ingénieurs liés, pour l'un, au ministère de l'Industrie et à l'industrie de l'électricité, et pour l'autre, au service des Phares et balises, ont été les véritables moteurs de ces recherches. Les industriels du secteur de l'énergie tels que Rateau et Alsthom ne se sont ainsi intégrés à ces recherches que par la sollicitation de Pétry et Ailleret. Les industriels de l'aéronautique Ratier et Bréguet semblent quant à eux avoir étudié de nouveaux modèles d'aéromoteurs sans y avoir été auparavant encouragés par Pétry ou Ailleret, montrant que ces entreprises pensaient pouvoir appliquer leurs connaissances en conception d'hélices d'avion pour l'utilisation de l'énergie éolienne dont il pressentaient l'intérêt potentiel. Enfin, les inventeurs non associés à des entreprises, qui ont également proposé de nouveaux modèles d'aéromoteurs, n'ont pas été soutenus pour la mise au point de leurs modèles.

### 8.1.3 Synthèse section 8.1

Pendant la guerre, la pénurie d'énergie et la volonté du gouvernement de développer le réseau électrique mènent le COEE à s'emparer du sujet des usines marémotrices et des aérogénérateurs. Les ingénieurs du COEE considèrent ces deux convertisseurs comme susceptibles d'une application rapide à l'alimentation du réseau électrique. Ils mettent en place une organisation de la recherche nationale avec les industriels du secteur de l'électricité, répondant aux orientations dirigistes, centralisatrices, productivistes du gouvernement de Vichy. Ils mettent à l'écart les inventeurs, jugés avec un mépris explicite par les responsables du ministère de la Production industrielle, et peu considérés par Ailleret et Pétry pour le vent. Ces derniers voient dans l'aérodynamique une condition nécessaire de modernisation de l'utilisation du vent, et laissent rapidement de côté les constructeurs français d'aéromoteurs.

Par rapport à l'entre-deux-guerres, une évolution frappante est la prise en considération du vent par un comité technique du ministère chargé de la politique énergétique et la mise en place d'une organisation nationale pour son utilisation. L'implication du COEE s'inspire d'initiatives similaires à l'étranger (Allemagne, Danemark, Russie, Angleterre, États-Unis). Cette source d'énergie est à son tour cartographiée, comme l'a été la houille bleue pendant l'entre-guerres. Une nouvelle complémentarité apparaît entre les énergies naturelles par le réseau électrique métropolitain : le vent s'ajoute aux marées et à la houille blanche. Mais le réseau électrique s'étant allongé, la complémentarité est davantage temporelle que spatiale, ou plus précisément, davantage saisonnière que géographique. Pour les marées, le caractère monopolistique du SEUM implique l'impossibilité de projets concurrents, et signe une extrême centralisation des institutions et des moyens mis en

œuvre pour cette énergie naturelle. L'action du SEUM accompagne la centralisation du système électrique opérée par le COEE, et l'« autorité des kilowatts » est entre les mains d'un petit nombre d'acteurs. Au contraire, la Commiission de la houille bleue étudiait tous les projets qui lui étaient envoyés. Enfin, dernière mutation avec l'entre-deux-guerres, les vagues ne font pas partie des sources d'énergie hydraulique étudiés par le CTEM. On peut cependant souligner que dans les faits, la Commiission de la houille bleue écartait systématiquement tous les projets marémoteurs qui lui étaient envoyés. Toujours est-il qu'aucun nouveau groupement ne se crée pour exploiter les vagues, mises de côté pour leurs mauvaises qualités thermo-industrielles.

Enfin, des différences apparaissent entre l'organisation de l'exploitation des marées et celle du vent. De son côté, le CTEM dispose des recherches effectuées depuis l'entre-deux-guerres sur les usines marémotrices. Les grandes entreprises du secteur électrique sont familières du sujet, que ce soit pour avoir mené des projets ou par leurs connaissances de la houille blanche. Pour les aérogénérateurs, Ailleret et Pétry cherchent à joindre bout à bout des connaissances sur l'électrotechnique et l'aérodynamique pour mettre au point de grands aérogénérateurs. Les études faites dans l'entre-deux-guerres par Constantin dans ce sens n'ont pas abouti, et les deux ingénieurs ne parviennent à s'adjoindre l'expertise de Darrieus qu'à l'issue de la guerre. Autre différence notable et qui est liée à cette inertie du système électrique et des travaux déjà faits sur les marées : d'emblée, c'est une entreprise monopolistique associant État et grands industriels qui est créée pour les marées. Pour le vent, deux ingénieurs sollicitent des industriels, mais ceux-ci sont a priori peu intéressés par la question.

En tout cas, ces travaux trouvent une continuité à l'issue de la guerre avec la création d'EDF, qui absorbe la SEUM ainsi que de nombreuses entreprises du secteur électrique. Dès sa création, l'entreprise publique dispose d'une direction des Études et recherche, à la tête de laquelle est placé Ailleret, et qui possède une Division énergie du vent.

## 8.2 Colonies : maintien de l'Empire et politique industrielle

En 1941, le gouvernement du Vichy décide de soutenir la mise au point et l'utilisation de convertisseurs maréthermiques et solaires dans les parties ensoleillées de l'empire français. L'énergie thermique des mers et l'énergie solaire sont en effet perçues par le secrétariat d'État aux colonies comme des outils idoines pour répondre à la nouvelle politique industrielle coloniale. Contrairement aux marées et au vent en métropole, ces recherches servent donc une politique industrielle, et non énergétique : les nouveaux convertisseurs doivent

fournir électricité, froid, eau douce, non pour un besoin exprimé en énergie mais pour créer les conditions nécessaire à la naissance d'industries d'extraction, de transformation et de transport de matières premières, au bien-être d'usagers blancs.

Dans cette section, la création de l'Organisme d'études de l'énergie thermique des mers et ses premiers travaux est d'abord relatée, puis les différents projets d'exploitation de l'énergie solaire soutenus par le secrétariat d'État aux colonies.

### 8.2.1 Énergie thermique des mers : secrétariat d'État aux Colonies et grandes entreprises

En septembre 1940, Georges Claude soumet au maréchal Pétain un nouveau projet d'exploitation de l'énergie thermique des mers. Son ambition est d'équiper le port d'Abidjan d'une usine d'au moins 50 000 kW, pour produire de la force motrice, de la « puissance évaporatoire ou chimique » et le froid « qui rendra la vie humaine non seulement possible, mais agréable dans ces belles régions ». Le port d'Abidjan, qui présente une forte dépression de terrain appelée « Trou sans fond », présente en effet des dispositions géologiques favorables à l'installation d'une station maréthermique. Une telle centrale, affirme Claude qui n'a pas perdu de son lyrisme quant aux conséquences heureuses de la mise en œuvre de son invention, assurerait à la région d'Abidjan un développement sans précédent, et « ouvrira peut-être un nouveau chapitre dans l'histoire de la civilisation. » Naîtraient en effet une « cité commerciale, tête de ligne ferrée importante dotée d'un port merveilleux [...], une cité industrielle, avec la force motrice et la puissance évaporatrice illimitées, avec toutes les productions d'un pays fertile », mais aussi « une cité de reconstitution et de repos s'étalant contre la lagune et la mer dans la belle végétation du cordon littoral » [55]. Pas plus que dans l'entre-deux-guerres, l'ambition de Claude n'est celle du développement des populations indigènes, mais celle du bien-être des colons et d'un développement industriel favorable à la nation française.

Suite à cette proposition, Claude est chargé de présenter son projet au secrétariat d'État aux colonies, qui décide, d'après un rapport favorable de l'inspecteur général des Ponts et chaussées Génissieu, de réunir le comité des Travaux publics le 9 septembre 1941. À cette réunion, présidée par Emmanuel Rousseau, conseiller d'État, sont présents non seulement des membres du comité des Travaux publics, mais également des représentants du ministère de la Production industrielle, de la Marine, de la Guerre et de l'Économie. On retrouve des ingénieurs des grands corps de l'État, experts des autres comités techniques pour l'utilisation des énergies naturelles, tels que Gibrat, de Rouville,

55. ANOM 91COL1084, p.d., Rapport de Génissieu sur les « Propositions de M Georges Claude concernant l'installation près d'Abidjan d'une station d'énergie thermique de la mer », 1941.

Caquot, Coyne, Crescent, Willemin, Courtier [56]. Claude est également présent. Rousseau, Génissieu, mais aussi Charles Jacob, directeur du CNRS, et Christian Beau, inspecteur général des Travaux publics des Colonies, y sont de fervents partisans du projet de Claude. Des questions de deux ordres sont abordées : d'un point de vue technique, le projet de Claude est-il viable, théoriquement, et en application au cas d'Abidjan ? D'un point de vue économique, est-il possible de trouver des débouchés aux énormes quantités d'énergie produite ? Pour la question technique, aucune objection sérieuse n'est émise : les expériences de Claude sont globalement considérées comme prouvant la faisabilité technique du procédé. Les membres du Comité estiment que le seul problème non résolu, et sur lequel Claude a buté à plusieurs reprises, est celui de la canalisation d'eau froide. Claude propose la creuser dans les roches du littoral, plutôt que de construire un tube flottant. La solution du tube flottant est cependant encore défendue comme une possibilité par l'inspecteur général des Ponts et chaussées Édouard Joyant. En tout cas, cette question n'est pas retenue comme insoluble.

En revanche, le problème des débouchés de l'énergie récupérée, qui a été soulevé en particulier par le gouverneur général d'AOF, est plus longuement abordé. Pour le gouverneur, le projet de Claude est ainsi « nettement prématuré » en raison, d'une part, de l'absence d'industries sur place, et de matières premières à transformer, et d'autre part, du petit nombre d'habitants blancs présents à Abidjan [57]. En accord avec les visions de Claude, une ambition exprimée par le secrétariat d'État aux colonies n'est effectivement pas celle de l'aide au développement des populations indigènes, mais celle de construire des « installations permettant d'améliorer les conditions de vie des Européens » [58], ainsi que la transformation de matières premières, en particulier minérales.

Les perspectives nouvelles de la politique coloniale sont également exprimées par les protagonistes du projet. Pour Rousseau, cette politique aurait jusqu'alors été trop guidée par un « contrat colonial » selon lequel « les colonies fournissent les matières premières ; les industries de transformation sont le privilège de la métropole » [59]. Il faudrait selon lui au contraire mener une politique d'industrialisation des colonies. Ceci implique de ne pas se poser la question des débouchés de l'énergie produite, mais des conditions de développement d'une future industrie. De ce point de vue, la création d'une station maréthermique pourrait constituer, comme l'imagine Claude, la première pierre de tout un

56. ANOM 91COL1084, p.d., Procès verbal de la séance du Comité des travaux publics des Colonies consacré au projet de station maréthermique à Abidjan, 09/09/1941.

57. citeANOMc, Rapport de Génissieu sur les « Propositions de M Georges Claude concernant l'installation près d'Abidjan d'une station d'énergie thermique de la mer », 1941.

58. Selon Lochard, inspecteur général des Mines, « la climatisation est le couronnement de la civilisation » !
ANOM 91COL1084, p.d., Rapport de Génissieu sur les « Propositions de M Georges Claude concernant l'installation près d'Abidjan d'une station d'énergie thermique de la mer », 1941.

59. ANOM 91COL1084, p.d., Procès verbal de la séance du Comité des travaux publics des Colonies consacré au projet de station maréthermique à Abidjan, 09/09/1941.

complexe industriel profitant non seulement à la région d'Abidjan mais à toute l'économie française. Elle stimulerait la prospection géologique et la production agricole. L'espoir est, en particulier, de trouver des gisements de bauxite pour la production d'aluminium. Aussi, pour André Nizery, qui dirigera les recherches sur l'énergie thermique des mers françaises de 1942 à sa mort (1954), « le développement des industries de transformation rendra inéluctable à bref délai, l'établissement et la poursuite d'une politique coloniale de l'énergie (Nizery, 1946, p. 35). »

En outre, le projet est considéré comme concernant non seulement l'économie coloniale, donc, relevant du domaine de l'AOF, mais, selon Beau, fervent défenseur du projet, elle « dépasse l'intérêt colonial, elle est d'ordre national et presque mondial » [60]. Un argument, qui sera ensuite utilisé avec force pour la poursuite des travaux de l'Organisme d'études créé à l'issue de la réunion du comité des Travaux publics, est ainsi le prestige apporté à la France par la construction de la première station maréthermique au monde — technique qui plus est, comme n'auront de cesse de rappeler les protagonistes du projet, d'une invention française. C'est ce qu'exprime Henri Bléhaut, secrétaire d'État à la marine et aux colonies, dans son plaidoyer en 1944 :

> « il y a le plus grand intérêt à ce que la France affirme, la première, que la certitude scientifique et technique ainsi acquise par le génie français est telle qu'elle prend la décision de construire la première usine d'énergie thermique des mers. [...] La France n'a pas tellement de sujets de prestige à l'heure actuelle qu'elle puisse se permettre de négliger délibérément dans les circonstances présentes, de tirer le parti maximum d'une conquête scientifique d'intérêt mondial et d'une portée économique incalculable. » [61].

C'est la raison pour laquelle Beau, mais aussi Jacob souhaitent que le projet soit réalisé « sous les auspices de la Recherche scientifique ». L'intérêt national est en effet multiple, et concerne tant l'économie (création de richesses et de brevets commercialisables à l'étranger) que le prestige apporté par la mise au point d'un nouveau convertisseur énergétique de grande puissance, applicable sur de nombreux sites dans le monde, dans la concurrence technologique internationale.

Enfin, un autre intérêt, qui sera exprimé par la suite à propos de ce projet, est la légitimé qu'il apporterait au maintien de l'empire français, montrant l'angoisse, de la part du gouvernement de Vichy, de perdre ces territoires. En 1944, Bléhaut, affirme ainsi que « le fait de prendre une décision qui paraît impliquer la récupération de nos colonies

60. ANOM 91COL1084, p.d., Procès verbal de la séance du Comité des travaux publics des Colonies consacré au projet de station maréthermique à Abidjan, 09/09/1941.

61. ANOM 2 APOM 10/18, 1943-1944, Lettre de Bléhaut, secrétaire d'État à la marine et aux colonies, au secrétaire d'État à l'économie nationale et aux finances, 04/07/1944.

constitue en même temps un acte de foi dont la portée n'est nullement négligeable » [62].

À l'issue de la réunion de septembre 1941, le comité des Travaux publics conclut ainsi à l'intérêt d'entreprendre, par un organisme d'études spécial qui serait placé sous les auspices du secrétariat d'État aux colonies et du CNRS, et « avec le concours des services de l'Équipement national, de la Marine (Service hydrographique) et de la Production industrielle » des recherches visant à l'élaboration d'une usine maréthermique à Abidjan. Ces recherches seront de trois ordres : études de terrain (géologie sous-marine, hydrographie), études technologiques (mise au point des différents éléments d'une usine), études économiques (utilisation de l'énergie et de l'eau froide extraite). L' « Organisme d'études d'une station d'énergie thermique des mers en Côte d'Ivoire » est créé par la loi du 12 décembre 1941. Sa durée de vie est fixée à dix-huit mois, aux termes duquel il doit répondre à la question de la faisabilité technico-économique de l'énergie thermique des mers à Abidjan. Il dépend financièrement du CNRS qui alloue pour son fonctionnement une subvention de six millions de francs [63], et administrativement du secrétariat d'État aux colonies. Un Comité technique est également créé, auprès duquel André Nizery est nommé délégué de l'Organisme d'études. Cet ingénieur des Ponts et chaussées, qui a travaillé huit ans au port de Dakar où il a « conduit de grands travaux, et notamment des travaux à la mer », est également le fils du directeur d'une grande entreprise d'armement. Il présente donc, selon Beau, les connaissances techniques, industrielles et coloniales opportunes pour diriger les recherches de l'organisme [64]. L'Organisme d'études est par ailleurs présidé par Jacob. Léon Nisolle, ingénieur des Arts et manufactures et spécialiste de la thermique industrielle, en est nommé ingénieur-conseil. Sont aussi membres du Comité des représentants du secrétariat d'État aux colonies, du ministère des Finances, des ingénieurs spécialistes des ouvrages d'art, de l'énergie hydraulique, de l'électrotechnique, de l'hydrographie, de la géologie [65]. On retrouve des ingénieurs de l'administration publique présents dans l'un, l'autre ou les deux comités techniques pour les énergies naturelles du ministère de la Production industrielle (marées et vent) : Nizery, bien-sûr, mais aussi Caquot, Génissieu et

62. ANOM 2 APOM 10/18, 1943-1944, Lettre de Bléhaut, secrétaire d'État à la marine et aux colonies, au secrétaire d'État à l'économie nationale et aux finances, 04/07/1944.

63. ANOM 91COL1084, p.d., Comité technique de l'Organisme d'études d'une station d'énergie thermique des mers en Côte d'Ivoire, Procès-verbal de la séance du 12/01/1942.

64. ANOM 91COL1084, p.d., Comité technique de l'Organisme d'études d'une station d'énergie thermique des mers en Côte d'Ivoire, Procès-verbal de la séance du 12/01/1942.

65. Les procès verbaux des séances du Comité entre janvier 1942 et mai 1943 permettent d'établir la liste ci-après pour cette période. Outre Beau, en tant que représentant du secrétariat d'État aux colonies, Gibrat, spécialiste de l'électrotechnique, Caquot, spécialiste de la conception d'ouvrages d'art, et Génissieu, spécialiste de l'hydraulique, on trouve dans le Comité : Léon Pelissier, ingénieur hydrographe en chef de la Marine ; Bizot, ingénieur en chef des Ponts et chaussées ; Dagnicourt, directeur-adjoint du Budget ; Armand Galliot, inspecteur général des Mines ; Maurice Gariel, ingénieur de l'École supérieur d'électricité, directeur général des ateliers de Neyret-Beylier et Piccard-Pictet ; Monteil, professeur au CNAM ; Robert Malacam, ingénieur principal des Travaux publics des Colonies.
ANOM 91COL1084, p.d., Procès-verbaux des séances du Comité technique de l'Organisme d'études d'une station d'énergie thermique des mers en Côte d'Ivoire, 01/1942-05/1943.

Gibrat.

Au bout d'un an, de multiples travaux ont déjà été exécutés, tels que la construction par Neyret-Beylier et Piccard Pictet (NBPP), spécialistes de la modélisation hydraulique [66], d'un modèle de la circulation d'eau froide au Laboratoire dauphinois d'hydraulique [67]. Ce modèle doit permettre des expérimentations en vue de répondre aux questions suivantes : y aura-t-il des échanges de chaleur entre l'eau froide du fond et l'eau chAude de surface lors du pompage ? Où pomper l'eau froide et où la rejeter pour éviter ces mélanges et, donc, une baisse sensible du rendement ? Des expériences effectuées sous la direction de l'ingénieur Pierre Danel (de NBPP) débutent ainsi dès l'été 1942 [68]. L'Organisme lance par ailleurs des appels d'offre auprès de spécialistes pour la conception de l'évaporateur (Prache et Bouillon, Condensateurs Delas, SCAM) et de la turbine (Rateau, Alsthom, la Compagnie électro-mécanique). Les services de la Marine préparent la campagne de mesures hydrographiques par les services de la Marine, et font mettre au point un outil spécial de carottage sous-marin.
En termes économiques, Nizery identifie, pour le site d'Abidjan, un ensemble de débouchés pour l'énergie produite : la production de sel par électrolyse et d'eau distillée au niveau de l'évaporateur. Le sel peut être utilisé dans l'industrie papetière et la fabrication d'alcool à partir du bois, deux industries dont le secrétariat d'État aux colonies étudie justement le développement. L'eau douce peut être vendue aux navires de Dakar qui payent actuellement cher pour en obtenir.

À l'issue des dix-huit mois initialement impartis à l'Organisme, les études ne sont pas terminées, c'est pourquoi Nizery et le secrétaire d'État aux colonies demandent la prolongation de la durée de l'Organisme d'études. Ils souhaitent également l'extension de ses missions. Le gouverneur général d'AOF est en effet sceptique sur l'utilité d'une usine maréthermique à Abidjan, mais il attire l'attention de Nizery sur un autre emplacement intéressant : le fossé de Cayar, près de Dakar [69]. L'AOF y voit plus de pertinence qu'à l'usine d'Abidjan et les services techniques de la colonie (Marine, Météorologie, Géologie) sont prêts à apporter leur collaboration. Le Comité est d'accord sur l'intérêt potentiel de cet emplacement, et prévoit une dépense de 425 000 francs pour effectuer des sondages, et

66. Créée en 1917, la société était avant tout une spécialiste des turbines hydrauliques, mais s'était rapidement diversifiée dans tout ce qui concerne les études hydrauliques, et, pour ce qui nous concerne ici, les modèles réduits. Dans les années 1930, elle était ainsi passée de « constructeur de machines » à « concepteurs d'aménagement »(Dalmasso et Robert, 2007, p. 49).

67. Gariel souligne que cette étude possède pour l'entreprise un caractère nouveau et délicat, en ce qu'elle n'avait jusqu'alors effectué que des études d'hydraulique de surface.
ANOM 91COL1084, p.d., Comité technique de l'Organisme d'études d'une station d'énergie thermique des mers en Côte d'Ivoire, 20/10/1942.

68. Cette prestation coûte 350 000 francs à l'Organisme d'études
ANOM 91COL1084, p.d., Comité technique de l'Organisme d'études d'une station d'énergie thermique des mers en Côte d'Ivoire, 20/10/1942.

69. ANOM 91COL1084, p.d., Comité technique de l'Organisme d'études d'une station d'énergie thermique des mers en Côte d'Ivoire, 20/10/1942.

de 50 000 francs pour l'étude du réchauffement des lacs. Peltier, un ingénieur des Ponts et chaussées du service des Travaux publics de Dakar, payé par l'Organisme d'études, est mis à disposition pour coordonner les études sur place. L'Organisme décide également de commencer l'étude économique de la question : 200 000 francs sont alloués pour effectuer une campagne de prospection minière. Le Comité demande donc un million de francs supplémentaires par rapport aux trois millions de francs déjà engagés [70].
Le 15 mai 1943, l'Organisme devient ainsi l' « Organisme d'études de l'énergie thermique des mers » et sa mission est étendue à « l'étude, en tout autre région que la Côte d'Ivoire et par tous les moyens, des possibilités éventuelles d'exploitation de l'énergie thermique des mers » [71] .

En 1944,le comité technique considère la faisabilité technico-économique de l'usine d'Abidjan comme prouvée (le prix du kWh est ainsi évalué au même montant que celui de la métropole). C'est pourquoi Nizery et Bléhaut plaident pour la création d'une Société d'économie mixte qui dirigerait la réalisation de la station maréthermique d'Abidjan, mais aussi l'élaboration d'autres projets. Le ministre des Finances n'accepte manifestement pas cette proposition, puisque l'existence de l'Organisme d'études est prolongée. Celui-ci poursuit ses études, en particulier sur le projet d'Abidjan. La société d'économie mixte L'énergie des mers n'est ainsi créée qu'en 1948 (voir 9.2.1).

Ainsi, à la Libération, un important travail a été effectué pour la mise au point d'une station maréthermique à Abidjan. Barbier, (2000) a bien résumé les aspects techniques du projet d'Abidjan tel qu'il était alors conçu. Pour Nizery, en 1946, tous les obstacles techniques sont levés (Nizery, 1946), parmi lesquels les éléments suivants :

— Gariel et Danel ont mis en évidence, grâce au modèle réduit du laboratoire d'hydraulique de Grenoble de NBPP, que l'aspiration d'eau froide de la profondeur à la surface ne modifierait pas la température de la couche de la prise d'eau froide.
— Le profil topographique de la région du Trou sans fond réalisé par le Service hydrographique de la Marine a confirmé l'intérêt du site d'Abidjan,
— Nisolle, appuyé par un comité restreint composé au moins de Caquot et Nizery, a conçu l'ensemble du cycle [72],
— Monteil a entrepris l'expérimentation d'un modèle réduit de l'ensemble évaporateur-condenseur-auxiliaires à l'Usine de Bercy du Service des Eaux de la ville de Paris,

70. ANOM 91COL1084, p.d., Comité technique de l'Organisme d'études d'une station d'énergie thermique des mers en Côte d'Ivoire, 20/10/1942.
71. ANOM 91COL1084, p.d., Comité technique de l'Organisme d'études d'une station d'énergie thermique des mers en Côte d'Ivoire, 18/03/1943.
72. Le problème principal étant de trouver le cycle et concevoir les auxiliaires associés qui maximisent l'énergie récupérable. Paramètres : différence de température entre source froide et source chAude et débit de chacune d'entre elles ; consommation d'énergie par les auxiliaires : extracteur de gaz dissous et pompes ; dimensionnement de l'évaporateur. Il choisit en particulier un cycle à condensation et évaporation en étages, d'un rendement meilleur qu'un cycle « à simple évaporation et à simple condensation ».

modèle construit par la SCAM. Ces études sont encore en cours à l'issue de la guerre, mais les résultats permettent selon Nizery de conclure à la faisabilité technique du groupe turboalternateur conçu par l'Organisme d'études.

— la conception générale de l'usine a été réalisée. Une seule enceinte étanche contient, sous vide, l'ensemble évaporateur-condenseur-turbine. La turbine de grande puissance fonctionne avec une détente fractionnée. L'évaporateur est alimenté par la conduite d'eau chAude et un condenseur par mélange par la conduite d'eau froide (cf, Figure 8.5, le schéma de fonctionnement pour une puissance installée de 15 000 kW),

— les problèmes techniques afférents sont aussi considérés comme résolus : conception de turbines de grand diamètre (par Rateau et la Compagnie électro-mécanique), d'une prise d'eau froide (en caoutchouc souple ou en tronçons de métaux jointés), de dispositifs d'étanchéité de l'enceinte sous vide (avec du béton armé [73].). La Compagnie électro-mécanique et Rateau ont conçu deux turbines spéciales. La prise d'eau froide, considérée comme le point le plus incertain et le plus difficile de la construction d'une usine énergie thermique des mers en tenant compte des différents échecs de Claude, deux solutions sont retenues : le tout caoutchouc pour les fonds tourmentés type Trou sans fond, ou des tronçons métalliques jointés pour les fonds à relief modéré. [74]

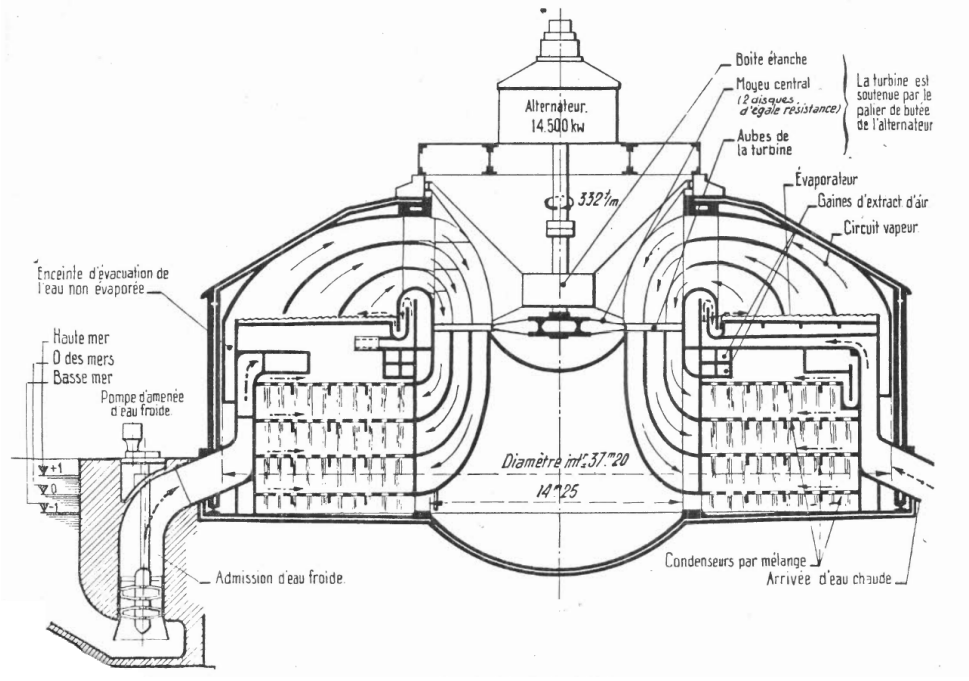



FIGURE 8.5 – Vue générale d'une centrale maréthermique conçue par l'Organisme d'études pour l'utilisation de l'énergie thermique des mers (NIZERY, 1946, p. 22)

73. Ce problème a été étudié par Laboratoire du bâtiment et des travaux publics et les Établissements Sainrap et Brice.

74. Différents matériaux ont été envisagés (toiles, matières plastiques, fibres de coco imprégnées de latex, fibre de verre...). La proposition de Claude de creuser un tunnel dans les roches littorales n'est ainsi pas retenue, en raison du coût et du délai (9 ans) d'une telle opération.

Dès le début de l'Organisme, l'optique de Nizery, comme celle du secrétaire d'État aux Colonies, est celle d'une éventuelle extension de la technologie à d'autres sites de l'empire qu'Abidjan, pour répondre à la « politique coloniale de l'énergie » voulue par le secrétariat d'État aux colonies. Mais ces acteurs expriment une autre ambition, celle de vendre cette technologie à l'étranger. Ils considèrent les deux solutions techniques, déjà envisagées par Claude, de la station terrestre ou de la station flottante. La seconde est plus universelle que la première, dans le sens où elle ne dépend pas de dispositions géologiques particulières du littoral. Claude avait d'ailleurs terminé ses expérimentations par une station flottante, pour laquelle il avait trouvé l'opportunité d'équiper un navire qu'il avait acheté à moindre prix pendant la crise financière (cf 5.3). Mais les difficultés techniques d'une telle option, liées notamment aux effets de la mer sur la plate-forme en cas de mauvais temps, dissuadent le Comité technique de se pencher sur cette disposition. En effet, le but est de passer le plus rapidement possible à la réalisation, si les études de l'Organisme prouvent la faisabilité technico-économique d'une station maré-thermique. La conception de stations flottantes pourrait alors être envisagée. En outre, l'Organisme identifie plusieurs emplacements dans le monde où des stations terrestres sont potentiellement constructibles, dans les colonies françaises (Martinique, Afrique équatoriale française) mais aussi dans les autres empires coloniaux et dans les pays d'Amérique du sud [75].

Pour répondre à l'ambition de la conquête d'un marché international, l'Organisme d'études examine une autre disposition technique que la solution flottante : l 'utilisation du rayonnement solaire pour élever la température des eaux de surface. Cette technique permet en effet d'étendre le domaine géographique de l'énergie thermique des mers « jusqu'à des latitudes méditerranéennes » (Nizery, 1946, p. 44). Beau contacte ainsi l'ancien médecin colonial Henri Barjot, qui a proposé dans l'entre-deux-guerres, entre autres applications de l'énergie solaire, l'insolation de grandes étendues d'eau par la mise en place d'un film d'huile transparent en surface (cf sous-section 4.2.2) [76]. Des expériences sont menées dans ce sens au Centre d'essais industriels du gouvernement général d'AOF à Dakar, pour le projet d'une usine dans le fossé de Cayar. Des « essais systématiques en laboratoire » sont encore en cours en 1946, dont Nizery espère de bons résultats (Nizery, 1946). Ces

75. Aux débuts de l'Organisme d'études, l'ingénieur hydrographe Léon Pelissier mentionne deux sites particuliers dans l'Empire français : le fossé de Cayar (AOF) et la rade de Saint-Pierre, dans la côte Ouest de la Martinique ; il stipule en outre que d'autres emplacements favorables existent probablement dans l'empire français, et dans le monde entier, comme dans les baies de Memba et de Fernao Veloso, en Afrique orientale portugaise (ANOM 91COL1084, p.d., Comité technique de l'Organisme d'études d'une station d'énergie thermique des mers en Côte d'Ivoire, Procès-verbal de la séance du 20/10/1942). Dans son article de synthèse en 1946, Nizery, bénéficiant très probablement d'une étude effectuée par un des membres du Comité technique de l'Organisme, élargit la liste des lieux possibles à plusieurs « riches territoires » en AEF (près de Libreville) mais aussi en Amérique (Mexique, Saint-Dominique, Honduras, Guatémala, Brésil), Afrique (Nigéria, Mozambique, Somalie italienne), Asie (Arabie, Ceylan, Formose, Sumatra, Philippines) (Nizery, 1946, p. 38).

76. ANOM 93COL17, p.d., Lettre de Beau à Jeannel, 25/06/1942.

essais sont à l'origine de travaux sur l'énergie solaire à l'Institut de physique météorologique de Dakar, où le professeur Henri Masson dirige la poursuite de ces expériences. Cependant, le procédé est finalement jugé trop coûteux et peu pratique [77], et le laboratoire dirigé par Masson abandonne ces expériences pour travailler sur les chauffe-eau et pompes solaires (voir section 9.2.3).

Ainsi, la guerre a été favorable à la prise en main par le secrétariat d'État aux colonies du Gouvernement de Vichy de recherches sur l'énergie thermique des mers, qui ont été dès le départ soutenues et financées par le CNRS, sous la direction de Jacob. Il ne s'agit pas là d'une politique énergétique de pénurie, ou qui viserait à répondre à un manque face à des besoins identifiés, mais d'une politique de développement économique visant la mise en valeur des colonies, le maintien de l'Empire, ainsi que le positionnement de l'industrie française dans la compétition technologique et économique internationale. Le but de la mise au point de stations maréthermiques sous le gouvernement de Vichy est donc bien moins l'indépendance énergétique, ou la réponse à l'expression d'un besoin en énergie, que l'industrialisation des territoires coloniaux, et la vente de brevets aux pays intéressés par cette source d'énergie. Les centrales envisagées sont toutes de grande puissance, et de multiples manières d'exploiter l'énergie sont imaginées, l'idée étant que l'énergie est le point de départ de toute production lucrative. Ainsi, s'il est envisagé que de l'électricité soit produite par ce biais, ce n'est pas en vue de l'injecter dans un réseau [78], mais pour l'utiliser sur place à la transformation de matières premières, telles que la bauxite pour la production d'aluminium. La production d'eau douce pour le fonctionnement des navires est projetée pour le cas d'Abidjan, mais elle est aussi entrevue pour l'alimentation de zones manquant d'eau douce telles que Port-Étienne ; le sel extrait par un procédé d'évaporation spécial pourrait être utilisé pour le commerce, ou pour la fabrication d'engrais. Enfin, l'utilisation de l'eau froide extraite est envisagée pour la climatisation.

Comme pour les marées et le vent autour du CTEM et du CTEV, le style d'organisation de la recherche sur l'énergie thermique des mers autour de l'Organisme d'études relève d'une gestion centralisée. Cependant, il s'agit d'une autre façon d'organiser les recherches que pour les marées et le vent : c'est l'Organisme d'études, composé presque exclusivement d'ingénieurs des grands corps de l'État, qui est le maître d'œuvre de ces recherches. Ainsi, c'est lui qui lance des appels d'offres à différentes entreprises sur certaines parties des études, et charge des services techniques de l'État de certains travaux

77. Gaston Remenieras, qui travaillait à EDF sur la question de l'énergie solaire, affirme ainsi que « ce procédé assez coûteux n'a pas été retenu car l'huile se salit et est accumulée par le vent à l'une des extrémités du bassin ».
Archives EDF, 852756, p.d., Gaston Remenieras, « Introduction à l'étude de l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'énergie électrique », 06/1957.

78. Bien que selon Nizery, les recherches sur les « courants continus à très haute tension » par la société Brown Bovery laisse espérer la possibilité de transporter à très grande distance de l'électricité, donc l'alimentation du réseau français en électricité maréthermique (Nizery, 1946, p. 37).

pour d'autres, à la différence des recherches sur les marées qui sont dirigées par le SEUM, et où les industriels du secteur de l'électricité ont une place prépondérante. Ici, les industriels sont appelés, voire mis en concurrence (cas de la Compagnie électro-mécanique, de Rateau et d'Alsthom). En outre, l'administration des territoires concernés joue un rôle mineur dans le programme pour l'énergie thermique des mers mis en place sous l'égide du secrétariat d'État aux colonies : la vocation de cette technologie est nationale (création de richesses nationales, prestige technologique et compétition économique internationaux) davantage que coloniale, dans le sens où elle n'est pas ancrée dans un territoire particulier où son besoin se serait fait ressentir. L'Organisme retient ainsi le site d'Abidjan malgré les réticences du gouvernement général d'AOF qui trouve une usine maréthermique superflue.

Cette étude de cas est outre une bonne illustration de l'effacement de la figure de l'inventeur au profit de celle de chef de projet. Si Claude participe aux séances du Comité technique, il est assez largement dépossédé de son projet. Son rôle dans l'Organisme d'études se limite au partage de son expérience, et à celui de caution rappelant l'origine française du procédé d'exploitation de l'énergie thermique des mers, qui n'est d'ailleurs plus appelé « procédé Claude-Boucherot ». Son idée initiale, celle du creusement d'un tunnel dans le littoral, est assez rapidement abandonnée. De même, celle, certes éprise d'un gigantisme technologique démesuré, celle des trois « cités », commerciale, industrielle et touristique.

Ces années de guerre ont très largement préparé les travaux de la future société d'économie mixte L'énergie des mer (voir 9.2.1).

### 8.2.2 Énergie solaire : secrétariat d'État aux Colonies et inventeurs

Parallèlement à ces recherches sur l'énergie thermique des mers, le secrétariat d'État aux colonies se penche, avec la société des Chemins de fer de la méditerranée au Niger sur l'utilisation de l'énergie solaire. Ces recherches sont initiées par les gouvernements généraux des territoires d'Afrique du Nord, qui s'en effacent cependant rapidement. Le CNRS et, dès sa création, l'ORSC, contribuent à ces recherches en tant qu'experts et, au moins pour le CNRS, comme financeurs. Marque de l'intérêt porté aux applications de l'énergie solaire par des acteurs de la recherche scientifique coloniale, René Jeannel, directeur des Recherches scientifiques des Colonies, et futur directeur de l'ORSC, donne, dans un plaidoyer pour la création de cette nouvelle institution, ce sujet comme exemple de recherches scientifiques à caractère colonial qu'elle pourrait mener [79]. Comme pour

79. Jeannel envisage ainsi de diviser les thèmes de recherches de la future institution en deux sujets, les sciences biologiques et les sciences physiques. Il donne pour cette deuxième catégorie l'exemple des recherches sur l'énergie solaire. Celles-ci, ne concernant pas spécifiquement les colonies, devraient être

l'énergie thermique des mers, le but est de produire de l'électricité, de l'eau douce, du froid, au moyen de convertisseurs de formes variées, des distillateurs aux centrales solaires. Ces initiatives prennent la forme d'un soutien aux inventeurs ou entreprises, à la manière dont procédaient la Commiission de la houille bleue et l'ONRSI dans l'entre-deux-guerres. Pourtant également orchestrée par le même secrétariat d'État aux colonies, cette forme d'organisation de la recherche est donc différente de celle qui concerne l'énergie thermique des mers. Mis à part l'achat de distillateurs solaires de type Pasteur par l'AOF en 1942, tous ces projets sont arrêtés avant la mise en place d'une installation opérationnelle, en raison de conflits entre les inventeurs et les institutions pourvoyeuses de moyens techniques et financiers.

Dans un premier temps, cette sous-section étudie la dynamique lancée en 1941 par les gouvernements généraux d'Afrique du Nord au cours d'une Conférence nord-africaine pour l'énergie électrique. Celle-ci vise l'organisation d'une recherche pour la mise au point des centrales solaires, et mène d'abord à la mise en place d'un premier projet dit projet « Berthier » (du nom du chercheur placé à la tête du projet) autour de la Société des chemins de fer Méditerranée-Niger (secrétariat d'État aux Communications) et du Gouvernement général de l'Algérie. Ce projet est abandonné au profit d'un ensemble de projets portés par le secrétariat d'État aux colonies auxquels s'adjoignent l'ORSC et, pour l'un d'entre eux, le CNRS : les projets Barbey, Pasteur, Barjot (du nom des inventeurs) et Insol (entreprise). Ces projets, arrêtés en 1944, sont examinés dans un second temps.

#### 8.2.2.1 La conférence Nord-africaine sur l'énergie électrique et le projet Berthier (1941)

Le 30 juillet 1941, une Conférence Nord-Africaine sur l'énergie électrique se tient à Alger, organisée par les représentants des trois territoires d'Afrique du Nord. Y sont abordés « les différents problèmes de nature à provoquer une amélioration de la production et de la distribution d'énergie électrique » sur ces territoires, parmi lesquels la génération d'électricité par l'énergie solaire, mais aussi par l'énergie éolienne [80]. Des représentants de l'Algérie, de la Tunisie et du Maroc, ainsi que de la Société des chemins de fer Méditerranée-Niger participent à cette conférence. La Société est probablement intéressée par tout potentiel de production d'électricité susceptible d'alimenter les chantiers de construction ainsi que les futurs points d'arrêt du réseau, pour lequel se pose un important problème de

organisées conjointement par le nouvel organisme et le CNRS.
ANOM 93COL18, p.d., René Jeannel, Rapport sur un Institut des recherches scientifiques coloniales, 1942

80. ANOM 93COL17, p.d., Lettre du vice-amiral Raymond Fenard, secrétaire général permanent en Afrique française, au directeur du Méditerranée-Niger de Ville-Malglaive.

main d'œuvre [81]. À l'issue de cette conférence, les participants s'engagent à encourager des recherches en vue d'exploiter la chaleur solaire pour produire de l'électricité.

C'est ainsi qu'une mission allant dans ce sens est décidée. Berthier, conseiller scientifique du Gouvernement général de l'Algérie, professeur à l'École préparatoire de l'enseignement supérieur de Chambéry (Université de Grenoble), doit en assurer la direction technique [82], et le Secrétariat général permanent en Afrique française est chargé de la direction administrative [83]. Le programme de recherche prévoit quatre directions : du point de vue des convertisseurs, expérimenter la transformation indirecte de l'énergie solaire par voie thermodynamique (production par concentration de la chaleur solaire de vapeur d'eau utilisée dans une turbine à vapeur) et la transformation directe grâce aux photopiles ; du point de vue de l'évaluation de la ressource, édifier des « stations de mesure, munies d'appareils enregistreurs de l'énergie solaire » de manière à établir une « carte solaire » représentant l'énergie solaire disponible sur les territoires concernés ; enfin, effectuer une « étude » pour « procéder à la transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique » [84]. Les premières études expérimentales, se rapportant à la mise au point d'éléments d'usines héliomotrices, doivent être effectuées en Algérie.

À la demande de Fenard, et suite aux engagements pris après la Conférence de l'énergie électrique, l'ingénieur des Ponts et chaussées Lucien Chadenson, directeur de la Société des chemins de fer Méditerranée-Niger, accepte une participation financière de l'entreprise aux recherches, à hauteur de 100 000 francs [85]. En juin 1942, Fenard affirme que les travaux de Berthier sont « assez avancés » [86]. Ils sont probablement rapidement interrompus, au profit d'une autre étude commanditée par le secrétariat d'État aux colonies à peu près au même moment que le projet Berthier. En effet, peu après que Fenard ait sollicité la Société des chemins de fer Méditerranée-Niger, celui-ci reçoit une demande analogue émanant de Beau, Inspecteur des Travaux publics au secrétariat d'État aux colonies, pour la mise au point de procédés de production d'électricité par la chaleur solaire. Un ingénieur des Arts et manufactures, Jacques Barbey, auteur d'un procédé de conversion thermodynamique de l'énergie solaire, a ainsi été missionné parallèlement à Berthier par le secrétariat d'État pour mener des expériences dans le Sahara algérien. Chadenson accepte également une participation de 60 000 francs, mais suggère un rapprochement des recherches menées par Berthier et par Barbey, et propose d'en être l'organisme coordinateur [87]. Fenard (secré-

81. Selon Gaida, (2014), les locomotives du Transsaharien étaient prévues pour fonctionner au Diesel, donc pas à l'électricité.

82. ANOM 93COL18, p.d., Lettre de Fenard au Gouverneur général, secrétaire d'État aux colonies, 20/06/1942.

83. Entité administrative créée par le régime de Vichy.

84. ANOM 93COL17, p.d., Lettre du vice-amiral Raymond Fenard, secrétaire général permanent en Afrique française, au directeur du Méditerranée-Niger de Ville-Malglaive.

85. ANOM 93COL17, p.d., Lettre de Chadenson à Fenard, 03/04/1943.

86. ANOM 93COL18, p.d., Lettre de Fenard au secrétaire d'État aux Colonies, 20/06/1942

87. ANOM 93COL18, p.d., Lettre de Chadenson au secrétaire d'État aux Colonies, 09/06/1942

tariat général permanent en Afrique française) et Beau (secrétariat d'État aux colonies), acceptent cette proposition [88]. Les traces des études de Berthier s'arrêtent là dans les archives nationales d'Outre-mer consultées pour cette section : elles ont probablement été absorbées dans celles de Barbey.

#### 8.2.2.2 Secrétariat d'État aux Colonies, ORSC et CNRS : projets Barbey, Pasteur, Insol et Barjot (1941-1944)

Le projet Barbey vise la mise au point et l'expérimentation d'une petite « station héliothermique » d'une puissance de quinze kilowatts, dans l'optique, à terme, de produire glace, force motrice et électricité au Sahara à partir de la chaleur solaire [89]. Le principe du procédé Barbey se rapproche de celui de Georges Claude [90] : il s'agit d'exploiter les différences de températures entre le jour et la nuit, dues à la chaleur solaire, dans le Sahara, où ces différences sont très importantes (jusqu'à 50°C) et ne varient pas beaucoup d'une saison à une autre. La journée, de l'eau est chauffée par le soleil dans des insolateurs, et stockée dans des accumulateurs isothermes de manière à rester chAude même la nuit. À l'inverse, de l'eau est refroidie la nuit, et également stockée dans des accumulateurs isothermes de manière à rester froide le jour. Le gradient de température ainsi obtenu est exploité dans un cycle basse pression grâce à des turbines adaptées [91]. Barbey et ses financeurs envisagent la production de glace dans des usines placées le long du chemin de fer transsaharien, « pour la consommation des denrées périssables et pour l'usage domestique ». La force motrice est destinée au pompage de l'eau et à l'actionnement de machines de transformation partielle de certaines matières premières (concassage de minerais par exemple). Elle permettrait, « en cas de découvertes hydrologiques [...] l'irrigation et la mise en valeur des territoires fertiles de l'ancien Atlantide ». L'électricité peut être produite de façon disséminée, sans nécessiter la construction préalable d'un réseau à haute tension [92]. La première application envisagée est la construction d'une station de pompage à Bidon V, point de relais routier et aérien entre Gao (Mali) et Reggane (Algérie).

Barbey a déjà effectué des expériences à l'Observatoire du Parc Saint-Maur, probable-

88. ANOM 93COL18, p.d., Lettre de Fenard au secrétaire d'État aux Colonies, 20/06/1942.
Lettre de Beau à Chadenson, 02/07/1942.
Lettre de Beau à Fenard, 02/07/1942.

89. ANOM 93COL18, p.d., Contrat de mission entre Barbey et le secrétariat d'État aux colonies pour la mise au point d'un projet de station héliothermique dans le Sahara, 01/06/1942.

90. Et a dans ses grandes lignes, comme le souligne Barbey lui-même, déjà été proposé par certains inventeurs comme Barjot ou Vincent dans l'entre-deux-guerres.
ANOM 93COL18, p.d., Demande de subvention de Barbey pour mission scientifique au Sahara, 25/03/1942.

91. Barbey, 1940 ; ANOM 93COL18, p.d., Demande de subvention de Barbey pour mission scientifique au Sahara, 25/03/1942.

92. ANOM 93COL18, p.d., Barbey, « Mémoire pour la mise en œuvre de l'énergie solaire en région désertique », 1942.

ment en présence de Maurain qu'il connaît, sur certaines composantes de son procédé. Puis, en mars 1942, il a, mémoire à l'appui, saisi le secrétariat d'État aux colonies d'une demande de subvention pour une mission au Sahara visant à réunir les données nécessaires pour mettre sur pied ce projet. Barbey a déjà sollicité le soutien du CNRS, resté indécis faute d'un avis compétent sur le projet [93]. Le secrétariat d'État aux colonies choisit quant à lui de lui apporter son soutien, après un avis positif de Jeannel, directeur des Recherches scientifiques au secrétariat d'État, puis de l'ORSC, mais aussi d'André Nizery, inspecteur général des Travaux publics des Colonies, consulté en tant qu'ingénieur délégué de l'Organisme d'études d'une station d'énergie thermique des mers en Côte d'Ivoire (cf sous-section 8.2.1). Une première mission de mesures météorologiques d'une durée de trois mois dans le Sahara, soit à Colomb-Béchar, soit à Ouargla (deux points du tracé du Transsaharien projeté) est ainsi décidée par le secrétariat d'État en 1942 [94]. Une somme de 200 000 francs [95], répartie entre la Société des chemins de fer Méditerranée-Niger, le secrétariat d'État aux colonies et le CNRS est allouée pour ce faire à Barbey [96].

L'inventeur, qui prévoit de faire des mesures l'été, doit partir immédiatement au Sahara. Cependant, son départ est « ajourné » et, dans les mois qui suivent l'allocation de sa subvention, il ne se consacre qu'à « analyser les expériences de [s]es prédécesseurs » [97] et à réunir et étalonner une partie du matériel nécessaire à la mission au Sahara [98]. En outre, il abandonne l'idée d'une mission au Sahara au profit d'une série de mesures dans une région ensoleillée de France, et s'engage dans une recherche de fonds privés pour soutenir

93. Charles Jacob, directeur du CNRS, a ainsi demandé à Barbey de soumettre son projet aux experts de son choix avant de décider d'apporter son soutien. Barbey a donc sollicité Maurain, alors doyen à la faculté des sciences, et connu pour ses travaux sur l'énergie solaire dans l'entre-deux-guerres, mais aussi Marcel Véron, professeur à l'École centrale de Paris et, comme Barbey, spécialiste de la thermique industrielle. Ces deux spécialistes se sont alors « récusés », selon les termes de Jeannel, pour des raisons que je ne peux que supposer. Véron est ingénieur-conseil chez un industriel (peut-être Babcock and Wilcox Co, bureau d'études américain en thermique industrielle, au nom duquel Véron a pris plusieurs brevets) qui a proposé à Barbey de collaborer pour la mise au points de stations héliothermiques. Barbey n'a pas accepté les conditions de cette entreprise, ce qui peut expliquer la position de Véron. Quant à Maurain, je n'ai aucun élément personnel pour expliquer sa position.
ANOM 93COL18, p.d., Lettre de Barbey à Beau, vers mars/avril 1942 ; Lettre de Jacob au secrétaire d'État aux Colonies, 10/06/1942.

94. ANOM 93COL18, p.d., Lettre de Beau à Chadenson, 06/05/1942 ; Lettre de l'ingénieur général Labbé, au nom de l'inspection générale des Travaux publics des Colonies, à Barbey, 02/06/1942.

95. Celle-ci devait couvrir pour moitié le matériel, et pour moitié les frais de transport et de personnels.

96. Outre l'aide de la Société de chemins de fer Méditerranée-Niger, Beau obtient le concours financier du CNRS, au nom duquel Jacob offre également une somme de 60 000 francs. Jacob garde cependant certaines réserves vis-à-vis de ce projet, choisissant de borner le concours du CNRS à une aide financière, et non matérielle, contrairement à son implication dans l'Organisme d'études pour la mise au point d'une station maréthermique en Côte d'Ivoire (cf sous-section 8.2.1).
ANOM 93COL18, p.d., Lettre de Beau à Chadenson, 02/07/1942 ; Lettre de Jacob au secrétaire d'État aux Colonies, 10/06/1942.

97. ANOM 93COL18, p.d., Lettre de Barbey à l'inspecteur général des Travaux publics des colonies, 14/05/1943.

98. Il s'agit : d'un pyrrhéliographe-solarigraphe-diffusographe ; d'un galvanomètre de rechange ; d'un anémomètre à girouette ; le tout, étalonné à l'observatoire du Parc Saint-Maur.

ses recherches, en plus des subventions publiques [99]. Barbey, dont la personnalité difficile est évoquée par plusieurs acteurs [100], semble en effet attacher une grande importance à garantir son intérêt personnel dans ces recherches : il se montre ainsi soucieux qu'elles gardent une forme d'indépendance vis-à-vis de l'administration publique, et à ce que la propriété de son invention lui soit reconnue [101]. Tout cela n'est pas pour plaire aux ingénieurs des institutions publiques qui le soutiennent. Le fait que Barbey ne remplisse pas le contrat d'une mission au Sahara telle qu'elle avait été formulée au départ conduit l'ORSC, constatant l'absence de « travail utile » de Barbey, à considérer la mission de l'inventeur comme arrêtée et à lui demander la restitution du matériel qu'il s'était procuré pour sa mission [102]. Le secrétaire général de l'ORSC cherche tout de même à poursuivre les recherches de Barbey sous une forme différente, en l'intégrant dans un Comité technique de l'énergie solaire. Mais Barbey refuse ces termes, ne souhaitant être soutenu par l'État que par le biais de subventions pour conserver son indépendance et la priorité de son invention [103]. C'est ainsi que les responsables de l'ORSC, échaudés par l'inaboutissement de la mission de Barbey au Sahara, qui avait déjà été encouragée par le biais de subventions, décident d'arrêter de travailler avec l'inventeur [104].

Dans les années 1942-1945, le secrétariat d'État aux colonies encourage d'autres initiatives visant à exploiter l'énergie solaire dans les territoires d'Outre-mer. Des inventeurs sollicitent le secrétariat d'État pour obtenir un soutien financier et matériel pour la mise en œuvre de leurs conceptions. C'est ainsi que les médecins Pasteur et Barjot, et les société Insol et Pyrhelios, qui avaient, pour les trois premiers, tenté de diffuser leurs inventions dans l'entre-deux-guerres, retiennent l'attention de Beau (secrétariat d'État aux colonies). Celui-ci souhaite évaluer les possibilités de mise en application immédiate de

99. ANOM 93COL18, p.d., Lettre de Barbey à l'inspecteur général des Travaux publics des colonies, 14/05/1943.

100. En 1942, Jacob souligne, de façon générale, le caractère difficile de Barbey, justifiant ainsi le fait qu'il ait demandé à Barbey de trouver lui-même des experts pour avis auprès du CNRS, plutôt que de les lui imposer.
ANOM 93COL18, p.d., Lettre de Jacob au secrétaire d'État aux Colonies, 10/06/1942.

101. Dans ses lettres et mémoires au style parfois excentrique, l'inventeur fait ainsi preuve d'une méfiance récurrente à l'égard des institutions publiques qu'il soupçonne de vouloir exploiter les travaux des inventeurs aux dépens de ceux-ci. Dans son mémoire, il se montre, par exemple, particulièrement froissé de ne pas avoir eu de retours du CNRS sur une des inventions pour la défense anti-aérienne et anti-char qu'il lui a soumise en 1939 avant d'être mobilisé, pendant que, selon lui, un « jeune savant promenait les mêmes inventions aux firmaments de l'acier victorieux, étant bien placé de par ses fonctions pour en connaître la valeur et l'antériorité ». Il accuse ainsi les acteurs du CNRS d'être à la fois « juge et partie » du processus d'innovation, et invoque le « processus administratif dit de « refoulement » [qui] consist[e] à refouler non par l'invention mais l'inventeur ».
ANOM 93COL18, p.d., Barbey, Mémoire pour la mise en œuvre de l'énergie solaire en régions désertiques, 1942.

102. ANOM 93COL18, p.d., Lettre du secrétaire général de l'ORSC à l'inspecteur général des Travaux publics des Colonies, 11/01/1944.

103. ANOM 93COL18, p.d., Extrait de la note de M Barbey sur les « Travaux et demande de crédits pour la mise au point de l'utilisation de l'énergie solaire, 1944.

104. ANOM 93COL18, p.d., Lettre du secrétaire général de l'ORSC à l'inspecteur général des Travaux publics des colonies, 18/04/1944.

leurs inventions en Afrique occidentale française (AOF), et encourager leur mise en œuvre.

En ce qui concerne Pasteur, certains de ses chauffe-eau et distillateurs solaires sont encore en exploitation en Algérie (cf sous-section 5.4). Le médecin général de l'armée s'est assuré la collaboration de la société Chalot [105] qui est en mesure de construire les deux modèles de chauffe-eau et distillateurs solaires brevetés par Pasteur : l'un de type caisse chauffante, et l'autre de type miroir parabolique, pour lesquels la société fournit des devis détaillés. Le prix modique des appareils ainsi que son aspect opérationnel [106] convainquent Beau qu'il faut « passer au stade de la diffusion » de cet appareil [107] et attire à ce sujet l'attention de Lozac'h, directeur du service de Santé des colonies, qui ne s'intéresse qu'au distillateur solaire à destination des formations sanitaires coloniales [108]. C'est ainsi que le secrétariat d'État commande dix modèles de la caisse chauffante, produisant 15 L/jour d'eau distillée (voir Figure J), pour le compte de l'AOF en juin 1942 [109].

Les établissements Insol reçoivent également l'attention et des financements du secrétariat d'État aux colonies pour la mise au point d'un procédé d'exploitation de l'énergie solaire. Dans les années 1930, cette société a déjà mis en place plusieurs installations de chauffe-eau solaires, brevetés par Stolpner, en France métropolitaine [110], et a retenu l'attention du ministère de la Guerre (cf sous-section 5.4). Le principe du procédé Stolpner est le suivant : de l'eau circule à l'intérieur de tubes enfermés dans des caissons plats et vitrés, soumis au rayonnement solaire, avant d'être stockée dans un accumulateur isotherme (Stolpner, 1933).
Pendant la guerre, la société augmente son capital [111] et dépose de nouveaux brevets au nom de son administrateur Guy Desdemaine-Hugon, et de son ingénieur conseil, Henry Dieterlen. Les chauffe-eau de Stolpner sont modifiés : dans le nouveau brevet, le chauffage de l'eau est indirect, et c'est un fluide intermédiaire, à faible température de congéla-

105. Constructeur d'appareils de chauffage domestique situé à Vaujours (région parisienne).
106. Les caisses chauffantes coûtent 680 francs et 22 kg de monnaie matière acier. À l'invitation de Pasteur, Robert Malacam (ingénieur des Travaux publics des colonies) et Labbé viennent constater le bon fonctionnement de l'appareil le 13 mai 1942.
ANOM 93COL18, p.d., Lettre de Labbé à Pasteur, 13/05/1942.
ANOM 93COL18, p.d., Lettre de Chalot au secrétaire d'État aux colonies, 02/06/1942.
107. ANOM 93COL18, p.d., Lettre de Beau au gouverneur général, haut-commissaire de l'Afrique française, 08/06/1942.
108. ANOM 93COL18, p.d., Lettre de Lozac'h à Pasteur, 03/03/1942.
109. ANOM 93COL18, p.d., Note de l'inspection général des travaux publics au gouvernement général de l'AOF, 21/07/1942.
110. Selon une brochure, seraient très satisfaits du fonctionnement du chauffe-eau : les usagers des bâtiments de l'évêché de Carcassonne, le maire de Cestas pour les bains municipaux, et Louis Lumière en personne !
ANOM 93COL17, p.d., Brochure de la société Insol, vers 1940.
111. D'après son administrateur, Guy Desdemaine-Hugon, elle fusionne en fait avec La Thermique naturelle, une autre société basée en Gironde qui exploitait les brevets de Stolpner dans les années 1930 et dont Desdemaine-Hugon était également administrateur. Son capital passe ainsi de 50 000 francs à 1 250 000 francs.
ANOM 93COL17, p.d., Lettre de Desdemaine-Hugon.

tion, qui est chauffé dans les tubes, évitant ainsi le gel pendant les périodes froides (La Thermique naturelle, 1939). La société se propose de développer d'autres applications : chauffage des serres, réfrigération des bâtiments, chauffage de grandes surfaces d'eau, production de glace. D'après au moins deux brochures du début des années 1940, ainsi qu'un article du *Génie civil*, l'entreprise cherche à promouvoir la diffusion de ses chauffe-eau dont elle vante le caractère opérationnel (voir installation de démonstration Figure 8.6) et économique (voir logo Figure 8.7), pour des applications domestiques et industrielles (voir publicités en Annexe I).

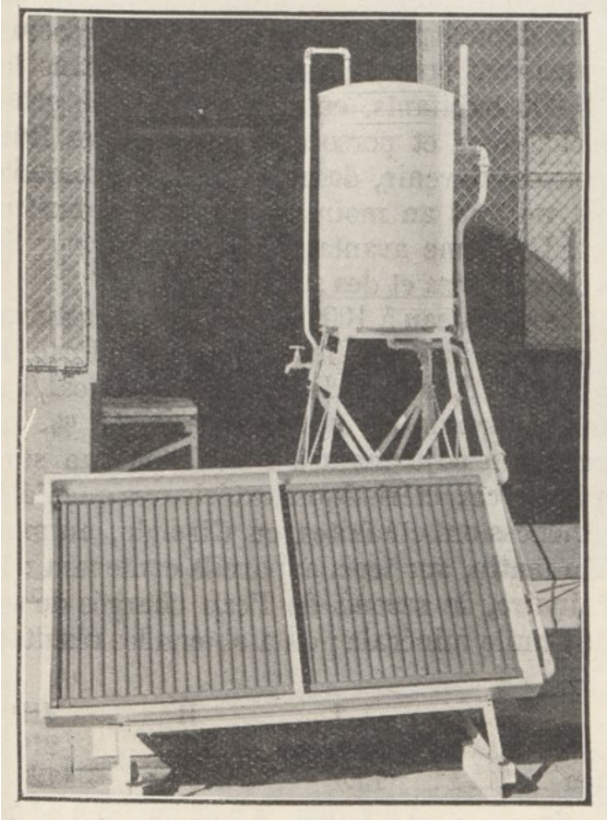


Figure 8.6 – « Vue d'une installation de démonstration » d'un chauffe-eau Insol (Gendron, 1940, p. 189)

Le nouveau chauffe-eau solaire fait l'objet d'un rapport élogieux du CNRS en 1940 (Établissements Insol, 1941). Le secrétariat d'État aux colonies s'intéresse quant à lui à un moyen de réfrigération par la chaleur solaire. Il octroie ainsi une subvention de 100 000 francs pour l'exécution d'un programme d'expérimentations du procédé « Frigisol » [113], qui vise à refroidir les bâtiments grâce à l'évaporation de l'eau et à la ventilation des locaux grâce à des réflecteurs solaires. Pour mettre au point ce programme, Dieterlen sollicite, comme Barbey, l'expertise du professeur Véron, sur les questions de thermodynamique, mais aussi de Barraud, ingénieur en chef de Péchiney-L'Aluminium français,

112. ANOM 93COL17, p.d., Logo présent sur les courriers de la société Insol en 1943.
113. ANOM 93COL17, p.d., Lettre de Dieterlen à Desdemaine-Hugon, 11/05/1944.




FIGURE 8.7 – Logo de la société Insol (1943) [112]

sur le pouvoir réflecteur de certains métaux. Une installation expérimentale est construite à Bellevue par la Société nationale d'aéronautique [114]. Mais un différend entre l'administrateur Desdemaine-Hugon et l'ingénieur-conseil Dieterlen met fin aux travaux de ce dernier. Comme Barbey vis-à-vis de ses financeurs, Dieterlen considére que ses propres intérêts ne sont pas bien garantis dans sa collaboration avec Insol [115]. Après 1944, Insol s'établit en Afrique du Nord où les débouchés sont plus importants qu'en métropole. Un brevet au nom d'Insol-Maroc, pour un chauffe-eau solaire semblable à ceux de Stolpner et Desdemaine-Hugon, est demandé en 1953 à Paris. Cette société devient ensuite Radiasol, et trouve une clientèle auprès de particuliers, de l'administration coloniale en Algérie et de l'Université d'Alger (cf 9.2.3).

Un dernier inventeur retient l'attention du secrétariat d'État aux colonies : Barjot, qu'on a déjà rencontré dans l'entre-deux-guerres comme Pasteur et Insol. Il sollicite le

114. ANOM 93COL17, p.d., Lettre de Desdemaine-Hugon à Darnault, inspecteur général des Travaux publics des Colonies, 08/07/1944.

115. Notamment, Dieterlen revendique la priorité du brevet Frigisol, dont Insol est officiellement propriétaire, et Dieterlen co-inventeur avec Desdemaine-Hugon. Pour ce dernier, Dieterlen n'a pas de légitimité à revendiquer cette priorité puisqu'il n'y a travaillé que sur commande d'Insol. En outre, Dieterlen reproche à Desdemaine-Hugon d'être trop flou sur les termes de l'exploitation du procédé à l'issue de sa mise au point, et réclame d'être intégré au Conseil d'administration, ce que refuse Desdemaine-Hugon tant que le procédé n'est pas totalement mis au point.
ANOM 93COL17, p.d., Lettre de Desdemaine-Hugon à Dieterlen, 22/05/1944.

secrétariat d'État en janvier 1942, et souhaite expérimenter à petite échelle son procédé permettant « la mise en valeur des terres africaines » [116]. Contrairement à celle de Pasteur, son invention n'a jamais été mise en pratique [117]. Beau est particulièrement intéressé par son invention visant à chauffer de l'eau grâce à des étendues d'eau de grandes surfaces disposées en fines couches dans des cuvettes à fond noir et recouvertes d'une lame d'huile transparente [118]. L'Organisme d'études d'une station maréthermique à Abidjan cherche en effet une méthode simple et peu coûteuse de chauffage de grandes étendues d'eau pour augmenter le rendement du cycle thermodynamique. Une telle méthode est effectivement expérimentée à Dakar entre 1942 et 1946, mais Barjot n'est pas inclus dans ces études (cf sous-section 8.2.1).

Ces expérimentations par des inventeurs financées par le secrétariat d'État aux colonies, le CNRS et la Société des chemins de fer Méditerranée-Niger ne connaissent pas de pérennité avec la fin du gouvernement de Vichy, ce qui signe la fin de ce type de dynamique entre une institution publique centrale et des inventeurs.

Le secrétariat d'État aux colonies a donc encouragé des études sur la mise au point de convertisseurs solaire parallèlement aux recherches sur les centrales maréthermiques, et avec des visées identiques : production d'électricité, d'eau douce, extraction et transformation de matières premières, transports, grâce à des centrales solaires, pour la politique industrielle des colonies. Comme pour l'énergie thermique des mers, le gouvernement de Vichy (secrétariat d'État aux Communications par le biais de la Société des chemins de fer Méditerranée-Niger, puis secrétariat d'État aux colonies, par le biais de l'ORSC à partir de 1942) est central dans ces projets. Les gouvernements généraux d'Afrique du Nord donnent une impulsion à des recherches au départ mais ils s'en écartent rapidement au moment où le secrétariat d'État aux colonies s'empare du sujet. Mais la configuration des acteurs est différente de celle du projet de centrales maréthermiques, ce que met en évidence la synthèse de cette section 8.2.

### 8.2.3 Synthèse section 8.2

Le gouvernement de Vichy voit dans la mise au point de centrales maréthermiques et solaires le moyen d'une nouvelle politique industrielle coloniale. Plusieurs entités du gouvernement s'y impliquent, en particulier le secrétariat d'État aux colonies, présent et central (d'abord par son sous-secrétariat à la recherche, puis par l'ORSC). Le secrétariat

116. ANOM 93COL17, p.d., Lettre de Barjot au secrétaire d'État aux Colonies, 05/01/1942.
117. Barjot affirme avoir déjà sollicité, à cet effet, l'ONRSI ainsi que le ministère des Colonies à ce sujet dans les années 1930, qui n'auraient pu accéder à sa requête à cause de « restrictions budgétaires ».
ANOM 93COL17, p.d., Lettre de Barjot au secrétaire d'État aux colonies, 05/01/1942.
118. Procédé présenté dans *La Nature* en 1933 (H. Barjot, 1933).
ANOM 93COL17, p.d., Lettre de Beau à Jeannel, 25/06/1942.

d'État aux Communications participe également aux projets solaires par le biais de la Société des chemins de fer de la Méditerranée au Niger, intéressée par les applications de l'énergie solaire pour le futur transsaharien. Les administrations territoriales sont moins présentes : le gouvernement général d'AOF est impliqué dans la mise en place de projets de centrales maréthermiques, mais est peu écouté, comme en témoigne le choix par l'Organisme d'études de l'énergie thermique des mers d'une usine à Abidjan, à l'encontre de la préférence du gouverneur pour Dakar, qui ne perçoit pas de débouchés de l'énergie produite à Abidjan. Malgré une impulsion initiale par la Conférence nord-africaine sur l'énergie électrique, les gouvernements généraux d'Afrique du Nord n'interviennent pas dans les projets solaires. Les projets maréthermiques et solaires ont ainsi une dimension nationale davantage que territoriale : les objectifs du gouvernement sont l'intensification de la production pour la nation (solaire et énergie thermique des mers), le prestige et le marché internationaux (énergie thermique des mers), la légitimité de la présence française (argument plus rarement évoqué). Cette dimension nationale explique la présence CNRS, en tant que financeur, dans ces projets.

Même si ces projets sont menés en parallèle et avec des ambitions identiques, des différences apparaissent entre les dynamiques déployées pour les projets d'usines maréthermiques et solaires. D'une manière générale, cela tient à l'inertie, appliquée de manière différente, par le système énergétique aux technologies maréthermiques et solaires, ainsi qu'à la nature de ces deux sources d'énergie. L'énergie thermique des mers se présente sous forme de chaleur constante, ce qui rend aisé son utilisation dans des centrales semblables aux centrales thermiques, selon un cycle thermodynamique. Des industriels du secteur de l'énergie ont déjà travaillé avec Georges Claude dans l'entre-deux-guerres, et la seule manière d'utiliser cette source d'énergie est celle que Claude et Boucherot ont présentée dans l'entre-deux-guerres, à tel point que le nom de la source d'énergie est devenu synonyme du procédé de conversion. Aux spécificités physiques de l'énergie thermique des mers, s'ajoute donc l'histoire des industriels qui ont déjà travaillé sur le sujet, ainsi que leur inscription dans le système énergétique. Tout cela favorise la conception d'un seul type de centrale (avec quelques variantes de détail) analogue aux machines thermiques connues, par un ensemble d'acteurs puissants (industriels du secteur de l'énergie et services techniques de l'État) qui se regroupent en une seule entité détentrice d'importants moyens techniques et financiers.

Pour l'énergie solaire, il n'y a pas d'industriels du secteur de l'énergie regroupés au sein d'un organisme central, mais des inventeurs, qui travaillent séparément et sur des procédés différents, et avec lesquels le secrétariat d'État aux colonies puis l'ORSC traitent directement. En effet, comme pour les aérogénérateurs au même moment, et pour les houlomoteurs dans l'entre-deux-guerres, la forme idoine de ces convertisseurs ne fait pas consensus : l'énergie solaire n'a jamais été utilisée de façon industrielle, même si des

moteurs solaires uniques ont déjà été construits (Mouchot, Tellier, Shuman), et des distillateurs construits en série. Ceux-ci représentent un usage particulier de l'énergie solaire et pour de petites puissances. La nature de l'énergie solaire, inconstante et intermittente contrairement à l'énergie thermique des mers, rend plus difficile la conception de convertisseurs homogènes aux centrales du système énergétique. Les seuls industriels du projet sont ainsi les Chemins de fer de la Méditerranée au Niger, qui dépendent aussi du gouvernement de Vichy, et qui sont intéressés pour les applications de l'énergie solaire en vue du futur chemin de fer, mais ils ne sont que pourvoyeurs d'argent. Ainsi, dans sa volonté de mettre au point de tels convertisseurs, le secrétariat d'État aux colonies rencontre des individus aux profils variés, et non des industriels du secteur de l'énergie. Les inventeurs ont des profils hétéroclites : un ingénieur spécialiste de la thermodynamique (Barbey), un ingénieur au profil indéfini (Dieterlen), deux médecins de l'armée qui ont fait leur carrière aux colonies (Pasteur et Barjot). Du point de vue de l'organisation de la recherche, des conflits entre les inventeurs, attachés à leur propriété intellectuelle et à leur intérêt dans les projets, et les institutions financeuses, qui trouvent ces inventeurs trop exigeants, ont raison de deux des projets soutenus par le secrétariat d'État aux colonies (Barbey et Insol). Le procédé Barjot est expérimenté à Dakar avec le soutien du gouvernement général de l'AOF mais sans l'inventeur, et pour le projet d'usine maréthermique. Finalement, les seules applications solaires qui font suite aux recherches encouragées par le secrétariat d'État aux colonies sont les distillateurs de Pasteur, déjà en application dans l'entre-deux-guerres.

Si l'on compare avec l'entre-deux-guerres, des ruptures apparaissent dans les acteurs et les convertisseurs, malgré certaines formes de continuité.
D'abord, les continuités sont les suivantes. Dans les acteurs, on constate la présence des mêmes inventeurs (Claude : énergie thermique des mers ; Barjot, Pasteur : solaire) et d'entreprises (industriels énergie : énergie thermique des mers ; Insol : solaire). Pour les projets solaires, il y a toujours une institution coloniale (secrétariat d'État aux colonies, secrétariat d'État aux Communications → résidence générale de France à Tunis) et une institution nationale de recherche (ONRSI → CNRS + ORSC). En termes de convertisseurs, c'est, pour l'énergie thermique des mers, exactement la même forme de centrale.
Maintenant, les changements suivants montrent la spécificité de la seconde guerre mondiale par rapport à l'entre-deux-guerres. Ces changements montrent la dimension nationale accordée à ces projets de convertisseurs d'énergies naturelles par le gouvernement de Vichy, avec l'ambition d'une politique industrielle. On constate la présence du gouvernement dans le projet d'usine maréthermique, là où il n'y avait que des industriels dans l'entre-deux-guerres, ce qui se traduit par la création d'une société d'économie mixte. Par ailleurs, la figure d'inventeur incarnée par Claude s'efface dans un projet centralisé, dirigé par un ingénieur, expert de l'administration publique (Nizery). Pour les projets solaires,

l'institution coloniale (secrétariats d'État aux colonies et aux Communications), est moins ancrée dans le territoire. Les moyens financiers sont plus importants : on passe d'un prix de 5 000 francs à partager entre les inventeurs, à des subventions de 100 000 francs pour un inventeur. D'une manière globale, ces deux projets sont considérés d'une manière cohérente comme une dynamique de recherche pour l'exploitation des énergies naturelles, alors que l'ONRSI soutenait des projets en tant que soutien à des inventions non spécifiquement du domaine de l'énergie. Certains acteurs parlent d'une « politique de l'énergie », au service d'une politique industrielle. Dans la forme des convertisseurs, la différence concerne les projets solaires, qui doivent répondre à une politique industrielle, et non agricole et militaire : on passe des distillateurs aux centrales solaires, pour la production d'électricité.

## 8.3 Synthèse Chapitre 8

La seconde guerre mondiale est le moteur d'une prise en main des recherches sur l'utilisation des énergies naturelles par des institutions publiques au niveau national, sous le gouvernement de Vichy : ministère de la Production industrielle, secrétariat d'État aux colonies, secrétariat d'État aux Communications (Société des chemins de fer Méditerranée-Niger). Le CNRS et l'ORSTOM s'impliquent dans les projets solaires et maréthermiques, conçus dans une perspective coloniale et nationale. Ces institutions ont organisé des recherches afin de parvenir à la construction et à la mise en service rapide de nouveaux convertisseurs. Alors que ce n'était le cas que de l'énergie des marées pendant l'entre-deux-guerres, les énergies éolienne, maréthermique et solaire sont l'objet d'un tel mouvement. De plus, les acteurs de cette dynamique la considèrent comme une action coordonnée pour l'utilisation des « énergies de remplacement » ou « sauvages », et pas comme une action de soutien ponctuel en faveur d'une invention quelconque, comme c'était le cas de l'ONRSI dans l'entre-deux-guerres. Les recherches opérées visent toutes à construire des centrales, électriques pour le réseau interconnecté métropolitain pour le vent et les marées, multifonctionnelle pour l'industrialisation des colonies.

Les recherches sur le vent et les marées, organisées sous l'égide du COEE, visent la production d'électricité pour le réseau électrique interconnecté. Ce dernier, qui s'est ramifié depuis l'entre-deux-guerres et que le COEE cherche à étendre, est donc au coeur de ces projets. C'est pourquoi le CTEM, qui doit étudier l'ensemble des énergies marines, laisse de côté, de manière encore plus affirmée que la Commiission de la houille bleue, l'énergie des vagues et de la houle, plus intermittente et dispersée, et donc plus difficile à exploiter que les marées dans des centrales électriques puissantes. Le réseau électrique interconnecté rend en outre possible l'utilisation à grande échelle de l'énergie éolienne pour la production d'électricité. Une complémentarité temporelle entre sources d'énergie

se dessine, d'une part, saisonnière, entre la houille blanche et l'énergie éolienne, et d'autre part, journalière, entre les différentes stations éoliennes potentiellement installées en plusieurs points du territoire. La logique d'une complémentarité géographique entre sources d'énergie qui prédominait dans l'entre-deux-guerres perd ainsi de son importance.

Pour le secrétariat d'État aux colonies, l'ambition est l'industrialisation des colonies pour l'économie de pénurie, le prestige de la France et le maintien d'un empire menacé de démantèlement. Aussi les centrales maréthermiques et solaires n'ont-elles pas pour but d'alimenter en électricité un réseau, mais de permettre la mise en valeur de toutes sortes de ressources coloniales, par l'extraction et/ou la transformation de matières premières. Il s'agit bien moins d'une réponse à des besoins exprimés que de la création d'un besoin futur, caractéristique d'une nouvelle politique de développement des colonies. Celle-ci est avant tout pensé dans une perspective nationale, et l'administration coloniale est peu présente dans ces projets.

L'organisation de ces recherches diffère en fonction des sources d'énergie : pour celles qui sont à la fois les plus régulières et qui ont déjà été étudiées par des industriels et/ou des institutions publiques dans l'entre-deux-guerres, ces industriels s'associent dans des organismes mi-publics mi-privés à la demande du gouvernement. C'est ainsi que de grandes entreprises du secteur de l'énergie qui avaient participé aux projets de centrales maréthermiques et marémotrices concentrent leurs moyens techniques et financiers au sein de la SEUM et de l'Organisme d'études de l'énergie thermique des mers. Ils n'envisagent qu'une forme de convertisseur, sur le modèle de la centrale hydroélectrique de houille blanche pour les marées, de la centrale thermique pour l'énergie thermiques des mers.

À l'inverse pour les énergies éolienne et solaire, peu ou pas étudiées par des industriels dans l'entre-deux-guerres, irrégulières (contrairement à l'énergie thermique des mers) et plus difficiles à concentrer/régulariser que l'énergie des marées, il n'y a pas d'association d'industriels, la forme des convertisseurs est plus incertaine et les moyens mis en œuvre moins importants. Deux ingénieurs de l'administration (Ailleret et Pétry) imitent les initiatives d'institutions publiques étrangères pour l'alimentation du réseau en électricité éolienne. Ils cherchent à associer les connaissances en aérodynamique et en électrotechnique pour concevoir des machines modernes, mais ils sont indécis sur la meilleure forme de ces convertisseurs, et les industriels du secteur de l'électricité ne s'impliquent pas dans ces projets. Ailleret et Pétry mettent de côté les constructeurs d'aéromoteurs dont la forme n'est pas dictée par les nouvelles connaissances en aérodynamique, et écartent la majorité des propositions d'inventeurs qui leur sont envoyées. Pour l'énergie solaire, le secrétariat d'État aux colonies est également indécis sur la forme du convertisseur et finance plusieurs inventeurs pour expérimenter plusieurs dispositions. Ces projets échouent en raison de conflits entre les inventeurs et les institutions qui les financent.

La figure de l'inventeur, très présente pendant la période précédente autour de la Commiission de la houille bleue, de l'ONRSI et dans les publications scientifiques et techniques, continue d'exister mais tend à disparaître, quoique de manière différente en fonction des sources d'énergie. L'existence de la SEUM, qui monopolise la ressource énergétique et les moyens publics destinés à la mise en place d'usines marémotrices, inhibe toutes les initiatives autres que celles de la SEUM. Dans le projet de station maréthermique, Georges Claude n'est plus central. Ces gros projets impliquant de puissantes institutions privées et publiques en collaboration ont pour effet de diminuer le rôle et d'effacer la figure de l'inventeur. Le même mouvement touche le vent et le soleil mais l'indécision sur la forme des convertisseurs et l'absence d'industriels laisse encore de la place à ce type d'acteurs, surtout pour l'énergie solaire. Ce ne sera plus le cas après la guerre.

À l'issue de la guerre, beaucoup de ces recherches sur les énergies naturelles sont poursuivies, ce qui montre l'importance de cette période de pénurie, de défaite militaire, de menaces d'un démantèlement de l'Empire et de politique économique dirigiste pour la forme des recherches ultérieures. La dynamique coloniale des énergies naturelles pendant la guerre justifie la présentation en deux périodes adoptée pour cette Partie 3. En effet, pour le solaire, cette dynamique est totalement stoppée, mis à part le commerce de quelques distillateurs et chauffe-eau solaires Pasteur et Insol. L'arrêt de ces projets à cause de différends entre les inventeurs (Barbey et Dieterlen) qui défendent farouchement leurs intérêts d'inventeurs et les institutions qui les financent (ORSC et Insol) qui les trouvent trop exigeants est en effet définitif. Les projets solaires prennent une forme différente à l'issue de la guerre : ce sont d'autres acteurs, d'autres convertisseurs. Le ministère de la France d'Outre-mer, qui prend le relais du secrétariat d'État aux colonies pour les projets d'usines maréthermiques, ne prolonge pas les études sur le centrales solaires, et la présence du CNRS dans ces nouvelles recherches n'est qu'une apparence de continuité.

# Chapitre 9

# Les énergies naturelles outils de « développements » (1946-1970)

Durant les années de guerre, le gouvernement de Vichy ainsi qu'un ensemble d'acteurs privés (y compris de grandes entreprises du secteur de l'énergie) se sont mobilisés pour des recherches sur deux grands domaines d'application des énergies naturelles, avec des objectifs politiques et économiques dépendant des territoires concernés. Un partage analogue se produit dans les deux décennies qui suivent la guerre. Malgré des reconfigurations institutionnelles, plusieurs projets sont ainsi poursuivis avec des objectifs similaires à partir de 1945. À la création d'EDF, un service des Études et recherches est créé, et dirigé par Ailleret. Il n'est donc pas étonnant que ce service, dont la mission était de mener une « politique de R & D dans tous les domaines utiles à l'énergie électrique », et en particulier, de « concevoir, construire et gérer un réseau unique » (Bastin et Bernard, 1996, p. 422), décide de poursuivre les recherches sur l'utilisation des énergies naturelles commencées pendant la guerre autour du ministère de l'Industrie et du Comité d'Organisation de l'énergie électrique. C'est ainsi qu'au sein de ce Service, est transférée la SEUM, transformée en un Service pour l'étude de l'utilisation des marées, et qu'une Division énergie du vent est créée pour étudier les questions relatives à l'énergie éolienne. L'existence de l'Organisme d'études de l'énergie thermique des mers, qui dépend non plus du secrétariat d'État aux colonies mais du ministère de la France d'Outre-mer, en en outre prolongée. Après l'arrêt des projets du secrétariat d'État aux colonies pendant la guerre, les études sur l'énergie solaire connaissent quant à elles un renouveau autour du CNRS et de deux universités (Algeret Dakar), ce qui est lié à la construction du réseau électrique algérien et à la dynamique internationale autour de cette source d'énergie avec l'affirmation d'un nouvel enjeu, celui de l'aide au développement. Dans l'Union française (Algérie, Maroc, Tunisie, AOF), les services techniques de l'administration coloniale, qui étaient restés à l'écart des recherches sur l'énergie solaire soutenues par le secrétariat d'État aux colonies,

entrent aussi en jeu et cherchent à mettre en place de petites installations solaires et éoliennes pour la mise en valeur agricole des territoires.

En métropole, les recherches sur les marées et le vent pour la production d'électricité sont ainsi poursuivies par la direction des Études et recherches d'EDF, ainsi que dans les sections de recherche de certains industriels du domaine de l'énergie. Les acteurs de la politique énergétique française, que ce soient le ministère de l'Industrie, EDF ou le Commissariat général au Plan (qui succède à la DGEN en termes de planification économique), restent en effet, jusqu'au début des années 1960, dans l'optique d'une augmentation à tout prix des disponibilités énergétiques nationales. Ainsi, selon les mots de Varaschin, (2009b, p. 134), jusqu'en 1961, « les réflexions des experts du Plan restèrent dominées par la hantise de la pénurie énergétique, le souci de l'indépendance nationale et la volonté de moderniser une exploitation qui devait peu à peu s'ouvrir à la concurrence internationale », ce qui explique la continuité d'une politique énergétique française « productiviste » avec les années de guerre. Si des investissements massifs sont effectués dans l'extraction charbonnière et dans la construction d'immenses barrages hydroélectriques, une part, mineure mais existante, des crédits et des moyens d'EDF sont ainsi consacrés à des travaux sur les énergies naturelles. Par ailleurs, au CNRS, de nouveaux travaux sur l'énergie solaire, d'abord campés dans un domaine particulier de la recherche fondamentale, s'ouvrent aux techniques de l'habitat solaire, dans le cadre d'une dynamique internationale pour l'exploitation de l'énergie solaire en direction des pays « sous-développés ». Si des fours solaires de taille de plus en plus importante au cours de la période ont d'abord pour vocation de façonner des technologies de pointe à but scientifique et industriel, contribuant au prestige de la France, l'habitat solaire se situe davantage dans une logique d'aide au développement et de positionnement dans le marché international. Cette application est minoritaire par rapport aux fours solaires. Toutes ces recherches sont suspendues ou fortement ralenties au cours des années 1960, avec la baisse du prix du pétrole et la mise au point de centrales nucléaires jugées opérationnelles, la focalisation de la politique énergétique française sur ces deux options, mais aussi le mouvement de décolonisations.

Dans les colonies, certaines institutions publiques, associées à des laboratoires universitaires et à des industriels du secteur de l'énergie, cherchent à mettre au point des procédés d'utilisation de l'énergie thermique des mers, de l'énergie solaire, de l'énergie éolienne ou de l'énergie des vagues. Ils ont des ambitions multiples : mise en valeur, industrielle et/ou agricole, des Territoires d'Outre-mer au profit de la métropole (énergie thermique des mers, solaire, éolien, vagues), recherche d'un marché international pour de nouveaux convertisseurs utilisables dans de vastes zones (énergie thermique des mers, solaire), prestige français (énergie thermique des mers, solaire), aide au « développement » des populations indigènes (solaire, éolien), dans un contexte international où s'institutionnalise la « coopération » entre pays industrialisés du Nord et pays jugés « sous-développés ». C'est

ainsi que les travaux sur l'énergie thermique des mers sont poursuivis au sein de l'Organisme d'études, qui est remplacé par une société d'économie mixte en 1949. Ces travaux sont également arrêtés au début des années 1960, autant pour des raisons de concurrence de sources d'énergie devenues moins chères dans les calculs comptables que de perte d'intérêt pour ces technologies qui, les décolonisations entamées, ne permettent finalement pas de maintenir l'empire et de le mettre en valeur au profit de la métropole. Les universités d'Algerpuis de Marseille, et de Dakar, ont quant à elles entrepris des recherches pour la mise au point de technologies solaires à usages variés : domestiques, agricoles ou industriels, et ont été affaiblis de la même manière dans les années 1960. De même, des projets d'utilisation de l'énergie éolienne, du pompage de l'eau à la production d'énergie électrique, ont été portés par des institutions comme le service de la Colonisation et de l'hydraulique d'Algérie ou l'entreprise Électricité et gaz d'Algérie (EGA), qui, pour le premier, a été mené à bien, et pour le second, stoppé net lors de la guerre d'indépendance du pays.

L'inauguration de l'usine marémotrice de la Rance en 1966 marque ainsi, autant que l'aboutissement de plus de deux décennies (ou de quatre, si on compte les travaux autour de la Commiission de la houille bleue) de travaux sur cette source d'énergie, la fin d'un cycle de recherches françaises sur l'utilisation des énergies naturelles. L'énergie solaire fait exception dans le champ des énergies naturelles, dans la mesure où, bien que de moins en moins dotées, des recherches sont poursuivies dans plusieurs laboratoires, et où les acteurs cherchent à se structurer au niveau national afin d'accélérer les réalisations et d'obtenir une visibilité au niveau international.

La majorité de ces recherches ont été relatées dans leur globalité et de manière plus ou moins détaillée par certains acteurs ou historiens de ces travaux. Ce Chapitre 9, sans revenir dans le détail de ces différentes histoires, en propose une synthèse en se focalisant sur les acteurs impliqués, les enjeux économico-politiques et l'imaginaire technicien qu'elles révèlent. Lorsqu'ils sont absents de ces récits, ces éléments sont précisés grâce à des publications d'acteurs ou d'archives d'institutions (Archives nationales : Industrie, service des Phares et balises ; Archives d'EDF ; Archives nationales d'Outre-mer : gouvernement général d'Algérie, ORSTOM). Il relate aussi certains projets absents de l'historiographie : des projets d'utilisation de l'énergie éolienne dans les territoires et départements d'Outre-mer par certaines entreprises et institutions de l'administration coloniale.

Ce chapitre examine d'abord les recherches métropolitaines sur des convertisseurs installés en France, visant l'approvisionnement électrique du territoire (marées, vent), ou le prestige technologique de la nation (solaire). Puis il étudie les projets de convertisseurs destinés aux territoires de l'Union française (solaire, vent, énergie thermique des mers, houle).

## 9.1 Métropole : réseau électrique et grandeur technologique (marées, vent, soleil)

Pour des applications en métropole, l'impératif de modernisation dirige les recherches sur l'utilisation des énergies naturelles dans des directions correspondant à l'impératif de grandeur technologique : production de grandes puissances électriques pour le réseau interconnecté (centrales marémotrices et éoliennes), prestige technologique d'installations sophistiquées (four solaire, cellules photovoltaïques de l'espace). Le pompage de l'eau par l'énergie éolienne, ainsi que la production de petites puissances électriques pour des installations rurales isolées du réseau en métropole, font ainsi de moins en moins l'objet d'investigations de la part des institutions responsables des aménagements énergétiques, puisque le réseau électrique national interconnecté, dont EDF se charge de poursuivre et achever la construction, les rend désuets. L'usage de ces moteurs dans les campagnes s'amoindrit de même qu'ils disparaissent progressivement des discours des ingénieurs sur la modernisation de la France. Argand, du service spécial créé à EDF pour l'étude de l'énergie éolienne, évoque ainsi en 1953 les « cadavres tordus et rouillés » des éoliennes de pompage dont il fut « érigé autrefois un assez grand nombre en France, sur des châteaux d'eau, lorsque le génie rural finançait leur fabrication » [1]. De même, le CNRS mène des recherches sur l'habitat solaire, il n'envisage des débouchés qu'Outre-mer. Des chauffe-eau fonctionnels dans le sud de la France ne trouvent pas de clientèle et certains constructeurs préfèrent s'établir dans l'Union française. Pour ce qui est des marées, les derniers moulins qui fonctionnaient sur la rivière de la Rance, autrefois largement équipée de ces petits moteurs, sont mis hors service par la construction de l'usine marémotrice qui promet d'apporter l'électricité aux minotiers, conquis par la modernité du nouveau mode d'exploitation de l'énergie marémotrice.

Les acteurs impliqués sont représentés sur le diagramme de la Figure 9.1 qui représente une synthèse des institutions impliquées et des projets formulés pour l'exploitation des énergies naturelles en métropole. Ceux-ci concernent exclusivement les énergies marémotrice, éolienne et solaire.
On voit qu'EDF est un acteur central pour tout ce qui concerne les énergies éolienne et marémotrice. Pour ces deux sources d'énergie, les grandes entreprises du secteur de l'énergie telles qu'Alsthom ou Neyrpic ont également été une partie prenante active de la mise au point de nouveaux convertisseurs (éoliennes, turbines à marées). En ce qui concerne l'énergie éolienne, EDF et le CTEV laissent une place aux nouvelles entreprises et aux inventeurs associés à un bureau d'études, pour tester une grande variété de modèles d'éo-

1. AN 80AJ/65, p.d., Rapport d'Argand sur l'énergie éolienne pour la sous-commission de l'énergie de la commission d'études et de coordination des plans de modernisation et d'équipement des territoires d'Outre-mer, 09/1953.

liennes. Des constructeurs étrangers sont en outre sollicités pour pallier le manque d'offre d'aérogénérateurs en France, car l'intérêt d'EDF se porte exclusivement sur de grandes machines productrices d'électricité. Le service des Phares et balises est également un acteur important de la dynamique nationale pour l'exploitation de l'énergie éolienne, et cherche à mettre en service des aérogénérateurs de petites puissance sur des phares. EDF et le service des Phares et balises sollicitent les mêmes types d'acteurs. Les projets d'usines marémotrices sont quant à eux l'apanage exclusif d'EDF et de son Service pour l'utilisation de l'énergie des marées (SEUM). Malgré des propositions spontanées d'inventeurs ou de bureaux d'études non associés à de grandes entreprises, il privilégie toujours les projets proposés par des consortiums de grandes entreprises répondant à des appels d'offre.

Pour l'énergie solaire, les acteurs sont différents, bien qu'EDF ait eu une place en tant qu'expert au niveau national et ait pu influer sur les directions données aux recherches françaises dans ce domaine. C'est ainsi dans plusieurs laboratoires publics (universitaires, CNRS ou ENS) que des recherches sont menées, pour lesquelles le ministère de la Défense, les gouvernements généraux du Maroc et de la Tunisie (fours solaires), ou le CNES (photopiles) apportent des financements en raison des intérêts particuliers qu'ils y trouvent. Il s'agit, pour le ministère de la Défense, de la production de matériaux intéressant l'Armée ; pour les territoires d'Afrique du Nord, de l'approvisionnement énergétique par des centrales ; pour le CNES, de l'alimentation des moteurs de satellites. Ces recherches rentrent dans le cadre de la concurrence technologique internationale, de politique énergétique des territoires de l'Union française et de l'aide au développement des pays « sous-développés ». Ces trois ambitions motivent la création de l'Association française pour l'étude et le développement de l'énergie solaire (AFEDES) à la fin des années 1960 par les acteurs de l'énergie solaire (laboratoires et industries), mais aussi par les responsables de la politique énergétique. Ceux-ci cherchent ainsi à fédérer les recherches françaises pour obtenir une visibilité internationale vis-à-vis d'un domaine concurrentiel et enjeu de stratégies géopolitiques de domination technico-économique.

Les réalisations restent limitées. Les seules installations à être entrées dans le domaine de l'usage quotidien sont l'usine marémotrice de la Rance, qui délivre toujours ses quelques 500 GWh annuels sur le réseau français ; les aérogénérateurs installés sur les phares gérés par le service des Phares et balises, qui ont fonctionné plusieurs années mais ne sont probablement plus en service actuellement ; et les photopiles du CNES qui ont permis de propulser les satellites français et étrangers. Ainsi, si quelques matérialisations ont montré la faisabilité technique d'autres convertisseurs, comme le four solaire de Mont-Louis puis celui de Mont-Louis Odeillo, ou encore les divers modèles d'aérogénérateurs construits autour d'EDF comme ceux de Neyrpic et du B.E.S.T, la majorité d'entre eux ont été concurrencés d'un point de vue économique par le pétrole et l'énergie nucléaire dans les années 1960, et sont restés des modèles uniques.

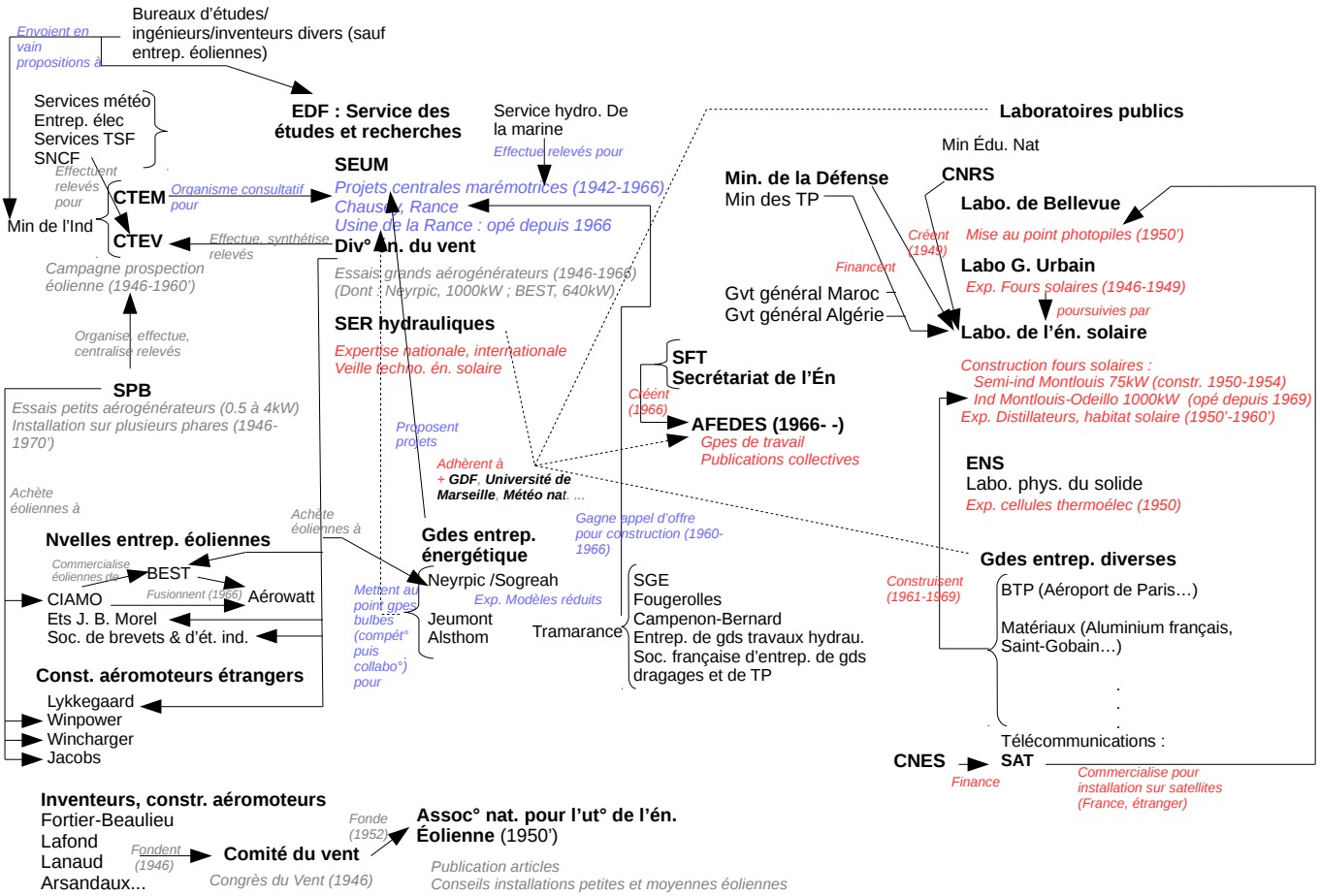



FIGURE 9.1 – Synthèse des institutions impliquées dans des projets d'exploitation des énergies naturelles en métropole (1946-1960')

La Figure 9.2 synthétise les projets qui ont mené à des matérialisations en métropole selon le type de convertisseurs. Lorsque le convertisseur a été opérationnel, la période d'utilisation et le nombre d'exemplaires en usage, sont précisés.

On voit bien que les convertisseurs étudiés font partie des plus « modernes » selon les critères de puissance et de sophistication. On voit aussi que seuls les convertisseurs les moins puissants et d'un usage spécifique (aérogénérateurs pour les phares, photopiles pour les satellites) ont trouvé une diffusion après la réalisation d'un prototype.

Cette section relate donc les recherches effectuées pour l'exploitation, en métropole, des énergies marémotrice, éolienne et solaire. Elle montre d'abord la position particulière d'EDF sur le sujet des énergies naturelles, qui explique en grande partie la direction prise par ces recherches en France dans les trois décennies qui ont suivi la guerre. Ensuite, elle relate successivement les projets d'usines marémotrices d'EDF, d'éoliennes d'EDF et du service des Phares et balises, ainsi que l'existence, entre Paris et Carcassonne, d'une

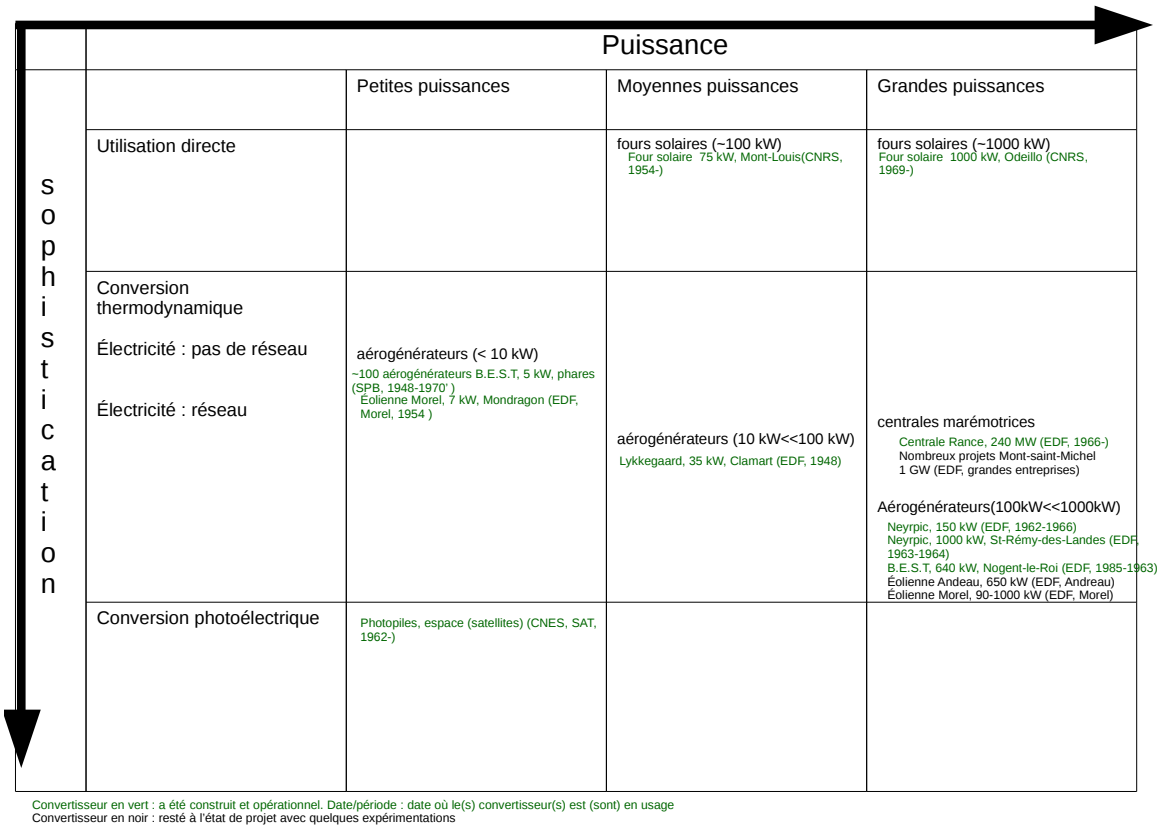



FIGURE 9.2 – Les projets de convertisseurs Outre-mer (1946-1960')

Association pour l'utilisation de l'énergie éolienne, qui montre la tentative, et l'échec, de constructeurs et d'inventeurs d'aéromoteurs français pour promouvoir l'utilisation de l'énergie éolienne sous toutes ses formes en métropole, puis Outre-mer, entre l'issue de la guerre et le milieu des années 1950. Elle montre enfin les projets de convertisseurs solaires portés par le CNRS.

### 9.1.1 EDF et les nouvelles sources d'énergie. Des centrales puissantes pour le réseau interconnecté

D'une manière générale, EDF ne s'implique activement que dans deux domaines, ceux de l'énergie du vent et de l'énergie des marées. Les ingénieurs d'EDF ne perçoivent effectivement la possibilité de production de grandes puissances électriques qu'à partir de ces deux énergies naturelles. Or, seule les intéresse la production de grandes puissances électriques. Gaston Remenieras, ingénieur hydraulicien, adjoint au chef (1946-1954) puis chef du Service des études hydrauliques (1954-au moins 1957) [2] se charge de suivre les études

2. Il remplace alors Nizery, au décès de ce dernier. Jusqu'au moins 1957, Remenieras fut également, à la Société hydrotechnique de France, secrétaire général du Comité technique (depuis 1942), administrateur

concernant les sources « non conventionnelles d'énergie » auxquelles aucun avenir à court ou moyen terme n'est envisagé pour la production de grandes puissances, et affirme ainsi :

« La direction des Études et recherches de l'Électricité de France suit les études portant sur les énergies non conventionnelles de façon à être en mesure de s'y intéresser plus largement lorsqu'elles paraîtront pouvoir devenir rentables dans le domaine des fortes puissances qui seul intéresse Électricité de France (AFEDES, 1968). »

Ceci explique d'une part que, dans ses travaux sur l'énergie des marées et l'énergie éolienne, EDF n'ait porté son attention que sur des centrales de grande puissance ; et d'autre part, l'intérêt distant d'EDF pour l'énergie solaire et l'énergie de la houle, dont l'entreprise ne juge pas rentable la conversion en grandes puissances électriques. Ainsi, l'entreprise ne contribue-t-elle qu'en tant qu'expert aux travaux sur des aérogénérateurs de petite puissance auprès des territoires d'Outre-mer [3] et sur les convertisseurs solaires (cf sous-section 9.1.4). En effet, dans ces territoires, seule l'utilisation d'appareils de petites puissances est jugée possible : pour l'énergie éolienne, à cause de l'absence de grands réseaux interconnectés atténuant l'irrégularité du vent, et pour l'énergie solaire, à cause d'un coût estimé comme non concurrentiel de l'électricité solaire.

En 1957, Remenieras écrit ainsi, dans un rapport au nom du service des Études et recherches [4], qu'« [e]n raison de son prix élevé il est peu vraisemblable que l'usine génératrice solaire trouve, actuellement, des applications dans les pays hautement industrialisés disposant économiquement et en abondance des sources d'énergie classiques. » Reprenant l'étude d'un intervenant à la Conférence mondiale de l'énergie de 1954 à propos d'un projet de centrale solaire à collecteur plat [5], il estime en effet le prix de toute centrale thermique de grande puissance au « double ou au triple d'une usine de même puissance — mais fournissant une énergie de qualité — implantée au même endroit », et estime que

(depuis 1954), président de la section « essais et mesures » (depuis 1954), vice-président de la section « hydraulique générale ».
Archives EDF, 852757, p.d., Titres et fonctions de Gaston Remenieras, 01/1957.

3. Argand est présent en tant qu'« expert » à la réunion de la Commission d'étude et de coordination des plans de modernisation et d'équipement des Territoires d'Outre-mer. Au passage, celle-ci était dirigée par Antoine, inspecteur général pour l'Union française et l'étranger d'EDF.
AN 80AJ/65, p.d., Rapport de la sous-commission de l'énergie, 09/1953.
De même, Paimboeuf et Holl participent à une réunion restreinte sur l'énergie éolienne dans l'Union française, avec l'inspecteur général des Travaux publics de la France d'Outre-mer Crouzet, et Pétry et Gonnard du service des Phares et balises.
AN 1991 0305/5, p.d., Réunion « Enquête sur l'énergie éolienne dans l'Union française » au cabinet de M Crouzet, 28/11/1951.

4. Cet article a été publié au moins en partie dans la *Revue générale de l'électricité*. Dans un chapitre d'ouvrage, Michel Rodot cite en effet certains extraits de cet article qui correspondent mot pour mot au rapport consulté dans les archives d'EDF (Rodot, 1993).

5. Il s'agit de O G Lof dont l'intervention est intitulée : « Engineering and economic problems in the electric production of solar energy ».
Archives EDF, 852756, p.d., « Quelques remarques sur le projet de centrale solaire de M. Hosni Badaoui », 29/07/1955.

« seul un prix de revient exceptionnellement élevé — et actuellement peu vraisemblable en raison du prix mondial et des facilités de transport des fuels-oils — du combustible pourraient rendre la centrale solaire concurrentielle » [6]. Il poursuit la comparaison avec les moyens classiques de production d'électricité dans le réseau national interconnecté, en assimilant, premièrement, les centrales solaires à des centrales de « pointe », c'est-à-dire des centrales de faible inertie mobilisables ponctuellement pour faire face aux pics de demande en électricité ; dans ce cas, le prix d'investissement des centrales solaires les défavorise par rapport aux centrales classiques (surtout thermiques). Il les compare ensuite aux centrales de base, c'est-à-dire produisant en permanence une puissance électrique qui est déterminée. Dans ce cas, « le prix du kWh solaire est obéré par sa faible utilisation annuelle » et la nécessité d'un « système d'accumulation d'énergie qu'il faudrait lui adjoindre pour assurer la continuité du service journalier ou saisonnier » [7]. L'extrait suivant précise sa position à propos des centrales solaires de petite puissance :

> « Actuellement, l'énergie solaire est trop « diluée » pour être économiquement transformable en énergie électrique sauf s'il s'agit de très petites puissances comme celles mises en jeu dans les appareils de télécommunications (satellites, missiles, etc....). Les premières applications rentables doivent se placer dans le domaine de petites installations pour le chauffage de l'eau, la climatisation des locaux, la réfrigération, l'irrigation etc, dans des régions où les sources d'énergie conventionnelles sont rares et coûteuses. [...] de tels travaux ne rentrent pas dans le cadre des activités d'Électricité de France. » [8].

Si aucun programme de recherche sur le solaire n'a vu le jour au sein d'EDF, Remenieras entretient cependant, au plus tard à partir de 1955, des liens avec les acteurs français du solaire, sur des applications métropolitaines (Trombe au LES, Aigrain au Laboratoire de physique des solides (cf 9.1.4)) mais aussi Outre-Mer (Masson à l'Université d'Alger et De Virel avec l'Université d'Alger dont l'histoire sera évoquée en sous-section 9.2.3). Il entend ainsi, d'une part, effectuer une veille technologique nationale au cas où des solutions intéressantes pour EDF verraient le jour, considérant que les « progrès réalisés » dans les « applications de faible puissance de l'énergie solaire » pourraient à terme être « utilisés dans divers domaines, et en particulier, dans celui des grandes centrales héliothermiques » [9] ; mais il est aussi appelé à donner des conseils sur la production thermique d'électricité et le génie énergétique en général. Ceci est certainement lié au fait que Remenieras fait partie, au moins à partir de 1957, d'un « groupe de travail » « énergie

6. Archives EDF, 852756, p.d., « Quelques remarques sur le projet de centrale solaire de M. Hosni Badaoui », 29/07/1955.

7. Archives EDF, 852752, p.d., Remenieras, Corrections au compte-rendu de la séance du 21 septembre 1966 de l'AFEDES consacrée aux moteurs solaires, 21/09/1966.

8. Archives EDF, 852756, p.d., Remenieras, « Introduction à l'étude de l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'énergie électrique », 06/1957.

9. Archives EDF, 852752, p.d., Remenieras, Corrections au compte-rendu de la séance du 21 septembre 1966 de l'AFEDES consacrée aux moteurs solaires, 21/09/1966.

solaire à bas potentiel » au Conseil supérieur de la recherche scientifique et du progrès technique [10], qui, créé en 1954, a précédé la DGRST, puis du Comité de conversion des énergies de la DGRST, un de ses neuf Comités d'action [11] qui prend en considération les convertisseurs solaires. Remenieras est donc un des spécialistes de l'énergie solaire au Comité de conversion des énergies, et pas seulement sur la question de l'électricité. Il est aussi en lien avec des acteurs internationaux, et devient membre de la Solar energy society, nouveau nom de l'Association for applied solar energy [12], qui organise un congrès international en 1956. Enfin, en 1966, dès la création de l'Association française pour l'étude et le développement de l'énergie solaire (AFEDES), qui avait pour but de fédérer les recherches françaises sur l'énergie solaire, Remenieras en est nommé membre, considérant que « l'Électricité de France peut apporter aux héliothermiciens l'appui de son expérience dans les techniques de la production thermique de l'électricité et de l'économie de l'énergie en général » (AFEDES, 1968). C'est ainsi qu'à plusieurs reprises, Remenieras est sollicité pour donner son avis sur divers projets d'exploitation de l'énergie solaire, en particulier pour des applications dans les territoires d'Outre-mer. En 1955, il produit un rapport, à la demande du CNRS, sur un projet de centrale solaire au Sahara, porté par Hosni Badaoui, projet à propos duquel il donne un avis négatif en raison d'un prix jugé trop élevé du kWh produit [13]. En 1956, à la demande du directeur du Laboratoire de génie civil de l'Université de Lisbonne Manuel Rocha, il donne une conférence au sur « l'état actuel du problème de la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique » [14]. En 1962, il est sollicité par De Virel pour la mise au point de pompes pour la Haute Volta — et conseille de s'adresser plutôt à Masson à Dakar ; De Virel parvient finalement à collaborer avec Perrot (cf sous-section 9.2.3). Lors de la construction du four solaire d'Odeillo par le CNRS, le service des Études et recherches d'EDF refuse la maîtrise d'œuvre de l'installation, mais « suit cette réalisation avec intérêt et [est] disposée à donner, éventuellement, ses points de vue » (cf 9.1.4) [15].

Ainsi, EDF a gardé un intérêt soutenu, mais n'a fait preuve d'aucun soutien actif, pour les recherches sur l'énergie solaire, considérant que la production en grand d'électricité, pour possible qu'elle soit, ne serait rentable que dans un avenir lointain.

10. Remenieras y faisait aussi partie de deux autres groupes de travail : « pluie artificielle », « stockage de l'énergie ».
Archives EDF, 852757, p.d., Titres et fonctions de Gaston Remenieras, 01/1957.

11. En 1961 furent institués, auprès de la DGRST, outre le Comité de conversion des énergies, les Comités d'actions suivants : « analyse démographique, économique et sociale » ; « applications de la génétique » ; « biologie moléculaire », « cancer et leucémies », « exploitation des océans », « fonctions et maladies du cerveau », « nutrition animale et humaine », « science économique et problèmes de développement » (*Journal officiel de la République française*, 10 mars 1961.).

12. Ce groupement américain d'« industriels, financiers et chercheurs » avait pour but de structurer la recherche américaine sur l'énergie solaire (Teissier, 2015, p. 199).

13. Archives EDF, 852756, p.d., Remenieras, « Quelques remarques sur le projet de centrale solaire de M. Hosni Badaoui », 29/07/1955.

14. Archives EDF, 852758, p.d., Lettre de de Rocha à Remenieras, 28/11/1956.

15. Félix Trombe en 1961, cité par Pehlivanian, (2014, p. 81)

Par ailleurs, EDF ne s'intéresse quasiment pas à l'énergie de la houle, mis à part un brevet pris par Jean Valembois, chef de la division recherches au Laboratoire national d'hydraulique d'EDF, en 1952. Valembois, qui a étudié la question au moins de loin, affirme en effet qu'en raison de son intermittence, de sa faible concentration et du coût des ouvrages à envisager, « l'on n'utilisera la houle que dans des cas très particuliers, lorsqu'il ne sera pas possible de trouver d'autres sources d'énergie, que les besoins seront réduits et le site exceptionnellement favorable, la houle y étant régulière et la côte appropriée à la construction d'ouvrages (Jean VALEMBOIS, 1957) ». Ceci ne ne l'empêche pas de prendre des brevets, en 1952, en France et aux États-Unis, « si l'on doit un jour construire une usine animée par l'énergie de la houle », c'est-à-dire pour le cas où un marché potentiel apparaîtrait dans le monde.

C'est aussi une des raisons pour lesquelles EDF contribue aux travaux français sur l'énergie thermique des mers, malgré le fait que cette source d'énergie ne concerne pas le territoire métropolitain. Par le biais de l'IGUFE, EDF participe en effet à différentes sociétés d'économie mixte dans les Territoires d'Outre-mer pour des projets de centrales électriques. L'entreprise n'est cependant pas moteur dans cette dynamique et elle répond davantage à « une exigence imposée par le pouvoir au nom de l'héritage, d'intérêts économiques et politiques ainsi que, accessoirement, du devoir d'aide au développement des populations indigènes » (VARASCHIN, 2002, p. 389). Ainsi, l'IGUFE est financée, non par EDF, mais par le ministère de la France d'Outre-mer, par le biais du FIDES, dans le but de « repousser les ingérences extérieures », c'est-à-dire d'assurer une maîtrise française du développement des infrastructures énergétiques (VARASCHIN, 2002, p. 393). EDF participe ainsi, en 1948, à la création de la société d'économie mixte L'énergie des mers. Il s'agit en effet de concevoir et construire des centrales maréthermiques produisant, entre autres, de grandes puissances électriques (cf 9.2.1). Nizery, le directeur général de L'énergie des mers, est par ailleurs, depuis 1946, chef du Service des études et recherches hydrauliques d'EDF (BARBIER, 2000). Mais l'action d'EDF dans les projets de la société L'énergie des mers est une réponse aux ambitions du ministère de la France d'Outre-mer plus que le résultat d'un intérêt propre d'EDF pour l'énergie thermique des mers.

Enfin, l'utilisation de l'énergie géothermique est abordée dans l'entreprise publique, puisqu'un rapport en son nom est publié à ce sujet en 1966 [16]. Celui-ci conclut que la géothermie haute énergie [17] est la seule potentiellement intéressante car elle peut concurrencer le prix du pétrole. Or, selon le rapport, seuls certains sites d'Outre-mer s'y prêtent, mais aucun en métropole, où seules sont disponibles des nappes à basse température dont le coût d'installation serait supérieur à celui des centrales thermiques classiques. La Société

16. AN 1994 0148/1, p.d., Comité géothermie, Rapport du groupe de travail réuni le 25/09/1973.
17. Utilisant l'eau des nappes aquifères dont la température est supérieure à 150°C, pour la production d'électricité.

Eurafrep poursuit des études sur le site de Bouillante en Guadeloupe à la fin des années 1960 et au début des années 1970 pour l'implantation d'une centrale productrice d'électricité, auxquelles EDF a peut-être participé, selon le même modèle qu'avec la société L'énergie des mers.

Ainsi, les deux énergies naturelles pour lesquelles EDF a été véritablement moteur de recherches sont l'énergie des marées et l'énergie éolienne dont il est maintenant question.

### 9.1.2 Des centrales marémotrices pour le réseau électrique. EDF et industriels de l'énergétique (1946-1966)

À la création d'EDF, la SEUM est absorbée au sein du service des Études et recherches, dirigé par Ailleret, en un service de même sigle : le Service d'études pour l'utilisation des marées, sous la direction de Louis Vantroys, ingénieur hydrographe en chef de la Marine. Gibrat, inquiété par la justice pour des raisons de collaboration, devient tout de même ingénieur-conseil auprès d'EDF pour les usines marémotrices. Le CTEM continue d'exister et poursuit son rôle d'organisme étatique suivant de près les travaux du SEUM. À partir de 1954, la construction de l'usine marémotrice de la Rance ayant été décidée, le SEUM dépend à la fois du Service des études et recherches et de la direction de l'Équipement [18].

René Bonnefille et Michel Banal, acteurs de cette histoire [19], ont relaté les travaux sur les usines marémotrices menés par EDF entre 1946 et 1966 (Bonnefille, 1976b ; Banal, 1996, p. 143-155 ; Banal, 1997). Dans ce paragraphe, je reprends de nombreux éléments factuels à ces deux auteurs, sans rentrer dans les détails technique (je me réfère aux deux auteurs pour ces questions) et en gardant à l'esprit la caractère situé de leur propos. Ils écrivent en effet ces articles à deux périodes de l'histoire (années 1970 et fin des années 1990) où les énergies renouvelables sont valorisées en France et à l'international, et ont tout intérêt à donner un récit valorisant pour EDF (pour ne pas dire hagiographique). Comme on le verra, ils ont par exemple gommé la remise en question de projets marémoteurs par certains acteurs ainsi que la stratégie opérée sciemment par EDF et le ministère de l'Industrie pour canaliser cette critique. J'utilise également l'article de Naegel, (2014), qui a relevé des contestations dans le projet d'usine marémotrice de la Rance, la menace qu'a représentée la concurrence du charbon et du pétrole vers 1959 pour la réalisation de ce projet, ainsi que l'implication des acteurs locaux (Chambre de commerce et d'Industrie, commune de Saint-Servan).

18. AN 1991 0305/7, p.d., Note de la direction générale d'EDF, 13/05/1954.

19. Bonnefille a commencé sa carrière à EDF par une thèse sur le modèle hydraulique des îles Chausey, soutenue en 1968. Michel Banal est devenu vice-directeur des Études et recherches d'EDF dans les années 1950 (International association of hydraulic engineering and research, 2009, p. 899).

Dans la continuité des travaux de guerre, deux projets sont étudiés par le SEUM entre 1946 et 1966 : l'usine marémotrice de la Rance et celle du Mont-Saint-Michel, la première étant considérée comme station d'essai à l'échelle industrielle précédent la seconde.

Pour la Rance, les études de cycle sont poursuivies par le SEUM, et les expériences sur modèle réduit continuées au Laboratoire dauphinois d'hydraulique par les ingénieurs de NBPP, devenue Neyrpic en 1948. La construction à Saint-Servan (au niveau de l'usine projetée) d'un autre modèle réduit est ensuite confiée au nouveau Laboratoire national d'hydraulique de Chatou [20] en 1954, afin de mettre au point les opérations de coupure de l'estuaire, mais aussi pour des études sur la corrosion des métaux par l'eau de mer par un « Groupe corrosion » [21]. Plusieurs groupes bulbes mis au point par des constructeurs comme Neyrpic, Jeumont et Alsthom [22] sont expérimentés par EDF, d'abord sur des moyennes chutes en rivière, puis en mer, au niveau d'une écluse désaffectée de Saint-Malo. Finalement, c'est un modèle de Neyrpic qui est choisi, entreprise qui collabore avec ses concurrents initiaux [23] pour la construction des groupes. En 1952, EDF présente un projet d'usine marémotrice avec demande de concession ; celle-ci est accordée en 1956. Un appel d'offre est lancé en 1955 pour la construction de l'usine, que gagne le consortium nommé Tramarance [24]. L'exécution de l'usine marémotrice de la Rance est alors intégrée dans le deuxième Plan de modernisation et d'équipement, pour un coût de trente-deux milliards de francs.
La construction de l'usine, dont la conception change plusieurs fois de forme depuis la demande de concession [25], a lieu entre 1961 et 1966, date où le général de Gaulle inaugure l'usine marémotrice de la Rance — avant d'exprimer en privé, comme on aime souvent à le raconter, son scepticisme vis-à-vis de l'installation. L'usine finale est munie d'un barrage de 750 m entre la pointe de la Brebis et la pointe du Briantais, qui sert également de pont routier (Naegel, 2014). Elle est à double effet, munie de 24 groupes bulbes d'une puissance de 10 MW (totalisant, donc, 240 MW de puissance installée), et fonctionnant en turbine et en pompe pour la régularisation du cycle. Mise en service en 1967, elle délivre de l'énergie au même prix qu'une centrale hydro-électrique classique.

Le projet d'usine marémotrice du Mont-Saint-Michel fait également l'objet d'études

20. Construit à la fin des années 1940, celui-ci était dirigé par André Nizery.
21. Celui-ci était constitué de représentants du SEUM, de la Région d'équipement n°8, de la Production hydraulique , et Laboratoire central de la production thermique, du Service de la construction du matériel et des Études et recherches de GDF.
22. AN 1991 0305/7, p.d., Comité consultatif des usines marémotrices, Procès-verbal de la réunion du 09-10/09/1955.
23. Jeumont et Alsthom, mais aussi Forges et ateliers du Creusot, Matériel électrique SW (Mauboussin, 1970, p. 214)
24. Celui-ci est composé des entreprises Société générale d'entreprises, Fougerolles, Campenon-Bernard, Les entreprises de grands travaux hydrauliques La Société française d'entreprises de grands dragages et de travaux publics (Mauboussin, 1970, p. 214).
25. Un article de Francis Auroy, directeur de la région d'Équipement n°8, donne les formes successives du projet depuis l'autorisation de concession jusqu'en 1957 (Auroy, 1957).

poussées, et de nombreuses propositions de projets, quoiqu'aucun d'entre eux ne soit finalement privilégié par le SEUM. Je souligne que, à l'inverse de ce qu'évoque Bonnefille, (1976b), en bon défenseur du projet, celui-ci a été rebaptisé « projet des Îles Chausey », pour ne pas émouvoir des détracteurs sensibles à la défiguration du paysage qui ne manquèrent pas de se manifester (cf 7.3). Sont donc réalisés, dans l'optique d'une construction à moyen terme, les travaux suivants :

— études océanographiques : mesures de courant par le Service hydrographique de la Marine (1953 ; 1957-1959) ; mesures des marées par le SEUM (1957-1959) ; mesures de la houle par le SEUM (1949-1952 ; 1959) et par le Laboratoire national d'hydraulique (1956-1960) ; mesures du vent [26] ;
— études hydrauliques : expériences sur modèles réduits des interférences entre la houle et l'usine par la SOGREAH (filiale de Neyrpic) (1953-1956) ; expériences sur l'influence de l'usine projetée sur le régime des marées, notamment sur la force de Coriolis qui, à l'échelle de l'usine envisagée, n'est pas négligeable ! Construction de plusieurs modèles réduits de la Manche par le « Pool Coriolis » [27] ;
— études géologiques : mesures bathymétriques par le SEUM (1957-1958) ; mesures géophysiques par la Compagnie générale de géophysique (1952-1953) ; mesures géologiques par le SEUM à l'aide d'un géologue-conseil (1955-1959) ;
— recherches d'emplacements possibles par les Carrières de l'Ouest ;
— études sédimentologiques.

Bonnefille, (1976b) donne une liste d'au moins dix-huit projets proposés par le SEUM et des groupements privés, comme SGE-Fougerolles (choisie pour la construction de l'usine de la Rance) ou Grands Travaux de Marseille, pour la construction de cette usine. Il est frappant qu'au fil des ans, ces projets deviennent de plus en plus ambitieux en termes de puissance installée. Le premier projet proposé au SEUM par L'énergie des marées en 1942 prévoyait ainsi une puissance installée de trois gigawatts ; en 1956, le projet du SEUM ambitionne une puissance installée de dix gigawatts. Il s'agit à chaque fois d'une part considérable de la consommation totale d'électricité en France, montrant qu'il s'agissait là, plus que de la réponse à une pénurie, d'une politique de croissance énergétique : en 1942, le projet Caquot aurait représenté la moitié [28] de cette consommation ; en 1956, celui du SEUM en aurait totalisé les deux tiers [29]. Le premier enjeu de ces installations marémotrices est en effet de répondre à une demande d'énergie supposée être

26. Peut-être par le service des Phares et balises, qui y effectuait alors des relevés de l'énergie éolienne pour le CTEV (cf 9.1.3).

27. Celui-ci était constitué de représentants du SEUM, de la faculté des sciences de Grenoble, du service hydrographique de la Marine, du Laboratoire d'Océanographie physique du Muséum d'histoire naturelle, de la SOGREAH. Bonnefille en faisait partie. Un modèle tournant de 14 m de diamètre fut ainsi construit et expérimenté entre 1957 et 1964.

28. Une dizaine de TWh/an (Bonnefille, 1976b, p. 130), sur une consommation totale d'environ 20 TWh/an(Janin, 1996, p. 366).

29. Environ 30TWh sur un total d'environ 50 TWh (Janin, 1996, p. 366).

multipliée par deux tous les dix ans, phénomène dit « loi Ailleret » (du nom, bien-sûr, de Pierre Ailleret, qui a formulé cette loi). Avec le projet du Mont-Saint-Michel, l'idée est de satisfaire ces objectifs tout en faisant des économies d'échelle. La logique espérée est celle d'un coût du kWh baissant avec la taille des installations [30]. Le réseau électrique interconnecté rend en outre envisageable le déversement de quantités d'énergie variables en si grande quantité. Selon de Rouville, ancien acteur de la Commiission de la houille bleue et témoin de quarante années d'efforts pour la mise en place de stations marémotrices, c'est bien l'existence de ce réseau interconnecté qui rend possible ce qui n'avait pas été réussi dans l'entre-deux-guerres, ce réseau permettant en quelque sorte de civiliser l'énergie des marées. Il affirme ainsi en 1957 que

> « Le temps des réalisations ne pouvait guère venir avant que soit créé un réseau interconnecté comme celui que nous commençons de posséder en France et que nous n'avions pas il y a trente ans ; le problème de régularisation de l'énergie sauvage de la marée ou plutôt de son adaptation à la demande s'atténue ainsi ; et le défaut de souplesse de cette production irrégulière a cessé d'être un cauchemar pour engendrer au contraire un art véritable de l'orchestration des cycles (De Rouville, 1957, p. 802) ».

Quelle que soit la forme du projet, le barrage envisagé mesure au total une trentaine de kilomètres, la durée des travaux est évaluée à quinze ans et l'investissement nécessaire à plusieurs centaines de milliards de francs (De Rouville, 1957). L'ampleur de ces travaux n'échappe pas aux ingénieurs d'EDF. Ceux-ci considérèrent cependant, au début des années 1960, la faisabilité technique du procédé comme acquise [31]. Leurs incertitudes concernent principalement l'avantage économique du procédé, étant donné la durée des travaux et la possibilité qu'à moyen terme l'électricité nucléaire devienne un moyen moins coûteux de produire de l'énergie à grande échelle.

Des oppositions à l'aménagement ont été considérées par les ingénieurs d'EDF et du CTEM comme un obstacle possible à la réalisation du projet. L'étude de ces oppositions n'a pas fait partie de mon travail, aussi ne connais-je leurs acteurs potentiels et leur teneur que par la manière dont les ingénieurs du SEUM ont cherché à les contourner. Ces oppositions sont d'ordre esthétique et économique (pour le tourisme) [32]. La stratégie de contournement passe par un jeu sémantique de dissimulation de ce que l'aménagement

30. La puissance installée est effectivement proportionnelle à la surface du bassin de rétention, tandis que le coût de l'installation est fonction de la longueur du barrage envisagé, et il était espéré que cela se répercute positivement sur le coût du kWh installé.

31. Archives EDF, 890463, p.d., « Récapitulation des études relatives au projet d'usine marémotrice de Chausey effectués par le SEUM et la REH8 », 31/12/1964.

32. Il a certainement existé d'autres oppositions dont je n'ai pas connaissance car les protagonistes de l'aménagement du Mont-Saint-Michel ne les ont pas considérées comme une entrave à la réalisation du projet.

était réellement et par des discours d'euphémisation ses conséquences. Pour le premier, c'est le nom d'Îles Chausey donné au projet à la place de celui de Mont-Saint-Michel qui devait masquer la réalité topographique de l'aménagement. Pour les seconds, ils consistent essentiellement à affirmer que la digue de retenue sera peu visible depuis le Mont, négligeant par ailleurs toutes les modifications engendrées par la retenue d'eau dans un sens ou dans l'autre. Ainsi, en 1950, un rapport du SEUM affirme explicitement que « [p]our réduire le risque d'opposition au projet s'appuyant sur la conservation du site du Mont-Saint-Michel, qui est un point névralgique pour l'opinion française », il serait commode de « ne retenir que le nom des Îles Chausey pour dénommer l'emplacement intéressé ». Il justifie ensuite cette terminologie qui serait « plus conforme d'ailleurs à la réalité topographique » et tente d'anéantir le bien-fondé des craintes d'ordre esthétique en affirmant que « l'aménagement prévu n'attente en rien à la situation actuelle du Mont et à son insularité [...] la vue des digues à partir de celui-ci devant être à peine perceptible » [33]. En 1964, un rapport d'EDF répète cet argument de l'invisibilité de la digue, qui « serait à 20 kilomètres du Mont » : ainsi, selon lui, « la courbure de la terre et le manque de netteté des horizons lointains suffisent pour qu'à cette distance la ligne de la digue ne puisse pas se distinguer d'un horizon naturel, en tout cas pas de la base du Mont, rarement même de son sommet. » [34]. Il était sans doute espéré que la répétition de cette proposition et de cet argument parviennent à persuader les opposants de l'ineptie de leur position. La proposition de de Rouville à ce sujet est presque amusante : sans argumenter, il affirme que « [l]'impression qu'on vient chercher au Mont-Saint-Michel n'en sera pas altérée », mais « qu'il faudra longuement le répéter et le prouver pour écarter une obstruction de ce chef » (De Rouville, 1957, p. 793). C'est la vertu de la répétition qui devait rendre cette proposition vraie ! Il semble que ces stratégies n'aient pas suffi à convaincre les détracteurs du projet, comme Devaux, déjà cité en 7.3, qui refuse le nouveau nom donné à l'aménagement, et soutient que « le danger esthétique, en réalité, [...] est dans la submersion permanente des « prés salés » et de ces espaces immenses, eau et sable mêlés, qui donnent leurs caractéristiques aux paysages du Mont-Saint-Michel » (Pierre Devaux, 1949d, p. 115).

Au cours de la période, les propriétaires de moulins à marées de la vallée de la Rance sont dépossédés de leurs installations par la déclaration d'utilité publique pour le projet d'usine marémotrice. Mais le témoignage, sur une émission de France Culture, d'un de ce meuniers montre qu'il était lui-même convaincu par l'injonction à la modernité amenant le réseau électrique au niveau de son exploitation (Chaumel et Cassar, 2016). Il est possible qu'il n'y ait pas eu, de la part de ces riverains, d'oppositions soutenues.

33. AN 1977 0614/6, p.d., SEUM, Rapport sur l'état actuel du projet du Mont-Saint-Michel, Février 1950, p. 8.

34. citeEDF, « Récapitulation des études relatives au projet d'usine marémotrice de Chausey effectués par le SEUM et la REH8 », 31/12/1964

Au début des années 1960, c'est l'argument économique qui est fatal à l'issue du projet d'usine marémotrice du Mont-Saint-Michel. La nouvelle politique énergétique d'ouverture au pétrole et d'investissements dans le nucléaire sont en effet été détermiNantes, pour l'abandon de l'énergie des marées en général, dans les programmes d'installations énergétiques. Ainsi, d'après Paul Naegel, un rapport EDF explicite alors clairement que la position du ministre de l'Industrie est alors passée de l'ambition « d'obtenir du site de la Rance le maximum raisonnable d'énergie, le prix de revient de celle-ci n'étant pas un critère essentiel » à celle de « produire quelques kilowattheures de moins à condition que les autres soient moins coûteux (Naegel, 2014, p. 97) ». Selon le même auteur, des hésitations ministérielles en 1959 ont même failli annuler la construction de l'usine marémotrice de la Rance. Le projet n'a alors dû sa poursuite qu'à une manipulation des chiffres du coût du kWh [35], mais aussi à une relative indépendance d'EDF vis-à-vis des pouvoirs politiques. Quant à l'usine du Mont-Saint-Michel, un rapport d'EDF de 1964 remet en question l'avantage économique de l'installation, et l'idée même d'économies d'échelles rendues possibles par la taille de l'usine [36]. C'est donc, comme l'affirme Michel Banal, « en raison des promesses de l'énergie nucléaire », mais aussi de l'immédiateté de la baisse du coût mondial du pétrole, que le projet de l'usine du Mont-Saint-Michel est abandonné en 1966, en même temps que tous les travaux d'EDF sur les usines marémotrices.

Un autre enjeu que la contribution à l'approvisionnement énergétique de la France est très probablement, à nouveau, le prestige d'être la première nation à mettre au point une technologie encore jamais mise en application, et, peut-être, l'avantage économique de potentielles ventes à l'international. Une fierté à faire de la France la « pionnière » dans un domaine intéressant le monde entier est clairement exprimée de façon récurrente. C'est par exemple le cas dans cette allocution de A. Genthial, président de la Société hydrotechnique de France, lors de l'ouverture des quatrièmes Journées de l'hydraulique consacrées aux énergies de la mer devant un public international :

> « nous avons pu nous rendre compte que, du fait du prochain démarrage de la Rance, la France se trouve en tête de toutes les nations dans ce domaine de l'utilisation des marées. Il y a là, certes, pour les Français, un motif de fierté, mais aussi un motif de sécurité au moment où, dans le monde entier, on s'interroge sur la possibilité de faire face à l'accroissement des demandes d'énergie au cours des prochaines années [...] et ceci uniquement pour mainte-

35. En prenant en considération l'utilisation connexe du barrage comme pont et en déduisant du coût total le coût de celui-ci, estimé à 10 millions de francs sur 395 millions de francs.

36. Des études économiques effectuées par SGE-Fougerolles et GTM permettraient ainsi d'affirmer que le prix proportionnellement inférieur du barrage par rapport à l'usine de la Rance peut être largement compensé par les intérêts des prêts nécessaires pour une durée de quinze ans, et par la réduction du marnage, et donc de l'énergie exploitable, due à la perturbation du barrage sur le régime des marées. Archives EDF, 890463, p.d., « Récapitulation des études relatives au projet d'usine marémotrice de Chausey effectués par le SEUM et la REH8 », 31/12/1964.

> nir et développer d'une façon rationnelle le standard de vie dans les pays de l'Occident et aussi, comme cela, nous le sentons de plus en plus, pour faire progresser le standard de vie des pays sous-développés » (Genthial, 1957, p. 19)

Cette citation révèle une globalisation de la civilisation industrielle, ainsi que la rhétorique du développement dans les pays « sous-développés », où la technologie des usines marémotrices permettrait d'augmenter le « standard de vie » de leurs habitants en une œuvre de bienfaisance universelle, . Il semble cependant que les seuls pays industrialisés, munis d'un réseau électrique interconnecté, aient été la cible du marché mondial des usines marémotrices. Ainsi, le rapport rédigé suite au colloque « Sources nouvelles d'énergie et développement économique », où Gibrat figure comme spécialiste de l'énergie des marées, mentionne que « les installations marémotrices à production intermittente peuvent être exploitées avec efficacité dans un pays possédant un réseau interconnecté », mais qu'on est « encore loin » de la réalisation de « petites usines marémotrices » qui présenteraient pourtant « un grand intérêt pour les régions sous-développées » (Nations-Unies, département des affaires économiques et sociales, 1957, p. 11-12). Pourtant, Gibrat lui-même affirme, dans son rapport, que « de faibles crédits suffiraient » pour ces installations (Nations-Unies, département des affaires économiques et sociales, 1957, p. 85).

Plusieurs signes montrent que les recherches françaises de cette période sont effectivement importantes sur le plan international. Ainsi, dans le rapport commandité par l'ONU en 1957 sur les nouvelles sources d'énergie, la partie sur l'énergie des marées est rédigée par Gibrat, ainsi reconnu spécialiste mondial de la question (Nations-Unies, département des affaires économiques et sociales, 1957, p. 72-85). En outre, le premier colloque international consacré aux énergies de la mer, où sont abordées les énergie marémotrice, maréthermique et houlomotrice, est organisé à Paris par la Société hydrotechnique de France dans le cadre des quatrièmes Journées de l'hydraulique [37].

Vis-à-vis de l'organisation de la recherche et de la maîtrise de la ressource énergétique, EDF est en situation de monopole, comme c'était le cas pour la SEUM pendant la guerre. Corrélativement, les initiatives externes à EDF sont inhibées ainsi que la place des inventeurs. Cette citation de de Rouville, en 1956, aux Journées de l'hydraulique, montre le mépris de cet ancien de la Commiission de la houille bleue pour une période où, selon lui, trop de place était accordée aux inventeurs :

« Vous dire le nombre d'inventeurs déchaînés par les appels et la propagande de la

37. Je signale aussi la forte représentation de chercheurs français dans les travaux présentés, qui peut être un indicateur de leur importance d'un point de vue international, indicateur cependant biaisé par le fait que ces chercheurs sont aussi organisateurs. Y sont ainsi présents trois cent participants, dont cinquante étrangers, et sur trente-trois rapports, trente-et-un sont français.

presse qui ont défilé devant la Commission et plus encore devant notre premier crible, ce serait évoquer assez vainement une époque qui paraît aujourd'hui plus puérile que légendaire. [...] Tout ce passé — j'allais dire ce fatras — est largement périmé, dépassé, depuis que la SEUM et le SEUM d'abord, la direction des recherches d'EDF ensuite (avec votre président à la tête) a pris en main le problème avec tout le sérieux qu'on peut en attendre et qui est nécessaire dans cette technique trop longtemps empreinte de poésie et de fantaisie » (De Rouville, 1957, p. 785).

Ainsi, d'une part, il est impossible pour un inventeur ou un groupement privé de mener à bien un projet sans passer par le SEUM, de la même manière que, comme l'avait souhaité Bichelonne pendant la guerre, toutes les initiatives privées devaient, pour espérer obtenir une quelconque réalisation, être absorbées dans la SEUM. En outre, le CTEM et le SEUM ont eu tendance à ignorer ou rejeter tous les projets qui leur étaient envoyés. Dans les publications et archives que j'ai consultées, les seuls projets extérieurs à EDF pris au sérieux par le CTEM et la SEUM concernent l'aménagement du Mont-Saint-Michel, seul site, excepté la Rance, retenu par EDF pour un aménagement marémoteur à moyen terme. Ceux-ci émanent en outre de grandes entreprises du génie civil ou de l'énergétique [38].

C'est ainsi que François Baudot, « ingénieur du génie civil », et « ex directeur technique des ateliers Blériot, aéronautique, à Paris » [39], voit son projet d'aménagement de la Loire refusé à deux reprises. Son projet « Napana » (Nantes-Paimboeuf-Saint-Nazaire ») ambitionne l'aménagement de la Loire en trois tranches d'usines marémotrices, réparties entre la canal de la Martinière et Saint-Nazaire (voir Annexe L, Figure L.1). Pour un coût de cinq millions de francs, Baudot envisage, outre la production annuelle de vingt millions de kilowattheures, de faire de l'estuaire de la Loire un « grand port Ouest-européen capable de recevoir des navires du plus fort tonnage et desservir par des voies ferrées électrifiées » [40], et même « le plus grand port « moderne » du monde » (voir vue d'artiste du port en Annexe L, Figure L.2), et ce, grâce à l'électricité qui serait à la portée de tous et qui permettrait la floraison d'une activité industrielle (notamment, extraction de sable et de tourbe) [41]. Baudot a entrepris un important travail de communication (brochures : voir Annexe L, conférences, article de journal (Ouest-France, 1947)) et cherché à obtenir tous les soutiens politiques possibles pour son projet. C'est ainsi qu'en 1947, il écrit au président de la République Vincent Auriol en personne pour lui demander que ses travaux soient reconnus d'utilité publique et pris en considération par le ministère des Travaux

38. Dans la liste donnée par Bonnefille, les projets mentionnés émanent, outre d'EDF, de : la société L'énergie des mers, qui fait figure d'exception (quoique le personnage de Caquot qui y était associé ne soit pas un inventeur sorti de nulle part) ; SGE-Fougerolles ; Grands travaux de Marseille ; Jean Velut qui, d'après les brevets pris à son nom au moment du dépôt des projets, était associé à la SGE et à Neyrpic (Bonnefille, 1976b).

39. AN 1977 0605/5, p.d.

40. AN 1977 0605/5, p.d., Lettre de Baudot au ministre de l'Industrie et du commerce, 14/04/1949.

41. AN 1977 0605/5, p.d., Brochure « La houille bleue et fluviale à Nantes et en Basse-Loire », 1950.

publics ou celui de l'Industrie. En 1948, il organise une réunion à la mairie de Nantes où il invite des personnalités politiques et des ingénieurs des services techniques locaux [42], mais aussi le ministre de l'Industrie (qui n'a probablement pas répondu à l'invitation). Baudot a retenu l'attention et le soutien plusieurs institutions locales : la municipalité de Nantes [43], dont le maire envoie au ministre de l'Industrie une lettre de soutien au projet de Baudot, ainsi qu'au moins deux députés [44]. Mais cela ne suffit pas, et l'ingénieur en chef du Service central de l'Électricité, d'abord missionné par Auriol, en 1947, pour étudier la proposition de Baudot, lui donne un avis négatif. L'argument principal de cet ingénieur est le « classement par ordre d'intérêt des divers emplacements d'usines marémotrices » effectué par le SEUM, qui n'estime pas l'estuaire de la Loire comme un emplacement prioritaire [45]. Baudot ne se décourage pas et relance le ministre de l'Industrie au moins à deux reprises [46], mais ces demandes ne connaissent pas davantage de suites. Bricard, membre du CTEM et ingénieur en chef du Génie maritime, lui reproche, en plus de l'exagération des chiffres à l'avantage du projet, que l'estuaire de la Loire est un site moins intéressant que celui de la Rance [47].

Sur la période (1946-1970), la situation de monopole de l'État vis-à-vis de l'énergie marémotrice se renforce donc, avec une expansion administrative ainsi que la concentration des moyens dans une seule entreprise publique, EDF, en lien fort avec le ministère de l'Industrie. Celui-ci, par le biais du CTEM, filtre et empêche les initiatives émanant d'acteurs autres que les grandes entreprises du secteur de l'électricité ou les ingénieurs des grands corps de l'État. À la suite de Naegel, (2014), on peut aussi souligner la relative autonomie d'EDF vis-à-vis de sa tutelle, le ministère de l'Industrie, et souligner que le CTEM n'a eu qu'un rôle consultatif dans les projets d'usines marémotrices. EDF se fait maître d'ouvrage des projets, pour lesquels elle sous-traite certaines parties à des industriels du secteur, qu'elle met en concurrence ou contraint à s'associer, tels Neyrpic et la Compagnie électro-mécanique. D'un point de vue matériel, les ramifications et l'allongement du réseau électrique permettent d'atténuer les irrégularités qui, étant prévisibles, deviennent acceptables pour des projets même gigantesques tel que ceux qui visent à aménager le Mont-Saint-Michel. Ceux-ci relèvent d'une *hybris* technologique que seul le paramètre économique semble avoir bridé, ainsi que, peut-être, les contestations locales. Dans les

42. Les députés et conseillers de Loire inférieure, les maires de Nantes, Saint-Nazaire, Frossay et Paimboeuf, les présidents des CCI de Nantes et Saint-Nazaire, le directeur d'EDF de Nantes, les représentants de la marine, les industriels utilisateurs, les ingénieurs des Ponts et chaussées de la ville.

43. Une commission composée du Conseiller municipal, Brunellière, de l'Union maritime de Basse-Loire, Aubin, est ainsi venue visiter avec Baudot les lieux de l'usine projetée, suite à quoi Baudot est invité à « exposer ses plans et ses projets devant les membres du Conseil municipal » (Ouest-France, 1947).

44. AN 1991 0305/5, p.d., Lettre de Baudot au ministre de l'Industrie, 27/04/1949.

45. AN 1977 0614/6, p.d., Avis de l'ingénieur en chef du Service central de l'électricité sur le projet d'utilisation de la « houille bleue et fluviale » à Nantes Paimboeuf Saint-Nazaire, 09/10/1947.

46. AN 1991 0305/5, p.d., Lettres de Baudot au ministre de l'Industrie, 27/04/1949 ; 16/01/1950.

47. AN 1991 0305/5, p.d., Rapport de Bricard à propos de la proposition de François Baudot, 15/01/1952.

années 1960, la concurrence économique du pétrole, du gaz et du nucléaire balaye tous les projets d'usines marémotrices, de manière définitive. Les marées ont ainsi fait l'objet de presque un demi-siècle d'études de la part des ingénieurs de l'administration publique et des grandes entreprises du secteur électrique, pour ne trouver qu'une réalisation, l'usine marémotrice de la Rance. Celle-ci a d'ailleurs bien failli ne pas exister, également à cause de cette conjoncture économique défavorable.

### 9.1.3 Des aérogénérateurs de petites et grandes puissances pour la signalisation maritime et le réseau interconnecté. EDF, service des Phares et balises, industriels et inventeurs (1946-1970')

Les travaux sur l'énergie du vent commencés pendant la guerre par Ailleret et Pétry sont poursuivis au sein de la Division énergie du vent, créée au sein du Service des études et recherches hydrauliques de la Direction des Études et recherches en 1946 et dirigée par André Argand, et du service des Phares et balises, autour du CTEV. L'intérêt commun entre Ailleret et Pétry est ainsi prolongé après-guerre : Ailleret, comme directeur des Études et recherches d'EDF qui cherche à évaluer l'intérêt de grands aérogénérateurs pour le réseau interconnecté, et Pétry pour le fonctionnement de son institution, en vue de la signalisation des phares.

#### 9.1.3.1 Le Comité technique de l'énergie des vents et la Division énergie du vent d'EDF. Cartographie des ressources et tentatives de coordination des recherches

Le CTEV se réunit peu en sessions plénières : une première fois en 1946, une seconde en 1949. Mais des réunions restreintes entre membres sur certains sujets ont également eu lieu : sur le jaugeage de l'énergie dans l'Union française (cf 9.2.2), et sur les petits aérogénérateurs pour l'utilisation dans les phares (cf 9.1.3.3). Ses membres sont en contact fréquent : travaux sur le jaugeage, et travaux sur les aérogénérateurs (cf Annexe H). C'est surtout pour ce premier sujet que le CTEV est actif, et en particulier Pétry, qui y joue un rôle central, non seulement en tant que secrétaire du CTEV, mais aussi qu'ingénieur en chef du service des Phares et balises.

Ainsi, pour EDF, selon Ailleret, il s'agit de mettre au clair si « cette source d'énergie ne pourrait pas être économiquement injectée sur les réseaux électriques » qui pourraient permettre de « pallier à l'extrême irrégularité du vent », et, plus précisément, de « savoir

si l'association d'aéromoteurs à un équipement hydraulique donne une solution plus économique, ou plus onéreuse qu'un équipement hydraulique » (Ailleret, 1948, p. 145). Ailleret considère donc toujours l'énergie éolienne comme une ressource potentiellement complémentaire de l'énergie hydraulique. Louis Serra, ingénieur à la Division énergie du vent, entrevoit un « aménagement intégral » des sources d'« énergie d'origine « naturelle » (vent et eau), grâce à une « répartition harmonieuse des centres de production d'énergie électrique [du] réseau national » : « usines hydrauliques en montagne, usines thermiques dans l'Est et le Nord, et pour les régions côtières : centrales éoliennes, sans oublier bien entendu les usines marémotrices »(Serra, 1953, p. 273-257). Le programme mené par la Division énergie du vent d'EDF vise donc à tirer au clair les deux éléments suivants : « préciser à quel coût par kilowatt installé et par mètre carré de surface offerte au vent peut arriver chacun des types d'aéromoteurs envisagés », et « savoir quelles sont les énergies les plus fortes par mètre carré et par an que la nature nous offre à la condition que nous sachions choisir les sites les plus favorables » (Ailleret, 1948, p. 145).

En marge de ce problème d'alimentation du réseau électrique, la Division énergie du vent s'intéresse ponctuellement à l'approvisionnement des îles isolées du réseau par des éoliennes de moyenne puissance. Cette question est corrélée, au CTEV, avec celles des aérogénérateurs de petites et moyennes puissances qui occupe le service des Phares et balises. Cependant, mis à part le projet d'implantation d'une éolienne danoise sur l'île de Molène à la fin des années 1940, qui ne s'est jamais réalisé (cf 9.1.3.3), il semble que ce sujet n'ait pas fait l'objet d'autres d'investigations par EDF.

Pour le service des Phares et balises, l'intérêt est dans l'évaluation des « [p]ossibilités de fourniture d'une certaine série d'aéromoteurs à courant continu à destination de phares divers et qui pourraient être d'un type standard convenant également à de petites installations privées, comme celles qui se multiplient en Tunisie depuis 1945 à l'aide d'aéromoteurs américains » [48]. En plus de l'alimentation des îles et des phares isolés, les petits aérogénérateurs sont donc associés, au CTEV, à un usage dans les territoires d'Outre-mer. Certains d'entre eux s'intéressent en effet à l'utilisation de l'énergie éolienne (cf 9.2.2).

La campagne de jaugeage de l'énergie éolienne amorcée pendant la guerre est ainsi poursuivie. À l'issue de la première réunion du CTEV d'avril 1946, il est décidé la création d'un réseau de stations de jaugeage de l'énergie éolienne, dont EDF centralisera les résultats. Les membres du CTEV émettent le souhait que « les renseignements fournis par les stations de jaugeage de la puissance du vent soient traduits sous la même forme que ceux fournis par les stations de jaugeage hydraulique exploitées par les circonscrip-

48. AN 1991 0305/2, 1941-1957, Refoubelet (directeur général de la SCAM), « Compte-rendu succinct de la réunion tenue le 06/07/1948 dans le bureau de M Pétry, directeur du service des Phares et balises », 06/07/1948.

tions électriques »[49], répondant ainsi à l'ambition d'EDF d'étudier la corrélation entre l'énergie hydraulique et l'énergie éolienne en France. En janvier 1947, à la demande du président du CTEV, une sous-commission est créée, spécifiquement dédiée au jaugeage[50], dans un souci de standardisation et de centralisation des mesures, de l'exécution à l'archivage des données. Elle est présidée par le président du Comité, et gérée par les ingénieurs des circonscriptions électriques[51]. Certains ingénieurs des Ponts et chaussées des services techniques de l'État estiment en effet que les mesures, et notamment le choix des emplacements de jaugeage, sont effectuées « un peu au juger » par Pétry et Ailleret, et craignent une « variété de méthodes de statistiques qui ira à l'encontre du vœu exprimé par le Comité »[52].

Ainsi, la campagne est continuée suivant les recommandations de standardisation préconisées par cette sous-commission. En 1946, 150 Ailleret sont commandés par le COEE, et mis progressivement en place en France métropolitaine[53]. Ils sont implantés en différents points où des installations existantes permettent de les placer en hauteur : postes de TSF, phares, pylônes de lignes de transport[54]. Les services techniques de l'État responsables de ces installations acceptent d'affecter une partie de leur personnel à effectuer un relevé, au mieux deux fois par jour, au pire tous les deux mois, de l'énergie cumulée : service des Phares et balises, EDF et quelques sociétés productrices et distributrices d'électricité privées, Office national météorologique, service de TSF, SNCF[55]. Ceux-ci sont rémunérés à cette fin par EDF.

En seulement quelques années, les relevés métropolitains permettent à EDF de classer les sites par ordre d'intérêt en termes de puissance éolienne annuelle (voir Tableau Annexe M). Il est alors décidé de ne poursuivre les mesures qu'au niveau des stations jugées les plus intéressantes, (voir Figure 9.3), et d'y effectuer des mesures plus précises — en particulier, celles de la vitesse du vent en fonction de la hauteur. Le territoire français est divisé en treize grandes zones en fonction de la quantité annuelle d'énergie éolienne reçue (voir Figure 9.4). Selon Serra, (1953, p. 294), ingénieur à la Division énergie du vent,

49. AN F14 20 902, p.d., PV de la première séance du CTEV, 18/03/1946.

50. AN 1977 0614/3, 1941, Décision de l'IPC chargé par intérim de la Direction du Gaz et de l'Électricité, 18/01/1947.

51. Ces entités administratives ont été créées pendant la guerre au nombre de neuf, et sont « chargées, chacune dans la limite de son territoire, du contrôle des usines hydroélectriques et des usines thermiques, du contrôle des concessions de transport et d'énergie électrique, du contrôle des concessions de distribution d'énerge électrique aux services publics (Rosenfeld, 1957) ».

52. AN 1977 0614/3, 1941, Lettre de Lebon, ingénieur ordinaire de la 5e circonscription électrique, à Crescent (président du CTEV), 19/10/1946.
AN 1977 0614/3, 1941, Lettre de Crescent au Directeur de l'Électricité, 29/10/1946.

53. En 1948, la quasi-totalité de ces Ailleret sont installés.
AN F14 20 902, p.d., CTEV, Prospection des sites, 03/12/1948.

54. AN F14 20 902, p.d., Circulaire du COEE pour la prospection des sites envoyé aux « différentes sociétés d'électricité », 21/05/1946.

55. AN F14 20 902, p.d., CTEV, Prospection des sites, 03/12/1948.

ces premiers résultats permettent de constater la complémentarité saisonnière escomptée entre énergie hydraulique et énergie éolienne. Grâce au réseau interconnecté, la production d'électricité d'origine « naturelle » permet ainsi une « meilleure adaptation des besoins, c'est-à-dire une production accrue d'énergie en hiver », sans avoir recours au charbon « dont la France n'est, certes pas, abondamment pourvue » (voir Figure 9.5). Selon Serra, ceci justifie « amplement tous les efforts entrepris pour domestiquer cette force de la Nature, de la façon la plus rationnelle et la plus complète » (Serra, 1953, p. 294).

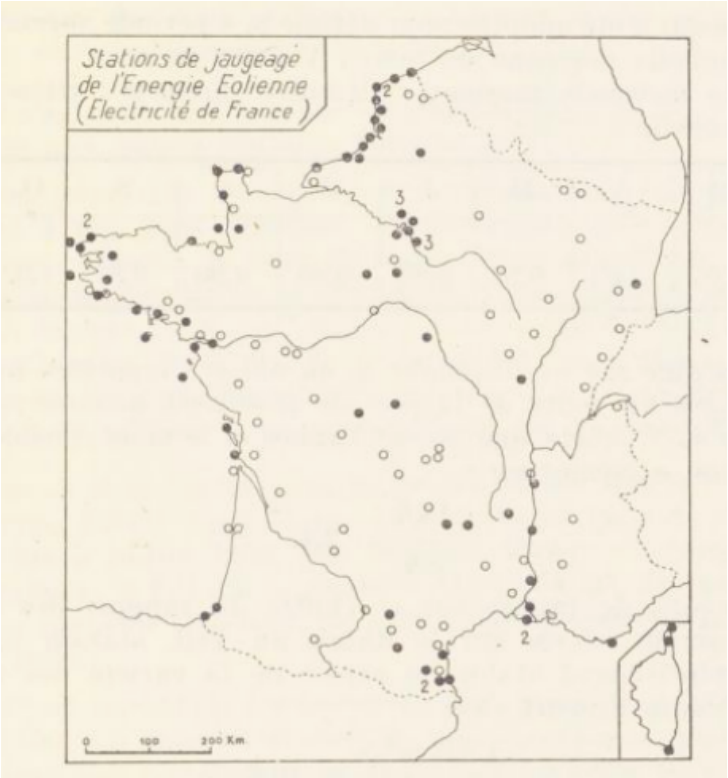



Figure 9.3 – Stations de jaugeage de l'énergie éolienne en France métropolitaine (Serra, 1953, p. 275)

Les relevés sont maintenus pendant plusieurs années au niveau des mêmes stations, avant qu'EDF ne se désintéresse de la question. En 1965, EDF décide ainsi d'arrêter les mesures de plusieurs stations de jaugeage afin de baisser le coût de ces jaugeages, puis, en 1969, l'entreprise publique ne finance plus du tout le jaugeage éolien. À ce moment, Pétry choisit de ne maintenir que certaines des stations intéressant particulièrement le service des Phares et balises [56]. Il est possible que certaines stations météorologiques aient également souhaité continuer ces mesures.

56. AN 1980 0213/133, 1955-1970, Lettre de Pétry à l'Ingénieur en chef du service maritime du Pas-de-Calais (et à d'autres), 14/08/1969.

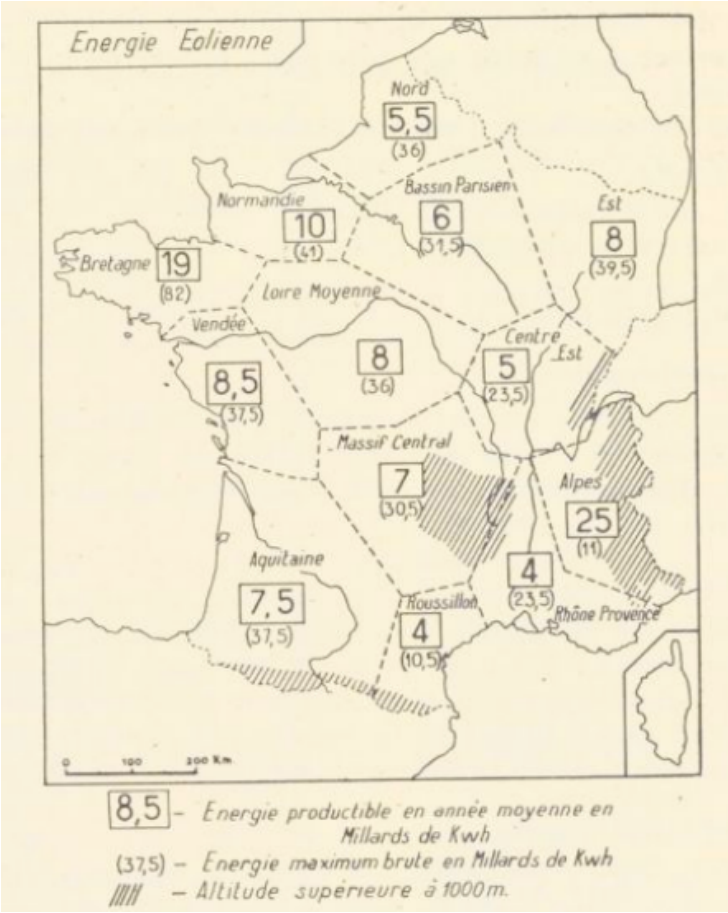



FIGURE 9.4 – Division du territoire français en zones de quantités d'énergie éolienne annuelle (SERRA, 1953, p. 290)

#### 9.1.3.2 EDF, inventeurs et grands aérogénérateurs pour le réseau interconnecté (1946-1966)

Dès sa création, la Division énergie du vent décide de poursuivre les études sur la production de grandes puissances électriques à partir de l'énergie éolienne. Ses responsables se donnent l'objectif de mettre au point des modèles d'une puissance installée d'environ 1 000 kW, en se basant sur l'expérience américaine de Grand Pa's Knob, qui constitue alors, selon Ailleret, « la seule base sérieuse d'appréciation *a priori* des dimensions dont il est le plus intéressant d'entreprendre l'étude » [57]. Elle choisit donc de faire expérimenter, à différents constructeurs, des aéromoteurs de leur conception, de modèles cependant très variés, sans se focaliser donc sur le modèle tripale qui avait été expérimenté dans le Vermont. Tous ces essais sont stoppés en 1966, avec l'abandon du programme EDF sur l'énergie éolienne, selon BONNEFILLE, (1976a, p. 56), « à cause de la baisse du prix du pétrole », et selon BANAL, (1996, p. 158), en raison du fait que « les perspectives de développement de l'énergie nucléaire apparaissaient [...] déjà trop riches pour ne pas y

57. AN F14 20 902, p.d., Ailleret, Rapport sur les aéromoteurs en cours d'étude à l'EDF, présenté au CTEV le 21/01/1949.

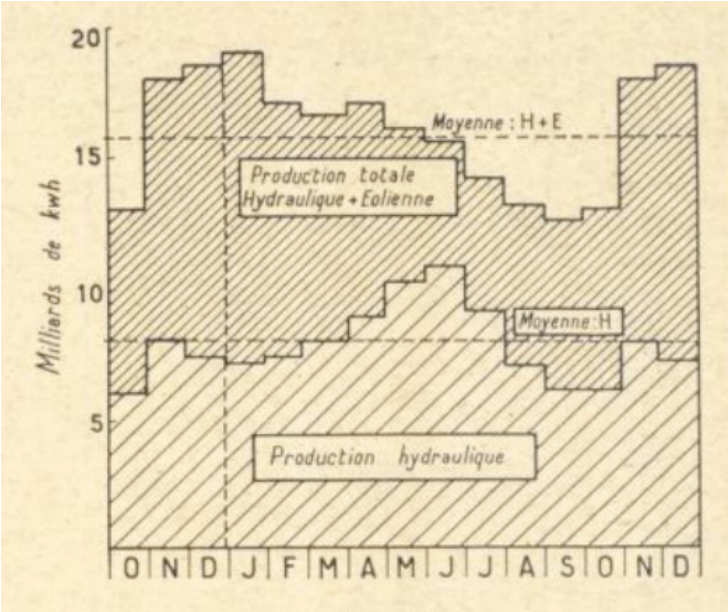



FIGURE 9.5 – Production mensuelle cumulée potentielle des énergie éolienne et hydraulique en France métropolitaine (SERRA, 1953, p. 292)

consacrer tous les moyens » ; il le fut très certainement pour ces deux raisons. Ce paragraphe montre la diversité des modèles qui ont été pris en considération et expérimentés avec l'aide d'EDF, et ce avec trois types d'acteurs : une grande entreprise renommée du secteur de l'hydraulique (Neyrpic), des inventeurs associés à une entreprise nouvelle créé spécialement pour mettre au point et commercialiser leurs modèles (Bureau d'études scientifiques et techniques (B.E.S.T), Lucien Romani ; Ets. J. B. Morel, Jean-Baptiste Morel ; Société de brevets et d'études industrielles, Jean-Édouard Andreau), constructeur danois d'aéromoteurs (Lykkegaard). La diversité des modèles étudiés montre qu'EDF souhaite, avant d'envisager toute construction en série, essayer un grand nombre de solutions techniques afin d'identifier celles qui permettraient d'obtenir l'électricité au coût le plus faible. Ceci explique la place que conservent certains inventeurs dans cette tentative pour la mise au point de nouveaux aérogénérateurs.

Plusieurs propositions d'inventeurs sont adressées à la Division énergie du vent ainsi qu'au CTEV, qui sont écartées sans davantage de considération, lorsqu'elles semblent ne pas remplir les « conditions indispensables de construction en série, de résistance à tous les temps et de rentabilité » [58]. Cependant, dès la fin des années 1940, au moins quatre

58. AN F14 20 832, p.d., CTEV, Procès verbal de la séance du 21/01/1949.
Ainsi des propositions envoyées, Dubos, Monnet ou Deparis qui, pour ces deux derniers, ont pourtant connu une petite audience dans la presse. Mais aussi celles de « Madame Dalverny, de M de Mermet, de M Carrez, de M Bloesy, De M Mars », ainsi qu'au moins dix-huit autres, et très certainement plus, dont je n'ai pas trouvé de traces. AN F14 20 902, p.d., Ailleret, Rapport sur les aéromoteurs en cours d'étude à l'EDF, présenté au CTEC le 21/01/1949.
AN F14 20 902, p.d., Comité technique de l'énergie des vents, « Lettres reçues de Madame Dalverny, de M de Mermet, de M Carrez, de M Bloesy, De M Mars », 21/01/1949.

marchés d'études sont contractés avec plusieurs constructeurs ou inventeurs : le Bureau d'études scientifique et techniques (B.E.S.T.), avec les brevets de Lucien Romani, pour une éolienne tripale de 45 m de diamètre et une puissance de 1 700 kW ; le « barrage aéromoteur Morel », mur vertical composé de courroies ailetées verticales mues par le vent ; l'aéromoteur Andreau de la Société d'études et de brevets industriels, muni d'une hélice à trois pales creuses expulsant de l'air par force centrifuge ; et les aéromoteurs « Chevreau-Deville », munis de deux hélice, une tripale avant et une bipale arrière, de 30 ou 45 m de diamètre pour une puissance de 700 ou 1 600 kW, et pour lequel les inventeurs ont créé la « Société d'études des procédés Chevreau et Deville » [59]. Les trois premiers sont effectivement expérimentés en collaboration avec EDF ; pour le troisième, je n'ai pas trouvé de traces d'une quelconque construction.

Comme, à l'issue de la guerre, aucune des inventions françaises en vue par la Division énergie du vent n'est disponible sur le marché, ses ingénieurs, qui veulent rapidement expérimenter le couplage des aérogénérateurs au réseau, vont d'abord chercher des modèles du côté des constructeurs étrangers qui proposent déjà la production de puissances électriques moyennes. C'était le cas du constructeur danois Lykkegaard dont, pendant la guerre, plusieurs modèles sont achetés par le gouvernement danois pour l'alimentation de réseaux électriques. Ces aérogénérateurs, rétrospectivement qualifiés de « démodés » par Bonnefille, (1976a, p. 61), étaient déjà jugés comme tels par les ingénieurs d'EDF, ainsi que par le ministre de la France d'Outre-mer Étienne Crouzet qui regrette l'achat par la Société marocaine de la houle et du vent d'une telle machine (cf sous-section 9.2.2). Aussi, lorsqu'en 1948, le Service des études et recherches d'EDF achète un moulin à vent [60] à la firme danoise, considère-t-il que « l'appareil n'[est] pas très intéressant en soi-même », mais qu'« il [doit] permettre de faire des essais sur la marche synchrone d'un alternateur directement couplé à une hélice, et accessoirement d'étudier l'effet du vent sur une roue de diamètre déjà grand ». Ce moulin à vent, d'un diamètre de 18 m et monté sur pylône de 21 m, délivrant 35 kW par vent de 12 m/s, est installé en juin 1948 sur le plateau de Clamart, où il est raccordé au réseau Île de France Sud et testé pendant quelques mois. D'après un rapport de décembre 1948, ces essais sont infructueux à cause de défauts mécaniques de la machine : des « torsions importantes de l'arbre vertical » provoquent des vibrations qui causent des variations importantes dans l'électricité mesurée, ce qui empêche la réalisation d'essais précis [61]. La Division énergie du vent souhaite ensuite transférer la machine sur l'île de Molène [62], mais selon Bonnefille, (1976a), les essais se sont arrêtés là, probablement en raison du fonctionnement jugé défectueux de

59. AN F14 20 902, p.d., Ailleret, Rapport sur les aéromoteurs en cours d'étude à l'EDF, présenté au CTEV le 21/01/1949.

60. C'est le nom utilisé dans le rapport d'EDF.

61. AN F14 20 902, p.d., EDF (service des Études et recherches), « Aéromoteur Lykkegaard », 12/1948.

62. AN 1991 0305/2, 1941-1957, « Compte-rendu succinct de la réunion tenue le 06/07/1948 dans le bureau de M Pétry, 06/07/1948.

l'appareil.

Neyrpic s'est intéressée aux aéromoteurs pour la génération d'électricité de grandes puissances pour le réseau électrique métropolitain. Trois articles de l'ingénieur-conseil Louis Vadot, qui en fut le concepteur, sont parus dans *La houille blanche* entre 1957 et 1959. Des brevets sont pris au plus tard en 1952, mais ce ne sont pas les conceptions qui ont été mises en œuvre par la suite. En tout cas, en 1955, EDF passe commande d'une première éolienne de 150 kW, tripale de 21 m de diamètre, sur pylône de 20 m de haut [63]. Le montage en est effectué en 1958 au site de Saint-Rémy-des-Landes sous la direction de Neyrpic après des essais préalables en soufflerie à Toulouse (Bonnefille, 1976a, p. 58). Après une rupture des pales métalliques en 1959, celles-ci sont remplacées par des pales en matières plastiques. L'éolienne fonctionne de 1962 à 1966, de manière jugée satisfaisante (elle n'est à l'arrêt que pendant cinquante-neuf jours et présente un bon rendement). Neyrpic propose un modèle plus puissant en 1963 : celui-ci, de 1 000 kW, est muni d'une hélice de 35 m de diamètre et monté sur pylône de 30 m (voir Figure 9.6). Il est couplé au réseau de 1963 à 1964, puis subit une rupture en 1964 au niveau du multiplicateur [64] : « la remise en l'état de l'ensemble fut d'abord envisagée, puis l'idée abandonnée », et l'aérogénérateur démonté en 1966 (Bonnefille, 1976a, p. 58).

Neyrpic fait exception dans les institutions étudiées dans cette partie, en ce que des recherches y sont menées pour des éoliennes de moyenne puissance (une dizaine de kilowatts), non pour la production d'électricité, mais pour le pompage de l'eau, et que ce convertisseur pouvait concurrencer des pompes alimentées par le réseau électrique. Dans une étude sur les éoliennes de pompage, Vadot fait ainsi état d'expériences, probablement dans les années 1950, sur de tels appareils construits par Neyrpic. L'ingénieur affirme que « pour des régions moyennement ventées, ces groupes sont tout-à-fait rentables et peuvent concurrencer très avantageusement les groupes de pompage électrique et thermique », même pour un groupe raccordé à un réseau (Vadot, 1957b, p. 523), ce qui sous-entend qu'elles sont adaptées au contexte métropolitain. Mais il est très flou sur les usages envisagés de ces moteurs, et indique simplement qu'un des types de groupes expérimentés pourrait être exploité en irrigation. Il est bien probable que l'entreprise avait davantage en vue une utilisation dans les territoires de l'Union française, où une demande de tels appareils existait et pour lesquels d'autres entreprises menaient des recherches similaires (voir 9.2.2).

L'aérogénérateur du B.E.S.T, entreprise probablement créée pour la mise au point de cet appareil, a été conçu par son ingénieur-conseil Lucien Romani. Le projet date de 1946

63. AN 1991 0305/3, p.d., Lettre d'Argand à Pétry, 13/07/1961.

64. Organe permettant de démultiplier la vitesse de rotation de l'arbre moteur pour entraîner la génératrice électrique à une vitesse suffisante.

65. AN 1991 0305/3, p.d., Éolienne de Saint-Rémy-des-Landes, photographie envoyée à Pétry par Argandy (1961).



FIGURE 9.6 – Éolienne Neyrpic de Saint-Rémy-des-Landes de 132 kW, 1961. [65]

et vise, conformément au souhait d'EDF et du CTEV, à fournir aux « réseaux de distribution locaux, ou même nationaux, un appoint d'énergie aussi substantiel que possible » [66]. L'entreprise ambitionne ainsi la mise au point des aérogénérateurs de grandes, mais aussi de petites puissances (voir paragraphe suivant pour ce dernier point). Après des expériences sur modèles réduits [67] entre 1949 et 1953 en soufflerie de l'Institut aérotechnique de Saint-Cyr, puis dans diverses souffleries (Institut aérodynamique de Toulouse, Grande soufflerie de Chalais-Meudon) [68] , une première éolienne de 640 kW est construite par la direction des Études et recherches « sur les plans et avec le concours des techniciens du

66. AN 1991 0305/3, p.d., B.E.S.T, « Avant-projet d'éolienne de 200 kW du type hélice-moulinet », 30/11/1947.

67. Deux modèles réduits bi/quadri-pale et tripale (25 cm et 60 cm de diamètre).

68. Entre 1950 et 1953, une première maquette avec une hélice de 3.60 m de diamètre montée sur pylône de 42 m de hauteur est testée à Saint-Cyr, puis, à la demande d'EDF, une seconde, conçue par Romani entre 1953 et 1954, et expérimentée sous la direction de Romani et R. Goethal, directeur du Laboratoire d'aérodynamique de l'ENSMA.
ARCHIVES EDF, 852786, p.d., G Rauline (EDF), Aérogénérateur expérimental Type B.E.S.T - Romani. Étude sur modèle réduit au 1/20, 01/1956.

B.E.S.T » à Nogent-le-Roi (voir Figure 9.7). Son hélice, qui mesure 30 m, est montée sur un pylône à 32 m de hauteur. Cette « station d'études de l'énergie du vent », dont la construction est terminée en 1958, est utilisée comme « banc d'essai pendant cinq ans (1958-1963) » (Bonnefille, 1976a, p. 50). Le site, bien qu'il ne soit pas situé dans une zone identifiée comme intéressante du point de vue de l'énergie éolienne, a été choisi, d'une part, en raison de la régularité des vents « à l'échelle de la minute, due à l'étendue considérable du vaste plateau dénudé qui entoure la station de tous côtés », et d'autre part, en raison de sa proximité de Paris, ce qui facilite la venue des ingénieurs et techniciens d'EDF depuis ce site [69]. Les essais commencent dès 1958, où l'aérogénérateur est couplé au réseau et y délivre de l'électricité. Deux hélices sont successivement étudiées [70], et, la seconde étant rompue en 1963, les essais sur l'aérogénérateur sont arrêtés. Il aura fonctionné cinq ans et délivré, en 1 780 h de fonctionnement, 22 540 kWh. En 1965, il est envisagé de réessayer la première hélice dans les Corbières, en y déplaçant l'aérogénérateur, mais cette idée est abandonnée en même temps que le programme éolien.

L'éolienne B.E.S.T devait servir à mettre au point un prototype d'éolienne plus puissante de conception spéciale. Munie de deux hélices tripales réunies sur le même arbre et actionnant chacune un alternateur de 2 MW, elle devait tirer profit d'une interaction hélice-pylône favorable à l'augmentation de la puissance recueillie au niveau de l'hélice, phénomène observé en soufflerie sur l'éolienne expérimentale. Réalisé et testé à Landunvez, en Nord-Finistère, région identifiée comme ayant un des plus intéressants potentiels en France, cet aérogénérateur devait être, selon le programme de la Division énergie du vent, construit en série et implanté en divers point du Finistère pour l'approvisionnement du réseau électrique toujours déshérité. Mais « [f]inalement, ces projets furent abandonnés, y compris l'idée de reprendre les essais de la machine de 800 kW »(Bonnefille, 1976a, p. 56), pour les raisons économico-politiques mentionnées plus haut. Ainsi, l'éolienne de Nogent-le-Roi ne constitue pas un prototype mais un « appareil expérimental » permettant d'étudier le fonctionnement des grands aérogénérateurs (performances, résistance des matériaux...), de tester pour plusieurs éléments différentes solutions et de déterminer les meilleures d'entre elles (freinage : mécanique, aérodynamique, électrique), de mettre au point des appareils de mesure (wattmètres, anémomètres). L'un des membres de l'équipe d'EDF et du B.E.S.T qui s'est chargée des expériences souligne le caractère nouveau et expérimental de ces travaux : il précise dans un rapport de 1958 que « les organes de cette machine sont inspirés de ceux en usage dans des industries où la fabrication en très grande série est de règle » (automobile, chemins de fer, pylônes de supports de ligne électrique) ou bien qu'ils « s'apparentent à des techniques principalement orientées jusqu'ici

69. Archives EDF, 852786, p.d., « Station d'études de l'énergie du vent. Aérogénérateur expérimental de 640 kW et diamètre 30.19 m », 04/1958.

70. Une à vitesse lente et l'autre à vitesse rapide

71. Archives EDF, 852786, p.d., EDF (Division énergie du vent), « Station d'études de l'énergie du vent, Nogent-le-Roi (Eure et Loir), Situation et implantation », 1958.



FIGURE 9.7 – Éolienne B.E.S.T de Nogent-le-Roi tout juste érigée (1958) [71]

vers la sécurité et non vers le bas prix de revient (aéronautique, marine, construction de ponts) » [72]. Il ajoute que l'équipe a été « gêné[e] par le fait qu'on ne disposait pas de précédent » et qu'une quantité importante de solutions techniques ont été testées au cas où celles-ci s'avéreraient ultérieurement indispensables. Aussi cet appareil n'est-il « en rien un prototype et les grands aérogénérateurs qui seront peut-être construits plus tard en petites séries [...] risquent de se présenter assez différemment, tant dans leur silhouette générale que dans leurs dimensions relatives » [73].

En 1966, le B.E.S.T se dissout, mais son personnel forme une nouvelle entreprise, Aérowatt, en fusionnant avec la Compagnie industrielle des aéromoteurs (CIAMO) : celle-ci, basée au Maroc, est créée en 1955 pour exploiter les brevets du B.E.S.T pour de pe-

72. ARCHIVES EDF, 852786, p.d., « Station d'études de l'énergie du vent. Aérogénérateur expérimental de 640 kW et diamètre 30.19 m », 04/1958.

73. ARCHIVES EDF, 852786, p.d., « Station d'études de l'énergie du vent. Aérogénérateur expérimental de 640 kW et diamètre 30.19 m », 04/1958.

tits aérogénérateurs utilisables dans pays « sous-développés » et les lieux isolés du réseau électrique. Aérowatt ne poursuit alors pas les études du B.E.S.T sur les grands aérogénérateurs, mais continue de commercialiser de petits modèles (Rapin et Noël, 2014, p. 50-52) (cf 9.1.3.3).

Jean-Baptiste Morel est l'inventeur de trois modèles originaux d'aéromoteurs, tous expérimentés avec le concours d'EDF (probablement technique et financier). Il monte pour cela la société « Établissements J. B. Morel ». La première de ces inventions est le « barrage aéromoteur Morel » : celui-ci est constitué de courroies verticales munies d'ailettes perpendiculaires et pivotant elles-mêmes autour d'un axe horizontal. Sous l'action du vent, perpendiculaire au plan du barrage, poussant les ailettes, chaque courroie tourne autour de deux poulies horizontales dans un mouvement de translation vertical [74]. Un marché d'études sur un mur de 20 m de haut est commandé par EDF en 1949 [75], et Morel expérimente probablement un modèle réduit, qui ne donne pas de résultats intéressant selon EDF (Bonnefille, 1976a, p. 59). Les deux autres appareils ensuite expérimentés sont l« hélice à pales tendues entre une jante circulaire et un moyeu allégé », dont un modèle de 3 m de diamètre est testé à Domène (Isère) en 1951, mais ne donne « pas de suite », malgré un bon rendement ; et une « éolienne à axe vertical », dont il est espéré qu'elle allie « les qualités de simplicité de l'ancienne panémone, aux rendements élevés des hélices modernes à pales profilées (Bonnefille, 1976a, p. 59-60). En 1954, un modèle de 7 kW est expérimenté à Mondragon pendant trois mois, et des essais sur des modèles de grande puissance (90, 500 et 1 200 kW)) doivent être effectués avec le concours d'EDF, mais la Société J-B Morel interrompt de premiers essais en 1955 « pour causes de difficultés financières » (Bonnefille, 1976a, p. 60).

L'« éolienne à dépression », inventée par Andreau, est une hélice bi- ou tripale creuse en tôle mince, montée sur un pylône creux lui aussi, en bas duquel est placée une turbine aérienne en communication avec l'air extérieur. Lorsque le vent actionne l'hélice, la force centrifuge exerce un effet de succion de l'air depuis l'hélice au sol jusqu'au bout des pales, provoquant la création d'un courant aérien continu. Ce courant actionne la turbine aérienne, reliée à un convertisseur électrique ou mécanique (machines agricoles, pompes...) (voir Figure 9.8). En effet, Andreau imagine autant la production de grandes puissances électriques pour le réseau, que des applications pour le pompage ou les machines agricoles des colonies (voir 9.2.2). Les avantages de ce procédé sont l'absence de pièces mécaniques multiplicatrices entre l'hélice et le convertisseur électrique, coûteuses et compliquant l'entretien de la machine, ainsi que la présence de la génératrice au sol plutôt qu'en l'air,

74. Morel imaginait également l'application de son procédé à l'utilisation des courants de rivière et de marées (Morel, 1946).

75. AN F14 20 902, p.d., Ailleret, Rapport sur les aéromoteurs en cours d'étude à l'EDF, présenté au CTEC le 21/01/1949.

en facilitant la maintenance [76]. Vers 1950, la Division énergie du vent, qui s'intéresse à l'éolienne à dépression depuis sa création, confie à Andreau l'étude d'un projet d'appareil de l'ordre de 650 kW [77]. En 1951, des essais sur une turbine sont en cours à l'Institut aérotechnique de Saint-Cyr par Andreau et des techniciens d'EDF [78], mais selon Bonnefille, (1976a, p. 60), ceux-ci auraient mis en évidence un faible rendement « par suite des pertes d'énergie cinétique de l'air expulsé en bout de pale », et il semble que la collaboration entre Andreau et EDF se soit arrêtée avec cette machine expérimentale. L'éolienne à dépression est par la suite reconnue comme un procédé « élégant », mais d'un rendement trop faible. C'est ce qu'affirme Bonnefille, (1976a) plus de deux décennies plus tard, et c'est déjà ce qu'affirmait l'ingénieur Vadot dans une « étude synoptique des différents types d'éoliennes ». Selon lui, cet inconvénient résulte non seulement des pertes en bout de pale, mais aussi de ce que « le rendement global est [...] le produit des rendements de l'hélice, du ventilateur, de la turbine à air et de la génératrice » qui, cumulés les uns aux autres, diminuent d'autant ce rendement (Vadot, 1957a). Elle connaît cependant davantage de succès en-dehors de la France métropolitaine (voir 9.2.2).

On peut donc remarquer, par rapport aux usines marémotrices, la diversité des grands aérogénérateurs expérimentés par EDF dans le but d'alimenter le réseau électrique. Pas un seul d'entre eux ne connaît de postérité : le programme EDF sur l'énergie éolienne étant stoppé en 1966, les seuls aérogénérateurs à être concrètement utilisés en France, et ce jusqu'aux années 1970, sont les petits aérogénérateurs pour des usages spécifiques de signalisation maritime (cf 9.1.3.3). En outre, l'entreprise publique ne s'est pas fixée sur un modèle optimal selon ses critères (production de grandes puissances électriques à un coût concurrentiel), bien qu'elle ait éliminé plusieurs options et que les éoliennes à hélice tripale à profil aérodynamique aient été finalement privilégiées. Ces études ont permis, selon Bonnefille, (1976a, p. 56), de souligner que les économies d'échelle qui seraient permises par l'augmentation de la puissance des unités de production, si souvent vantées par nombre de défenseurs de l'énergie éolienne, ne sont pas si évidentes : en effet,

> « les tailles optimales des différents organes essentiels d'un aérogénérateur ne sont pas les mêmes. L'infrastructure, le support, l'appareillage électrique sont bon marché quand la puissance est aussi élevée que possible. En revanche, les grandes hélices coûtent très cher ; d'une part parce que leur poids et leur prix croissent comme le cube de leur diamètre, alors que la puissance croît comme le carré ; et d'autre part, parce que la vitesse de rotation décroît proportionnellement au diamètre, de sorte que la transmission et la génératrice

76. AN 1991 0305/3, p.d., Andreau, « Éolienne 12 CV - 8 kW à dépression Système Andreau ».
77. AN 1991 0305/4, p.d., Lettre de Pétry à Saigot (ingénieur en chef du service de la Colonisation et de l'hydraulique d'Alger), 05/02/1951.
78. Bonnefille, (1976a, p. 60) mentionne des essais à l'Institut aérotechnique de Saint-Cyr conjointement par Andreau et EDF, qui doivent correspondre à cette étude.

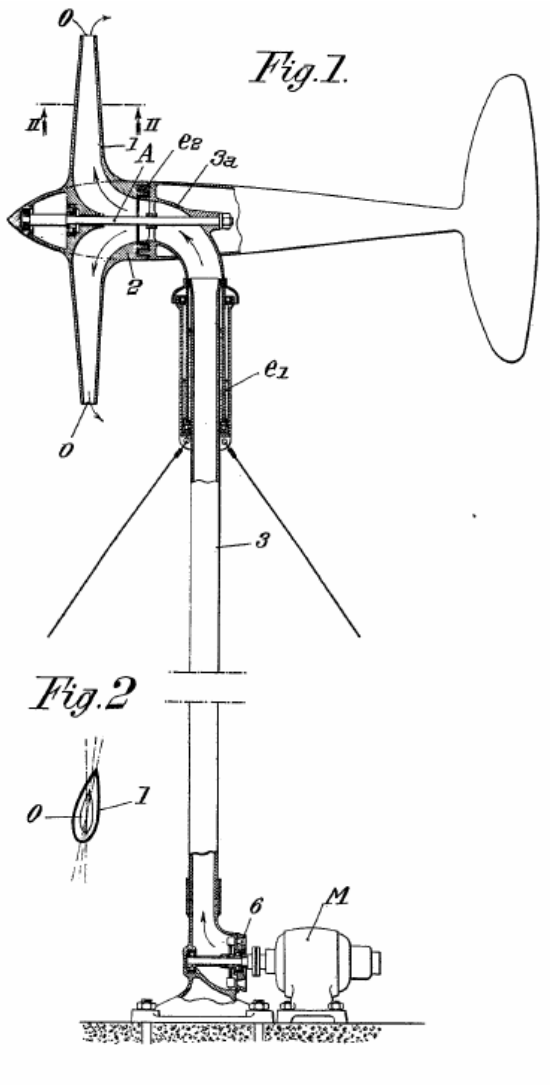



FIGURE 9.8 – Éolienne à dépression, système Andreau (ANDREAU, 1949)

sont alors de plus en plus coûteuses. »

En ce sens, les grandes usines éoliennes que cherche à développer EDF sont comparables aux usines marémotrices, pour lesquelles l'énergie produite est proportionnelle au carré des dimensions du barrage, lequel barrage étant quant à lui d'autant plus coûteux. On peut souligner, parmi les concepteurs des modèles originaux testés par EDF, la place toujours importante des inventeurs, mais aussi l'absence des constructeurs d'aéromoteurs toujours en activité depuis l'entre-deux-guerre, dont les modèles ne correspondent pas aux attentes des ingénieurs d'EDF : faible puissance, roues conçues sans la science aérodynamique. À ce sujet, certains constructeurs sont parvenus à maintenir une activité, mais dans les colonies et protectorats (cf sous-section 9.2.2).

#### 9.1.3.3 Service des Phares et balises et petits aérogénérateurs autonomes pour la signalisation maritime (1946-1970')

Au service des Phares et balises, plus d'un demi-siècle après le duc de Feltre, Pétry et ses collègues cherchent à alimenter les installations électriques des phares grâce à des aérogénérateurs de petites puissances. Trois grands types d'aérogénérateurs sont à mettre en place, en fonction de l'appareillage des phares, c'est-à-dire :

— des émetteurs-récepteurs de radiotéléphonie et des récepteurs de radiodiffusion, nécessitant une puissance de 50 W, pour lesquels un aérogénérateur de quelques centaines de watts suffit,
— les feux électriques fonctionnant pendant tout ou partie de la nuit, d'une puissance de 3 000 ou 6 000 W, ou les « batteries destinées à alimenter les radiophares de puissance ingénieure ou égale à 400 W », dont un ou deux aérogénérateurs de 3 kW satisfont les besoins,
— un ensemble d'appareils cumulant une puissance plus importante : radiophares de 2 kW, signaux sonores, lampes à arc puissantes, et nécessitant des aérogénérateurs fournissant 10 à 20 kW électriques [79] .

Le programme du service des Phares et balises se focalise sur la deuxième catégorie d'aérogénérateurs. Avant que des aérogénérateurs français soient disponibles, Pétry fait tester dès 1946 des modèles d'aérogénérateurs américains, seuls de ce type disponibles sur le marché, aux établissements Sautter-Harlé [80]. Il s'agit d'aérogénérateurs Jacobs (1 200 à 2 400 W), Winpower (1 800 kW) et Wincharger (500 W) [81]. Ceux-ci ayant montré un fonctionnement satisfaisant, Pétry en fait installer quelques exemplaires sur des phares [82], afin de tester leurs performances en mer. Mais il s'avère rapidement qu'ils ne se prêtent pas à l'usage escompté. En effet, ces appareils, conçus pour être utilisés dans les vastes plaines continentales américaines, ne sont pas adaptés au vent marin, et sont sujets à la corrosion [83].

79. AN F14 20 832, p.d., Ginocchio, Note au sujet de l'installation d'aérogénérateurs dans les phares non raccordés au secteur, 18/04/1950.
80. AN 1991 0305/2, 1941-1957, Lettre du directeur général de Sautter Harlé à Pétry, 24/03/1948 ; Lettre du directeur adjoint de Sautter-Harlé à Petry, 04/08/1948 ;
81. AN 1991 0305/2, 1941-1957, « Compte-rendu succinct de la réunion tenue le 06/07/1948 dans le bureau de M Petry », 06/07/1948.
82. En 1953, le phare de Chausey est équipé d'un aérogénérateur Jacobs de 2 400 W (voir Figure 9.9). En 1952, les phares du Chauveau (près de la Rochelle) et des Triagoz (près de Saint-Brieuc), sont équipés d'aérogénérateurs Jacobs de 1 200 W.
AN 1991 0305/3, p.d., Photographies de l'éolienne Jacobs, 20/12/1949.
AN F14 20 832, p.d., Lettre de Hémar à Baste et Bideau, ingénieurs en chef des Ponts et chaussées à La Rochelle et Saint-Brieuc, 30/06/1952.
83. AN 1991 0305/4, p.d., Lettre de Ginocchio au chef du Service de l'hydraulique de l'Afrique Occidentale française, 27/07/1953.
85. AN 1991 0305/3, p.d., Photographie de l'aérogénérateur Jacobs de Chausey, 20/12/1949.



FIGURE 9.9 – Éolienne Jacobs de 1 200 kW sur pylône de 20 m alimentant le phare de Chausey (1949) [85]

C'est pourquoi Pétry choisit de se tourner vers des entreprises françaises pour la mise au point d'appareils de la deuxième et de la troisième catégorie de puissances, et adaptés aux vents marins. Pour lui comme pour les membres du CTEV, ce problème est connexe de celui de l'alimentation en électricité des îles et de certaines zones côtières des colonies isolées du réseau électrique, aussi échange-t-il avec EDF et certains représentants de l'administration coloniale à ce sujet [86]. Il s'adresse ainsi à la Société de condensation et d'applications mécaniques (SCAM) qui, avec la Compagnie électro-mécanique, expérimente des aérogénérateurs conçus par Darrieus, son ingénieur-conseil, et avec le B.E.S.T En plus d'expérimenter de grands aérogénérateurs pour le compte d'EDF, ce bureau d'études travaille donc sur de petits aérogénérateurs d'un usage spécial. Pétry se tourne également vers Andreau, mais celui-ci n'est pas assez rapide par rapport à ses concurrents [87].

En 1948, le service des Phares et balises et le B.E.S.T passent ainsi un marché pour la fourniture de dix éoliennes de 3.75 kW, munies d'hélices tripales de 4 m de diamètre, conçues spécialement pour résister à la corrosion de l'air marin [88]. Il semble que la mise

86. Par exemple, avec Crouzet, ministre de la France d'Outre-mer, le Service de l'hydraulique de l'Afrique occidentale française, ou Drouhin chef le service de la Colonisation et de l'hydraulique d'Algérie index[institutions]Service de la colonisation et de l'hydrauligue (Algerie)@Service de la colonisation et de l'hydraulique (Algérie), à qui, à leur demande, il envoie tous les renseignements qu'il connaît sur les petits aérogénérateurs.

87. Pétry, en tant que secrétaire du CTEV répondant à une requête de Saigot, ingénieur en chef du service de l'Hydraulique et de la colonisation d'Algérie, qui ne parvenait pas à entrer en contact avec Andreau, lui dit ainsi que « les aérogénérateurs Romani sont peut-être d'un principe moins "élégant" que les aérogénérateurs Andreau, mais [qu']ils auront plus tôt le mérite d'exister. »
AN 1991 0305/4, p.d., Lettre de Pétry à Saigot, 18/06/1951.

88. AN 1991 0305/4, p.d., Marché par entente directe entre Gaston Romani, représentant le B.E.S.T et Jacques Hémar, ingénieur en chef du service technique des Phares et balises, représentant ce dernier,

au point de ces aérogénérateurs ait pris plus de temps que prévu, puisque c'est en 1957 que le premier aérogénérateur de cet ordre de puissance livré par le B.E.S.T au service des Phares et balises est mis en service (Prunieras, 1966). Cette éolienne tripale de 4.10 m de diamètre, d'une puissance installée de 4 800 W est mise en place au phare des Sept-Îles, sur une île en face de Ploumanach, dans les Côtes du Nord. Il remplace deux groupes électrogènes au gasoil de 13 ch (˜10 kW) pour l'alimentation d'une lampe de 1 500 W, d'un radiotéléphone et de ses auxiliaires. L'ancienne batterie d'accumulateurs au Cadmium-Nickel étant insuffisante pour permettre d'emmagasiner l'énergie intermittente de manière à délivrer l'énergie nécessaire pendant suffisamment de temps, un nouvel accumulateur au plomb d'une capacité presque double est également installée [89]. Au bout de deux ans de fonctionnement, l'hélice tripale est remplacée par une hélice bipale de 5.73 m de diamètre (voir Figure 9.10). Malgré le surcoût d'installation de ce nouveau moteur (évalué à 40 000 francs en 1966), il s'avère très rapidement rentable par rapport aux moteurs diesel : en raison de coût d'entretien et de fonctionnement (carburant) considérablement réduits, le prix global (comptant à la fois l'installation et le fonctionnement) est réduit de plus de moitié (Prunieras, 1966, p. 59). Le service des Phares et balises décide donc de multiplier les installations de ce type.

Selon Rapin et Noël, (2014, p. 50-52), la Compagnie industrielle des aéromoteurs (CIAMO) est créée en 1955 pour commercialiser les petits aérogénérateurs B.E.S.T Lorsque, en 1963, EDF décide d'arrêter de travailler sur les grands aérogénérateurs avec le B.E.S.T, l'entreprise connaît des difficultés qui la poussent, en 1966, à fusionner avec la CIAMO, pour former la société Aérowatt. Aérowatt a alors dû son succès aux commandes du service des Phares et balises pour l'alimentation des phares. Un autre usage très spécifique mène à l'utilisation des aérogénérateurs B.E.S.T : l'alimentation de bases et stations aux conditions climatiques extrêmes, la station Charcot en Terre-Adélie et la station de Port-aux-Français sur les îles Kerguelen (Rapin et Noël, 2014, p. 51).

Pétry s'adresse également à la SCAM, qui travaillait déjà avec le service de la Colonisation et de l'hydraulique du Gouvernement général d'Algérie pour la mise au point des aérogénérateurs conçus par Darrieus, et d'une puissance allant de 3 à 50 kW. Ces appareils auraient en effet pu s'adapter à l'alimentation électrique de phares de la troisième catégorie de puissances. En 1948, un prototype, de rotor tripale 15.70 de diamètre, 50 kW par vent de 10m/s, est alors en cours de construction, pour le compte du service de la Colonisation et de l'hydraulique. Mais il semble que cet appareil soit resté à l'état de prototype (voir 9.2.2). En 1949, la SCAM se dit en outre prête à collaborer avec Sautter Harlé pour l'étude d'aérogénérateurs de 600 W, cette fois-ci pour des installations électriques

01/04/1948.

89. La première avait une capacité de 340 Ampères-heures, celle de la nouvelle est de 500 Ampères-heures (Prunieras, 1966, p. 56).

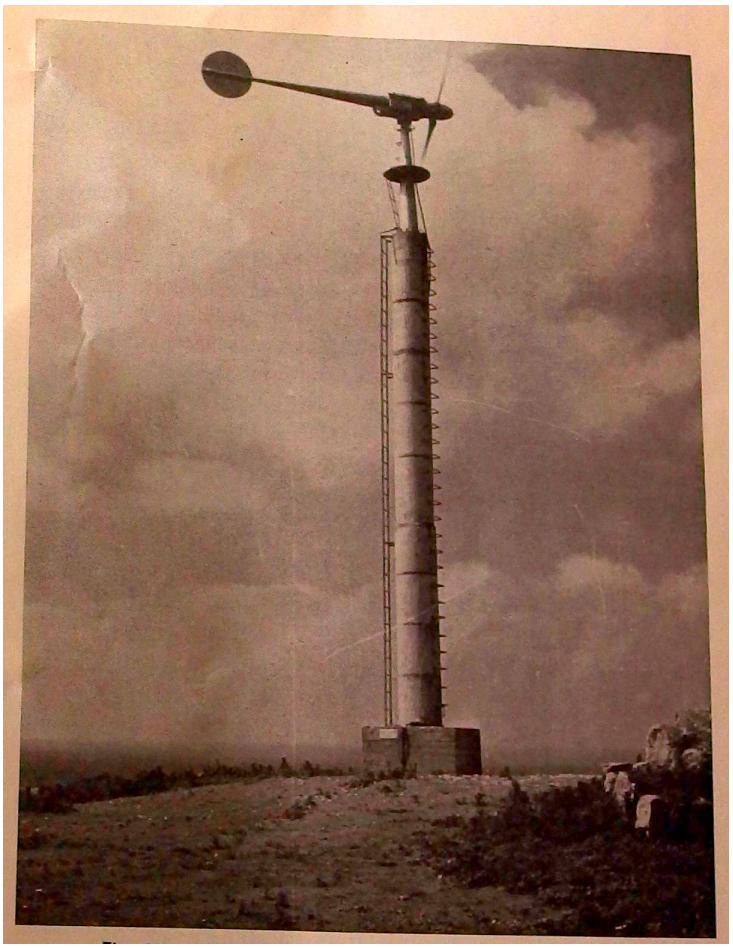


FIGURE 9.10 – Éolienne B.E.S.T de 4 800 W installée au phare des Sept-Îles en 1957 (PRUNIERAS, 1966)

de phares de la première catégorie de puissance [90], mais je n'en ai pas trouvé davantage de traces.

#### 9.1.3.4 Les petits aéromoteurs abandonnés. L'échec de l'Association nationale pour l'utilisation de l'énergie éolienne (1946-1950')

L'intérêt exclusif d'EDF pour les grands aérogénérateurs et l'allongement par le même acteur du réseau électrique ont eu pour effet l'abandon des éoliennes de pompage et électriques dans les campagnes. Cependant, à l'issue de la guerre, en situation de pénurie d'énergie, l'avenir de ces machines ne paraît pas scellé. Le cas de l'Association nationale pour l'utilisation de l'énergie éolienne permet de montrer que ce mouvement a en effet a été rapide, mais aussi de nuancer son caractère inéluctable et univoque. Ainsi, à l'issue de la seconde guerre mondiale, certains acteurs, ingénieurs, inventeurs, mais aussi responsables politiques, ont considéré les petits aéromoteurs ou aérogénérateurs comme moyen

90. AN 1991 0305/2, 1941-1957, Notes de l'entretien entre Pétry (service des Phares et balises), Darrieus et Lacroix (Compagnie électro-mécanique) et Menissier (SCAM), 28/03/1949.

de moderniser les campagnes et ont tenté de s'organiser pour faciliter de telles installations. Ils ne sont pas alors en contradiction avec les modernisateurs, puisque le Plan Monnet, conçu dans l'immédiat après-guerre, en situation de pénurie, prévoit la construction de cinq cent mille petites éoliennes dans les localités encore non desservies par le réseau électrique (De Ricou, 1955b, p. 495). Finalement, ce programme n'est cependant jamais mis à exécution.

Un Comité du vent se constitue en 1945, dans le but de faire le point sur les possibilités d'utilisation de l'énergie éolienne en France et de s'organiser pour la promouvoir. À la tête de projet, on retrouve Paul Basiaux-Defrance, ancien élève de l'École polytechnique qui fait la promotion de l'énergie éolienne depuis l'entre-deux-guerres ; Fages-Bonnery, ingénieur en chef du Génie rural de l'Aude ; Fortier-Beaulieu qui, depuis l'entre-deux-guerres, mène des expériences sur des modèles d'aéromoteurs qu'il a lui-même conçus ainsi que sur ceux de Constantin (cf 5.4), présenté comme un « pionnier » (Basiaux-Defrance, 1947). Le Congrès du vent, organisé à Carcassonne du 21 au 24 septembre 1946, est la première action menée par le Comité (De Ricou, 1955a), et on y retrouve, outre ces derniers protagonistes, plusieurs constructeurs et inventeurs français d'éoliennes (allant des petits aéromoteurs et aérogénérateurs aux aérogénérateurs de moyennes puissances) [91]. Les sujet abordés couvrent toutes les utilisations envisagées de l'énergie éolienne (pompage, production de petites, moyennes et grandes quantités d'électricité) [92]. Il y est également question de nouveaux modèles proposés et testés par des inventeurs/constructeur, de la prospection des sites en cours en France, ou encore de la production d'hydrogène par électrolyse « en vue de l'alimentation en carburant national et économique des voitures françaises » (Basiaux-Defrance, 1947).

La volonté affirmée par ces acteurs de fonder une « Association nationale pour l'uti-

91. Outre Fortier-Beaulieu, J. Estrade, également membre du Comité, ingénieur des Arts et métier et des Arts et manufactures qui présente un « rapport très documenté sur ses relevés anémométriques et expériences dans le département de l'Aude », en chiffrant le projet d'une future installation de 15 kW qu'il compte faire dans sa propriété d'une centaine d'hectares (polyculture) » ; Henri Lanaud, « industriel à Nantes, et son collaborateur M Poggi, ingénieur des Arts et Métiers [...] présentant les résultats d'essais de leur tripale de 6 m de diamètre, actionnant une génératrice asynchrone marchant en parallèle avec le réseau électrique local, et fournissant une puissance de 12 kW par vents de 10 m/s ». Ils exposent également « leurs calculs, plans d'exécution et devis d'une installation éolienne de 1 000 kW » ; Lafond, « pionnier de la turbine à aubes et à axe vertical » ; Arsandaux, « attaché au ministère de l'air » et inventeur d'une éolienne construite par Ratier pendant la guerre ; Georges Bretel, constructeur à Quédillac, qui « dit avoir installé depuis neuf ans, c'est-à-dire en pleine crise, une centaine de petits groupes éoliens (à hélices tripales et batteries d'accumulateurs) de 1/2 à 5 ch par vent de 10 m/s et qui donnent entière satisfaction à leurs propriétaires ».
Ont également été lus les rapports du constructeur Bertholon, « sur son petit groupe éolien « altervent », de 250 W par vent de 5 m/s, à hélice tripale et à génératrice monophasée à aimants permanents » ; de « P. Jacquemin, de Méréville [...] qui a réalisé un « tourniquet » constitué par les deux moitiés d'un cylindre coupé longitudinalement » (Basiaux-Defrance, 1947).

92. Mis à part les constructeurs mentionnés ci-dessus, on trouve parmi les membres du Comité : Edgar Micanel, ingénieur électricien de l'Université de Grenoble et avocat à la Cour d'appel de Grenoble ; Edmond Gaïsset, « ancien élève de l'École polytechnique ».

lisation de l'énergie éolienne » est cependant suivie « d'un grand silence de 6 ans », à l'issue duquel elle voit enfin le jour sous l'impulsion de l'industriel Fortier-Beaulieu [93]. Les premiers membres de cette association, basée à Paris, sont probablement identiques aux membres du Comité du vent primitif et aux participants au Congrès du vent. Selon un prospectus présentant l'Association peu après sa création, son but est de « promouvoir toutes études, recherches et réalisations concernant l'utilisation de l'énergie du vent » et ses moyens d'actions doivent comporter « la tenue de Congrès, la publication de bulletins, mémoires brochures, l'organisation de conférences, de cours, la création de laboratoires, etc... ». L'ambition de ses membres est ainsi de « coordonner les efforts, les connaissances scientifiques et expérimentales, les moyens de toutes sortes de tous ceux qui, sans exception, (pouvoirs publics, savants, ingénieurs, constructeurs, utilisateurs) s'intéressent à l'utilisation de l'énergie du vent [...] afin d'offrir une ressource de premier ordre à [l]'économie nationale, et, à peu près sans frais, un moyen efficace de progrès social dans les régions de la France métropolitaine et de ses Territoires d'Outre-mer où son action salvatrice ne peut être contestées » [94]. L'Association se double ensuite d'un « Office général des éoliennes » (OGE) dont le siège social se trouve également au 110 avenue Raymond Poincaré à Paris, et qui propose ses conseils aux particuliers souhaitant installer une éolienne de pompage pour l'arrosage ou l'irrigation, ou génératrice de puissances alternatives ou continues allant jusqu'à 25 kW. La brochure de présentation de l'OGE propose ainsi, forte d'« avoir travaillé longtemps en silence pour atteindre son objectif », d'« examiner le cas toujours d'espèce de l'utilisateur », de « guider l'acquéreur judicieusement et impartialement » dans le choix de son équipement, d'assurer son installation sous garantie, et d'« assurer la visite et le contrôle périodique de chaque installation » (voir, Annexe K, la brochure de l'OGE). Les membres de l'OGE souhaitent manifestement faire payer leurs prestations, ou tout au moins les visites périodiques, puisqu'ils annoncent effectuer celles-ci pour un « prix modique ».

L'action de l'Association n'a manifestement pas été à la hauteur de ses ambitions. Il n'y a eu aucun nouveau Congrès du vent, et je n'ai pas trouvé de traces de correspondance ou de liens quelconques entre le CTEV, EDF ou le service des Phares et balises et les membres de cette association, si ce n'est la présence de sa brochure et de quelques informations complémentaires dans les dossiers de Pétry concernant le CTEV. La volonté d'une coordination nationale ou de création de nouveaux laboratoires, n'a pas été accomplie. En ce qui concerne l'OGE, je n'en trouve aucune mention ailleurs que dans la brochure présente dans les archives du CTEV (dossiers de Pétry), il est cependant possible qu'il y ait eu une confusion entre l'Association et l'OGE. Cette action s'est limitée à de la

93. AN 1991 0305/3, p.d., Prospectus de présentation de l'Association nationale pour l'utilisation de l'énergie éolienne, vers 1952.

94. AN 1991 0305/3, p.d., Prospectus de présentation de l'Association nationale pour l'utilisation de l'énergie éolienne, vers 1952.

« propagande » dans des revues et à du conseil aux particuliers et aux administrations intéressées, et ce, presqu'exclusivement Outre-mer, pour des appareils allant jusqu'à des puissances moyennes, c'est-à-dire les seules disponibles sur le marché.

Ainsi, en 1954 et 1955, Charley de Ricou, ingénieur de l'École supérieure d'électricité, publie quatre articles dans *Industries et travaux d'Outre-mer*, en tant que secrétaire de l'Association, sur l'utilisation de l'énergie éolienne dans les territoires d'Outre-mer. Il y donne de nombreux renseignements visant à encourager à l'utilisation des éoliennes de petites et moyennes puissances : types disponibles, prix de revient et comparaison avec des moteurs thermiques, renseignements à donner à des fournisseurs et manière de les obtenir (régime du vent, topographie...). Il y dresse une « distinction fondamentale [...] entre deux catégories d'éoliennes : les premières, conçues et construites pour fonctionner isolément, ou même en parallèle avec d'autres voisines, comme cela existe, et celles qui sont destinées à fonctionner en parallèle sur un réseau important de distribution existant, alimenté par ailleurs par des groupes moteurs quelconques » (De Ricou, 1955a, p. 174). Il ne s'intéresse qu'à la première catégorie, pour laquelle des solutions techniques existent, alors que la seconde n'est qu'à l'étude à EDF. Ces articles sont une exhortation à des utilisateurs potentiels, comme aux constructeurs français, à prendre en considération un marché qui existe selon l'auteur en France, mais surtout Outre-mer. L'auteur cite l'objectif de cinq cent mille éoliennes prévus dans le Plan Monnet pour la métropole et précise que six cent mille petites éoliennes pourraient y être rentablement installées selon une étude économique qu'il a menée vers 1946. Mais, malgré l'importance de ce chiffre, le titre de l'article et ses conclusions montrent qu'en 1954, l'Association a abandonné l'espoir d'un marché pour ces machines ailleurs qu'Outre-mer (De Ricou, 1955b, p 496). Elle cible désormais tout particulièrement les « zones arides », avec des arguments qu'on retrouvera dans le projet du service de la Colonisation et de l'hydraulique d'installation d'éoliennes de pompage dans les Hauts plateaux oranais (cf 9.2.2.2). Selon de Ricou, « dans l'état actuel des choses, l'éolienne est seule capable de développer (si ce n'est de sauver) le développement tout court, avec toutes ses conséquences, de nos territoires d'Outre-mer ». En effet, les autres sources d'énergie y manquent, et « la nature, dans son œuvre périodique de destruction, l'avance du désert lui-même, n'attendent pas », aussi « l'émancipation désordonnée et violente (certainement) des populations déshéritées n'attendra pas davantage » (De Ricou, 1955b, p. 497). Il s'agit ici de la rhétorique de l'aide au développement avant les décolonisations qu'on retrouvera dans la section 9.2 : les indigènes ont besoin de l'aide de la technique occidentale pour tirer parti de leurs richesses, voire pour survivre face à une nature implacable, et ceci justifie la nécessité d'une présence française dans les territoires d'Outre-mer.

Le cas du Congrès du vent et de l'Association pour l'utilisation de l'énergie éolienne montre ainsi l'engouement pour l'utilisation d'éoliennes de petites puissances ainsi qu'une

tentative avortée de coordination nationale de la part d'ingénieurs et de constructeurs dans l'immédiat après-guerre. Il révèle également la rapide restriction du marché en métropole, ainsi que le repositionnement de certaines sociétés dans les Territoires d'Outre-mer dans les années 1950. Cette association a probablement vu sa fin avec les décolonisations.

#### 9.1.3.5 Synthèse 9.1.3

EDF et service des Phares et balises ont collaboré pour mesurer énergie du vent en métropole, et sollicité des entreprises françaises et étrangères, parfois les mêmes, pour mettre au point des aérogénérateurs. Ces deux acteurs ont des finalités différentes : construction de centrales électriques à destination du réseau national (puissances de l'ordre du mégawatt) pour EDF, et mise en place petits aérogénérateurs (entre une centaine de watts et une dizaine de kilowatts) avec accumulateurs à destination de sites isolés en mer pour service des Phares et balises. Une autre convergence que la mesure du vent et la mise au point, en général, d'aérogénérateurs, réunit EDF et le service des Phares et balises : l'alimentation en électricité de sites isolés du réseau, et notamment des îles, pour EDF, est corrélée avec celle des phares et balises. Ces deux acteurs sont complémentaires d'un point de vue scientifique, technique et organisationnel : EDF est expert de l'électrotechnique et dispose de moyens d'expérimentation le service des Phares et balises dispose de moyens techniques et organisationnels pour mesurer vent en divers points du littoral et centraliser les données. Or, le littoral est particulièrement visé pour l'alimentation électrique par les aérogénérateurs : le vent y est régulier et fort, particulièrement au Nord-Ouest qui toujours moins bien desservi que le reste de la France.

EDF expérimente une grande variété de modèles originaux, et le service des Phares et balises teste plusieurs modèles disponibles sur le marché, dans le but d'obtenir l'énergie utile sous la forme escomptée à un prix concurrentiel avec les convertisseurs concurrents (centrales thermiques, hydrauliques, marémotrices pour EDF, groupes électrogènes pour le service des Phares et balises). Cette variété montre un imaginaire technicien relativement libre, et un domaine de la technique non encore spécifique. Le caractère hybride des recherches, entre aérodynamique et électrotechnique, en est un signe, comme l'illustre parfaitement l'éolienne B.E.S.T de Nogent-le-Roi. Le système électrique exerce une faible inertie sur la forme des sous-convertisseurs primaires, c'est-à-dire ceux qui convertissent l'énergie mécanique du vent en énergie mécanique au sein de la chaîne de conversion (de manière globale, des roues). Du point de vue des acteurs, les énergéticiens ne se sont, sauf exception de la Compagnie électro-mécanique, jamais penchés sur cette question. Il n'y a pas d'experts, pas de dispositions techniques *a priori*, et la place toujours libre pour les inventeurs. Mais la majorité d'entre eux est peu prise en considération par le CTEV.

L'existence de l'infrastructure électrique est primordiale pour les études d'EDF sur

aérogénérateurs : elle est la condition de possibilité et la destination des aérogénérateurs. Il rend en effet envisageable l'utilisation de cette énergie irrégulière sans nécessité de stockage/régulation, grâce à une complémentarité journalière entre toutes les centrales électriques. Il permet de tirer profit d'une complémentarité saisonnière éolien/hydraulique déjà espérée pendant la guerre, et montrée par la Division énergie du vent dès 1953. L'énergie éolienne est complètement assimilée à l'énergie hydraulique, avec la représentation sur un même diagramme de la productibilité saisonnière des deux sources d'énergie, de façon homogène.

Comme pour les usines marémotrices dans l'entre-deux-guerres puis dans les années 1950, cette assimilation des aérogénérateurs à des centrales, cette intégration au système électrique, font du coût du kilowattheure électrique un critère primordial de la réussite de ces machines. En situation de concurrence défavorable, sur ce seul critère, avec d'autres sources d'énergie du système, les projets sont abandonnés par EDF, en 1966. C'est la même logique qui explique la réussite des petits aérogénérateurs B.E.S.T au service des Phares et balises, donc en-dehors du système électrique : dans cette situation particulière (site isolé), les aérogénérateurs s'avèrent plus avantageux.

Les travaux du CTEV s'inscrivent dans une dynamique internationale. Les travaux américains de Grand Pa's Knob constituent ainsi un modèle pour les travaux EDF sur aérogénérateurs. Ils motivent les études de la Division énergie du vent et donnent l'ordre de grandeur, en termes de puissance installée, des modèle projetés par EDF. Par ailleurs, le service des Phares et balises s'adresse d'abord à constructeurs étrangers (américains), ainsi qu'EDF avec le moulin à vent Lykkegaard (Danemark). Le service des Phares et balises , davantage « client » que « développeur », s'adresse ensuite à des constructeurs français, moins dans une optique nationaliste que parce que les modèles américains ne sont pas adaptés aux conditions marines. EDF cherche par contre à développer une technologie française.

Enfin, on peut souligner que l'abandon des éoliennes de pompage dans les campagnes n'apparaît pas encore inéluctable à la fin de la seconde guerre mondiale. Si le développement du réseau électrique semble les faire disparaître rapidement, il est intéressant de voir que, pour les planificateurs, ainsi que certains ingénieurs et responsables politiques, elles constituaient toujours un facteur de modernisation rurale à la fin de la seconde guerre mondiale, en situation de pénurie.

### 9.1.4 Fours et photopiles solaires pour le prestige de la France. CNRS, Université, industriels (1946-1973)

Les recherches menées autour du CNRS et de certains laboratoires universitaires français sur l'exploitation de l'énergie solaire à l'issue de la guerre ont été très largement traitées, en particulier par Pehlivanian, (2014), mais aussi par Teissier, (2013), ou encore des acteurs de l'énergie solaire comme Pharabod, (1993) ou Rodot, (1993). Le foisonnement de ces recherches en France dans les années 1950-1960 est visible dans la thèse de Pehlivanian, (2014), et Teissier (2013 ;2015) a mis en évidence une dynamique de coopération ou de compétition internationales (voire nationales [95]) entre certaines de ces institutions, reflétant pour le premier un contexte de guerre froide et pour le second une quête, par les « politiciens du Nord »[ du développement au Nord et au Sud. Le même auteur a ainsi fait ressortir deux grands types de motivations et de formes de technologies dans ces recherches : celles à vocation de prestige [96] international reflétant une compétition entre nations industrialisées, desquelles relèvent les travaux sur les fours solaires et sur les photopiles (ce qu'il appelle la « haute technologie »), et celles à vocation d'aide au développement des pays jugés sous-développés et qui concernent l'habitat solaire (ce qu'il appelle « basse technologie »). Je reprendrai sa conclusion selon laquelle les applications de « haute technologie » auraient été privilégiées par les politiques françaises de recherche scientifique et technique dans le cadre d'une concurrence entre pays industrialisés, en particulier dans les années 1960.

Dans cette sous-section, il est question des institutions métropolitaines qui se sont impliquées dans des recherches sur des convertisseurs de « haute technologie » développées, en rupture avec les travaux de guerre et d'avant guerre sur l'énergie solaire, dans certains laboratoires de recherche du CNRS et universitaires. Les travaux historiques cités plus haut sont mis à profit (les autres seront traitées dans la sous-section 9.2.3). L'absence d'implication directe d'EDF dans les recherches sur l'énergie solaire, ainsi que sa position réservée par rapport aux possibilités de cette source d'énergie, a déjà été montrée en 9.1.1. Dans les autres institutions, les recherches ont essentiellement pour vocation des applications spécifiques et limitées. Elles ne doivent donc pas répondre à des besoins en énergie estimés, comme les marées et le vent pour EDF. C'est le cas, pour une large part d'entre ses travaux, de l'équipe de Trombe et, exclusivement, de celle de Rodot, au CNRS, mais aussi de celle d'Aigrain au laboratoire de physique des solides de l'ENS, de celles du CNES, et des industriels qui travaillent avec eux. Cette sous-section présente ces travaux successivement. Elle montre également comment la création, en 1966, de l'Association

95. On y pressent une compétition larvée entre Perrot à l'Université d'Alger puis de Marseille, et de Trombe au Laboratoire de l'énergie solaire du CNRS.

96. Ce n'est pas le mot qu'il utilise, je reprends à mon compte ce terme utilisé par Hecht, (2014) à propos des enjeux de l'énergie nucléaire.

française pour le développement de l'énergie solaire (AFEDES), a été une tentative de structuration nationale de la recherche sur l'énergie solaire, jusqu'alors dispersée entre diverses institutions menant indépendamment des recherches sur des technologies diverses, et ce en réponse à la dynamique de recherches internationale où la France devrait prendre sa place. « Haute » et « basse » technologies y sont alors représentées.

Au début de ses travaux sur l'énergie solaire, les visées de Trombe, la forme des convertisseurs qu'il étudie ainsi que le mode de recherche sont très différentes des recherches le CNRS avait soutenues pendant la guerre, essentiellement comme organisme financeur de projets dirigés par le secrétariat d'État aux colonies Il ne s'agit plus, en effet, de mettre au point des convertisseurs permettant de valoriser les colonies, mais de construire un outil de recherche en chimie des hautes températures, et plus particulièrement dans le domaine des matériaux réfractaires, ces solides qui ont un très haut point de fusion et qui sont « essentiels pour le développement des industries aérospatiales et nucléaires » (Teissier, 2013, p. 13). En outre, que ce soit Insol, Barbey, Maurain ou Barjot, les convertisseurs qu'ils étudiaient n'utilisaient pas de miroirs paraboliques ou d'appareils de concentration du rayonnement solaire (pour les trois premiers, il s'agissait de caisses chauffantes selon différentes dispositions, et pour le quatrième, de réservoirs d'eau surchauffés grâce à un film transparent en surface) pour des raisons de coût, liées à l'usage envisagé qui ne demandait pas d'obtenir les températures les plus importantes, mais de la chaleur à un coût économique. Selon une terminologie décrite par Trombe lui-même, les convertisseurs expérimentés par son équipe sont ainsi des « fours solaires », c'est-à-dire des « appareils donnant de grandes concentrations d'énergie solaire » pour l'obtention de températures les plus hautes possibles (Trombe, 1955, p. 443) [97].

C'est ainsi que Trombe, dans le cadre plus global d'une publication collective sur la Chimie des hautes températures par le Comité du même nom, entame, en 1946, un état de l'art sur les moyens d'utiliser l'énergie solaire pour la fusion des métaux. Pour expérimenter cette possibilité, il entreprend d'installer et de tester des miroirs paraboliques, issus de la défense anti-aérienne, avec le sous-directeur de son laboratoire Marc et la doctorante Charlotte Henri-La Blanchetais, à l'Observatoire de Meudon dont une petite partie leur est prêtée par son directeur (Pehlivanian, 2014). Les résultats encourageants de ces expériences convainquent Trombe de l'intérêt des fours solaires sur les fours électriques pour la chimie des hautes températures. Il attire l'attention de l'Armée sur ces machines par le biais du général Jean-Paul Bergeron, qu'il convainc du profit qu'elles représenteraient pour l'expérimentation de matériaux et la production de matières intéressant la Défense nationale [98].

97. Ainsi, « le four lui-même, dans lequel est utilisée cette énergie, ne représente qu'une faible partie de l'ensemble. La plus grande partie est constituée par le système qui sert à concentrer le rayonnement et, éventuellement, par celui qui sert à l'orienter » (Trombe, 1955, p. 443).

98. Selon Pehlivanian, (2014, p. 57), les matériaux réfractaires pouvaient ainsi rentrer dans la com-

Le CNRS décide, en 1949, la construction d'un Laboratoire de recherches sur l'énergie solaire (LES). Malgré l'intérêt initial de l'équipe de Trombe pour le domaine particulier de la chimie des hautes températures, Laboratoire de l'énergie solaire étend ses recherches sur l'énergie solaire à d'autres applications, et fait ainsi le lien avec les recherches passées. La construction du Laboratoire de l'énergie solaire s'effectue sous la tutelle conjointe des ministères de l'Éducation nationale et de l'Armée (direction générale des Poudres), qui cède et rénove pour ce faire une partie de la citadelle Vauban de Mont-Louis (commune d'Odeillo-Via), où le CNRS fait construire et aménager le nouveau laboratoire avec un budget de 350 millions de francs. La direction technique et industrielle de l'Air offre également son concours financier (10 millions de francs). Mais on trouve aussi, parmi les financeurs du projet, les gouvernements généraux du Maroc (1 million de francs) et d'Algérie (Pehlivanian, 2014, p. 57), introduisant une dimension coloniale dans les travaux du Laboratoire de l'énergie solaire. D'après Teissier, (2013, p. 17), ces deux territoires, tout comme l'Armée, sont intéressés par les applications solaires dans le bâtiment, mais aussi pour l'agriculture, et poussaient le Laboratoire de l'énergie solaire dans ce sens. Ces préoccupations de confort domestique rejoignent une partie de celles du CNRS et du secrétariat d'État aux colonies pendant la guerre, mais aussi celles de l'ONRSI et du gouvernement de Tunisie et de l'Armée pendant l'entre-deux-guerres, et, plus globalement, celles de nombreux inventeurs de convertisseurs solaires des deux périodes décrites dans les Parties 1 et 2. Les deux territoires Nord-africains sont en outre probablement intéressés par la possibilité de produire des engrais chimiques pour la mise en valeur agricole des colonies.

Le Laboratoire de l'énergie solaire, dirigé par Trombe, est inauguré en 1950. Pendant toute la décennie 1950, il connaît une « croissance régulière », liée à l'augmentation des moyens du CNRS, à la politique de ce dernier qui est « particulièrement favorable aux centres provinciaux d'avant-garde » et à ses liens avec le CEA, l'Armée et l'industrie aéronautique (Teissier, 2013, p. 15). Des recherches sont menées dans les deux grandes directions qu'il se donne désormais : celle de la chimie des hautes températures, et celle des applications domestiques et agricoles de l'énergie solaire (chauffage et distillation de l'eau, climatisation, réfrigération, irrigation et chauffage des serres). Cet élargissement des domaines d'étude du Laboratoire de l'énergie solaire aux applications coloniales est stimulé par l'implication des gouvernements généraux d'Algérie et de Tunisie dans la construction du Laboratoire de l'énergie solaire, mais aussi par la participation de Trombe aux symposiums de Madison (1953) et de New Delhi (1954) de l'UNESCO sur l'énergie solaire (Teissier, 2015, p. 201). En 1954 est ainsi achevée la construction d'un four solaire, alors le plus grand du monde, muni d'un miroir parabolique d'un diamètre de 12 m et d'une

position des tuyères, éléments constitutifs de propulseurs, mais aussi être utilisés pour la fabrication d'acide nitrique, réactif nécessaire à la fabrication d'explosifs. En outre, le CEA est aussi concerné par ces travaux, car les matériaux réfractaires intéressent l'industrie nucléaire (Teissier, 2013, p. 17).

puissance de 75 kW, et dit « semi-industriel » probablement en raison de sa puissance intermédiaire entre celle des miroirs paraboliques les plus courants et celle des centrales énergétiques classiques. Ce four fait du Laboratoire de l'énergie solaire un « centre internationalement reconnu » (Teissier, 2013, p. 16). En outre, des essais de climatisation solaire sont effectués au Laboratoire de l'énergie solaire, allant du « mur Trombe » (procédé de chauffage utilisant la convection naturelle) à la réfrigération solaire. À nouveau, c'est à Colomb-Béchar, sur le tracé de plusieurs anciens projets de chemin de fer Transsaharien, qu'un convertisseur solaire, également financé par l'Armée, est construit : il ne s'agit pas d'un chauffe-eau solaire comme pour le cas de Pasteur (financé par l'Armée — cf 5.4), mais, comme il l'avait été envisagé entre autres pour le procédé de Barbey (avec le secrétariat d'État aux colonies et le CNRS — cf 3.4), de production de glace.

Pendant la décennie 1960, qui est aussi celle de la « politique de la grandeur gaullienne » (Teissier, 2013), le Laboratoire de l'énergie solaire se focalise sur un projet de grande ampleur : le four solaire de Mont-Louis-Odeillo. En effet, « [l]ancé par la dynamique coloniale, l'habitat solaire ne fait pas recette en métropole alors que l'Empire s'effrite » (Teissier, 2013, p. 18). Aussi, si « plusieurs maisons solaires sont construites dans la commune de Mont-Louis-Odeillo pour démontrer la viabilité du système en conditions réelles » (Teissier, 2015, p. 202), les applications de ces procédés sont restées très limitées.

À la fin des années 1950, l'équipe du Laboratoire de l'énergie solaire entreprend ainsi le projet d'un four de taille cette fois-ci « industrielle », le four géant d'Odeillo, muni d'un miroir parabolique de 40 m de haut et 50 m de large et d'une puissance de 1 000 kW, conçu à partir des données acquises sur le four de Mont-Louis Odeillo (Teissier, 2007). Celui-ci doit cumuler une fonction instrumentale (recherche en chimie des hautes températures) et industrielle (production de composés chimiques). La construction du four à Font-Romeu-Odeillo-Via (près de Mont-Louis Odeillo) dure huit ans (1961-1969) et mobilise « l'action conjuguée de trois ministères (Éducation, Défense, Travaux publics) et d'une quinzaine de contractants privés, sous la direction d'Henri Vicariot (1910-1986), polytechnicien, ingénieur en chef de l'Aéroport de Paris » (Teissier, 2013, p. 20). Elle coûte six millions de nouveaux francs (Pehlivanian, 2014, p. 82). L'ambition de ce four est, toujours, de mener des recherches sur les hautes températures, mais aussi de pouvoir traiter d'importantes quantités de matières (« plusieurs tonnes de matériaux en quelques heures ») pour l'industrie militaire, aéronautique ou encore la micro-électronique (Pehlivanian, 2014, p. 93).

Malgré une conjoncture défavorable aux recherches sur l'énergie solaire, liée aux décolonisations et à la baisse du prix du pétrole, ce projet est ainsi réalisé sous le gouvernement du général de Gaulle, dont la politique de la grandeur donne une place centrale à la science et à la technologie (Teissier, 2013, p. 18). Il connaît un importante renommée interna-

tionale et, en particulier, aux États-Unis, dont le département de la Défense dispose d'une voix au comité de direction du Laboratoire de l'énergie solaire (Teissier, 2013, p. 21). Le four solaire géant est ainsi, comme la technologie nucléaire (Hecht, 2014), un objet de prestige pour la France et contribue à rendre à la nation sa grandeur perdue. Selon Teissier, (2015, p. 211), le four géant du Laboratoire de l'énergie solaire représente, à la fois un succès technique, scientifique et géopolitique, et un échec économique. En effet, le four est opérationnel, mais il ne permet pas une « exploitation industrielle rentable pour la fabrication ou la purification des matériaux solides. » Ce four solaire est toujours opérationnel aujourd'hui comme centre d'essais et laboratoire de recherches.

Dans les années 1950, le CNRS s'implique également dans le développement d'une autre technologie de pointe pour l'utilisation de l'énergie solaire, le solaire photovoltaïque, et ce pour des applications aérospatiales dans un contexte de guerre froide. Ce programme de recherches mené au laboratoire de Bellevue sous la direction de Michel Rodot, permet au CNES, dès sa création en 1962, de trouver « toutes prêtes en laboratoire, les photopiles solaires de haut rendement » (Rodot, 1993, p. 88). Le CNES, nouvelle institution centralisée de recherche scientifique issue de la politique gaullienne, et chargée de mener à bien un programme national de recherche aérospatiale, est en effet intéressé par les possibilités d'alimenter les satellites artificiels par le biais de ce convertisseur, comme cela se faisait déjà Outre-Atlantique et en URSS. La Société anonyme de télécommunications (SAT) est ainsi chargée par le CNES d'en « faire le développement industriel », et des satellites artificiels français en sont effectivement équipés « pendant une dizaine d'années », de même que certains satellites européens(Rodot, 1993, p. 88). Une autre société, Radiotechnique-Compélec (RTC), spécialisée dans les télécommunications et dont font partie la Compagnie générale d'électricité (CGE) et Philips, commercialise quant à elles des photopiles pour les balises aériennes et maritimes, ainsi que pour les relais hertziens (Pehlivanian, 2014, p. 414-727). Ces générateurs photovoltaïques délivrent une puissance de 0.1 à 10 W.

Il s'agit donc ici, avec ces premières cellules photovoltaïques, d'un usage très spécifique de l'énergie solaire. Jusque vers 1970, cette technologie est alors perçue comme ne pouvant permettre la production d'électricité que pour ce type d'usages nécessitant de très petites puissances. En 1957, dans une étude sur les possibilités de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire, Remenieras affirme ainsi, à propos des convertisseurs utilisant les effets photoélectrique ou thermoélectrique que, « malgré leur rendement parfois élevé et la simplicité que leur confère l'emploi d'appareils purement statiques », ces solutions sont « encore unanimement jugées trop coûteuses dès qu'il s'agit de puissances excédant celles nécessaires à de petites installations » [99]. En 1970, François Desvignes, chercheur

99. Il prend pour exemple les résultats de l'entreprise américaine Bell pour lequel le prix de 50 000 fr/kWh annuel serait en fait « du même ordre que celui de la pile de lampe de poche ».

au Laboratoire d'électronique et de physique appliquée [100], où il a travaillé sur les cellules photoélectriques, ouvre les perspectives des utilisations « terrestres » de ces convertisseurs au pompage et à l'électrolyse (probablement pour la production d'eau douce). Mais selon lui, ces applications, qu'il qualifie de « non nobles », et sur lesquelles des équipes de recherches étrangères travaillent alors, n'ont encore qu'un avenir très lointain. Une production industrielle en grande série serait effectivement nécessaire pour obtenir un prix de revient concurrentiel avec les autres convertisseurs, ce qui demanderait des investissements « à l'échelle d'un pays qui en a l'utilité et l'intérêt », alors que « les pays pour lesquels un tel investissement serait le plus justifié [...] sont en même temps ceux dont le budget ne permet pas des investissements à très long terme et d'une rentabilité encore problématique » (Desvignes, 1970, p. 59). En revanche, l'enjeu de positionnement international de la France dans l'industrie des photopiles pour la conquête spatiale est très explicite. En 1970, Rodot et Pierre Vasseur, chef de la division Études techniques et développements du CNES de la Direction scientifique et technique du CNES, disent ainsi fièrement, dans les *Cahiers de l'AFEDES*, que dans une « compétition internationale sévère », « la France [a pu] prendre une place de choix sur le marché international : sa production équipe maintenant les satellites français et un certain nombre de satellites européens et américains » (Rodot et Vasseur, 1970, p. 9).

Le Laboratoire de physique des solides de l'ENS, sous la direction de Pierre Aigrain , s'intéresse, à partir des années 1950, à la possibilité de générer de l'électricité solaire grâce à l'effet thermo-électrique, probablement pour les mêmes applications que le solaire photovoltaïque. Dans le rapport sus-cité, Remenieras affirme qu'Aigrain aurait évalué à 3% le rendement d'un « générateur solaire thermo-électrique utilisant un couple de semi-conducteurs » à collecteur plan, [101], rendement moindre que celui des cellules photoélectriques (utilisées dans les convertisseurs photovoltaïques), qui atteignait, pour les cellules développées par la SAT, 14%.

Mis à part certains travaux du Laboratoire de l'énergie solaire sur l'habitat et l'agriculture solaire qui se sont surtout concentrés dans les années 1950, ces recherches métropolitaines sur de nouveaux convertisseurs dans des laboratoires français (du CNRS ou universitaires) concernent donc en grande partie des techniques sophistiquées et chères (fours solaires, conversion photoélectrique ou thermoélectrique) qui ne répondent pas, ou de manière indirecte (pour les applications à l'industrie nucléaire) à l'estimation d'un besoin énergétique, comme EDF l'espérait des marées ou le vent, mais à des applications très spécifiques (aérospatiales, militaires). Masson, en 1960, dit ainsi de la conversion directe

Archives EDF, 852756, p.d., Remenieras, « Introduction à l'étude de l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'énergie électrique », 06/1957.

100. Antenne française de la société Philips.

101. Archives EDF, 852756, p.d., Remenieras, « Introduction à l'étude de l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'énergie électrique », 06/1957.

de l'énergie solaire en énergie électrique fait partie des sujets « sur lesquels le laboratoire n'a pas fourni de données à l'économiste (Masson, 1960, p. 173) ».

EDF a suivi de loin ces travaux mais ne s'est pas directement impliqué dans des recherches car ses responsables ne jugent pas envisageable la production de grandes puissances électriques, ni en métropole, ni Outre-mer, pour des raisons économiques (cf 9.1.1). On peut souligner que Trombe lui-même considérait les moteurs solaires comme non compétitifs et que c'est probablement pour cette raison que le Laboratoire de l'énergie solaire ne s'est pas penché sur ce type de convertisseur [102].

Avant les décolonisations (et, après les décolonisations, à l'Université d'Alger), les applications spécifiques de l'énergie solaire (militaires, spatiales) ne sont pas les seules à être étudiées en France métropolitaine. Des applications à l'habitat mais aussi à l'agriculture solaires, techniquement opérationnelles dans les années 1950, ont été mises au point, mais peu de réalisations en sont cependant effectuées. Pourtant, des applications métropolitaines sont possibles pour le mur Trombe ou encore pour la réfrigération solaire, comme le montrent la construction de quelques maisons solaires dans les Pyrénées-Orientales. De même, des chauffe-eau solaires sont disponibles dans le commerce et utilisables dans les régions ensoleillées de France. Ainsi, la société Insol, qui avait été encouragée par le secrétariat d'État aux colonies pendant la guerre, commercialise encore des chauffe-eau solaires, dont certains ont été utilisés dans le Sud de la France dès les années 1940 (cf sous-section 8.2.2). Cette société, initialement basée à Bordeaux, s'est implantée au Maroc (Casablanca) dans les années 1950 (devenant Insol Maroc, puis Radiasol), espérant probablement y trouver une clientèle plus étendue. Cette société n'a probablement pas pu survivre à l'indépendance des territoires d'Afrique du Nord [103]. Alors que des techniques opérationnelles sont disponibles, aucune politique publique n'est en effet mise en place pour encourager l'emploi de ces convertisseurs en France, qui restent chers par rapport à des convertisseurs conventionnels, surtout en période d'« abondance » énergétique ressentie grâce au prix décroissant du pétrole mondial. À propos des chauffe-eau solaires, Remenieras dit ainsi, en 1957, qu'il est « économique dans de nombreuses régions bien ensoleillées », mais que son prix trop élevé freine la clientèle particulière, donc « il appartient aux collectivités de donner l'exemple d'un plus grand souci de l'intérêt général en les utilisant pour les services de douches ou les hôpitaux » (Archives EDF, 852756, p.d., Remenieras, « Introduction à l'étude de l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'énergie électrique », 06/1957.).

Dans les années 1950 et 1960, il y a donc une diversité de recherches métropolitaines sur l'énergie solaire. Le « rapatriement » de Perrot et de ses travaux sur l'énergie so-

102. En 1955, au colloque de New Delhi sur l'énergie solaire, il dit ainsi que les moteurs solaires « sont encore beaucoup trop chers » (Trombe, 1956).
103. Le dernier brevet de cette société est de 1960 (n°798.480)

laire à l'Université d'Alger, davantage voués aux applications industrielles, domestiques et agricoles de l'énergie solaire ont ajouté à cette diversité d'acteurs et de domaines d'applications. En outre, l'équipe de Masson à Dakar poursuit, malgré l'indépendance du Sénégal, ses recherches sur les chauffe-eau et les pompes solaires (pour ces deux sujets, voir 9.2.3).

Malgré cette ambition de fédérer les recherches françaises sur l'énergie solaire, le rôle de l'AFEDES est resté, selon Teissier, (2015, p. 213), « essentiellement éditorial » avec la publication des *Cahiers de l'AFEDES*. Ceux-ci montrent néanmoins la volonté annoncée de mise en commun des travaux et de dynamique collective sur tous les sujets concernant l'énergie solaire, quelles que soient les applications (spatiales, métropolitaines, Outre-mer et « pays en voie de développement »). Réalisé par le groupe de travail « Études pyrhéliométriques », dirigé par l'ingénieur en chef de la Météorologie nationale Perrin de Brichambault, le premier numéro est ainsi consacré aux méthodes de mesure du rayonnement au sol (leurs modes opératoires et leurs appareils de mesure), et témoigne de l'ambition d'homogénéiser ces méthodes afin d'obtenir une cartographie des ressources pertinente pour leur utilisation. Les mesures du rayonnement solaire étaient en effet jusqu'alors effectuées par des services de météorologie qui n'avaient pas pour but premier l'emploi de l'énergie solaire. C'est ce que font remarquer Perrot et Touchais en 1963 :

> « Il importe avant tout de connaître avec une bonne précision les particularités de cette climatologie. Or, c'est une observation banale pour les héliotechniciens, la climatologie solaire, qui est assez bien connue pour les besoins de la météorologie, laquelle se contente de valeur globales et moyennes, l'est très peu pour les besoins de l'héliotechnique ; ceux-ci exigent en effet la séparation de la radiation directe et de la radiation diffuse, et s'intéresse davantage aux diagrammes des puissances reçues et cumulées (diagrammes de durée) qu'aux pointes exceptionnelles de la radiation et ses variations aléatoires (Perrot et Touchais, 1963, p. 211). »

La remarque de Perrot et Touchais ne concerne pas que le cas de l'Algérie, et, dix ans plus tôt, Trombe, au colloque de l'UNESCO de New Delhi, se disant « f]rappé du développement des mesures concernant le vent », en appelle à un « inventaire du rayonnement du soleil dans différents pays » (Trombe, 1956, p. 173). Ce sujet est pris en considération par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) à la fin des années des années 1960, qui coordonne alors des travaux internationaux sur la mesure du rayonnement solaire [104]. C'est ce qui pousse Perrin de Brichambault à proposer à l'AFEDES de travailler à la création d'un « étalon international du rayonnement solaire » [105] — un premier rapport du groupe « Études pyrhéliométriques » précise qu'« il ne s'agit pas ici d'un point de

104. Archives EDF, 852752, p.d., AFEDES, PV de la séance du 22/09/1966.
105. Archives EDF, 852752, p.d., AFEDES, Séance du 16/02/1966.

« politique de prestige », mais d'une volonté de « un soutien utile » et d'« aide efficace » à l'OMM, ou encore de « coopération internationale » [106]. Le groupe conclut à la nécessité d'une action nationale coordonnée en particulier entre le CNRS (LES) et la Météorologie nationale.

Au-delà de l'action de coordination voulue par l'AFEDES par ce groupe de travail « études pyrhéliométriques », on peut y relever, comme ce fut le cas pour les marées dans l'entre-deux-guerres et pour le vent à l'issue de la guerre, une ambition de cartographier les ressources en énergie solaire, qui représente une nouvelle manifestation de mise en ressource du territoire par les énergies naturelles. À ce sujet, des cartes solaires sont déjà présentées par certains des acteurs déjà mentionnés, sans qu'un travail de coordination national ou international ait été fait. C'est ainsi que Trombe présente dans les années 1950 une carte indicative de l'énergie solaire en métropole, représentant le nombre d'heures d'ensoleillement annuel, et provenant de données de l'Office météorologique national (cf Figure 9.11). Dix ans plus tard, Masson représente de même les heures annuelles d'insolation obtenues par l'ancien service météorologique d'Afrique occidentale française pour cartographier les disponibilités en énergie solaire dans ces pays ayant alors acquis leur indépendance (voir Figure 9.12). À la même période, Marcel Perrot, de l'Institut de Marseille, signale l'insuffisance de cette donnée pour les « héliotechniciens », et établit une carte de la puissance solaire instantanée en métropole, qui a cependant la même allure que celle de l'ensoleillement annuel. Elle permet selon lui de montrer que « les régions côtières ouest et sud sont favorables à l'utilisation de l'énergie solaire » (Perrot, 1963, p. 39).

Les recherches métropolitaines sur l'énergie solaire se sont donc focalisées sur des applications d'abord scientifiques (LES) (années 1940), puis coloniales (LES puis Université d'Alger), militaires (LES) et spatiales (CNES, laboratoire de physique des solides de Bellevue) (années 1950), puis scientifiques, industrielles (LES) et néo-coloniales (Université d'Alger) (années 1960). Les enjeux énergétiques de ces recherches sont restés minoritaires face aux enjeux géopolitiques de grandeur technologique et de maintien d'une emprise sur les territoires du Sud (développés dans la sous-section 9.2.3). Des techniques opérationnelles ont été mises au point : fours et photopiles solaires, mais aussi distillateurs (comme pendant la période précédente), maisons, réfrigérateurs et serres solaire. Il y a eu, en métropole, peu de diffusion de ces techniques, qu'il s'agisse de l'habitat (enjeu énergétique) ou de la culture (enjeu agricole) solaires, ou des fours solaires à applications industrielles pour la fabrication de matériaux. Ces convertisseurs solaires se révèlent en effet non compétitifs économiquement, avec la perte de l'acuité des enjeux énergétiques et

106. Archives EDF, 852752, p.d., Perrin de Brichambault, « Rapport concernant les activités du groupe de travail « études pyrhéliométriques » », 22/09/1966.
108. Archives EDF, 852752, p.d., Masson, « Le rayonnement solaire dans l'Ouest africain », 21/09/1966.




FIGURE 9.11 – « Carte de France représentant les différents taux d'ensoleillement, en nombre d'heures de soleil par an. Extraite de Félix Trombe, conférence faite devant la Société chimique de France, le 10 octobre 1952 » (PEHLIVANIAN, 2014, p. 55). Données provenant de l'Office national météorologique (TEISSIER, 2015, p. 194).

de l'empire colonial. La seule application à s'être alors généralisée est ainsi la conversion photovoltaïque pour les satellites artificiels.

Ainsi, un point commun entre les recherches sur le solaire en métropole et les recherches sur les marées autour d'EDF au même moment est l'enjeu de prestige technologique. Mais une différence avec les marées et le vent est l'enjeu énergétique minoritaire pour la métropole, du fait du manque de possibilités de produire économiquement de l'électricité par les convertisseurs solaires, ce qui explique l'absence d'EDF dans ces recherches. Ceci met en évidence le passage obligé par le réseau électrique et les centrales de grande puissance pour tout projet d'approvisionnement énergétique métropolitain après la seconde guerre mondiale, ainsi que l'importance, dans la politique énergétique métropolitaine, d'EDF. Son avis négatif sur l'intérêt des centrales solaires a probablement été déterminant dans l'absence de recherches en ce sens en France. Le système électrique relègue les convertisseurs solaires à des espaces lointains : refuges de montagne, territoires d'Outre-mer, espaces extra-terrestres.

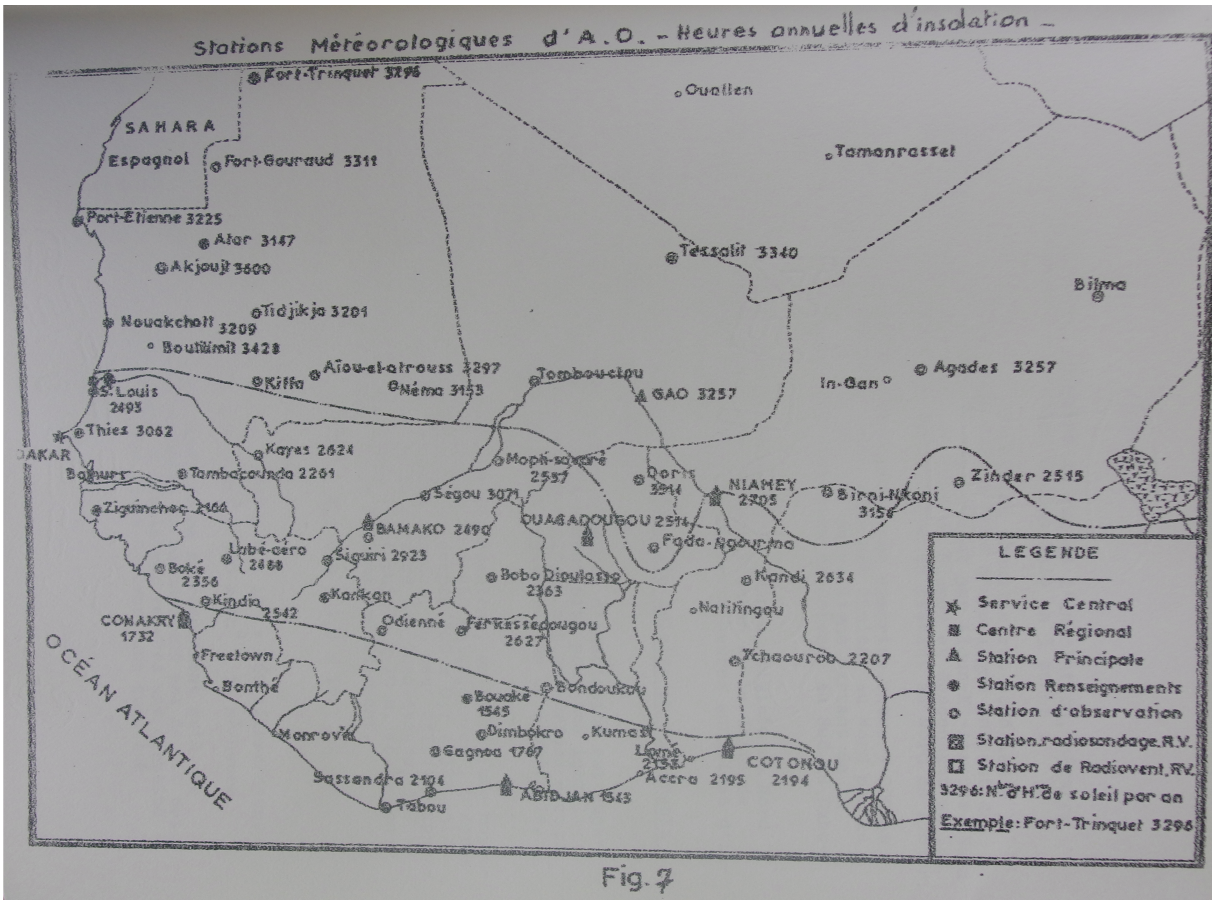



FIGURE 9.12 – « Stations météorologiques d'Afrique Occidentale — Heures annuelles d'insolation » [108]

Par ailleurs, le contexte international se révèle primordial, qu'il s'agisse de coopération et d'aide au développement (avec les pays du Sud) ou de compétition (entre pays du Nord). À la fin des années 1960, la tentative de fédération des acteurs au niveau national avec la création de l'AFEDES montre plus un souci de représentation internationale qu'un intérêt des acteurs de la politique énergétique (GDF, EDF, SFT) pour le sujet. Enfin, une grande différence, par rapport à toutes les sources d'énergie étudiées dans cette Partie 3, est que les recherches françaises sur l'énergie solaire n'ont pas été stoppées entre la fin des années 1950 et le début des années 1960. Au début des années 1970, et lorsque se déclenche la crise énergétique mondiale, le four solaire d'Odeillo, et le Laboratoire de l'énergie solaire existent encore (quoique, pour ce dernier, de façon fragmentée (TEISSIER, 2015, p. 213-214)), probablement en raison des enjeux géopolitiques qui sont associés à ces recherches (toujours, coopération Nord-Sud et compétition entre pays industrialisés).

### 9.1.5 Synthèse section 9.1

EDF, son réseau électrique et ses partenaires étatiques et industriels prennent une place croissante dans le système énergétique. Selon un mouvement constaté pendant la seconde guerre mondiale, leur expansion est administrative et territoriale. De manière directe (refus d'autorisation et d'aide financière aux projets) ou indirecte, ils contraignent les convertisseurs d'énergies naturelles, soit à devenir homogènes aux convertisseurs du système électrique (centrales hydroélectriques et thermiques), soit à coloniser d'autres espaces (îles, phares, montagnes, territoires d'Outre-mer, domaine spatial). L'assimilation des convertisseurs aux centrales leur donne la possibilité de s'intégrer au système, mais les rend également plus vulnérable à la conjoncture économique, étant donné que le coût du kilowattheure devient le critère crucial de choix d'un convertisseur. Des recherches sont donc menées sur les marées et le vent en période de pénurie, de reconstruction et de recherche à tout prix de kilowattheures électriques, et abandonnées avec la concurrence d'autres sources d'énergie (pétrole, gaz, nucléaire), dans les années 1960.

L'allongement et la densification du réseau électrique rendent possible l'utilisation d'énergies irrégulières sans procédé de régulation. Il permet une complémentarité temporelle, journalière (effet statistique de l'addition de nombreux générateurs à partir d'une source d'intensité instantanée aléatoire mais de moyenne régulière à l'échelle de la journée) et saisonnière (complémentarité de nature entre le vent et les cours d'eau). De cette manière, le vent est assimilé à la houille blanche, comme le sont les marées depuis l'entre-deux-guerres.

Contrairement aux convertisseurs éoliens et marémoteurs, les convertisseurs solaires et houlomoteurs non encore construits en série ne disposent pas des avantages liés à l'expérience et aux économies d'échelle, en plus des difficultés inhérentes à la production de grandes puissances électriques par les énergies naturelles. Les marées disposent des travaux de l'entre-deux-guerres, le vent des recherches internationales sur le sujet qui ont influencé les recherches françaises.

Le contexte international est très important, avec une compétition économique et technoscientifique entre pays du Nord. Les travaux français sur les énergies éolienne et solaire sont influencés par les recherches internationales, que ce soit en termes de génération d'électricité pour le réseau, ou de production de petites puissances pour les zones non reliées au réseau.

De nouvelles cartographies des ressources métropolitaines apparaissent, le vent et soleil, qui s'additionnent à celle des marées.

## 9.2 Outre-mer : réseaux électriques, exploitation des richesses et recherche de marchés (solaire, énergie thermique des mers, vent et houle)

En parallèle de l'impératif de modernisation en métropole se joue celui du développement des territoire d'Outre-mer et des nations « sous-développées » dont font partie, à partir des années 1960, tous les premiers ayant acquis leur indépendance. Les objectifs des projets d'exploitation des énergies naturelles sont ceux de la modernisation, comme en métropole, des espaces habités par des européens, mais aussi la mise en valeur des richesses (minérales et agricoles) des territoires de l'Union française, le positionnement dans un marché international et le prestige technologique. À chacun de ces enjeux, plusieurs types de convertisseurs des plus simples et de faibles puissances aux plus sophistiqués et de grandes puissances, sont destinés à des territoires différents. L'argument de l'« aide au développement », pour sincère qu'il ait été vis-à-vis d'ambitions philanthropiques, recouvre souvent ces quatre enjeux.

Le glissement d'une rhétorique coloniale à celle du développement dans les discours internationaux, ainsi que le changement de politique impérialiste associé, se retrouvent ainsi dans les projets d'exploitation des énergies naturelles. Les convertisseurs d'énergies naturelles, perçus comme pouvant servir à la « mise en valeur » de territoires jugés sous-exploités, et à l'augmentation du « niveau de vie » de populations parfois dites « sous-évoluées » [109], sont de plus en plus considérés plus comme une part à prendre dans le marché international. C'est ce qu'affirme Abdou Moumouni, professeur de physique nigérien et fondateur, en 1964 d'un Laboratoire de l'énergie solaire au Mali, et, en 1969, d'un Office de l'énergie solaire au Niger, avec le soutien du gouvernement nigérien. Ce militant pour l'indépendance affirme que l'implication des pays « développés » pour l'utilisation de l'énergie solaire dans les pays « sous-développés » ne résulte pas du fait qu'ils aient été « subitement touchés par l'ampleur [des] problèmes [de l'Afrique noire, l'urgence de [leurs] besoins et les impératifs de [leur] développement », et qu'ainsi « ils solutionneraient à [leur] avantage le problème de la création d'outils les mieux adaptés à [leurs] besoins et à [leurs] conditions de développement ». Selon lui, au contraire, « tout ce qui semblerait être fait dans ce sens l'est bien plus par souci de conquête que par altruisme, et il faut s'en convaincre définitivement » (Moumouni, 1964, p. 116). Aussi les déclarations « du style « philanthropique » en direction des pays sous-développés [...] ne couvrent souvent que la recherche de nouveaux marchés et se révèlent simples phrases creuses de circonstance »

109. À propos des pays tropicaux où pourraient être construites des stations maréthermiques, Devaux dit même la chose suivante « Dans ces régions qui, dans l'ensemble, sont « arriérées » et fort peu industrielles, la production massive d'énergie électrique aurait des incidences considérables » (Pierre Devaux, 1949a, p. 141).

(Moumouni, 1964, p. 115). Il en appelle ainsi à l'organisation, par les États africains eux-mêmes, de recherches sur l'énergie solaire pouvant répondre à ce qu'il considère, malgré sa critique des pays occidentaux, comme un « impératif de développement ». Ce que Moumouni critique est la dépendance technico-économique vis-à-vis des pays occidentaux, mais non l'idéologie du développement et la nécessité de la croissance énergétique pour rendre possible ce processus.

Contrairement aux projets qui concernent la métropole, les acteurs français de l'Outre-mer envisagent des formes variées de convertisseurs, pour de multiples applications et des usagers différents. Ces convertisseurs vont des éoliennes de pompage et distillateurs solaires peu puissants, aux grands aérogénérateurs ou aux centrales maréthermiques produisant de grandes quantités d'électricité. Les premiers sont destinés à des populations rurales et visent à l'amélioration de l'hygiène et à l'augmentation de la production agricole des territoires concernés. Les centrales maréthermiques, solaires, éoliennes, visent l'industrie d'extraction de produits minéraux, la production d'engrais chimiques pour le développement d'une agriculture intensive, l'alimentation de réseaux électriques interconnectés pour des usagers urbains et européens. Malgré la diversité des systèmes énergétiques concernés, tous ces convertisseurs sont sensés augmenter les disponibilités énergétiques des territoires en question, et donc contribuer à leur « développement ». Le développement prend donc plusieurs formes : modernisation des zones urbaines par le réseau électrique sur le modèle de la métropole, intensification, par tous les moyens, de la production industrielle et agricole des territoires d'Outre-mer. Ainsi, pour l'AOF, un potentiel hydroélectrique insuffisant pour la croissance énergétique souhaitée, et un équipement thermique coûteux, (Varaschin, 2002, p. 396), justifient la place que prend l'énergie thermique des mers dans le Plan de modernisation et d'équipement des territoires d'Outre-mer. Selon un rapport de la sous-commission de l'énergie de la Commission de modernisation des TOM, « l'AOF, défavorisée en ce qui concerne les ressources hydroélectriques doit trouver, dans l'énergie thermique des mers, un appoint précieux pour ses zones côtières » [110]. Ce Plan, qui évoque également les énergies solaire et éolienne, n'a cependant encouragé leur utilisation que pour de grandes puissances à potentiel de production d'électricité, ou d'« avance » technologique internationale [111]. Des financements du FIDES sont assurés pour le préchauffage solaire car ces études sont, à la base, complémentaires de celles sur l'énergie thermique des mers. Pour le four solaire, le général Bergeron s'en avère un fervent défenseur, mais une défiance est exprimée par les membres de la Commission vis-à-vis de ses véritables possibilités pratiques, c'est-à-dire de ses « applications industrielles ». D'après les procès-verbaux de quelques séances, l'avis positif de la Commission vis-à-vis

110. AN 80AJ/65, p.d., Rapport de la sous-commission de l'énergie de la Commission d'étude et de coordination des plans de modernisation et d'équipement des territoires d'outre-mer, 09/1953.

111. Les spécialistes du solaire de la Commission sont Nizery et Trombe, qui présentent, pour l'un, les dispositifs de préchauffage solaire de grandes étendues d'eau, et pour le second, le projet de four solaire géant dans les Pyrénées orientales

d'un financement de la part du ministère de la France d'Outre-mer semble davantage lié à l'avance de la France qu'il faudrait avant tout conserver, qu'aux véritables applications industrielles du four géant. En ce qui concerne l'énergie éolienne, l'ORSC possède une Commission d'études pour l'utilisation de l'énergie éolienne, qui obtient cinq millions de francs du FIDES en 1947 pour la création d'une station de distillation de l'eau à Port-Étienne (Mauritanie).
AN 80AJ/65, p.d.
AN 1991 0305/5, p.d., Compte-rendu de la réunion de la Commission d'études pour l'utilisation de l'énergie éolienne de l'ORSC, 28/05/1947.. De même, en 1954, la Commission d'études et de coordination des plans de modernisation de l'Algérie, de la Tunisie et du Maroc prévoit des financements pour une station géothermique pilote à Hammam-Meskoutine [112]. Des deux projets d'usines pilotes éolienne et géothermique, aucun n'a eu de suite.

Les acteurs de ces projets sont nombreux, et, souvent, n'agissent pas de manière coordonnée. Plusieurs institutions publiques françaises sont moteurs de cette dynamique : ministère de la France d'Outre-mer puis ministère de la Coopération ; gouvernements généraux des territoires d'Afrique du Nord et leurs services techniques ; universités, avec plusieurs trajectoires possibles lors des décolonisations en fonction des territoires et des individus ; certaines entreprises, petits constructeurs ou grandes entreprises du secteur de l'énergie ; entreprises énergétiques coloniales (EGA, EEM). Y participent également : des structures publiques nationales de recherche, pour ce qui concerne le solaire : CNRS et DGRST, dès sa création, avec le Comité de conversion des énergie. Par ailleurs, une société d'économie mixte, la société L'énergie des mers, est chargée de mettre au point la technique des usines maréthermique et de réaliser des projets Outre-mer. Pour ce qui concerne le solaire, certains acteurs tentent de mettre en place des moyens de coordination nationale (création de l'AFEDES) ou internationale (COMPLES), alors que la vague de décolonisations touche à sa fin. Le diagramme de la Figure 9.13 synthétise les acteurs impliqués pour des projets français hors métropole.

La Figure 9.14 représente les projets étudiés dans cette section. Il montre d'abord que les projets de convertisseurs les plus « simples » ont été plus nombreux Outre-mer. Il montre aussi que ce sont ces convertisseurs qui sont arrivées au stade le plus avancé du processus d'innovation.

Les réalisations menant à l'usage escompté sont ainsi plus nombreuses qu'en métropole, avec la mise en place d'éoliennes de pompage et de distillateurs solaire dans les territoires d'Afrique du Nord avant les décolonisations ou la mise en service de pompes solaires, à

112. 70 millions de francs sont ainsi préconisés pour cette usine pilote, sur un total de 20 238 francs pour tout le programme d'équipement énergétique (Commission d'études et de coordination des Plans de modernisation et d'Équipement de l'Algérie, 1954).

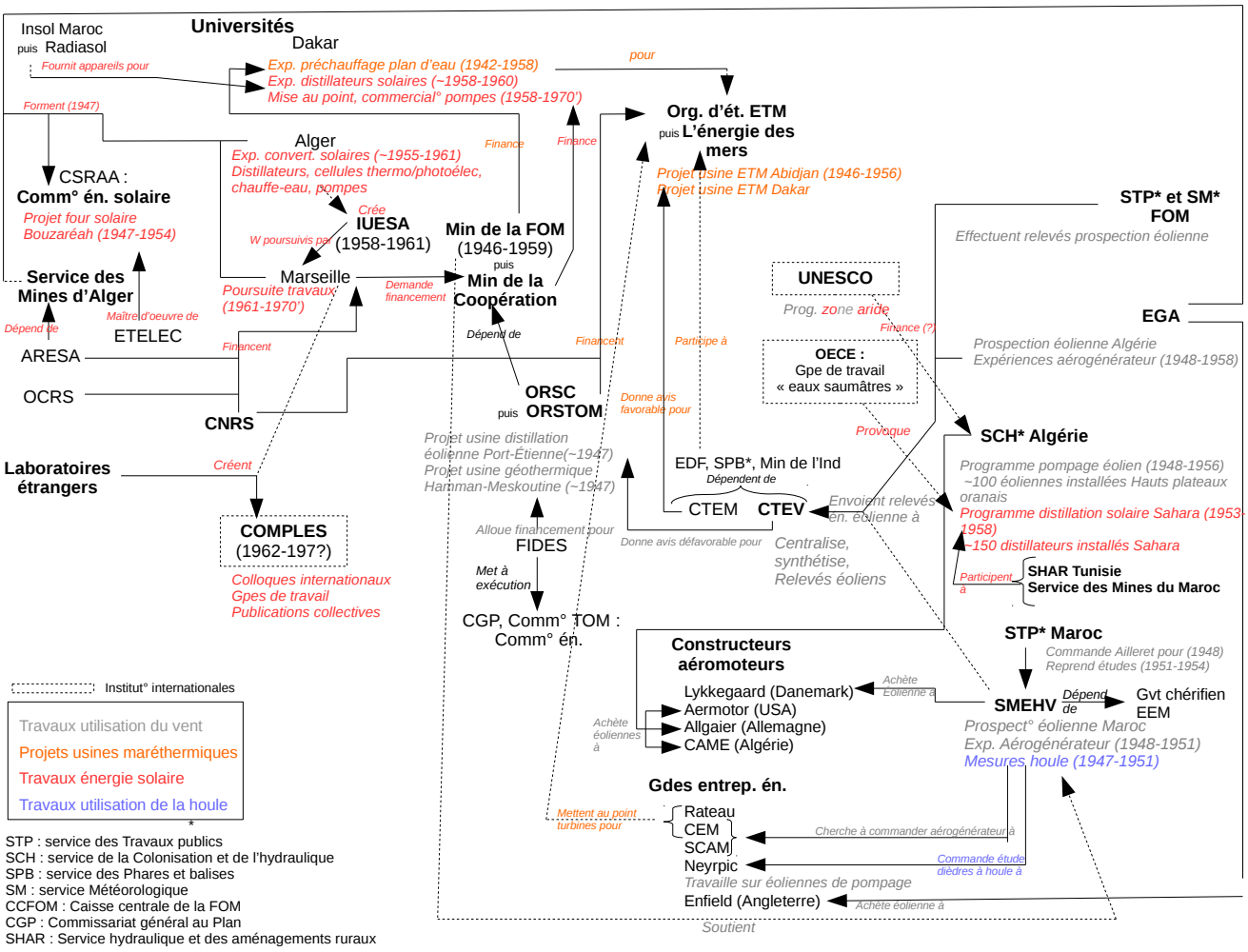



FIGURE 9.13 – Synthèse des institutions impliquées dans des projets d'exploitation des énergies naturelles Outre-mer (1946-1960')

partir de la fin des années 1960, dans d'anciennes colonies d'Afrique. Des installations d'essai opérationnelles, mais qui n'ont pas eu de suites, ont également été réalisées, telle que l'éolienne Enfield-Andreau ou l'éolienne Lykkegaard par EGA. De même, les fours solaires construits par l'Université d'Alger, n'ont, malgré leur caractère opérationnel, trouvé aucune application autre que des essais de laboratoires. Enfin, malgré le fait que plusieurs éléments d'usine aient été mis au point, aucune centrale maréthermique n'a vu le jour dans les (ex-)territoires coloniaux. La majorité des projets sont abandonnés avec les décolonisations, ou délocalisés (cas de l'Université d'Alger), à l'exception des projets portés par l'Université d'Alger et la Sofretes, montrant l'importance des décolonisations dans la périodisation de cette Partie 3.

Cette section étudie les projets pour la mise en place de convertisseurs d'énergies naturelles dans les territoires d'Outre-mer. Pour chaque source d'énergie, elle étudie un ensemble de projets, qui ont eu des formes variées en fonction des sources d'énergie et des territoires d'application. Pour chaque source d'énergie, les projets sont classés en fonction

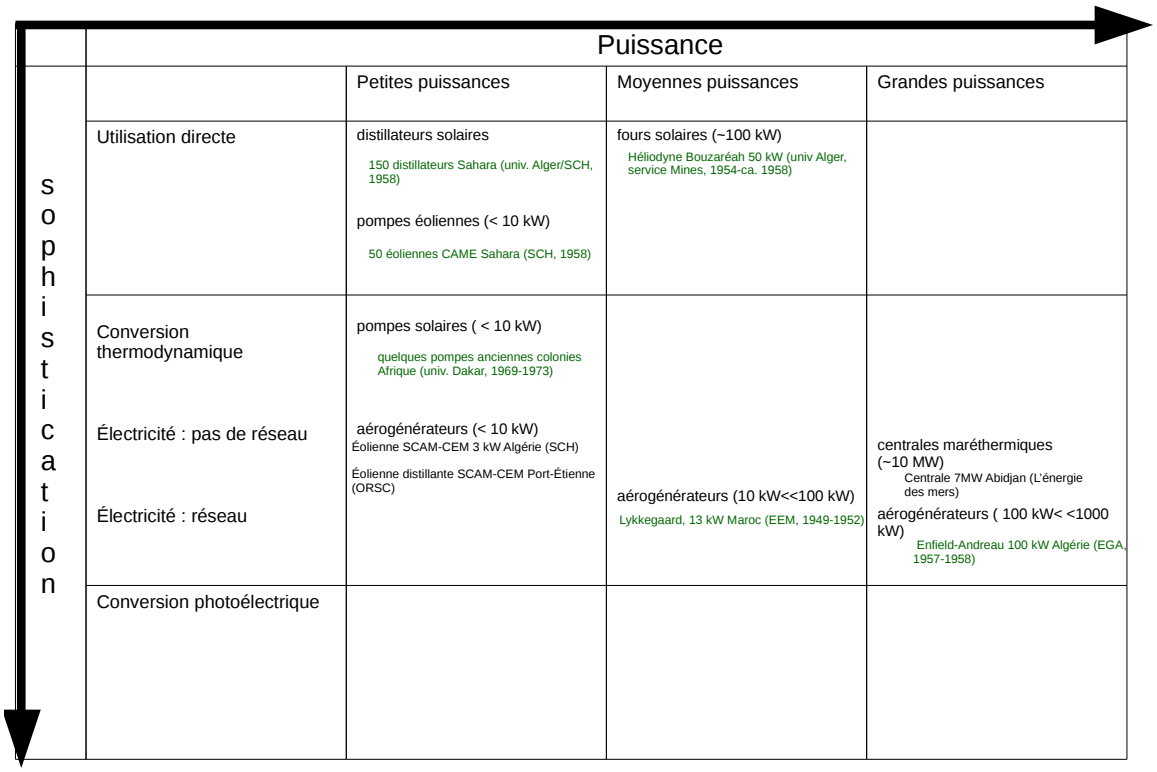



FIGURE 9.14 – Les projets de convertisseurs Outre-mer (1946-1960')

des types de convertisseurs, allant des plus « simples » et de faible puissance aux plus « sophistiqués » et puissants (cf Figure 2). En premier lieu, elle examine le projet mené par la société L'énergie des mers à la suite des travaux de l'Organisme d'études de l'énergie thermique des mers sous le gouvernement de Vichy. Elle examine ensuite plusieurs projets éoliens dans les territoires d'Afrique du nord (Algérie, Maroc). Premièrement, la campagne de mesure de l'énergie éolienne organisée entre le CTEV et certaines composantes de l'administration de ces territoires. Deuxièmement, la mise en place de petites éoliennes de pompage pour la mise en valeur agricole des Hauts plateaux oranais par le service de la Colonisation et de l'hydraulique entre 1946 et 1952. Troisièmement, des études sur des aérogénérateurs de moyenne puissance pour les populations blanches éloignées du réseau par quelques entreprises françaises à la demande de l'ORSC et des services techniques de l'administration algérienne. Enfin, sur le modèle d'EDF, les études d'EGA et d'Énergie électrique du Maroc sur des aérogénérateurs pour le réseau électrique en construction. Pour terminer, elle relate les projets de convertisseurs solaires portés par l'Université d'Alger puis de Marseille autour de Maurice Touchais puis Charles Perrot, et par l'Université d'Alger et la Sofretes.

### 9.2.1 Énergie thermique des mers, mise en valeur des pays du Sud et recherche d'un marché. La société L'énergie des mers (1946-1958)

Les études de l'Organisme d'études de l'énergie thermique des mers commencées pendant la guerre sont poursuivies sous l'égide du ministère de la France d'Outre-mer. Les enjeux économiques et politiques d'une usine maréthermique d'Abidjan restent globalement les mêmes que pendant la guerre. L'Organisme d'études de l'énergie thermique des mers souhaite voir naître une économie industrielle et agricole, qui profiterait par ailleurs à la nation française, grâce à l'électricité et aux sous-produits de cette usine. Il envisage en outre de répliquer des usines maréthermiques en plusieurs endroits de l'AOF, pour engendrer des centres industriels dans l'Union française. Ceux-ci sont aussi pensés comme outils de légitimations de la présence française. Enfin, l'Organisme cherche à positionner l'industrie française dans un marché international prometteur lié à la grande étendue de la ressource [113]. Enfin, dans la course internationale, la maîtrise, en premier, de cette technique, assurerait à la France un prestige technologique [114]. Mais à la différence de la guerre, une rhétorique du développement des DOM-TOM, non uniquement destinée aux populations blanches, est utilisée, et un besoin croissant en énergie de toutes les populations justifie l'encouragement à l'utilisation de l'énergie thermique des mers. Le « sous-développement » de la Côte d'Ivoire est, comme pour l'ensemble de l'AOF, ainsi invoqué par les responsables de la politique énergétique de l'Outre-Mer. Selon Michel de Verteuil, responsable du service d'Outre-mer de l'IGUFE, « l'équipement électrique de la Côte-d'Ivoire se trouvait après la guerre, après un long isolement, dans un état rudimentaire et précaire » (Varaschin, 2002, p. 391). La multiplication des usines maréthermiques

113. À ce propos, je n'ai pas trouvé, dans les sources, de cartographie de la ressource à proprement parler, et il semble qu'aucune campagne de mesures spécifique, telles que celles sur l'énergie des marées oru l'énergie éolienne, ait été menée pour effectuer cette cartographie. Cela dit, des modèles de circulation océaniques étaient disponibles grâce aux données récoltées par les océanographes, et, au colloque international sur les énergies marines de 1956, deux océanographes, André Gougenheim et Vsevololod Romanovsky, ont été conviés pour présenter les phénomènes de circulation marine et, plus particulièrement, celui des remontées d'eau froide au voisinage des côtes (appelé « upwelling »), qui joue un rôle important sur le gradient de température exploitable au niveau des littoraux. Ils présentent à ce sujet des isothermes de surface dans l'Océan atlantique et la mer méditerranée, et non dans les océans tropicaux, ce qui montre que ces mesures n'ont pas été prises spécifiquement pour le sujet de l'énergie thermique des mers (Gougenheim et Vsevolod Romanovsky, 1957).

114. En 1953, Nizery, dans un rapport destiné à défendre le dossier de l'usine maréthermique d'Abidjan auprès de la sous-commission de l'énergie de la Commission de modernisation des territoires d'Outre-mer, insiste sur le fait que les Américains s'intéressent également à cette technologie, et qu'il ne faudrait pas se laisser « devancer » en la matière :

« Depuis 1950, date à laquelle nous avons mis le Bureau of reclamation au courant des travaux français, l'Université de Berkeley a entrepris elle aussi des recherches qui l'ont conduit à des conclusions analogues aux nôtres. Inutile de dire que les projets d'Abidjan sont suivis par eux avec la plus grande attention. Il serait vraiment dommage de perdre dans ce domaine l'avance que nous a donnée l'obstination de G. Claude et les efforts faits par l'État depuis 1942. »

AN 80AJ/65, p.d., Nizery, « Note au sujet de l'énergie thermique des mers » », 05/1953.

pourrait ainsi contribuer à l'électrification de l'AOF.

Les études techniques menées par l'Organisme le mènent à conclure à la faisabilité technico-économique d' une usine maréthermique [115]. En 1948, avec un avis favorable du CTEM , le ministère de la France d'Outre-mer crée la société d'économie mixte L'énergie des mers, avec la participation d'EDF. Nizery en est nommé directeur général. En 1949, un avant projet détaillé d'usine maréthermique à Abidjan est déposé auprès d'un comité technique présidé par Caquot, désigné par le ministère de la France d'Outre-mer pour l'examiner au point de vue technique et économique. Ce Comité atteste, d'une part, de l'avantage économique de l'usine vis-à-vis des procédés classique de production d'électricité [116], et d'autre part, de sa faisabilité technique, moyennant la mise au point « sur les lieux mêmes » des procédés de construction de la conduite d'eau froide [117]. Une « garantie de l'État à un emprunt de 200 MF » est ainsi accordée à la Société (Barbier, 2000).

Pour le deuxième Plan de modernisation des territoires d'Outre-mer (1954-1957), la sous-commission de l'énergie préconise de poursuivre les études sur l'énergie thermique des mers et de parvenir à une réalisation rapide, dans le double but de développement d'une économie locale, et de maintien d'une place de premier rang mondial vis-à-vis de cette technologie [118]. Les membres de la Commission sont unanimes sur l'impératif de mise en œuvre rapide de ce projet, à l'exception des représentants de l'Administration de la Côte d'Ivoire, qui, comme pendant la guerre, y voient une source d'énergie plus coûteuse que les sources d'énergie classiques. Ce projet garde donc un caractère national, davantage que territorial. Un budget de 60 MF est préconisé pour la poursuite du projet. En 1953, Nizery annonce la mise en service du premier groupe turbo-alternateur dans un délai de deux ans et demi, moyennant la réussite à Abidjan de la mise au point finale des procédés d'installation de la conduite d'eau froide, et une continuation dans le financement par l'État du projet [119]. Des expériences ont effectivement lieu en 1953-1954, puis en 1955-

115. Les ingénieurs du Laboratoire national d'hydraulique de Chatou mettent au point l'appareil d'extraction des gaz dissous Rateau, et en 1947, des expériences sont menées sur les canalisations de prise d'eau froide, construites par les Chantiers Schneider de Chalon. En 1947 ont ainsi lieu des essais près de Brest sur des tronçons de 150 m de long et de 2.5 m de large. (Barbier, 2000 ; Salle et Capestan, 1957). Pour l'Organisme, ces deux aspects techniques posent les problèmes les plus délicat. À Dakar, les expériences de réchauffage de l'eau par la chaleur solaire sont également continuées. La Compagnie électro-mécanique et Rateau, sollicitées pour mettre au point une turbine basse pression, en conçoivent et expérimentent chacune un modèle.

116. Ainsi, selon ce Comité, « [p]ar rapport à une centrale thermique, les économies de combustibles permettent de compenser dès les premières années d'exploitation, le supplément de charges financières résultant du coût d'établissement des ouvrages calculé avec un taux de 5% », et « [p]ar rapport aux centrales hydrauliques réalisables en Côte d'Ivoire, les frais de construction sont moins élevés et surtout beaucoup mieux adaptés à la progression de la consommation ».
AN 80AJ/65, p.d., Nizery, « Note au sujet de l'énergie thermique des mers », 05/1953.

117. AN 80AJ/65, p.d., Nizery, « Note au sujet de l'énergie thermique des mers », 05/1953.

118. AN 80AJ/65, p.d., Rapport de la sous-commission de l'énergie de la Commission d'étude et de coordination des plans de modernisation et d'équipement des territoires d'outre-mer, 09/1953.

119. AN 80AJ/65, p.d., Nizery, « Note au sujet de l'énergie thermique des mers », 05/1953.

1956, sur différents conduites, et permettent notamment de tester l'efficacité des « flotteurs anti-houle » inventés par Nizery, dans le but d'atténuer les effets de la houle sur la pose de la conduite — et ce, malgré le décès de ce dernier en 1954.

En 1956, aux Journées nationales de l'hydraulique consacrées aux énergies marines, les protagonistes du projet annoncent la parfaite faisabilité du projet. Beau affirme la réussite des opérations de pose de la conduite d'eau froide (Beau, 1957) ; Salle [120] et Capestan [121] affirment que « la production d'énergie thermique des mers se présente non plus comme une entreprise aléatoire, mais comme une opération parfaitement réalisable » (Salle et Capestan, 1957, p. 711). Pourtant, la société L'énergie des mers se dissout en 1958 (Barbier, 2000), et aucune centrale maréthermique n'est finalement construite à Abidjan.

Deux facteurs expliquent l'abandon du projet : les décolonisations et la concurrence d'autres sources d'énergie (pétrole et hydraulique). En effet, la perte de l'AOF comme territoire français met à mal la mise en valeur de ses richesses au projet de la nation française. Par ailleurs, la possibilité d'un marché international s'évanouit alors que le pétrole devient une source bon marché . De plus, le programme d'électrification de la Côte d'Ivoire arrive, notamment avec la construction de grandes centrales hydroélectriques, à une production sinon excédentaire, du moins suffisante pour la ville d'Abidjan. La forte croissance de la consommation d'électricité en Côte d'Ivoire entre 1946 et 1960 est en effet fondée sur des équipements classiques [122]. Ainsi le professeur Henri Masson affirme-t-il, en 1960, que « la mise à exécution du programme d'Abidjan reste en suspens jusqu'au moment où on pourra entrevoir le plein emploi de l'énergie résultant du l'équipement, en cours d'achèvement, de chutes d'eau importantes situées dans la zone économique d'Abidjan » (Masson, 1960, p. 163). L'argument du développement des populations indigènes est resté rhétorique, puisque la croissance de la consommation d'électricité concerne une clientèle majoritairement urbaine et en grande partie européenne [123] .

### 9.2.2 Vent, mise en valeur et développement des colonies. Des éoliennes de pompage aux grands aérogénérateurs

À l'issue de la guerre, l'énergie éolienne retient l'attention de plusieurs responsables politiques et administratifs de l'Union française, ainsi que de différentes sociétés qui y

120. Ingénieur général de la marine en retraite, qui a probablement participé aux essais.
121. Ingénieur à la société L'énergie des mers.
122. En 1951, est ainsi mise en service à Abidjan une « nouvelle centrale à vapeur d'importance ». En 1958 et 1959 les grandes centrales hydroélectriques de La Bia et Ayamé sont inaugurées (Varaschin, 2002, p. 397).
123. En 1960, la consommation annuelle par habitant de 1 300 kWh concerne 12 000 Européens installés à Abidjan, 20 000 Africains et 2 000 abonnements commerciaux (Varaschin, 2002, p. 403).

sont implantées : ministère de la France d'Outre-mer, ORSC, services de la Colonisation et de l'hydraulique, sociétés productrices et distributrices d'électricité, constructeurs d'aéromoteurs. Il est difficile d'en dresser une vision d'ensemble. En effet, les institutions, leurs modes d'action, les types de convertisseurs et les usages escomptés sont variés, du pompage de l'eau à la production de grandes quantités d'électricité pour le réseau interconnecté, y compris au sein des mêmes territoires. Par exemple, en Algérie, le service de la Colonisation et de l'hydraulique s'intéresse aux éoliennes de petite puissance pour le pompage de l'eau et la production d'électricité, tandis qu'EGA cherche à mettre au point des aérogénérateurs de grande puissance pour le réseau interconnecté, répondant à la politique d'électrification de ce territoire. De son côté, l'ORSC nourrit l'ambition de construire une centrale éolienne pilote, et formule le projet d'une puissante station de distillation de l'eau alimentée par le vent à Port-Étienne (Mauritanie). Comme en métropole, apparaissent donc des projets de grands aérogénérateurs, mais les formes d'utilisation de l'énergie éolienne jugées désuètes (pompage et petites puissances électriques) et en cours d'abandon en métropole (sauf pour les usages particuliers précisés en 9.1.3) sont aussi considérés, au contraire, comme un facteur de « développement » dans certains contextes coloniaux.

Reflet de la diversité des acteurs, les sources consultées pour traiter ce sujet de l'énergie éolienne dans les territoires d'Outre-mer sont diffuses : il s'agit des comptes-rendus du CTEV, de quelques lettres entre le service des Phares et balises et certains membres de l'administration coloniale, ainsi que d'articles. Cette sous-section 9.2.2 décrit d'abord la campagne de mesures de l'énergie éolienne dans l'Union française par le CTEV, puis rend compte de certains de ces efforts pour exploiter l'énergie éolienne selon le type d'usage envisagé, des plus faibles puissances jusqu'aux plus importantes, et des convertisseurs les plus simples jusqu'aux plus sophistiqués.

#### 9.2.2.1 Études du régime du vent dans l'Union française. CTEV, EDF et ministère de la France d'Outre-mer (1946-1960')

La campagne de mesure de l'énergie éolienne organisée par le CTEV en métropole est rapidement étendue à tous les territoires de l'Union française. En effet, divers acteurs intéressés par les possibilités d'exploitation de cette source d'énergie souhaitent de la même manière obtenir un maximum de renseignements sur ses caractéristiques en différents points de ces territoires. Le fait de caractériser spatialement le régime du vent permettrait, selon les usages et l'ampleur des projets envisagés, d'évaluer les éventuelles dispositions particulières des machines à construire, d'identifier les sites les plus intéressants, ou encore d'étudier la corrélation possible avec l'hydraulique. Pour de multiples raisons, cette prospection est restée très fragmentaire et est très loin d'avoir abouti à une

cartographie des ressources telle que celle de la métropole.

Cette prospection est opérée par différentes institutions de manière plus ou moins dispersée. En effet, le ministère de la France d'Outre-mer pour les territoires d'Outre-mer [124], EGA et le service de la Colonisation et de l'hydraulique pour l'Algérie, et, pour le Maroc, la Société marocaine d'études de la houle et du vent (SMEHV), créée par le gouvernement chérifien à l'issue de la guerre pour poursuivre les recherches d'Énergie électrique du Maroc sur l'énergie éolienne dans l'entre-deux-guerres (cf 5.3), décident d'équiper certains de leurs services en compteurs d'énergie éolienne.

En 1945, le ministère des Colonies commande ainsi cinquante compteurs Ailleret à la Compagnie des compteurs à destination des territoires d'Outre-mer, « en vue de rechercher les énergies captables dans les sites les plus ventés et les plus pauvres en énergies d'autres sortes » [125]. Peu après, le ministère de la France d'Outre-mer qui lui succède en commande vingt-quatre autres à destination de l'Indochine (vingt) et du Cameroun (quatre) [126]. L'ambition du ministère de la France d'Outre-mer est d'étudier la possibilité d'équiper certains points isolés de tout réseau électrique de petits aéromoteurs pour le pompage et la production d'électricité, et non de construire de grands aérogénérateurs, en raison de l'absence de réseau électrique dans la majorité de ces régions. C'est ce qu'exprime Crouzet, inspecteur général des Travaux publics de la France d'outre-mer, dans un rapport sur la « répartition des sources d'énergie » et la « politique de leur mise en valeur dans les territoires d'Outre-mer » pour la sous-commission de l'énergie de la Commission de modernisation des TOM [127]. Il « admet » ainsi que « certaines installations privées aient recours à l'énergie éolienne, par exemple pour élever de l'eau car dans ce cas l'élévation d'eau constitue directement un accumulateur et peut être très économique, mais il lui semble « difficile d'envisager l'énergie éolienne pour alimenter un réseau de distribution publique dans ces pays, pare qu'on serait obligé de débiter dans un accumulateur très important, puis de faire redébiter cet accumulateur sur le réseau sans avoir la possibilité d'utiliser comme dans les autres pays plus développés un réseau extrêmement maillé qui

124. Les TOM sont, en 1946, les suivants : Afrique occidentale française (AOF) (Côte d'Ivoire, Dahomey, Guinée, Mauritanie, Niger, Sénégal, Soudan, Haute-Volta), Afrique équitoriale française (AEF) (Congo, Gabon, Oubangui-Chari, Tchad), Comores, Madagascar, Nouvelle-Calédonie, Saint-Pierre-et-Miquelon, Côte des Somalis.

125. AN 1991 0305/2, 1941-1957, Lettre de Pétry à Portier (directeur du Service des télécommunications du ministère de l'Air), 23/01/1945.

126. Ainsi, en 1949, ont été envoyés le nombre suivant d'Ailleret en fonction des territoires : vingt-huit en AOF ; onze au Cameroun ; dix en AEF ; dix à Madagascar ; six à Djibouti ; deux à Nouméa ; dix-huit en Indochine ; cinq à la Réunion ; deux à Saint-Pierre et Miquelon. Ces chiffres ne prennent pas en compte la deuxième commande à destination du Cameroun et de Madagascar.
AN 1991 0305/4, p.d., Procès verbal de la réunion « Énergie éolienne » tenue au service des Phares et balises entre des représentants du service des Phares et balises, d'EDF et du ministère de la France d'Outre-mer, 16/12/1949.

127. AN 80AJ/65, p.d., Étienne Crouzet, « Répartition des sources d'énergie et politique de leur mise en valeur dans les territoires d'Outre-mer » annexé au rapport de la sous-commission de l'énergie de la Commission d'étude et de coordination des plans de modernisation et d'équipement des TOM, 09/1953.

permette d'absorber l'énergie éolienne en un point pour économiser de l'énergie des lacs en d'autres ».

En 1949, les territoires d'Outre-mer disposent de cent cinq compteurs Ailleret [128]. Dans ces territoires, les stations relèvent le plus souvent de la Météorologie nationale, puis, pour certains, à partir de 1951, des services des Travaux publics [129]. Ces services effectuent les relevés qui sont centralisés, jusqu'environ 1950, par le ministère de la France d'Outre-mer [130], puis par le CTEV [131], qui les envoient ensuite à la Division énergie du vent d'EDF. Toutes les stations côtières des territoires d'Outre-mer, mais aussi de Tunisie et du Maroc sont, dès 1945, gérées par le service des Phares et balises, dont un service spécial centralise les relevés avant de les envoyer à EDF [132].

Dès le départ, la campagne de mesures en France d'Outre-mer initiée par le ministère connaît des difficultés. En 1951, lors d'une réunion tenue entre des représentants d'EDF, du ministère de la France d'Outre-mer et d'EDF, Paimboeuf d'EDF souligne ainsi « le petit nombre des relevés mensuels », et le manque de pertinence de certains d'entre eux par rapport au régime des vents attendu. Les relevés traduisent des vitesses de vent beaucoup plus faibles que l'expérience ne permet de les évaluer [133]. Ces difficultés sont dues à des dispositions différentes dans l'administration coloniale par rapport à celles de la métropole, que ce soit en termes de moyens humains, techniques, financiers, ou de conditions météorologiques. Crouzet invoque ainsi un manque de personnel « compétent pour installer les appareils et effectuer les lectures », ayant pour conséquence des imprécisions dans les relevés. La faute revient également à un mauvais emplacement des appareils de jaugeage, car les services météorologiques « n'ont d'agents que dans les grandes villes et sur les aérodromes, tous endroits abrités des vents en général ». De surcroît, « ces services manquent de moyens de transport et ne peuvent donc pas installer d'appareils sur les points exposés au vent du littoral ou des chaînes de montagne. ». Enfin, « l'absence de

128. AN F14 20 902, p.d., Procès-verbal de la deuxième séance du CTEV, 21/01/1949.

129. AN 1991 0305/4, p.d., PV réunion « Énergie éolienne » tenue au cabinet de Crouzet, 28/11/1951.

130. AN 1991 0305/4, p.d., Procès verbal de la réunion « Énergie éolienne » tenue au service des Phares et balises entre des représentants du service des Phares et balises, d'EDF et du ministère de la France d'Outre-mer, 16/12/1949.

131. AN 1991 0305/4, p.d., Lettre de Pétry à Thomas-Collignon (directeur des Travaux publics de Madagascar), 07/12/1950.
Dans cette lettre, Pétry affirme que le CTEV centralise les relevés de l'Union française et qu'EDF les traduit en graphiques.
AN 1991 0305/4, p.d., PV réunion « Energie éolienne » tenue au cabinet de Crouzet, 28/11/1951.
Il est résolu, après cette réunion, que le service des Phares et balises soit désormais l'organisme centralisateur des relevés à la place du ministère de la France d'Outre-mer. Cela suggère que le CTEV ne jouait pas encore ce rôle, et que le service des Phares et balises et le CTEV soient en quelque sorte confondus pour cette tâche. En effet, les courriers des différents services de l'Union française contenant les relevés sont adressés à Pétry en tant que secrétaire du CTEV.

132. En Tunisie, il existe, en 1951, vingt-et-un compteurs Ailleret. Je n'ai pas de renseignements sur les institutions responsables de l'acquisition et de la gestion de ces compteurs. AN F14 20 902, p.d., Procès-verbal de la deuxième séance du CTEV, 21/01/1949.

133. AN 1991 0305/4, p.d., PV réunion « énergie éolienne » tenue au cabinet de Crouzet, 28/11/1951.

moyens de communication pour acheminer les relevés » complique encore la régularité des transmissions [134]. Ceci explique le choix de Crouzet de faire effectuer, à l'issue de cette réunion, les relevés par le service des Travaux publics plutôt que par celui de la Météorologie sur certains territoires. À cela s'ajoute un autre problème, celui de l'indemnisation des personnels effectuant ces relevés : en métropole, c'est EDF qui assure ce financement ; dans les territoires d'Outre-mer, où les relevés ont été ordonnés par le ministère de la France d'Outre-mer, EDF ne considère plus ce financement comme relevant de ses missions, et le ministère limite son investissement budgétaire à l'achat et à l'installation des appareils, dont la partie concernant les phares est par ailleurs assurée par le service des Phares et balises. Dans les divisions d'Outre-mer du service des Phares et balises, les personnels réclament un dédommagement pour le travail supplémentaire demandé par le jaugeage [135]. En réponse, le secrétaire du CTEV lui suggère de trouver, localement, un arrangement identique à celui de la métropole, avec une société productrice d'électricité ou une société agricole, qui verraient un intérêt à l'usage entrevu de l'énergie éolienne [136]. Il est probable qu'un tel arrangement n'ait pas été trouvé et que les relevés aient été poursuivis selon le bon vouloir des gardiens de phares.

Malgré leur manque de fiabilité, du moins au départ, les relevés en France d'Outre-mer sont utilisés par le CTEV pour identifier, comme en métropole, des sites plus intéressants du point de vue de l'énergie éolienne. Ils sont peu nombreux : le CTEV décide, en 1951, le retrait de la majorité des compteurs de l'AOF et de tous ceux de l'AEF, et le maintien de ceux de la Côte des Somalis, de la Nouvelle-Calédonie, de Saint-Pierre-et-Miquelon, de Madagascar et de Mauritanie [137]. Le seul territoire d'AOF dont le CTEV retient l'intérêt pour l'utilisation de l'énergie éolienne est la Mauritanie. Cela est probablement dû du projet porté par l'ORSC, à l'issue de la guerre, d'une station de distillation de l'eau à Port-Étienne, pour lequel un financement de 5 millions de francs est alloué par le FIDES. L'avis négatif du CTEV et du ministère de la France d'Outre-mer, représentant l'État central métropolitain, vis-à-vis de l'intérêt de l'énergie éolienne dans la majorité des territoires d'Outre-mer, ne dissuade pas l'administration de ces territoires de chercher à utiliser cette source d'énergie. Le service de la Colonisation et de l'hydraulique d'AOF se penche ainsi sur cette question, en particulier pour le pompage de l'eau, qui revêt selon lui sur le

134. AN 1991 0305/4, p.d., PV réunion « énergie éolienne » tenue au cabinet de Crouzet, 28/11/1951.
135. En 1953, Pétry reçoit ainsi un courrier du directeur adjoint des Travaux publics de Madagascar réclamant des fonds pour assurer une gratification aux cinq gardiens de phares effectuant les relevés sur le territoire.
AN 1991 0305/4, p.d., Lettre de A. Pichon, directeur général adjoint des Travaux publics de Madagascar à Pétry, 12/03/1953.
136. AN 1991 0305/4, p.d., Lettre de Pétry à Pichon, 20/03/1953.
Pétry ajoute que les gardiens de phare de Madagascar reçoivent des touristes des gratifications financières à propos desquelles la Direction des phares et balises ne s'est jamais fâchée, et suggère ainsi subtilement qu'ils pourraient bien faire un effort pour effectuer ces relevés !
137. AN 1991 0305/4, p.d., PV réunion « Energie éolienne » tenue au cabinet de Crouzet, 28/11/1951.

territoire une « importance primordiale » [138]. Le chef du Service contacte, à cet effet, le CTEV en 1953, afin d'obtenir des renseignements sur les aéromoteurs disponibles sur le marché. En 1956, ce service amorce une étude systématique du régime des vents, ainsi qu'une étude du marché des aérogénérateurs. Ces travaux ont certainement été stoppés lors de la disparition de l'AOF et de l'indépendance des pays qui la constituaient.

En Algérie, ce sont le service de la Colonisation et de l'hydraulique et EGA qui sont à l'initiative de la prospection éolienne, et au Maroc, la SMEHV. Les deux sociétés procèdent d'une manière similaire à celle d'EDF en métropole. EGA, société nationale de production et de distribution d'électricité, et la SMEHV, société d'études filiale d'Énergie électrique du Maroc (EEM), souhaitent ainsi étudier les possibilités d'alimentation du réseau électrique interconnecté en énergie éolienne, et donc, en particulier, la complémentarité temporelle entre les ressources éoliennes et hydrauliques, mais aussi entre divers sites éoliens. Pour Hilaire Duquennois, ingénieur des Études et recherches à EGA, les vents des vallées algériennes, où des aérogénérateurs pourraient être installés, semblent en effet être les plus importants pendant les périodes sèches, quand les aménagements au fil de l'eau se tarissent. La création de « complexes hydro-éoliens » permettrait ainsi d'envisager des aménagements au fil de l'eau qui étaient négligés par l'impossibilité (géologique, topographique) de mettre en place une régularisation [139]. EGA s'équipe ainsi de cinquante compteurs Ailleret [140], mais met également au point un nouveau procédé de mesure du vent adapté aux vents littoraux les plus puissants. Ces « plots de tempêtes » conçus par Duquennois permettent de mesurer la vitesse du vent lors de tempêtes, et intéressent vivement le service des Phares et balises qui en fait équiper le phare du Cap de Garde [141]. Yves Bars, inspecteur général des Ponts et chaussées et président de la SMEHV, constate de même qu'au Maroc, la période de sécheresse estivale correspond à celle des vents les plus forts et les plus réguliers — il ajoute que les très faibles débits d'eau devraient d'ailleurs y être « réservé[s] aux irrigations » [142]. Une première analyse effectuée à partir du dépouillement de tous les appareils d'enregistrement de l'ONM au Maroc sur cinquante et une années d'observations a permis au ingénieurs de la SMEHV d'identifier des sites au potentiel le plus intéressant, après quoi ceux-ci ont été équipés en compteurs Ailleret dans le but d'une « étude plus poussée du régime du vent, de son énergie, et des variations de celle-ci » [143]. Entre 1947 et 1949, la SMEHV commande ainsi, avec les crédits

138. AN 1991 0305/4, p.d., Lettre de Pierre Merlin (chef du service de l'Hydraulique de l'AOF) au CTEV, 22/10/1956.
139. AN 1991 0305/4, p.d., Duquennois, « Augmentation en énergie garantie par l'adjonction aux aménagements hydro-électriques régularisés de centrales éoliennes utilisant les vents des vallées », 01/08/1948.
140. AN F14 20 902, p.d., Procès-verbal de la deuxième séance du CTEV, 21/01/1949.
Au Maroc, ces compteurs ont été commandés par le service des Phares et balises, ces stations étaient donc côtières. Ceci est cohérent avec le fait que la SMEHV étudiait des zones côtières.
141. AN 1991 0305/4, p.d., Lettre de Duquennois à Petry, 23/06/1953 ; Lettre Ginocchio à Poggi (ingénieur des Ponts et chaussées à Bone), 15/12/1953.
142. AN 1991 0305/5, p.d., Lettre de Bars à Pétry, 12/05/1949.
143. AN 1991 0305/5, p.d., J. Lavigne, « Note sur l'activité de la SMEHV en 1950 », 18/11/1950.

des Travaux publics du Maroc, au moins quatorze Ailleret [144] .

Le service de la Colonisation et l'hydraulique algérien effectue également, entre 1946 et 1956, une étude du régime des vents, quoique de manière moins systématique et moins étendue qu'EGA, la SMEHV ou le ministère de la France d'Outre-mer. Il s'intéresse essentiellement au pompage de l'eau par l'énergie éolienne pour la mise en valeur des terres agricoles et met en particulier en œuvre, entre 1946 et 1954, le projet de construction de multiples points d'eau dans la régions des Hauts plateaux oranais, dans le nord-ouest du pays, sur plus de cing millions d'hectares, pour y augmenter la production de l'élevage ovin (voir 9.2.2.2). Des mesures de la vitesse du vent sont d'abord réalisée par les ingénieurs du Service afin de dimensionner les installations. Les appareils utilisés sont alors des anémomètres « classiques » [145], suffisants pour se faire une idée grossière du régime des vents [146], puis le service se munit, vers 1953, d'une trentaine de compteurs Ailleret pour le nord du territoire [147]. Leur installation est achevée en 1955, date à laquelle le premier relevé est envoyé au CTEV, et il est très probable que la guerre d'indépendance de l'Algérie ait mis un terme à cette courte période de mesures.

Après les décolonisations, la majorité des relevés dans les nouveaux États cessent d'être envoyés au CTEV [148] .

Ainsi, la majorité des territoires de l'Union française ont fait l'objet d'une évaluation de la ressource éolienne, que la Division énergie du vent d'EDF et le service des Phares et balises ont tenté de centraliser par le biais du CTEV. Mais en fonction des institutions qui s'en sont chargées, de leurs moyens techniques, organisationnels et financiers, du degré d'intérêt et d'implication qu'elles montrent pour l'exploitation de cette source d'énergie, de l'usage escompté de l'énergie éolienne et de l'étendue qui en est envisagée, les relevés ont été plus ou moins précis, nombreux et réguliers. Malgré une tentative de standardisation et de centralisation de ces données par le CTEV, celles-ci ont ainsi gardé un caractère fragmentaire.

144. AN 1991 0305/5, p.d., Lettre de Pétry à Bars, 02/05/1952 ; Lettre de Lavigne à Pétry, 14/04/1951.
145. Ce sont des « moulinets Robinson ».
146. ANOM 81F 2042, p.d., J. Avargues (ingénieur en chef du 2e arrondissement du SCH à Oran) et J Ripoll ( subdivisionnaire du service de la Colonisation et l'hydraulique à Sidi-bel-Abbès), « Hydraulique pastorale. Création de points d'eau dans les Hauts Plateaux oranais. Utilisation de l'énergie éolienne », Conférence au service des Études scientifiques , 22/05/1954.
147. AN 1991 0305/4, p.d., Lettre de Pétry à Drouhin, directeur du service de la Colonisation et de l'hydraulique, 16/06/1953.
148. Dans le relevé des appareils de jaugeage de l'énergie éolienne effectué par le CTEV en 1963, seules les stations de Tunis, du cap Bougarouni (Algérie), et de Madagascar (Flacourt phare, îlot des Aigrettes, île aux Prunes) sont renseignées. Il est indiqué à propos des autres que les renseignements sont « non communiqués ».
AN 1977 0614/3, 1941, CTEV, Relevé des appareils de jaugeage d'énergie éolienne du mois de mars 1963.

#### 9.2.2.2 De petites éoliennes de pompage pour la mise en valeur des terres arides. Le service de la Colonisation et de l'hydraulique et les Hauts Plateaux oranais (1942-1956)

Après la guerre, certaines organisations internationales pour la coopération Nord-Sud et des administrateurs coloniaux envisagent les éoliennes de pompage en désuétude dans les pays industrialisés comme un facteur potentiel de développement pour les zones dites arides du globe, ainsi qu'en témoigne le programme de l'UNESCO considérant l'énergie éolienne et l'énergie solaire comme des solutions pour le manque d'eau. Dans l'Union française, le service de la Colonisation et de l'hydraulique de l'AOF (voir 9.2.2.1) et celui de l'Algérie se sont penchés sur cette question entre la fin de la guerre et les décolonisations [149]. Le marché y a ainsi survécu plus longtemps qu'en métropole pour les constructeurs d'aéromoteurs français, d'autant que le besoin de nouvelles machines, adaptées notamment au climat des zones arides, est exprimé par les administrations intéressées, mais aussi par des experts du programme des zones arides tels que Lacroix. Certains constructeurs ont choisissent ainsi de s'y établir, avant de plier boutique lors des décolonisations, comme la Compagnie africaine de matériel éolien (CAME). Celle-ci, émanant des Établissements Henry basés à Boulogne depuis la fin du XIX^e^ siècle (voir 5.1), s'établit en 1953 à Sidi-bel-Abbès afin de commercialiser des éoliennes de pompage dans la partie africaine de l'Union française [150].

Le grand constructeur de l'industrie énergétique qu'est Neyrpic a aussi tenté de se positionner sur ce marché, en plus de celui des aérogénérateurs de moyenne et grande puissance. L'ingénieur Louis Vadot fait ainsi état de recherches poussées au sein de Neyrpic sur les éoliennes de pompage. Dans une étude sur ces machines, il mentionne des expériences, probablement dans les années 1950, sur deux grands types de groupes de pompage : ceux munis d'« éoliennes lentes », c'est-à-dire de roues multipales semblables aux roues des aéromoteurs de type américain, et de pompes à piston, adaptées pour de petites puissances et de petits débits ; et ceux munis d'éoliennes « rapides », c'est-à-dire d'hélices à faible nombre de pales, et de pompes centrifuges, adaptées pour des puissances et des débits plus grands (VADOT, 1957b). Un prototype de machine du premier type, avec une roue de 6.10 m de diamètre et pompant de l'eau à une hauteur de 40 m, ainsi que deux autres du second type, avec hélices tripales de 8 m ou 13 m de diamètre, ont ainsi été construites et testées par Neyrpic. La première, délivrant un débit de 50 000 $m^3$/an par vent annuel moyen de 6 m/s, était probablement destinée au remplissage de réservoirs pour l'alimen-

149. Ce fut aussi probablement le cas d'autres services administratifs de l'Union française, puisque, en 1954, le ministre de la France d'Outre-mer donne des instructions aux différents gouverneurs généraux sur la manière de passer des marchés avec les constructeurs d'aéromoteurs (voir plus loin dans ce paragraphe).

150. La société affirme ainsi construire et vendre « annuellement en Algérie, Maroc, AOF, AEF et Madagascar » une soixantaine d'éoliennes de pompage.
ANOM 81F 2042, p.d., Mémoire de la CAME à destination du ministre de l'Intérieur, 26/11/1954.

tation humaine et/ou animale ; pour la seconde, l'entreprise avait en vue des applications à l'irrigation. Vadot affirme que « leur supériorité est évidente pour des points d'eau éloignés de centre habités ou de réseau de distribution » (VADOT, 1957b, p. 522). L'ingénieur en appelle à la construction en série de ces machines, mais, alors qu'il écrit ces lignes, le processus de décolonisations est déjà bien engagé et il semble que Neyrpic n'ait jamais trouvé de clientèle pour ses éoliennes de pompage.

Ce paragraphe étudie un projet de mise en valeur agricole des Hauts Plateaux oranais grâce à des éoliennes de pompage, porté entre 1946 et environ 1954 par le service de la Colonisation et de l'hydraulique algérien. Ce dernier décide en effet d'organiser l'aménagement de multiples points d'eau au sein d'une vaste zone aux conditions climatiques extrêmes avec l'ambition explicite de rendre plus productive son activité pastorale. Ce service est issu du service de la Colonisation qu'il remplace à la fin des années 1930. Au lieu de se charger de l'extension du domaine colonial, le Service s'occupe « désormais de la mise en valeur des périmètres irrigables ainsi que de l'alimentation en eau potable des centres jusque là prise en charge par les communes » (ARRUS, 1985, p. 121-122). Pour ARRUS, (1985), le « problème de l'eau » a ainsi été construit par le système colonial afin de légitimer la présence française sur ces territoires. Le besoin de ces derniers de faire appel à la technologie occidentale pour résoudre ce problème justifie ainsi que les administrateurs et ingénieurs coloniaux s'y « penchent avec sollicitude ». Le programme éolien des Hauts plateaux oranais rentre tout-à-fait dans ce cadre.

Les Hauts Plateaux oranais sont une région au climat aride à caractère continental située au nord de l'Algérie, dans la chaîne de l'Atlas et à la limite du Sahara. À l'issue de la guerre, des bergers « indigènes » y effectuent encore traditionnellement une activité pastorale qui implique la transhumance des troupeaux sur de longues distances afin que les animaux paissent et s'abreuvent toute l'année. Les moutons sont en effet une espèce adaptée à une végétation rare et dispersée et au temps très variable selon les saisons (très chaud l'été et très froid l'hiver), et leur élevage est la principale source de richesses et même d'alimentation de ces nomades — quelques colons ont également trouvé dans l'élevage de moutons une source de revenus. Considérant cette activité agricole, d'une part trop peu productive et trop précaire, mais d'autre part la seule possible dans cette région, le service de la Colonisation et de l'hydraulique nouvellement créé par le Gouvernement algérien se penche dès 1942 sur cette question. Ce Service, chargé de « l'aménagement, sous toutes ses formes, des points d'eau pour l'alimentation des populations rurales et des troupeaux », décide la création, vers 1946, d'une subdivision spéciale, dite « subdivision des Hauts Plateaux » (LES TECHNIQUES NOUVELLES, 1954, p. 5), qui s'occupe de l'« hydraulique pastorale » [151]. La misère des populations touchées, mais surtout le manque à

151. Définie comme « la création et l'équipement des points d'eau dans les régions steppiennes d'élevage extensif » (LES TECHNIQUES NOUVELLES, 1954, p. 5).

gagner pour l'économie algérienne par ces incertitudes sont invoqués pour prendre en main cette question. Des acteurs de l'administration et du gouvernement algérien présentent la production ovine, en même temps que la viticulture, comme un fleuron de l'agriculture algérienne. Ainsi Salado, un commissaire au Gouvernement, affirme-t-il en 1954 qu'« en raison de la diminution annuelle du cheptel ovin français, des besoins importants en laine de l'industrie textile de la métropole, et aussi en raison des grandes distances qui séparent la France des autres pays moutonniers, le cheptel ovin algérien constitue et constituera encore plus demain, avec ses six millions de têtes environ, l'une des richesses principales de ce pays » [152] .

Le service de la Colonisation et de l'hydraulique impute le manque de productivité des Hauts plateaux à une trop grande dépendance des nomades envers les conditions climatiques, qui, selon les années peuvent être ravageuses pour les troupeaux. En particulier, la sécheresse, certaines années, provoque une raréfaction de l'eau et de la végétation nécessaires à l'alimentation des troupeaux, et ainsi une forte mortalité parmi ceux-ci. Cette dépendance est quant à elle associée à un mauvais usage des ressources en eau disponibles, les installations d'approvisionnement en eau étant trop rares et archaïques, fruit de « conceptions périmées » (Les techniques nouvelles, 1954, p. 5). Pour ces ingénieurs, les véritables responsables de cet archaïsme sont davantage les nomades inexpérimentés voire mal intentionnés que les techniciens responsables des anciens aménagements, qui n'avaient fait que prendre en considération l'inaptitude de ces « nomades peu évolués » et « craigna[ie]nt, non sans raison, le[ur]s déprédations » (Les techniques nouvelles, 1954, p. 5). D'une manière générale, les méthodes d'élevage des nomades sont jugées « archaïques, sans aucun souci de l'hygiène, de la vie matérielle des ovins pendant l'hiver, de la commercialisation, etc »(Brochet, 1948 [153] ). Les ingénieurs du Service entendent donc résoudre ce problème de l'eau grâce à un vaste programme d'aménagement de points d'eau selon des conceptions « modernes » dans l'ensemble des Hauts plateaux.

Ce programme, établi en 1946 (Brochet, 1948), vise à « équiper rationnellement en points d'eau les terres de parcours de neuf communes mixtes couvrant quelque cinq millions d'hectares, et d'une partie des Territoires du Sud », c'est-à-dire « un pays qui s'inscrit dans un quadrilatère de 400 kilomètres sur 250 et que peuplent, à certaines époques, trois millions et demi de têtes de bétail » (Les techniques nouvelles, 1954, p. 5). Afin de permettre une consommation d'eau suffisante pour l'ensemble de ces troupeaux (les ingénieurs parlent bien de l'alimentation en eau des moutons, et non de celle des nomades) il est prévu de construire sur l'ensemble de cette étendue un réseau de points d'eau distants de quinze kilomètres chacun, soit trois cent cinquante points d'eau, dé-

152. ANOM 81F 2042, p.d., Salado, « Rapport sur l'élevage ovin en Algérie », présenté au nom de la 3e commission de l'Assemblée algérienne, 01/07/1954.
153. Lucien Brochet était ingénieur en chef du service de la Colonisation et de l'hydraulique.

livrant une quantité d'eau de 20 $m^3$/jour (Brochet, 1948). De ce fait, l'ensemble des troupeaux pourraient être répartis sur de plus vastes distances et permettre à la végétation de se régénérer davantage que lorsque les moutons sont concentrés autour des seuls points d'eau et exercent une pression sur les pâturages qui empêche ceux-ci de croître. L'exécution de ce programme, probablement en partie financée par le programme « zone aride » de l'UNESCO [154] , est commencée en 1947. Elle implique des aménagements importants comme le creusage de puits profonds ou l'ouverture de nouvelles pistes d'accès. Les quatre « brigades spécialisées » qui en sont chargées sont installées à Sidi-bel-Abbès, Bedeau, Trézel et Saïda (Brochet, 1948).

Pour les ingénieurs de la division des Hauts plateaux, parmi tous les problèmes posés par ce programme (« détermination du réseau de points d'eau, caractéristiques des ouvrages, méthodes d'exécution des travaux, mode d'exhaure de l'eau, distribution, exploitation, entretien »), « celui de l'exhaure de l'eau présente le plus de difficultés ». Cela est dû à l'état des installations en place, c'est-à-dire « de l'éloignement des points, de l'état précaire du réseau des pistes », mais aussi à « l'inexistence totale d'un réseau électrique ». S'y ajoutent, selon les ingénieurs, des raisons géologiques, la profondeur des nappes aquifères étant très variable et pouvant atteindre des profondeurs importantes (jusqu'à 150 m), et, enfin, à nouveau, « l'inexpérience des autochtones mais aussi de leur esprit de destruction » [155]. C'est pour toutes ces raisons que, parmi plusieurs types de moteurs effectuant l'exhaure, les ingénieurs ont choisi de généraliser l'emploi d'éoliennes.

En effet, les ingénieurs envisagent l'emploi des trois moteurs suivants : pompes à piston actionnées à la main, pompes à moteur thermique, et pompes éoliennes. À propos des premiers, ils ont conçu, construit et testé un prototype au niveau d'un point d'eau. Selon eux, malgré un rendement satisfaisant, ce moteur manuel n'est pas adapté à l'usage escompté à partir de 15 m de profondeur de puits, principalement en raison du comportement et de la mentalité des « autochtones » : en plus des « assauts destructeurs » auxquels ces derniers se seraient livrés, en raison de leur « inexpérience » et de leur « désœuvrement », ils se seraient révélés incapables d'une utilisation « rationnelle » — il est question de bergers « déficients ». En effet, leur « indolence et leur répugnance à un effort physique un peu soutenu font qu'ils préfèrent imposer à leurs troupeaux une marche supplémentaire de 12 à 15 km, pour les faire abreuver en des points où l'eau est distribuée mécaniquement » [156].

154. Dans un rapport d'activité de l'UNESCO, une « bourse de recherche sur la zone aride » a été attribuée à la France pour l'Algérie.
Archives UNESCO, p.d., Programme de la zone aride, compte-rendu d'activité pour la période du 1er mai 1954 au 15 septembre 1954.

155. ANOM 81F 2042, p.d., J. Avargues (ingénieur du service de la Colonisation et de l'hydraulique du 2e arrondissement d'Oran) et R. Ripoll (ingénieur du service de la Colonisation et de l'hydraulique de la subdivision des Hauts plateaux), « Création de points d'eau dans les Hauts plateaux oranais », Conférence au Service des études scientifiques, 22/05/1954.

156. ANOM 81F 2042, p.d., J. Avargues et R. Ripoll , « Création de points d'eau dans les Hauts Plateaux oranais », Conférence au Service des études scientifiques, 22/05/1954.

Tout ceci justifie la recherche de moyens de pompage automatiques ou « sources artificielles » pour tous les puits de profondeur supérieure à 15 m. Les moteurs thermiques sont ainsi envisagés dans un premier temps comme solution, mais les frais d'entretien (gardiennage, réparations) et de fonctionnement (nécessité d'acheminer du carburant depuis le siège de la sous-subdivision « qui atteint parfois plusieurs centaines de kilomètres ») lui font préférer celle des moteurs éoliens qui présentent un fonctionnement plus automatique, dans la mesure où ils ne nécessitent pas d'apport de carburant. La mesure de l'énergie du vent effectuée par le Service indique par ailleurs un régime favorable à l'usage envisagé, pourvu que les machines y soient aussi adaptées.

Les ingénieurs se trouvent alors confrontés à la question de la disponibilité des éoliennes de pompage sur le marché, mais surtout de leur adaptation au climat particulier des Hauts Plateaux. Effectivement, constatant « les nombreux appareils éoliens abandonnés, parce que en panne, voire partiellement détruits, un peu partout dans les exploitations agricoles », ils cherchent à en connaître les raisons. La première d'entre elles est « l'apparition dans les campagnes de l'énergie électrique avec ses innombrables solutions de facilité », et la seconde, l'inadaptation des machines importées de France, de Hollande ou d'Allemagne, et conçues pour des usages et des conditions climatiques différentes. Il s'agit, dans les Hauts Plateaux, de puiser de l'eau profondément et avec un haut débit, grâce à des vents chargés de sable, souvent faibles mais pouvant atteindre des vitesses très importantes. Avant de mettre au point un appareil spécial, ils étudient les éoliennes abandonnées pour comprendre leurs insuffisances, mais cherchent également à tester les éoliennes en vente en Algérie, en France et à l'étranger. L'étude du régime du vent en lien avec l'usage escompté mène à rechercher des éoliennes ayant les caractéristiques suivantes :

— « Débit  L/jour par vent de 5 m/s ;
— sensibilité : démarrage par vent de 3 m/s au maximum et avec débit de 2 $m^3/h$
— étanchéité absolue du carter enfermant le mécanisme » [157].

C'est ainsi qu'un appel d'offres est lancé vers 1950 auprès des « maisons spéciales [...] que ces problèmes pouvaient intéresser » [158]. Une douzaine de sociétés sont ainsi consultées [159],

157. ANOM 81F 2042, p.d., J. Avargues et R. Ripoll, « Création de points d'eau dans les Hauts Plateaux oranais », Conférence au Service des études scientifiques, 22/05/1954.
158. ANOM 81F 2042, p.d., J. Avargues et R. Ripoll (ingénieur du service de la Colonisation et de l'hydraulique de la subdivision des Hauts Plateaux), « Création de points d'eau dans les Hauts Plateaux oranais », Conférence au Service des études scientifiques, 22/05/1954.
159. Il s'agit de : Araou (Narbonne) ; Allgaier (Allemagne) ; Aermotor (Chicago) ; Société industrielle et commerciale d'Afrique ; Société oranaise de fournitures et d'entreprises industrielles (Oran) (« pour les appareils anglais ») ; Impor-Export (Alger) ; Compagnie industrielle des aéromoteurs (Paris ; cf 9.1.3.2) ; Nicolas (Sidi-Bel-Abbès) ; Henry Hamelle (Oran) ; Couppez (Paris) ; Société industrielle de travaux d'entrepris générale (Maroc).
ANOM 81F 2042, p.d., J. Avargues et R. Ripoll, « Création de points d'eau dans les Hauts Plateaux oranais », Conférence au Service des études scientifiques, 22/05/1954.
Mais aussi : Andreau, qui répond trop tard à l'appel.
AN 1991 0305/4, p.d., Lettre de Saigot (ingénieur en chef du service de la Colonisation et de l'hydrauliqu d'Alger) à Pétry, 18/06/1951.

et seules trois d'entre elles répondent à l'appel d'offres : Araou, Aermotor et Allgaier. Un modèle (deux pour Aermotor) de chacune de ces entreprises est alors commandé et testé pour le pompage de certains points d'eau :

— une éolienne Allgaier, tripale, de 10 m de diamètre (voir Figure 9.15), à Bataillon d'Afrique (Commune mixte du Telagh), pour un coût de 1 576 600 francs. Celle-ci est le seul modèle à allure « moderne », similaire aux nouveaux modèles à petits nombres de pales et à grande vitesse tels que ceux du B.E.S.T ou de Neyrpic, testés dans les Hauts Plateaux,

— une éolienne Aermotor multipale de 4.85 m de diamètre et une autre de 6.10 m de diamètre, installée à Saïda, pour un coût de 1 950 000 francs,

— une éolienne Araou multipale de 6 m de diamètre coûtant 1 450 000 francs.



FIGURE 9.15 – Point d'eau de Bataillon d'Afrique muni d'une éolienne Allgaier (vers 1950) [161]

Après un an d'essais, chacune de ces éoliennes présente des inconvénients pour l'usage escompté, que ce soit un débit insuffisant au-delà d'une certaine profondeur (Aermotor), un manque de souplesse et de robustesse dans les grands vents (Araou) ou un défaut de sensibilité aux vents faibles mais fréquents (Allgaier). Les ingénieurs du Service parviennent à un fonctionnement satisfaisant en apportant plusieurs modifications mais ne peuvent envisager de généraliser ces solutions en raison de la dispersion et de l'éloignement des sites à équiper, mais aussi du coût de ces installations. C'est ainsi qu'ils décident de mettre au point une machine spécifique, et s'adjoignent pour cela l'expertise d'Eugène

161. ANOM 81F 2042, p.d., J. Avargues et R. Ripoll, « Création de points d'eau dans les Hauts Plateaux oranais », Conférence au Service des études scientifiques, 22/05/1954.

Henry, « ingénieur mécanicien gérant » d'une société française récemment établie en Algérie. Celle-ci y représente la maison Allgaier, et Henry a été confronté au fonctionnement défectueux de ses éoliennes dans les Hauts Plateaux. Il conçoit et met alors au point, en « quinze mois d'études et d'essais en usine », une pompe éolienne à roue multipale. Trois mois d'essais sur un puits près de Bedeau (département d'Oran) le révèlent plus sensible, plus souple et plus robuste dans le vent saharien que les machines précédemment testées, et ce notamment grâce à des modifications dans le mécanisme de transformation du mouvement circulaire en mouvement rectiligne (passage de l'énergie mécanique de la roue à celle de la pompe) [162]. Elle est de plus capable de pomper à débit suffisant jusqu'à 80 m de profondeur, coûte moins cher (1 414 000 francs) que les trois autres types d'éoliennes et comporte des pièces facilement remplaçables. Elle présente ainsi les caractéristiques escomptées pour le pompage de l'eau dans les Hauts Plateaux. Henry met ensuite au point une éolienne de plus petite taille (roue de 4 m) et donc moins chère (450 000 francs) suffisante pour des profondeurs allant jusqu'à 40 m. L'allure générale de la machine reste la même que celle des éoliennes de pompage de type américain : une roue à aubes multipales en acier de quelques mètres de diamètre montée sur pylône (voir, Figure 9.16, l'installation de Bou-Ktoub).

Satisfaite de ce dispositif, la division des Hauts Plateaux procède, à partir de 1952, à la multiplication de telles installations, selon deux modèles-type fonctions de la hauteur à pomper : puits (de quelques mètres à 80 m), éolienne (4 m de diamètre ou plus selon que la profondeur du puits est supérieure ou égale à 15 m) et pompe d'exhaure, réservoir de 50 $m^3$, borne fontaine, deux abreuvoirs de 80 m de long à régulation automatique des débits (voir Figure 9.16). En mars 1953, cinquante points d'eau équipés d'un pompage éolien ont été mis en place dans les Hauts Plateaux oranais [163], et quinze autres munis de moteurs thermiques (voir la carte des points d'eau en Annexe N). Les ingénieurs de la Subdivision des Hauts Plateaux se félicitent que « de vastes régions, autrefois dépourvues d'eau, d'ailleurs appelées Bled El Attech (pays de la soif), sont déjà aujourd'hui parsemées de ces ouvrages où l'eau coule « comme à la ville » » [164]. Il espèrent alors atteindre, l'année suivante, la centaine d'installations. Henry, dont l'entreprise a acquis la préférence de l'administration algérienne [165], souhaite alors s'assurer une clientèle dans les colonies françaises d'Afrique du Nord, fort d'avoir mis au point une solution française pour le pompage de l'eau adaptée au climat de ces territoires. En 1953, il transforme ainsi sa

162. ANOM 81F 2042, p.d., J. Avargues et R. Ripoll , « Création de points d'eau dans les Hauts Plateaux oranais », Conférence au Service des études scientifiques, 22/05/1954.

163. Il s'agit de vingt-huit moulins à vent français (Araou et Henry), dix-huit moulins à vent américains (Aermotor) et quatre moulins à vent allemands (Allgaier) (Avargues et Ripoll, 1954).

164. ANOM 81F 2042, p.d., J. Avargues et R. Ripoll , « Création de points d'eau dans les Hauts Plateaux oranais », Conférence au Service des études scientifiques, 22/05/1954.

165. L'entreprise aurait été « agréée au Plan d'Industrialisation de l'Algérie par arrêté gubernatorial du 15 juillet 1954 ».
ANOM 81F 2042, p.d., Lettre de Henry au ministre de l'Intérieur, 26/11/1954.

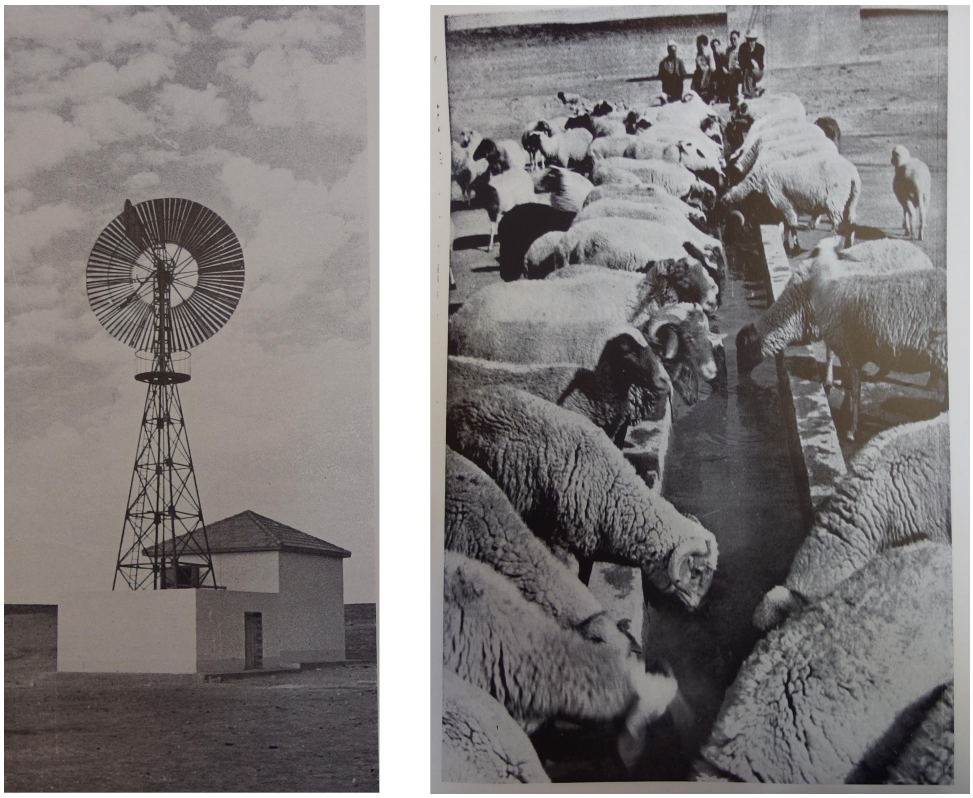


FIGURE 9.16 – Point d'eau de Bou-Ktoub (Commune mixte de Geryville) muni d'une éolienne Henry et abreuvoir-type (vers 1952)(AVARGUES et RIPOLL, 1954, p. 16)

société en Compagnie africaine de matériel éolien (CAME), et, en 1954, il s'adresse directement au ministre de l'Intérieur pour obtenir des facilités de vente pour ses machines par rapport aux éoliennes étrangères au Maroc et en AOF [166]. Mais il est fort probable que le programme ait été stoppé avec la guerre d'Algérie, que la CAME se soit dissolue, et je ne sais rien du devenir de ces points d'eau par la suite.

La manière dont les points d'eau se présentent et dont ils sont gérés donne des indications sur la vision du développement présente à l'esprit des ingénieurs de l'administration coloniale. Dans une position paternaliste, ils considèrent les nomades comme de simples usagers, incapables d'entretenir les installations dont ils se servent, et qui pourraient de surcroît être injustement malveillants. Leurs pratiques traditionnelles de transhumance sont en outre jugées archaïques et improductives. Ainsi, preuve d'une méfiance toujours vive dans l'esprit des ingénieurs vis-à-vis des bergers nomades, dans ces installations-

166. Il obtient du ministre de l'AOF qu'il demande aux gouvernements généraux de l'AEF et de l'AOF, du Cameroun et de Madagascar, de communiquer les renseignements sur les machines de la CAME en usage, et une comparaison avec les autres machines françaises et étrangères. Ces gouvernements doivent aussi sommer les usagers de matériel éolien de consulter la CAME lors de l'établissement des appels d'offre et en communiquer les résultats au ministre. Ce dernier veut ainsi se faire un avis argumenté avant de privilégier un constructeur, même français, dans le choix des matériels publics.
ANOM 81F 2042, p.d., Lettre de la direction du Commerce, de l'Énergie et de l'Industrie du ministère de l'Intérieur au gouverneur général de l'Algérie, 05/04/1955 ; Lettre du ministre de la FOM au ministre de l'Intérieur, 14/04/1955.

types, la pompe, le puits et le réservoir sont abrités par des structures en maçonnerie qui empêchent l'accès aux installations par des personnes autres que le service de la Colonisation et de l'hydraulique (Les techniques nouvelles, 1954, p. 7) [167]. Ce sont ces derniers qui assurent l'entretien et la réparation des machines. Ils se réjouissent cependant de la satisfaction des « autochtones » vis-à-vis de ces nouveaux dispositifs et considèrent leur opération comme une réussite dans la mesure où les grands mouvements de transhumance sont sensiblement réduits. En effet, des « des zones nouvelles de pacage sont utilisées qui ne pouvaient pas l'être, faute de moyens d'abreuvement » et, on assiste, par conséquent, « à une évolution des populations pastorales dans le sens, sinon d'une sédentarisation (comme autour de Sidi-Bel-Abbès), du moins d'une localisation régionale de la transhumance dans les zones nouvellement équipées » (Les techniques nouvelles, 1954).

Cette étude de cas constitue donc l'exemple d'un programme éolien dont une bonne partie a été mise en application, avec une utilisation pendant au moins quelques années. Il met en évidence l'adaptation nécessaire d'un objet technique au contexte dans lequel il est utilisé comme, pour ces éoliennes de pompage le climat, l'usage de l'eau ou encore la provenance de cette dernière. Il représente en outre un des derniers efforts de l'administration coloniale pour mettre en valeur les terres algériennes, qui fut très probablement interrompu par la guerre d'Algérie. L'exemple de la CAME montre que l'Afrique du Nord a constitué un des derniers marchés pour les constructeurs d'éoliennes de pompage de type américain, et suggère que les décolonisations ont constitué un dernier coup dur pour ces entreprises. Par ailleurs, ce programme montre une vision particulière du développement, que permettrait l'utilisation de l'énergie éolienne. L'ambition première que révèlent les discours des protagonistes du programme est avant tout économique pour la France : faire de l'Algérie un des leaders mondiaux de la production d'ovins. L'enjeu de la mortalité des ovins est ainsi bien plus souvent invoqué que l'alimentation en eau des nomades ! Quant aux bienfaits du programme pour les populations visées, ils sont jaugés à l'aune d'un idéal occidental de mise en valeur maximale des ressources (terre, vent, animaux...) et de confort (sédentarité). Cette tentative pour imposer un mode de vie, avec des intentions certes charitables, a donné lieu à des conflits, comme en témoignent les actes de vandalisme qu'évoquent les auteurs, et dont ils parlent comme s'il s'agissait d'un penchant des nomades pour la destruction. Je n'ai malheureusement pas d'autres traces de ces conflits et des motifs des nomades pour ces actes. Quoi qu'il en soit, ils ne sont pas pris en considération en tant que contestation d'une manière de vivre et de penser qui est en rupture avec, et qui remet et question et menace un autre mode de vie.

167. De même, en ce qui concerne les installations munies de pompes à manivelle, la pompe et la manivelle sont protégées par une « enceinte de 2 m X 2 m et 1 m 50 de hauteur, en maçonnerie de briques creuses de 0.11 m de largeur, couverte, fermée d'une porte à deux vantaux, en forte tôle, avec fermeture à vis, à l'abri de toute effraction » (Avargues et Ripoll, 1954, p. 16).

#### 9.2.2.3 Des aérogénérateurs de petites et moyennes puissances pour les communautés européennes isolées. Zraguet (SCH Algérie) et Port-Étienne (ORSC) (1947-1948)

Les organisations internationales étudiant la question de l'utilisation de l'énergie éolienne envisagent, parmi les applications de l'énergie éolienne dans les pays « sous-développés », la production de petites puissances électriques à usage local, pour des lieux non reliés à un réseau électrique interconnecté. En France, certains inventeurs et constructeurs ont tenté de mettre au point des aérogénérateurs de quelques dizaines de kilowatts adaptés aux vents chargés de sable pour répondre à une telle demande de la part d'institutions coloniales françaises. C'est le cas de la SCAM en collaboration avec la Compagnie électro-mécanique, qui ont en vue l'alimentation d'îles métropolitaines et de communautés isolées, et qui sont au moins sollicitées à la fin des années 1940 par le service de la Colonisation et de l'hydraulique et par l'ORSC dans ce sens [168]. En 1950, un prototype de générateur à hélice tripale de 16 m, conçu par Darrieus, d'une puissance de 5 kW par vent de 5 m/s et de 50 kW par vent de 10 m/s est ainsi en cours d'expérimentation dans les ateliers de la Compagnie électro-mécanique. L'entreprise se dit alors prête à livrer des commandes sous quelques mois [169]. Mais il semble qu'aucune de ces éoliennes n'ait été fournie.

Vers 1947, le service de la Colonisation et de l'hydraulique d'Algérie cherche également à utiliser l'énergie éolienne pour alimenter en énergie électrique la tour du village de Zraguet, dans les Hauts plateaux oranais où se déploie le vaste programme de pompage éolien. Une éolienne de 3 kW, par vent de 4 m/s, doit charger un accumulateur alimentant un dispositif d'éclairage et des petits moteurs. La SCAM prévoit une livraison du prototype mis au point en France [172]. L'idée est d'étudier la possibilité d'alimenter les postes isolés de cette région en électricité éolienne, et de multiplier ce type d'installations. À nouveau, une telle livraison n'a probablement pas eu lieu.

À Port-Étienne, sur la côte mauritanienne, l'ORSC a entrepris de construire une centrale de production d'électricité alimentant à la fois le réseau électrique de la ville, et une station de distillation de l'eau qui absorberait les surplus d'énergie liés à l'intermit-

168. À noter que Lacroix, ingénieur à la Compagnie électro-mécanique, était aussi expert des aérogénérateurs à l'UNESCO, puisqu'il a été chargé de l'écriture d'un rapport sur ce sujet pour le programme « zone aride ».

169. AN 1991 0305/2, 1941-1957, Notes de l'entretien entre Pétry (service des Phares et balises), Darrieus et Lacroix (Compagnie électro-mécanique), et Menissier (SCAM), 08/03/1949.

171. Ce dispositif expérimental a pour but de « procéder à la mise au point et au réglage de la régulation réalisée pour [l'] aérogénérateur à rotor de 16 mètres de diamètre ». « L'action du vent est remplacée par un groupe à variation de vitesse, et les pales sont figurées par des bras lestés donnant même poids et même force centrifuge que les pales réelles. ».
AN 1991 0305/2, 1941-1957, Lettre de la SCAM à Pétry, 28/03/1950.

172. AN 1991 0305/2, 1941-1957, Compte-rendu de la réunion tenue entre le service des Phares et balises, EDF, la SCAM et Sautter-Harlé, 06/07/1948.



FIGURE 9.17 – Modèle réduit d'hélice tripale testé en 1950 aux ateliers de la Compagnie électro-mécanique (Le Bourget) [171]

tence du vent. À la base, le gouvernement de Vichy est à l'initiative de ce projet. En effet, Pétry, missionné en 1942 par la DGEN pour étudier les possibilités d'utilisation des « énergies de remplacement » (voir 8.1.2), devait également examiner les éventuelles « application[s] coloniale[s] aux hélices qui seraient par ailleurs utilisées en métropole pour l'électricité » [173]. Pétry n'envisageait donc pas, alors, de produire de l'électricité aux colonies, mais selon lui, « de même que les éoliennes [en métropole] font pour la plupart du pompage d'eau pour la consommation, l'irrigation ou l'assèchement, de même aux colonies elles pourraient actionner des distilleries d'eau salée et alimenter des réservoirs d'eau potable dans les déserts » [174]. Les premiers lieux d'application qu'il imagine sont Bidon V, poste saharien qui devait être une des étapes du chemin de fer transsaharien ; et Port-Étienne, en Mauritanie. Dans ce port, les habitants font appel, pour leurs besoins en eau, à des importations par bateau des ports coloniaux les plus proches (Maroc

173. AN 1991 0305/5, p.d., Lettre de Pétry à Laurent (Société Rateau), 05/08/1942.
174. AN 1991 0305/5, p.d., Lettre de Pétry à Laurent (Société Rateau), 05/08/1942.

et Sénégal) [175], ainsi qu'à une usine distillatoire alimentée par un groupe électrogène au mazout construite à cet effet en 1938-1939 [176]. La sécheresse est due à l'extrême rareté des précipitations, et l'enclavement de la ville rend coûteuse l'importation d'eau douce. L'importation de pétrole étant d'un prix encore plus élevé, la distillation d'eau de mer à partir de cette source coûte deux fois plus cher que le transport d'eau. Le manque en eau et en combustible de ce port, la disponibilité en eau de mer, ainsi que des vents réguliers et puissants, y font de la distillation éolienne de l'eau de mer un procédé qui trouverait une application immédiate [177]. Pétry est d'abord en lien avec le Gouverneur général Haut commissaire de l'Afrique française et la société Rateau, qui travaille sur la mise au point de distillateurs alimentés par une source d'énergie intermittente. Son étude retient alors l'attention de J Petel, secrétaire technique aux Applications industrielles de l'ORSC, mis au courant de ces travaux, ainsi que de Jeannel, directeur de l'ORSC, qui se propose de suivre « activement » le projet [178].

Avec le premier Plan de modernisation des TOM, l'ORSC parvient à obtenir 5 millions de francs du FIDES pour la création d'une station éolienne pilote. C'est le projet d'une usine éolienne de production d'électricité et de distillation de l'eau à Port-Étienne qui est retenu, en raison du caractère jugé immédiat des applications envisagées. Selon R. Peltier, chargé en 1947 par l'ORSC de l'étude de l'installation de l'usine , « le problème essentiel à Port-Étienne est celui de l'eau douce », et c'est même « surtout ce manque d'eau qui a empêché le développement [du port] » [179]. Ce port n'est peuplé que de quelques centaines d'habitants, dont une cinquantaine d'Européens et « un demi-millier à un millier de Maures et de tirailleurs sénégalais » [180]. Son rôle est avant tout militaire, mais il constitue également un centre administratif colonial et dispose d'une activité économique de pêcherie. Ce territoire est prisé pour des raisons économiques et militaires : il possède d'importantes ressources en poisson dont une partie est déjà exploitée par des compagnies françaises et étrangères, ces dernières se contentant de pêcher le poisson au large sans entrer en contact avec le port ; « Port-Étienne est le seul port aisé à construire sur la côte d'Afrique » entre Casablanca et Dakar, deux points des « pays neufs [...] susceptibles de développement prodigieux » ; il pourrait en outre « desservir un immense arrière-pays, actuellement désertique » [181]. Peltier l'imagine ainsi comme un relais aéronautique entre

175. AN 1991 0305/5, p.d., Lettre de Pétry à Beau, 24/06/1942.
176. AN 1991 0305/5, p.d., Lettre du Gouverneur général Haut commissaire de l'Afrique française à Pétry, 14/08/1942.
177. À noter que pendant l'entre-deux-guerres, Port-Étienne était un des lieux pour lequel Jules Richard avait envisagé des applications du distillateur solaire mis au point avec l'ONRSI (voir 5.4).
178. AN 1991 0305/5, p.d., Lettre de Pétel à Pétry, 19/06/1943.
179. AN 1991 0305/5, p.d., Peltier, « Installation d'une centrale éolienne à Port-Etienne », note commandée par l'ORSC, 04/11/1947.
180. AN 1991 0305/5, p.d., ORSC, Compte-rendu de la réunion de la Commission d'études pour l'utilisation de l'énergie éolienne, 28/05/1947.
181. AN 1991 0305/5, p.d., Peltier, « Installation d'une centrale éolienne à Port-Etienne », note commandée par l'ORSC, 04/11/1947.

l'Afrique et l'Amérique du Sud, un « port de guerre secondaire » ou un « port de pêche actif ».

Toutes ces perspectives donnent à la production simultanée d'eau douce et d'électricité une place intéressante. En 1947, l'électricité, utilisée exclusivement par les quelques dizaines d'habitants européens, est en effet presque entièrement produite à partir de pétrole — Air France, ainsi qu'un commerçant, possèdent en outre chacun une petite éolienne qui charge des accumulateurs, qui se détériorent rapidement en raison du sable que transporte le vent. Une double production d'électricité et d'eau douce permettrait de pallier l'irrégularité du vent pour un circuit de distribution non raccordé à un réseau régional ou national d'électricité : la partie variable de la production d'électricité serait utilisée à la production d'eau douce, et l'autre à l'alimentation du réseau électrique local. Les usagers visés sont principalement européens, l'électricité leur étant réservée, et leur consommation d'eau douce par habitant calculée comme deux fois plus importante que celle des « indigènes » [182]. Peltier estime le besoin en électricité à 25 kW de puissance maximale. Il contacte des constructeurs d'aérogénérateurs et de distillateurs électriques : pour ce qui est des aérogénérateurs, la SCAM, mais aussi un ingénieur de bureau d'études nantais, Lanaud, et pour les usines de distillation, Prache et Bouillon. Peltier juge le projet proposé par Lanaud trop ambitieux [183], et suggère à l'ORSC d'attendre la mise au point des éoliennes de la SCAM qui correspondraient parfaitement au projet qu'il a établi. L'usine éolienne n'est finalement jamais construite, et plusieurs raisons peuvent en être la cause. Ce peut être une cessation des expériences de la SCAM, qui se seraient arrêtées aux tests de prototype au début des années 1950, mais aussi un problème de financement de l'installation, dont le coût était estimé à une fourchette comprise entre 24 millions de francs et 26 millions de francs, bien loin des cinq millions de francs accordés par le FIDES. L'ORSC n'aurait ainsi pas trouvé les fonds nécessaires pour mettre ce projet à exécution.

Ces deux exemples montrent qu'une demande en aérogénérateurs de moyennes puissances, pour des sites isolés d'un réseau de distribution électrique, a existé au moins dans les années 1940 de la part d'institutions coloniales, et que des constructeurs comme la SCAM ont tenté d'y répondre. Celle-ci n'est manifestement pas parvenue à satisfaire à temps cette demande. Par ailleurs, l'exemple de l'usine éolienne de distillation et de production d'électricité montre, de la part de l'ORSC, la vision d'un mode de « développement économique et social » qui profiterait essentiellement aux populations européennes : le confort des habitants blancs de Port-Étienne, l'économie nationale et l'intérêt militaire français.

182. AN 1991 0305/5, p.d., Lettre du Gouverneur général Haut commissaire de l'Afrique française au Secrétariat d'État aux Colonies, 14/08/1942.

183. Lanaud ne concevait que des installations d'une puissance minimale de 1 000 kW. Cet ingénieur aurait, d'après Crouzet, expérimenté à Nantes une hélice tripale « Clark Y » débitant 450 kW.
AN 1991 0305/3, p.d., « Note technique de l'appareil Atlas », 14/05/1948.

#### 9.2.2.4 Des aérogénérateurs de moyennes et grandes puissances pour l'approvisionnement du réseau électrique. Maroc (SMEHV, 1947-1952), Algérie (EGA, 1948-1958)

Deux projets d'aérogénérateurs dans les territoires de l'empire colonial français ont eu pour objectif d'approvisionner un réseau électrique interconnecté, celui de la Société marocaine d'études de la houle et du vent au Maroc (SMEHV), et celui d'EGA en Algérie. Ces deux sociétés ont mené ces études d'aérogénérateurs en parallèle avec une prospection éolienne des sites, dans l'espoir d'une complémentarité saisonnière entre énergie hydraulique et énergie éolienne, à l'instar d'EDF (voir 9.2.2.1).

En 1947, le gouvernement chérifien décide d'étudier les possibilités du vent et de la houle comme sources d'énergie électrique pour le Maroc, et crée la SMEHV, basée à Rabat. Cette société est chargée de reprendre les travaux sur le vent menés pendant l'entre-deux-guerres au sein d'Énergie électrique du Maroc en collaboration avec la Compagnie électro-mécanique (voir 5.3), et d'élargir les études à l'énergie de la houle. Il semble que le ministère de la France d'Outre-mer ait également participé aux travaux de la SMEHV sur le vent, puisque Crouzet, inspecteur en chef des Travaux publics au ministère, montre plusieurs signes d'implication dans la société. En 1951, la société disparaît et ses études sont entièrement reprises par la Direction des Travaux publics du Maroc : l'ingénieur Yves Bars reste responsable des études sur la houle, et Bauzil (Chef de la circonscription de l'Hydraulique et de l'électricité de Rabat) se charge des études sur l'éolien [184]. Énergie électrique du Maroc semble avoir gardé un œil attentif sur ces travaux puisqu'un rapport de 1952 au nom de l'entreprise en fait une synthèse [185]. Les traces de ces études s'arrêtent dans les archives consultées pour cette partie en 1952, et il est probable qu'elles aient été effectivement stoppées peu de temps après.

Au niveau de l'utilisation de la houle, la Société n'a procédé qu'à des relevés en un nombre restreint de points de la côte en lien avec l'Institut de Physique du Globe. Cela montre cependant la volonté de jauger, au moins dans le temps, la « quantité » d'énergie disponible. Les deux institutions financent ainsi ensemble l'installation de manomètres enregistreurs [186] qui doivent permettre à la SMEHV d'évaluer l'énergie moyenne annuelle de la houle à Casablanca. La société commande en outre des essais à NBPP pour évaluer l'intérêt d'utiliser un procédé de « dièdres à houle » dont ils possèdent la licence. Il s'agit du procédé Giannonni-Giry, breveté dans l'entre-deux-guerres (voir 6.4). La SMEHV s'associe pour cela à la Société méditerranéenne d'énergie marine (SOMEMA). Les deux sociétés

184. AN 1991 0305/5, p.d., Lettre de Bauzil à Pétry, 19/01/1952.
185. AN 1991 0305/5, p.d., EEM, « Note sur une installation d'essai réalisée à Mogador pour l'utilisation du vent comme moyen de production de l'énergie électrique », 1952.
186. La SMEHV y consacre 125 000 francs, sur une dizaine de millions.
AN 1991 0305/5, p.d., « Note sur l'activité de la SMEHV en 1950 », 11/1950.

reprennent, au Laboratoire dauphinois d'hydraulique, des études commencées par les deux inventeurs en conditions réelles. Les essais de NBPP, puis Neyrpic, mènent à la conclusion, en 1956, que le procédé n'est pas, dans les conditions économiques actuelles, rentable dans la majorité des cas, et ce, non en raison du convertisseur, mais de la nature de la houle elle-même (Dhaille, 1957).

Dès les premières années d'analyse du régime des vents, et avant que des conclusions précises aient été tirées de ces études encore en cours, les ingénieurs de la SMEHV projettent de créer à Mogador une installation d'essais de production d'électricité éolienne. Le vent y semble en effet relativement constant. La société contacte alors divers constructeurs, dont NBPP, la Compagnie électro-mécanique, ou encore FL Schmidt au Danemark. Le constructeur danois Lykkegaard est le seul pouvant fournir des aérogénérateurs de moyenne puissance. La SMEHV acquiert en 1948 une machine de cette société, munie d'une roue de 18 m de diamètre, dans le but de tester l'injection d'électricité éolienne sur le réseau de Mogador. Celui-ci est alimenté normalement par des groupes Diesel totalisant 1 000 kW. Lykkegaard, compagnie qui a fourni une grande partie des aérogénérateurs aux stations électriques danoises, est ainsi choisie au vu de sa bonne réputation, mais surtout de sa disponibilité sur le marché. EDF effectue parallèlement, et pour les mêmes raisons, des études similaires sur le même modèle d'éolienne Lykkegaard (voir 9.1.3.2), aussi la SMEHV rentre-t-elle en contact, vers 1949, avec la Division énergie du vent pour bénéficier de son expérience. Celle-ci, ayant testé la marche synchrone de la génératrice électrique, a déjà rencontré des problèmes lors du couplage au réseau électrique parisien [187]. Partant de ces résultats, la SMEHV couple au contraire son Lykkegaard avec une génératrice asynchrone, de 30 kW, ce qui règle le problème mais en génère d'autres — notamment, le moulin doit être surveillé en permanence pour être arrêté en-dessous d'une certaine vitesse de rotation [188].

Hormis ces questions spécifiquement électriques qui sont l'objet principal de ces expériences, le Lykkegaard se révèle globalement décevant. Crouzet déplore ainsi le choix de ce moulin qu'il considère « démodé ». Notamment, ses ailes ne sont pas profilées comme celles des éoliennes « modernes » grâce aux lois de l'aérodynamique, le rendement mécanique n'est donc pas optimisé. Crouzet en dresse un portrait non sans humour ni mépris : « nous sommes en présence de deux longerons quadrangulaires en bois et de volets également en bois manœuvrés par des tringles », reproduisant « exactement le modèle primitif qui a été décrit [vingt ans auparavant] dans diverses revues techniques », autrement dit,

187. Des « battements » ont ainsi été constatés lors du couplage au réseau, dus au faible volant d'inertie du moulin par rapport à celui, infini, du réseau.
AN 1991 0305/5, p.d., SMEHV, « Note sur une installation d'essai réalisée à Mogador pour l'utilisation du vent comme moyen de production de l'énergie électrique », 1952.
188. En l'absence de régulation automatique, au-dessous de cette vitesse (7 m/s), la roue passe de générateur à moteur, ce qui endommage le système et consomme de l'électricité.

d'un « outil préhistorique » [189], ou encore d'un « contemporain du moulin de la Galette » (moulin parisien construit au XVII^e siècle) [190]. Il qualifie ainsi le constructeur d'« illustre inconnu parmi les techniciens de l'aérodynamique », et de « brave forgeron de l'île Fionie qui continue à construire de vieux moulins » [191]. L'allure du Lykkegaard, avec ses deux ailes en bois croisées, rappelle en effet davantage les moulins à vent hollandais d'antan que les hélices d'avion profilées dont se rapprochent les aéromoteurs « modernes » telles que les « éoliennes de grand style » de Darrieus (voir Figure 9.18). Mais l'aéromoteur est, surtout, inadapté au cas du Maroc : il est en bois, matériau rapidement détérioré par les conditions climatiques du Maroc, et les engrenages, insuffisamment huilés, sont trop fragiles face aux vents salins transportant du sable. L'éolienne est ainsi endommagée à plusieurs reprises lors des essais [192].

En 1952, la Société travaille encore à la mise au point d'une roue libre permettant le découplage entre l'aéromoteur et la génératrice en-dessous de la vitesse de synchronisme [195]. La SMEHV y fait état d'un fonctionnement global sans problèmes majeurs d'octobre 1949 à mai 1952, avec une puissance horaire moyenne de 14,3 kW. Il s'agit probablement des derniers essais des institutions coloniales au Maroc pour la production d'électricité éolienne. Finalement, le réseau électrique interconnecté marocain aura vu, notamment entre 1947 et 1954, c'est-à-dire pendant la période incluant les essais de Mogador, sa production considérablement augmentée, essentiellement à partir d'énergie hydraulique, régularisée par le thermique. Notamment, la proportion d'électricité produite par l'énergie hydraulique entre 1953 et 1954 passe de 38% à 78%, et elle est plus que doublée dans l'absolu (SAUL, 2002, p. 506-507) [196]. Il est possible que, devant les difficultés rencontrées à faire fonctionner l'aérogénérateur Lykkegaard, et le manque d'autres machines de cette puissance disponibles sur le marché, Énergie électrique du Maroc et le gouvernement chérifien aient décidé de se focaliser sur l'hydroélectricité et d'abandonner l'idée d'une complémentarité hydraulique-éolien. Le mouvement d'indépendance du Maroc, très actif au début des années 1950 et qui aboutit en 1956, est peut-être aussi à l'origine de l'arrêt des travaux d'Énergie électrique du Maroc sur l'énergie éolienne, l'entreprise se focalisant sur les travaux de construction en cours, et non sur la mise au point de nouveaux convertisseurs.

Les études d'EGA sur les aérogénérateurs commencent peu après la prospection sur l'énergie éolienne commencée en 1948, dans le but d'une mise en œuvre rapide de « com-

189. AN 1991 0305/3, p.d., Crouzet, « Note technique de l'appareil Atlas » 14/05/1948.
190. AN 1991 0305/3, p.d., Lettre de Crouzet à Rauber (EDF, Division énergie du vent), 15/09/1948
191. AN 1991 0305/3, p.d., Lettre de Crouzet à Rauber ( EDF, Division énergie du vent), 15/09/1948.
192. AN F14 20 902, p.d., Lettre de Y Bars (SMEHV) à Crescent, 07/09/1948.
AN 1991 0305/5, p.d., EEM, « Note sur une installation d'essai réalisée à Mogador pour l'utilisation du vent comme moyen de production de l'énergie électrique », 1952.
195. AN 1991 0305/5, p.d., EEM, « Note sur une installation d'essai réalisée à Mogador pour l'utilisation du vent comme moyen de production de l'énergie électrique », 1952.
196. Elle passe alors de 281.9 kWh à 643.4 kWh (SAUL, 2002, p. 506-507).

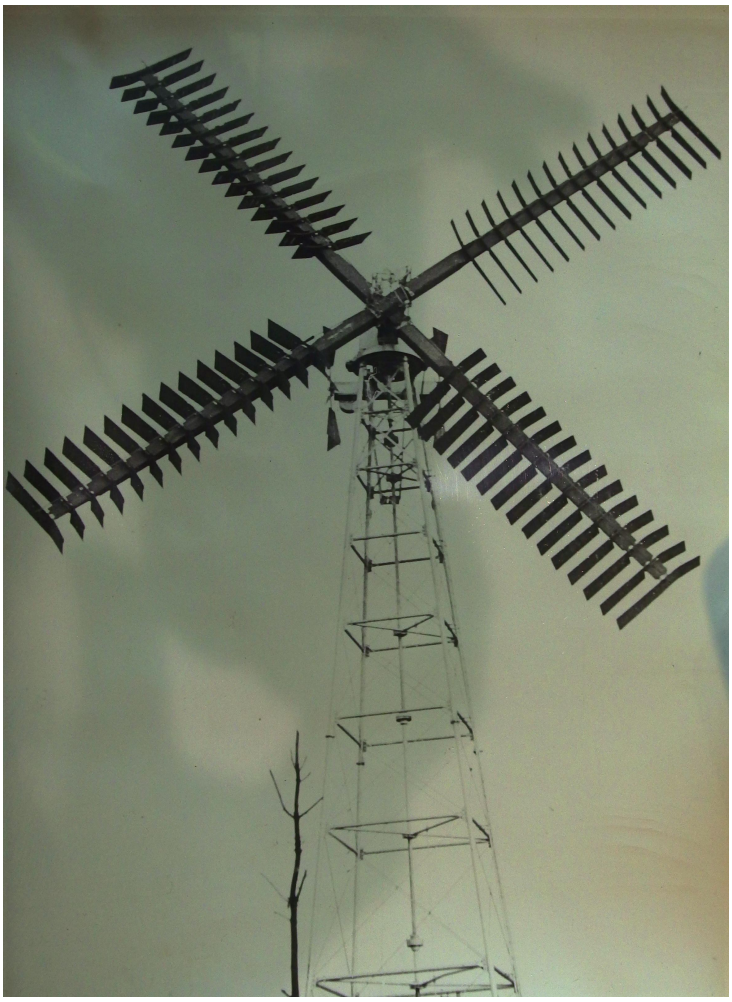


FIGURE 9.18 – Éolienne Lykkegaard installée à Mogador par Énergie électrique du Maroc (1948) [194]

plexes hydro-éoliens » sur l'ensemble du territoire algérien. Le point de vue de Hilaire Duquennois, ingénieur au service des Études générales et recherches d'EGA chargé de ces recherches, est que « l'avenir [des aérogénérateurs] appartient aux groupes puissants », et qu'on « ne peut songer à installer une infinité de petits groupes » [197]. Duquennois choisit de focaliser ses études sur les éoliennes à dépression conçues par Andreau, et étudie « l'installation d'éoliennes Andreau de 100 kW situés en divers points d'Algérie » [198] — sujet à propos duquel il donne une conférence à la conférence mondiale de l'énergie, en 1954. Malgré l'avis d'EDF, qui, peu avant, a également expérimenté un prototype d'éolienne Andreau, et conclu à un rendement trop faible du procédé (voir 9.1.3.2), ce dernier trouve donc une destinée plus heureuse en dehors de la métropole. En 1951, outre l'intérêt d'EGA pour les éoliennes Andreau, douze prototypes tripales de 8 kW (8.50 m de dia-

197. AN 1991 0305/4, p.d., Duquennois, « Augmentation en énergie garantie par l'adjonction aux aménagements hydro-électriques régularisés de centrales éoliennes utilisant les vents des vallées » 01/08/1948

198. AN 1991 0305/4, p.d., Duquennois, « Note d'étude dans laquelle nous avons évalué la production d'une éolienne de 100 kW, du type à dépression, supposée installée en différents points d'Algérie », 12/05/1954.

mètre) sont « en cours de construction aux Ateliers et chantiers de France à Dunkerke » pour des « organismes officiels » des « Colonies et de l'étranger » [199]. EGA se procure un modèle plus important encore : il s'agit d'une éolienne de 24,4 m de diamètre, 30 m de haut et d'une puissance nominale de 100 kW. Ce modèle a initialement été construit pour le compte de la British electrical authority par la société britannique Enfield-Cables limited, pour être connecté sur le réseau anglais, mais les expériences ont été abandonnées en 1953 (Bonnefille, 1976a, p. 59-60) [200]. En 1957, une éolienne est en place pour essais au site Grand Vent, près d'Alger. EGA effectue des expériences en présence des

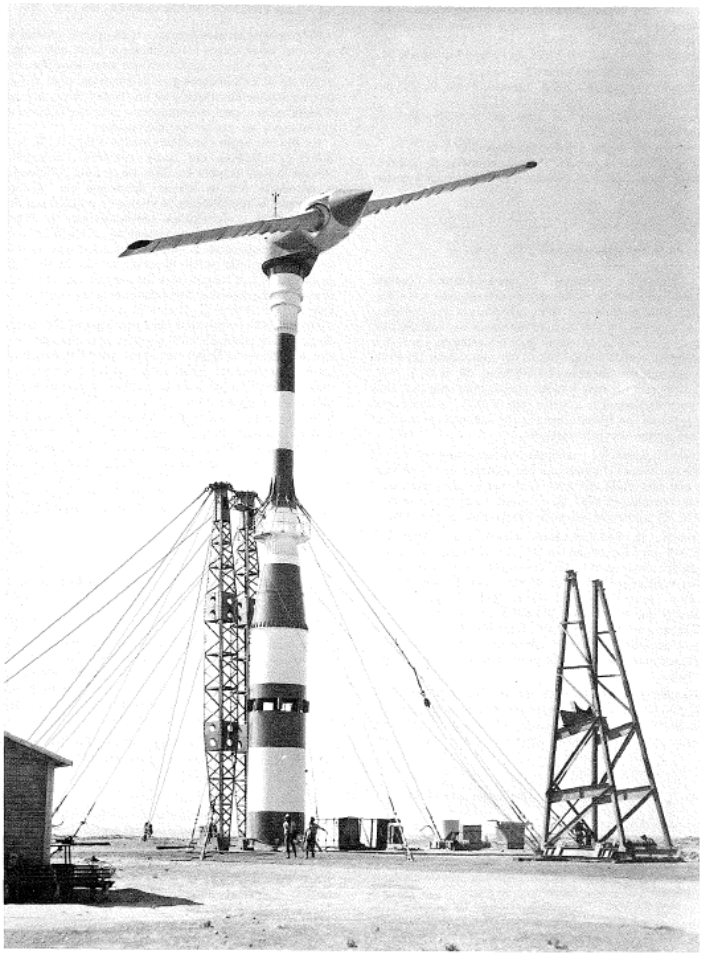


Figure 9.19 – Aérogénérateur Enfield-Andreau d'essais installé au site de Grand-Vent (1957) (Bonnefille, 1976a)

constructeurs anglais [201] : pendant ses 180 h de fonctionnement, l'éolienne débite entre 80 et 130 kW (Bonnefille, 1976a, p. 60). En 1958, l'ingénieur Durand conclut à l'intérêt

199.
AN 1991 0305/4, p.d., Lettre d'Andreau à Pétry, 11/07/1951.

200. Selon Bonnefille, 1976a, p. 59-60, ces expériences ont été arrêtées en raison de mauvaises conditions expérimentales, le site d'expérimentation (Prae-Wood, St-Albans) étant dans une zone boisée, perturbant le régime du vent.

201. AN 1991 0305/3, p.d., Lettre de Durand (ingénieur à EGA) à Pétry, 08/04/1958.

de ces essais, au bon fonctionnement de l'éolienne par rapport aux exigences d'EGA, et annonce la poursuite de ces études [202] . Néanmoins, celles-ci s'arrêtent « pour des raisons d'insécurité » (Bonnefille, 1976a, p. 60), c'est-à-dire en raison de la guerre d'Algérie.

### 9.2.3 Solaire, coopération et aide au développement. Applications domestiques, agricoles et industrielles

Le Laboratoire de l'énergie solaire, sous la direction de Trombe, après s'être focalisé sur des applications militaires et industrielles pour la métropole, a mené des recherches, à partir des années 1950, sur certains usages domestiques et agricoles de l'énergie solaire (cf 9.1.4). Ceux-ci peuvent trouver leur emploi dans les zones arides, et la présence de Trombe comme spécialiste de l'énergie solaire à l'UNESCO montre que ces recherches du CNRS s'inscrivent au sein d'une dynamique internationale apparue dans les années 1950, et liant les pays industrialisés aux pays dits « sous-développés ». En Algérie et au Sénégal, deux territoires sous domination coloniale française jusqu'au tournant des années 1960, le mouvement est inverse, et des recherches sont menées dès les années 1940 pour des applications domestiques, agricoles et industrielles à destination des régions chaudes et « sous-développées », avant de s'élargir à des sujets plus spécifiques comme les conversions photoélectrique et photovoltaïque.

Premièrement, cette sous-section présente les projets portés par l'Université d'Alger, d'abord sur la mise en place d'un four solaire, en collaboration avec EGA et le service des Mines d'Alger, puis sur des distillateurs solaires, en lien avec l'OECE, le service de la Colonisation et de l'hydraulique et les services techniques des deux autres territoires français d'Afrique du Nord. Ces acteurs voient dans le four solaire le moyen d'une mise en valeur agricole des Hauts plateaux algériens (production industrielle d'engrais) et dans le distillateur solaire un moyen d'alimenter les habitants de zones arides en eau potable. L'OECE apporte son aide pour se projet qui s'inscrit dans le cadre de la coopération internationale pour l'aide au développement. Elle relate ensuite, la création de l'Institut de l'énergie solaire d'Alger, transféré à Marseille à l'indépendance de l'Algérie, et ses recherches sur de multiples formes de convertisseurs, dans le cadre de recherches internationales. Enfin, elle expose la mise au point par l'Institut de physique météorologique de Dakar de pompes solaires et la création de la société Sofretes qui commercialise ces machines dans les pays du Sud après les décolonisations et malgré la concurrence du pétrole.

202. AN 1991 0305/3, p.d., Lettre de Durand (ingénieur à EGA) à Petry, 08/04/1958.

#### 9.2.3.1 Un four solaire industriel pour le développement agricole de l'Algérie : l'héliodyne de la Bouzaréah. EGA, Service des mines, Universités de Marseille et d'Alger (1946-1955)

En Algérie, le Gouvernement général est à l'initiative de la création d'une équipe de recherches sur l'énergie solaire dès l'issue de la guerre. Celle-ci rentre dans le cadre d'une nouvelle organisation visant à l'exploitation des ressources algériennes : le Conseil supérieur de la recherche appliquée (CSRSAA), est ainsi créé en 1946 [203] par arrêté gubernatorial. Le CRSAA est chargé, en lien avec le CNRS, de « coordonner les efforts dispersés tendant à la mise en valeur des ressources naturelles de [l'Algérie] », en fournissant « à l'Administration les avis techniques et les renseignements scientifiques qui serviront aux recherches relatives à la découverte et à l'exploitation des ressources naturelles en Algérie » (Documents algériens, 1947). Parmi les cinq grands thèmes abordés lors de la première réunion de ce Conseil figure l'énergie solaire [204]. Le CRSAA nomme alors une Commission de l'énergie solaire, dont l'objectif est « d'approfondir les voies menant à l'utilisation industrielle de l'énergie solaire afin d'alléger l'usage des énergies fossiles qui viennent à manquer » (Pehlivanian, 2014, p. 106-107).

La Commission de l'énergie solaire est présidée par Gaston Bétier, ingénieur général des Mines, et composée de représentants d'EGA (Frixon, directeur général de la production), du service des Mines d'Alger(Gaston Bétier, ingénieur général des Mines) et de l'Université d'Alger (André Guillemonat). La présence du directeur général d'EGA dans cette équipe laisse penser qu'un des buts de ces recherches était de développer la production d'électricité. La création de la Commission de l'énergie solaire fait probablement suite à la Conférence nord-africaine sur l'énergie électrique au cours de laquelle le gouvernement algérien avait émis le voeu d'encourager les recherches sur la production d'électricité solaire (voir 8.2.2). Ces recherches ambitionnent en effet l'augmentation des disponibilités énergétiques du territoire algérien, et la présence de Bétier dans la commission illustre la dimension de politique énergétique voulue par la création de cette institution.

Ces recherches se focalisent ensuite sur la mise au point d'un outil, le four solaire, dont l'application industrielle envisagée, et souhaitée à court terme, est le « développement agricole de l'Algérie » (Pehlivanian, 2014, p. 107). Plus particulièrement, la Commission vise l'installation de plusieurs centaines de fours solaires construits en série sur les Hauts-plateaux algériens pour la fabrication du nitrate de soude, une molécule entrant dans la composition d'engrais chimiques [205]. Guillemonat souligne la dépendance de l'Algérie

203. Et non en 1943, comme il l'est indiqué par Pehlivanian, (2014, p. 106).

204. Il y a, par ailleurs, les recherches minières (et, en premier lieu, les recherches charbonnières), les recherches aéronautiques, les recherches agricoles et les « recherches diverses », parmi lesquelles « l'étude du vent et de la houle comme source d'énergie »(Documents algériens, 1947). À propos de ces dernières, je n'ai pas connaissance de travaux qui ont eu lieu dans ce cadre.

205. Mais aussi de certaines armes. L'absence d'institutions militaires dans les acteurs du projet laisse

vis-à-vis des importations de ce produit (Guillemonat, 1954). Ainsi, le projet est à rapprocher de celui que portait la division des Hauts plateaux du service de la Colonisation et de l'hydraulique (voir 9.2.2.2), dont l'objectif était également la mise en valeur agricole des Hauts plateaux oranais, zone jugée improductive et sous-exploitée, quoiqu'à partir d'une autre énergie naturelle (le vent), et non pour la culture mais pour l'élevage.

Des travaux conjoints entre les Universités d'Alger(Jean Savornin) et de Marseille (Guillemonat), EGA (Bétier), les bureaux d'études de l'ingénieur-conseil Armand Harouimi et ETELEC (Maurice Touchais, ingénieur des Arts et métiers) [206] en tant que maîtres d'œuvre, et le service des Mines (Bétier) en tant qu'ordonnateur des dépenses, aboutissent à la construction, par les Établissements Sautter-Harlé d'un prototype de four solaire opérationnel en 1954. Baptisé « héliodyne », il est installé sur la colline de la Bouzaréah, à l'Observatoire d'Alger, dépendant de l'Université d'Alger. Il « est constitué d'un miroir parabolique de 8.4 m de diamètre qui lui procure une surface utile de 50 $m^2$ » (Pehlivanian, 2014, p. 109-111) et concentre une puissance de 50 kW par temps complètement clair (Le Génie civil, 1955a). Il est donc plus petit et moins puissant que le four de Mont-Louis Odeillo, d'un diamètre de 12 m et d'une puissance de 75 kW, ce qui n'empêche pas Perrot d'affirmer que ce miroir est, « en puissance utilisable au foyer, le plus puissant du monde » (Perrot, 1963, p. 68). Le sujet d'une compétition personnelle et institutionnelle entre, d'une part, Perrot et Trombe, et l'Université et le CNRS, a été esquissé par Pehlivanian, (2014).

En 1954, la guerre d'Algérie provoque le gel des financements destinés au programme d'essais de l'héliodyne, ainsi que sa production en série, qui « reste donc à l'état de prototype et voit son utilisation de plus en plus réduite au fil des ans, jusqu'à être complètement abandonné à la fin des années 1950 » (Pehlivanian, 2014, p. 113). Pourtant, d'autres recherches sont initiées dans plusieurs laboratoires algérois, toujours en lien avec le service des Mines.

À l'Université d'Alger, les travaux sur l'énergie solaire se diversifient à partir d'environ 1953, allant de la mise au point de distillateurs solaires, à celle de réfrigérateurs ou encore de cellules photo-électriques. Plusieurs laboratoires étudient alors toutes ces applications dans le monde. Pour la majorité d'entre elles, elles font partie des solutions prônées par le programme « zone aride de l'UNESCO » pour l'alimentation humaine et la mise en valeur agricole des terres. Une Association pour la recherche et l'utilisation de l'énergie solaire (ARESA), administrée par le service des Mines d'Algeret dirigée par Bétier, est créée en 1956 et soutient la recherche sur l'énergie solaire par l'octroi de bourses d'études

penser que c'était la première application qu'ils recherchaient en premier lieu ; cependant, il n'est pas exclu que la seconde ait été envisagée comme une possibilité.

206. Y participent aussi les professeurs Wolfers et Crausse, dont je n'ai pas trouvé les institutions de rattachement (très certainement, les universités d'Algerou de Marseille).

(Pehlivanian, 2014, p. 117).

#### 9.2.3.2 Des distillateurs solaires pour l'eau potable dans le Sahara. OECE, service de la Colonisation et de l'hydraulique et Université d'Alger (1952-1962)

Outre sa participation aux travaux sur les fours solaires qui ont mené à l'installation de l'héliodyne de la Bouzaréah, l'équipe du laboratoire de Chimie appliquée de la faculté des Sciences, dirigée par le professeur Savornin, travaille à la mise au point de distillateurs solaires. Ces travaux s'inscrivent directement dans la dynamique de coopération internationale. En 1952, l'OECE crée un groupe de travail « dessalement des eaux saumâtres » (« n° 8 ») au sein du « sous-comité de la Coopération dans la recherche du Comité de la Productivité et de la recherche appliquée » (Terre et eaux, 1955). La distillation solaire figure en bon candidat parmi les solutions envisagées [207], aussi la délégation française, « tenant compte de l'intérêt présenté par le dessalement des eaux saumâtres pour l'Afrique du Nord et les contrées sahariennes, a demandé aux administrations intéressées de ces régions de prendre en charge l'organisation d'une réunion de travail et l'établissement d'un programme de recherches en coopération » (Terre et eaux, 1955). Le service de la Colonisation et de l'hydraulique d'Algérie organise une journée d'études en collaboration avec l'Université d'Alger, le service des Mines du Maroc et le service Hydraulique et des Aménagements ruraux en Tunisie. Cette Journée a lieu à Algerles 3, 4 et 5 mai 1955.

À l'issue de ces journées, les trois administrations coloniales d'Afrique du Nord concernées décident de mener en coopération un programme de recherches afin d'évaluer les possibilités d'utilisation des distillateurs solaires pour la production d'eau potable à destination des populations, d'arriver rapidement à des installations opérationnelles dans le Sahara français, et d'être en mesure de généraliser ces solutions à d'autres pays intéressés. Le service de la Colonisation et de l'hydraulique algérien se charge de la réalisation de ce programme, en collaboration étroite avec l'équipe universitaire de Savornin. Il est également en lien avec les deux autres services techniques, Tunisien et marocain, ainsi qu'avec des institutions étrangères travaillant la désalination des eaux saumâtres : la direction du *Saline water conversion program* porté par le Department of Interior américain, le groupe de travail « n°8 » de l'OECE, et l'Université de Bari (Italie) (Gomella, 1955). Entre 1953 et 1955, le Service mène de nombreuses expériences sur plusieurs appareils et dans différents lieux du Sahara algérien. Des essais préliminaires sont effectués à Alger, en 1953, probablement à la Bouzaréah [208] avec l'aide des chercheurs de l'Université d'Alger et de

207. Trois grands types de solutions sont étudiés : distillation, électrodialyse et échanges d'ions (Terre et eaux, 1955).

208. Selon Pehlivanian, (2014, p. 140), des prototypes sont construits à l'Observatoire de la Bouzaréah.

ceux qui ont mis en place l'héliodyne, puis vingt appareils sont mis en service dans le Sud algérien, en 1954 [209].

Les distillateurs sont du type « verrière », similaires aux châssis distillateurs installés en Tunisie et en Algérie dans l'entre-deux-guerres, et choisis pour les mêmes raisons de simplicité et de faible coût. L'ingénieur Cyril Gomella, qui a dirigé ces recherches, ne cite ces travaux que pour mémoire, et il dit s'être principalement basé sur les travaux de sa collègue américaine Maria Telkes [210]. Les expériences font varier, à nouveau, des paramètres comme les matériaux de construction (bois, béton-amiante, amiante moulé...), l'orientation des châssis, la surface d'insolation, la couleur de la cuve... Le service de la Colonisation et de l'hydraulique conclut de ces premières expériences que « le distillateur solaire répond particulièrement bien aux besoins actuels en eau des petites agglomérations sahariennes et des habitations isolées » (Gomella, 1955). Gomella en appelle alors à une « coopération technique internationale réelle en la matière », « pour éviter tout gaspillage de temps et d'argent » (Gomella, 1955). C'est pourquoi, de la même manière que le service de la Colonisation et de l'hydraulique avait cherché à attirer l'attention des techniciens et constructeurs d'aéromoteurs sur le problème du pompage éolien pour les Hauts plateaux oranais, Gomella publie un article dans *Terres et eaux* en montrant ses résultats.

Des travaux visant à l'amélioration du rendement des distillateurs sont ensuite poursuivis à l'Université d'Alger, dont il est rendu compte à plusieurs reprises dans les *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*. En 1962, Georges Lejeune présente le distillateur solaire résultant de ces travaux, et affirme que des travaux de dimensionnement de l'ensemble d'évapocondensation sont encore en cours pour la mise au point de cet appareil (Lejeune, 1962). Le service de la Colonisation et de l'hydraulique multiplie en outre les installations dans le Sahara. Ainsi, selon Behrman, (1958), cent cinquante distillateurs solaires sont exploités en 1958, et produisent plus de 1 000 L d'eau par jour.

#### 9.2.3.3 L'énergie solaire sous toutes ses formes. IUESA, Université d'Alger et COMPLES (1955-1970')

Au laboratoire de physique de l'Université d'Alger, des recherches sur l'énergie solaire sont initiées à partir de 1955, sous l'impulsion du professeur Marcel Perrot, ingénieur des Arts et métiers, et du professeur André Blanc-Lapierre. Travaillant tous deux sur la

209. Sont installés : à Birskra, quatre appareils ; à El-Arfiane, trois appareils ; à Touggourt, neuf appareils ; et à El-Oued, deux appareils (Gomella, 1955).

210. À ce sujet, on peut se demander s'il l'a déjà rencontrée physiquement, puisque, citant ses travaux, il parle du « chercheur »Maria Telkes ! Peut-être est-ce lié à la rareté, à l'époque, de l'emploi du mot « chercheuse » ; ou peut-être la prenait-il effectivement pour un homme, malgré son prénom, n'imaginant pas, derrière une citation bibliographique de chercheur, une femme.

thermoélectricité, ils étendent les recherches algéroises sur l'énergie solaire aux applications de ce phénomène. Ils font ainsi construire un petit four pour faire des expériences sur la thermoélectricité. Deux collègues, Santo Martuzzini, assistant de Perrot financé par l'ARESA pour préparer un Diplôme d'études supérieures sur les semi-conduct eurs appliqués aux cellules solaires, et Fridal Juston-Coumat, technicien du service des Mines, l'utilisent en outre pour tester la synthèse d'insecticides en 1957. La mise au point de chauffe-eau solaires et de cellules photovoltaïques est en outre à l'étude (Pehlivanian, 2014, p. 116-117).

Afin de rassembler ces recherches variées et portées par les laboratoires universitaires (chimie, physique) et le service des Mines d'Alger, la création d'un Institut de l'énergie solaire de l'Université d'Alger (IUESA) est décidée en 1958 et effective en 1959. Dirigé par Perrot, l'IUESA rassemble une vingtaine de chercheurs rattachés aux laboratoires mentionnés ci-dessus, ainsi qu'au laboratoire de sciences naturelles, qui doit travailler (ou travaille peut-être déjà) sur les algues microscopiques et la photobiologie végétale, dont des applications sont en particulier envisagées pour l'épuration de l'eau. La responsabilité de la station solaire de la Bouzaréah lui est confiée. Il doit en outre opérer en collaboration étroite avec l'ARESA, « considérée comme un service annexe de l'Institut ». Cette dernière présente une dimension davantage appliquée, et permet de bénéficier de relations avec le milieu industriel (Pehlivanian, 2014, p. 121). Outre sa vocation de recherche, l'IUESA présente un service enseignement qui est habilité à délivrer, à partir de 1961, un certificat d'études d'énergie solaire, le premier diplôme consacré à l'énergie solaire en France.

La création de l'IUESA bénéficie de crédits du CNRS, et probablement de financements de l'Organisation commune des régions sahariennes (OCRS) (Pehlivanian, 2014, p. 120). Cette institution est créée en 1957 par un accord entre l'Assemblée de l'Union française, l'Assemblée nationale et le Conseil de la république, alors qu'une prospection intensive depuis la fin de la guerre par le BRP vient de révéler des gisements de pétrole pressentis par des géologues depuis les années 1920. Aussi, si l'objectif officiel de cette institution est la « mise en valeur » du Sahara, dans « les domaines énergétique, minier, hydraulique, industriel et agricole » (Journal officiel de la République française, 1957), le véritable moteur de sa création est la mainmise de l'État et des entreprises françaises sur les ressources pétrolières sahariennes, alors que la guerre d'Algérie laisse entrevoir une indépendance inéluctable. L'OCRS, créée sous la tutelle d'un ministère du Sahara spécialement mis en place à cet effet, marque ainsi une coupure juridique entre le Sahara et certains territoires de l'Union française auxquels il était jusqu'alors rattaché (« Algérie, mais aussi la Mauritanie, le Niger, le Soudan [le Mali actuel] et le Tchad » (Malti, 2014)). Dans l'objectif d'une mise en valeur, pas uniquement pétrolière, du Sahara, elle a ainsi peut-être financé des travaux sur l'énergie solaire.

Effectivement en accord avec cette politique, l'IUESA porte rapidement un projet de nouvelle station solaire dans le Sahara, mais aussi, selon Touchais, de « complexes industriels » solaires (Touchais, 1984 ). Touchais et Perrot présentent en effet le Sahara comme « grande réserve française d'énergie solaire » (Pehlivanian, 2014, p. 130), faisant écho aux discours enjoués sur les réserves de pétrole sahariennes qui permettraient d'alimenter le marché français. Selon ces acteurs, les complexes solaires, installées en plein désert, combineraient plusieurs applications possibles de l'énergie solaire, exploitant de manière optimale toutes les échelles de températures disponibles avec les différents convertisseurs solaire. Des industries de transformation de matières premières pourraient s'y installer, et de l'électricité produite en très grandes quantités. Touchais préconise la fabrication d'hydrogène par électrolyse, qui régulariserait la production d'électricité et serait transporté par gazoducs dans les pays voisins. Le rêve d'une énergie illimitée, stockable, transportable, est ici magnifiquement exprimé.

Le dénouement de la guerre d'Algérie déstabilise la structure de l'IUESA. En 1962, Perrot est en effet contraint de quitter le territoire algérien devenu « dangereux » pour lui (Pehlivanian, 2014, p. 154). Si certains de ses collègues restent encore, au moins quelques temps, à l'IUESA [211], Perrot est affecté à l'Université d'Alger. L'IUESA perdure dans l'Algérie indépendante sous le nom d'Institut de l'énergie solaire [212]. À Marseille, Perrot tente de poursuivre ses recherches et de mettre en place une structure analogue à l'Institut qu'il avait jusqu'alors dirigé (Pehlivanian, 2014, p. 154-160 [213]). Il rejoint, dans sa nouvelle Université d'accueil, son collègue Guillemonat qui avait, avant que Perrot ne s'intéresse à l'énergie solaire, contribué à la mise en place de la station de la Bouzaréah (voir 9.2.3.1). Perrot « parvient [...] à reconstituer une équipe de chercheurs intéressés par l'emploi de l'énergie solaire à Marseille et dans les alentours » (Pehlivanian, 2014), et fait construire une station solaire expérimentale dans le centre de Marseille. Pour financer les contrats de ces collaborateurs [214] et mettre en place ces installations, Perrot obtient des financements de la DGRST [215], mais aussi des fonds qui avaient été alloués, pour l'IUESA, à l'ARESA. Celle-ci était rattachée au service des Mines d'Alger, qui dépendait du Gouvernement algérien ; il est possible qu'elle ait continué à exister sous la tutelle des nouvelles institutions créées dès le début de la Ve République pour succéder aux institutions coloniales (Gouvernement général d'Algérie, ministère de la France d'Outre-

211. C'est le cas de Jean Oualid et de Santo Martinuzzi. Ce dernier fait office de directeur de l'IUESA jusqu'en 1965, où il rejoint Perrot à Marseille (Pehlivanian, 2014, p. 133).

212. C'est ce qu'affirme le site internet du Centre de Développement des Energies Renouvelables algérien, issu de l'IUESA après plusieurs transformations (voir https ://www.cder.dz/spip.php ?rubrique34). Un travail historique sur les transformations de cet institut est encore à faire.

213. Perrot affirme avoir appris « par hasard » que quelqu'un l'avait remplacé à la direction de l'Institut en 1964, date jusqu'à laquelle il en est resté directeur officiel (Pehlivanian, 2014, p. 156).

214. Il s'entoure ainsi, outre de Guillemonat, de Georges Peri, Touchais, Jean Oualid, Santo Martuzzini (Pehlivanian, 2014, p. 155).

215. Qui lui sert à embaucher Peri et à financer la construction de la station solaire (Pehlivanian, 2014, p. 155-158).

mer), telles que secrétariat d'État aux affaires algériennes créé en 1960, et chargé de la politique de « coopération » de la France en Algérie définie par le nouveau Gouvernement (Chaib, 2016, Annick Lacroix, 2014), ou le ministère de la Coopération créé en 1959.

La dimension internationale des recherches sur l'énergie solaire, que ce soit celle de la coopération avec les pays du Sud, ou la collaboration avec les pays du Nord, est un moyen pour Perrot de garder une place et des moyens dans ce champ alors qu'il perd ses fonctions officielles, son équipe de recherche et ses moyens matériels en quittant l'Algérie. Le laboratoire tente au moins une fois d'obtenir les financements du ministère de la Coopération, pour un projet de « pompe solaire à pulsomètre » porté par un collaborateur, Jean-Louis De Virel [216]. Par ailleurs, la Coopération méditerranéenne pour l'énergie solaire (COMPLES) est créée en 1961 à l'initiative de Perrot [217] ainsi qu'à celle de Touchais, à la suite de la Conférence des Nations Unies sur les « nouvelles sources d'énergie : éolienne solaire et géothermique » tenue à à Rome en août de la même année (Pehlivanian, 2014, p. 130-132). Celle-ci avait pour objectif d'« [a]ider à porter remède à des situations énergétiques insuffisantes et précaires dans les pays insuffisamment développés » (Tiers Monde, 1962). Les objectifs de la COMPLES, qui réunit des chercheurs de plusieurs pays méditerranéens (France, Italie, Espagne, Grèce, Portugal), sont similaires, au moins au départ : il s'agit d'« aide aux pays en voie de développement » (Pehlivanian, 2014, p. 138). En témoignent les objets d'étude de ses cinq premières commissions : radiation solaire, chauffage de l'eau à basse température, distillation solaire à basse température, conversion thermodynamique et séchage agricole . Tous ces types de convertisseurs sont préconisés par les chercheurs et les acteurs des organismes de coopération comme solutions idoines pour le développement des pays « sous-développés ». Rapidement, cependant, d'autres thèmes y sont ajoutés : photochimie et conversion directe de l'énergie solaire en électricité, avec l'adhésion à la COMPLES de chercheurs comme Rodot. Les moyens d'action de la COMPLES se rapprochent de ceux de l'AFASE américaine dont elle forme une sorte de pendant méditerranéen : partage et synthèse des connaissances par le biais d'un bulletin collectif périodique, organisation de colloques annuels de chercheurs . Perrot en est secrétaire , et conserve ce statut après sa fuite d'Algérie.

Par ailleurs, Perrot tire parti de la dynamique internationale en faveur de l'énergie solaire par le biais d'une collaboration poussée avec un chercheur de l'Université de Gênes, Giovanni Francia (Pehlivanian, 2014, p. 157-160). Leur projet collectif de construction d'une chaudière solaire de 50 kW est subventionné par la DGRST, institution publique nationale pour la recherche scientifique et technique, et l'OTAN, institution publique

216. Archives EDF, 852758, p.d., Lettre de De Virel au ministre de la Coopération, 16/07/1963.

217. C'est du moins ce qu'il affirme lui-même ; on pourrait en douter dans la mesure où Perrot semble avoir déployé de grands efforts pour se faire reconnaître comme acteur central et « pionnier » de l'énergie solaire. Il dit, de la même manière, avoir été à l'initiative de la création de l'AFEDES (Pehlivanian, 2014, p. 161).

internationale à caractère militaire, qui apporte aussi son concours à la construction de la station solaire de Marseille, où doit être installée la chaudière. Ils ambitionnent la conversion thermodynamique, pour la production de force motrice et d'électricité, et la contribution de l'OTAN est vraisemblablement liée aux possibles applications militaires de l'énergie solaire, qu'avait déjà entrevues l'armée française en subventionnant le projet porté par Trombe au CNRS. La Société des eaux de la ville de Marseille apporte également son concours à cette installation, ainsi que Francia lui-même. La construction de la station solaire, munie de la chaudière, se fait en 1963-1965.

À la fin des années 1960, les recherches sur l'énergie solaire à l'Université d'Alger connaissent des difficultés et s'affaiblissent grandement, par manque de financements [218] ainsi qu'à cause d'une restructuration de l'Université dispersant le personnel CNRS dans d'autres laboratoires, privant ainsi la faculté de sesen laboratoire chercheurs sur l'énergie solaire (Pehlivanian, 2014, p. 165-166). Elles se poursuivent toutefois, avec moins de moyens et de manière plus confidentielle. Cet affaiblissement des soutiens institutionnels, nationaux et internationaux, pour la recherche universitaire sur l'énergie solaire, traduit une baisse de l'intérêt international pour ce champ de recherches . La création de l'AFEDES au même moment (voir 9.1.4) paraît montrer le contraire. Cependant, cette nouvelle institution, émanant d'une volonté de fédérer les recherches françaises afin d'obtenir une visibilité internationale, a essentiellement opéré par le biais de publications collectives, plus que par une aide aux recherches des différents laboratoires.

#### 9.2.3.4 Université de Dakar et aide au développement des régions arides. De l'énergie thermique des mers (1943-1958) aux pompes solaires (1957-1970')

À Dakar, les expériences sur l'énergie solaire ont été lancées pendant la guerre dans le cadre des recherches sur l'utilisation de l'énergie thermique des mers portées par l'Organisme d'études qui en était chargé (voir 8.2.1, 9.2.1). Le gouvernement général d'AOF est intéressé par la possibilité d'injecter de grandes puissances électriques dans le réseau tout en produisant de l'eau douce, et envisage la construction d'une usine maréthermique à Dakar. Des travaux sur le surchauffage de la source chaude par l'application d'un film d'huile transparent sur des surfaces grandes et de faible épaisseur (environ 30 cm)), proposé dans l'entre-deux-guerres par Barjot, doivent ainsi mener à une amélioration du rendement du cycle énergie thermique des mers (Masson, 1960, p. 115). Ils sont d'abord menés au Centre d'essais industriels du Gouvernement général d'AOF à Dakar, et des « essais systématiques en laboratoire » sont encore en cours en 1946 (Nizery, 1946).
Ils sont ensuite poursuivis sous la direction du professeur Henri Masson, doyen de la fa-

218. L'OTAN cesse ainsi ses financements en 1969 (Pehlivanian, 2014, p. 160).

culté des sciences de Dakar, au Laboratoire de physique météorologique. Ces expériences montrent que le procédé n'est pas applicable durablement à cause du mélange, au cours du temps, entre l'eau de la source chaude et l'huile insolatrice. En 1958, des expériences sont encore en cours, et le film d'huile est remplacé par des matières plastiques (Masson, 1960, p. 115). Cette voie de recherche est probablement abandonnée à cette période où la Société L'énergie des mers est dissolue, et où les recherches françaises sur l'énergie thermique des mers sont stoppées.

L'équipe de Masson, ouverte aux recherches sur l'énergie solaire et désireuse de s'inscrire dans la dynamique internationale autour de l'utilisation de cette source d'énergie pour les zones arides du globe, mène ensuite des expériences sur les distillateurs, chauffe-eau et pompes solaires, donc pour des applications (exceptée la distillation), mais aussi des puissances (petites [219]) et des types (simples : sans concentration) de convertisseurs et des usagers (les habitants des zones rurales de « pays en voie de développement ») différents. En effet, Masson considère ces seules applications comme techniquement, économiquement et socialement réalisables. Ainsi, pour lui, seule l'énergie solaire « sous la forme de chaleur pour le chauffage des aliments, d'une habitation, ou de l'eau nécessaire aux besoins domestiques, [...] celle utilisée pour la réfrigération, la distillation de l'eau ou la production de force motrice » ont « fourni de[s] données à l'économiste » en dehors des expériences de laboratoire, au contraire de la « conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique ou chimique » (Masson, 1960, p. 173). D'autre part, la « réalisation de vastes installations dans les grandes villes » se heurte au « grand obstacle » que constitue « son caractère intermittent et sa mise en réserve ». Une clientèle urbaine ne peut se satisfaire d'une fourniture d'énergie qui présenterait ces (mauvaises) qualités naturelles. La mise en place de dispositifs de régulation est quant à elle trop coûteuse, qu'il s'agisse de stocker de l'eau en hauteur, ce qui nécessite une configuration topographique favorable, ou de charger des batteries d'accumulateurs électriques, toujours trop chères pour de grandes puissances. En revanche, les zones rurales, où, d'une part, l'utilisation de sources classiques d'énergie est trop coûteuse, et où, d'autre part, les habitants sont moins exigeants sur la qualité de la fourniture d'énergie, sont des régions où existe le seul marché potentiel pour les convertisseurs solaires. Effectivement,

> « [d]ans les régions sous-développées, la main d'œuvre non spécialisée est bon marché. Un manœuvre acceptera volontiers de faire ce travail peu fatigant pour une somme modique, 400 francs par jour, par exemple. Dans une région industrialisée par contre, le même travail coûtera 10 fois plus. De même, sous les climats tropicaux, dans une localité dépourvue d'électricité, une maîtresse de maison trouvera avantageux d'avoir à sa disposition un frigidaire solaire, même si elle doit manœuvrer elle-même le réflecteur, tandis qu'ailleurs elle

219. De la centaine de watts à quelques kilowatts

trouvera ce travail fastidieux et achètera un frigidaire électrique (Masson, 1960, p. 173). »

C'est ainsi que, au plus tard en 1957, l'équipe du Laboratoire de physique météorologique entreprend des mesures sur des chauffe-eau solaires Radiasol. Ceux-ci sont fournis par la Société du même nom, issue de la Société Insol-Maroc, émanant elle-même de la société Insol créée dans l'entre-deux-guerres pour commercialiser des chauffe-eau solaires (voir 5.4, 8.2.2) (Masson, 1960, p. 120). En 1958, l'équipe effectue des expériences sur la cuisson des aliments à l'aide d'un miroir parabolique (Masson, 1960, p. 120), de même que, à peu près à la même période, sur un distillateur solaire (Masson, 1960, p. 117), et sur des dispositifs de pompage solaire. Elle teste pendant six mois une pompe « SOMOR », du nom de la firme italienne qui les fabrique (Masson, 1960, p. 160), puis une installation constituée entre autres d'insolateurs Radiasol, et fonctionnant en cycle indirect grâce à un fluide à faible température de vaporisation (Girardier, 1963). Par la suite, elle se focalise sur cette dernière application, notamment par le recrutement en doctorat, en 1960, de l'ingénieur Jean-Pierre Girardier. Girardier est chargé de mettre au point un appareil à même de résoudre le « problème » de « l'alimentation en eau des régions isolées des zones tropicales » , et plus particulièrement :

— « [l']alimentation en eau du cheptel nomade
— l'alimentation en eau potable des petites collectivités (centre agricole, etc...)
— l'irrigation au voisinage des fleuves africains ou du Moyen-Orient (faible hauteur-gros débit). » [220]

Ce sont précisément des applications pour lesquelles les moteurs thermiques ont « échoué » à rendre possible l'existence de stations de pompage dans le désert. En effet, ces moteurs « classiques » « nécessitent un entretien qui les rend irrémédiablement inutilisables en zone désertique où la main d'œuvre qualifiée n'existe pas ». De plus, « les difficultés d'approvisionnement périodique » de faibles quantités de carburant les rendent inimaginables. Aussi, « il n'existe pratiquement pas de petites stations de pompage de moins de 15 CV en zone désertique (9 seulement pour le Sénégal) » [221]. L'énergie solaire présente l'avantage d'être présente localement. L'équipe de Masson cherche donc à mettre au point des pompes solaires de cette puissance, qui puissent rapidement trouver une place sur le marché identifié.

L'Université d'Alger reçoit pour cela des subventions du ministère de la Coopération, mais aussi de la DGRST, par le biais du Comité de conversion des énergies où Reme-

220. Archives EDF, 852752, p.d., Jean-Pierre Girardier, Étude économique sur les possibilités de développement des moteurs solaires à collecteurs plans, Rapport présentée à la séance d'études de la Section énergie solaire de la Société française des thermiciens, 21/09/1966.

221. Archives EDF, 852752, p.d., Jean-Pierre Girardier, Étude économique sur les possibilités de développement des moteurs solaires à collecteurs plans, Rapport présentée à la séance d'études de la Section énergie solaire de la Société française des thermiciens, 21/09/1966.

nieras est l'interlocuteur de Masson en tant qu'expert de l'énergie solaire [222]. Les pompes testées ont toutes le même principe de fonctionnement : une série d'insolateurs plans fixes chauffant en cycle fermé de l'eau cède, via un échangeur, sa chaleur à un fluide caloporteur. La vapeur produite actionne une pompe à piston (système baptisé « ITTEC » par Girardier) ou une turbine (système baptisé « SECRA »), elle est ensuite condensée grâce à l'eau pompée. De toutes les manières envisagées par les ingénieurs pour produire de la force motrice, c'est alors la plus simple et la moins coûteuse : les procédés de conversion directe en électricité sont écartés d'emblée, et les procédés de concentration sont trop délicats et nécessitent une main d'œuvre spécialisée qui n'est pas disponible dans les régions d'application en vue. La pompe est conçue de manière, non seulement, à présenter un fonctionnement entièrement automatique, mais aussi à ne « nécessiter absolument aucun entretien » [223]. Ainsi, les futurs usagers sont pensés, comme dans le cas des éoliennes des Hauts plateaux oranais, comme des consommateurs qui exploitent passivement une machine livrée prête à l'emploi.

Girardier travaille dans un premier lieu avec le procédé de type SECRA. Le premier modèle de démonstration est composé de six insolateurs Radiasol d'1 $m^2$, d'une pompe de 50 W, et fonctionne avec du chlorure de méthyle ou du fréon comme fluide caloporteur (voir Figure 9.20). Mis en service en 1962, il fonctionne sans avarie : il pompe, les « belles journées », un débit de 10 L/min à une profondeur de 13.5 m [224] ». Souhaitant tester le procédé sur une plus large échelle, l'équipe dakaroise décide d'augmenter la surface d'insolation (elle passe à 300 $m^2$) et de remplacer la pompe à piston par une turbine couplée à un générateur électrique. La construction de cette pompe ITTEC débute en octobre 1964, et la mise en service est effectuée au printemps 1965 [227]. Le débit obtenu est de 40 $m^3$/h à une hauteur de 10 m, et la puissance de 3 kW [228]. Masson juge faible le rendement (0.4%), analogue à celui de SECRA. Selon Masson, certains « sceptiques »

222. Le projet de pompe solaire reçoit, au moins pour la période 1963-1964, 116 000 francs du FIDES et 120 000 francs de la DGRST. En outre, le ministère de la Coopération semble disposé, en 1966, à accorder une nouvelle subvention pour la poursuite des recherches.
Archives EDF, 852758, p.d., Henri Masson, projet de convention de recherches entre l'Université d'Alger et la DGRST, 25/03/1963 ; Compte-rendu de la séance d'étude de la Section énergie solaire de la Société française des thermiciens, 21/09/1966.

223. Archives EDF, 852752, p.d., Jean-Pierre Girardier, Étude économique sur les possibilités de développement des moteurs solaires à collecteurs plans, Rapport présentée à la séance d'études de la Section énergie solaire de la Société française des thermiciens, 21/09/1966.

224. Archives EDF, 852752, p.d., Henri Masson, La production de force motrice à partir de l'énergie solaire, Rapport présentée à la séance d'études de la Section énergie solaire de la Société française des thermiciens, 21/09/1966.

226. Archives EDF, 852752, p.d., Henri Masson, La production de force motrice à partir de l'énergie solaire, Rapport présentée à la séance d'études de la Section énergie solaire de la Société française des thermiciens, 21/09/1966.

227. Archives EDF, 852758, p.d., Henri Masson et Jean-Pierre Girardier, Rapport d'activité concernant la convention de recherches 63-FR-062 modifiée par l'avenant du 28 février 1964, 20/05/1965.

228. Archives EDF, 852752, p.d., Jean-Pierre Girardier, Étude économique sur les possibilités de développement des moteurs solaires à collecteurs plans, Rapport présentée à la séance d'études de la Section énergie solaire de la Société française des thermiciens, 21/09/1966.

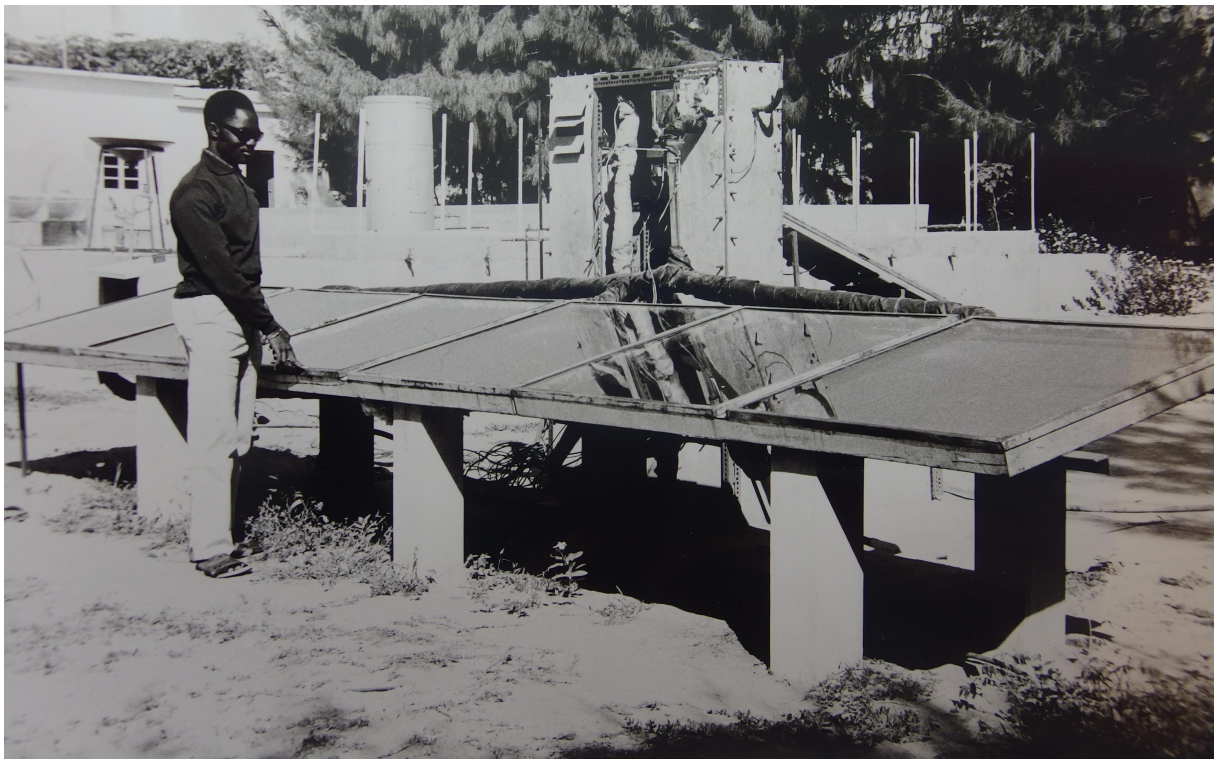


FIGURE 9.20 – Pompe solaire SECRA (premier plan) à l'Institut de physique météorologique de Dakar [226]

auraient souligné qu'« un âne ferait mieux ». Il montre cependant la faisabilité du procédé, et l'équipe dakaroise décide de poursuivre son études des pompes solaires, pour augmenter leur puissance et surtout leur rendement. Une nouvelle pompe SECRA, plus puissante (l'augmentation de la surface d'insolation est portée à 10 $m^2$, la puissance est de 80 W) est ainsi construite, et la pompe ITTEC est modifiée. La turbine est notamment remplacée par une pompe à piston ; sa puissance est élevée à 4 kW, sans changer la surface d'insolation.

Ces études techniques permettent à Masson et Girardier d'estimer que les pompes expérimentées pourraient être rentables par rapport aux moteurs thermiques si elles étaient produites en série [229]. Dès 1969, des pompes solaires de 1 kW du type SECRA sont commercialisées et installées dans d'anciennes colonies telles que le Niger (GIRARDIER, 1995) [230]. L'Université d'Alger dispose pour cela de soutiens publics (DGRST, ministère de la Coopération, mais aussi ANVAR et CEA ) et privés (Renault) [231], qui montrent le

229. ARCHIVES EDF, 852752, p.d., Jean-Pierre Girardier, Étude économique sur les possibilités de développement des moteurs solaires à collecteurs plans, Rapport présentée à la séance d'études de la Section énergie solaire de la Société française des thermiciens, 21/09/1966.

230. Il s'agit probablement de soutenir les recherches du Laboratoire de l'énergie solaire, fondé par Moumouni, et qui s'occupe de « rayonnement terrestre », les « chambres froides exploitées grâce à ce rayonnement », les « réfrigérateurs solaires » et les « dispositifs de séchage de diverses matières ». Dans ce cadre, le ministère de la Coopération français envoie un stagiaire au Niger en collaboration avec le CNRS et l'État du Niger (Archives EDF).

231. Le CEA met ainsi au point des revêtements sélectifs pour les collecteurs solaires de pompes, et Renault conçoit une machine de sertissage des tubes pour les échangeurs de chaleur (GIRARDIER, 1995).

lien étroit entre les visées d' « aide au développement » et celles de recherche d'une place dans un marché international prometteur.

Le premier choc pétrolier stimule la commercialisation dans les pays du Sud des pompes mises au point à l'Université d'Alger : en 1973, la Société française d'études thermiques et d'énergie solaire (Sofretes), société d'économie mixte dirigée par Girardier, est créée à cette fin. On a ici un rare exemple d'une continuité entre la période (1940-1970) et celle des chocs pétroliers dans les projets d'utilisation des énergies naturelles : la recherche d'un marché dans l'« aide au développement » des pays du Sud a suscité et maintenu l'intérêt pour les pompes solaires après les décolonisations et alors que la baisse internationale du prix du pétrole avait donné un coup de grâce à nombre d'autres projets.

### 9.2.4 Synthèse section 9.2

Dans l'Union française, le paysage d'acteurs est fragmenté, malgré des croisements ponctuels entre projets. La présentation adoptée pour cette période, par source d'énergie, ne fait pas apparaître de cohérence globale. Une présentation par type de convertisseur ou par territoire ne semble pas en révéler davantage. Plusieurs traits se dégagent cependant.

La tentative inaboutie d'une cartographie de la ressource éolienne par le ministère de la France d'Outre-mer montre, outre son ambition de mise en valeur rationnelle d'une ressource (avec une homogénéisation par les instruments, les unités de mesure) à l'échelle de l'empire, ses difficultés à organiser un tel projet de manière centralisée. Cela est dû à la variété des conditions (organisationnelles : personnel technique peu enclin à collaborer (phares) et manque de financements, climatiques (inadaptation des « Ailleret ») de chaque territoire. On peut y aussi voir la relative autonomie de l'administration de ces territoires, dont certains services techniques organisent parfois eux-mêmes leurs relevé (service de la Colonisation et de l'hydraulique, EGA et SMEHV) ou tiennent peu compte des résultats transmis par EDF (gouvernement général d'AOF).

D'une manière générale, l'administration coloniale interne à chacun des territoires est en effet plus présente que pendant la guerre, où le secrétariat d'État aux colonies avait pris beaucoup de place. Les gouvernements généraux (Algérie, Maroc, AOF, Tunisie) encouragent des projets éoliens, solaires, pour répondre à des visées économiques internes (mise en valeur agricole et industrielle, construction du réseau électrique) ou internationales (coopération pour l'aide au développement, positionnement des chercheurs français). À cette fin, ils financent des laboratoires universitaires (Université d'Alger), nouvel acteur de l'après-guerre, et des services techniques (service de la Colonisation et de l'hydraulique d'Algérie et d'AOF).

Le cadre international est primordial : la dynamique pour l'aide au développement amène de nouveaux acteurs (OECE, UNESCO, COMPLES, ARESA), potentiels financeurs, en tout cas fédérateurs des recherches. Le positionnement des chercheurs français (universités Alger/Marseille, Dakar), mais aussi des gouvernements généraux d'Algérie, de Tunisie et d'AOF, qui participent aux recherches sur des distillateurs et pompes solaires, ainsi que sur des pompes éoliennes, est clairement ancré dans la problématique de l'aide au développement. Selon les projets, le développement cache plus ou moins de visées économiques au profit de l'État colonial. L'exemple du service de la Colonisation et de l'hydrauliqu d'Algérie, financé par l'OECE pour des pompes éoliennes qui doivent en fait servir à augmenter la production algérienne d'ovins, ou du four solaire d'Alger, d'abord destiné à produire des engrais pour l'agriculture algérienne, le montrent bien. Par ailleurs, devant des difficultés à trouver des constructeurs français d'aéromoteurs des plus simples aux plus puissants, plusieurs acteurs se tournent vers des sociétés étrangères : Lykkegaard (Danemark) pour Énergie électrique du Maroc, la British electrical authority (Angleterre) pour EGA, Allgaier (Allemagne) et Aermotor (États-Unis) pour le service de la Colonisation et de l'hydraulique.

Plusieurs cas de convertisseurs éoliens montrent la nécessaire adaptation des machines aux conditions infrastructurelles et climatiques des territoires d'implantation. Les caractéristiques du vent (direction, puissance, composition de l'air : présence ou non de sel, de sable, d'eau...), particulièrement variables dans le temps et dans l'espace, rendent difficile la construction en série de convertisseurs implantables n'importe-où sur terre. Cela explique les difficultés rencontrées avec les enregistreurs Ailleret en Union française, l'éolienne Lykkegaard au Maroc, les éoliennes Henry en Algérie.

La société L'énergie des mers, seule permanence des projets de guerre coloniaux, se démarque des autres projets de l'Union française. Il s'en rapproche (et en est même emblématique) dans plusieurs enjeux qu'il poursuit : mise en valeur des colonies, marché et prestige internationaux. Mais, même dans la rhétorique, il diffère des autres car il ne se montre pas dans la dynamique de l'aide au développement. De plus, comme pendant la guerre, il est porté par l'ORSC (ministère de la France d'Outre-mer) et de grands industriels de l'énergie, de manière relativement indépendante des gouvernements de ces territoires (en l'occurrence, AOF). Il y est peu ancré : les centrales maréthermiques clé-en-main qui doivent s'exporter n'importe-où dans le monde pour apporter richesses et bien-être aux alentours, mais aussi surtout devises et gloire à la nation française.

En tout cas, les réalisations de l'Outre-mer sont plus nombreuses à sortir du banc d'essais. Les plus « simples », plus nombreuses Outre-mer, sont aussi celles qui trouvent la diffusion la plus large, et qui correspondent aux enjeux internationaux de l'aide au développement (cf 9.14). Certaines « zones arides » de l'Afrique se voient équipées de

distillateurs solaires, pompes solaires. Le four solaire d'Algerfonctionne plusieurs années mais reste un modèle unique. Les aérogénérateurs de moyenne et de grande puissance d'Énergie électrique du Maroc et EGA débitent quelques kilowatts sur le réseau mais ne trouvent pas de pérennité avec les décolonisations.

## 9.3 Synthèse Chapitre 9

Dans la continuité de la guerre, quatre sources d'énergies naturelles sont l'objet de projets de convertisseurs innovants dans les années (1940-1970) : énergies des marées, du vent, du soleil et maréthermique. Des recherches sur l'utilisation de la houle sont menées mais de manière beaucoup moins approfondie et par un nombre d'acteurs très restreint.

Deux grandes dynamiques de recherches sont identifiable en France : celles qui concernent la métropole et celles qui concernent l'Outre-mer puis les pays « sous-développés ». On y retrouve des différences dans la forme des convertisseurs mis au point, les acteurs impliqués et leur organisation.
En métropole, les institutions sont moins nombreuses et plus coordonnées qu'Outre-mer. EDF, avec ses partenaires industriels, se révèle un acteur central en ce qui concerne l'éolien et le marémoteur, confirmant le mouvement de monopolisation de ce marché amorcé pendant la guerre. Par le CTEV, EDF et le service des Phares et balises réalisent une cartographie de l'énergie éolienne, qui se retrouve, avec les marées, assimilées à la houille blanche comme ressource pour alimenter le réseau électrique. Ce réseau prend une place croissante dans le système énergétique et les éoliennes autonomes, électriques ou non, disparaissent des campagnes. Une tentative avortée de coordination des recherches sur les aéromoteurs de petites et moyennes puissance par l'Association pour l'utilisation de l'énergie éolienne d'abord en métropole, puis aux colonies, est un indice de la difficulté de composer avec la présence d'un acteur si puissant et d'un système technique à caractère monopolistique. Les constructeurs d'aéromoteurs cessent leur activité ou partent pour l'Outre-mer.
Dans l'empire puis l'ex-empire, les recherches sont plus dispersées avec des acteurs variés. L'administration centrale (ministère de la France d'Outre-mer et CTEV) tente d'organiser une campagne de mesures de l'énergie comme en métropole mais n'y parvient pas. L'ORSC monte un projet de distillateur éolien à Port-Étienne, mais le projet reste théorique. La société L'énergie des mers, qui dépend du ministère de la France d'Outre-mer, met au point les éléments d'une centrale maréthermique comme maître d'ouvrage d'un ensemble d'industriels, et opère ses choix avec une prise en considération limitée de l'administration locale. Aucune usine maréthermique ne voit le jour. Certaines entreprises en charge du secteur électrique d'un territoire (EGA et Énergie électrique du Maroc),

mènent des recherches sur l'énergie éolienne sur le même modèle qu'EDF : mesure de la ressource, essais sur des moyens et grands aérogénérateurs pour alimenter le réseau dans l'espoir d'une complémentarité saisonnière entre énergies éolienne et hydraulique. Les modèles d'éoliennes testés sont les mêmes qu'EDF, quoiqu'en moins grand nombre et de moindre puissance (Lykkegaard et Andreau). L'administration coloniale de certains territoires d'Afrique finance des recherches universitaires pour la mise au point de convertisseurs solaires (fours, distillateurs, pompes : Algeret Dakar) et, avec ses services techniques, finance la mise au point et l'installation de pompes éoliennes (Algérie). La dynamique internationale de coopération pour l'aide au développement joue un grand rôle : elle offre des financements pour certaines de ces opérations, et est une occasion pour les chercheurs français de se positionner dans cette dynamique.

Les grands constructeurs du (ou proches du) secteur de l'énergétique tentent de se positionner sur la majorité de ces marchés. Cependant, excepté Neyrpic, ils sont présents uniquement lorsqu'il est question de projets d'installations puissantes : centrales éoliennes, marémotrices ou fours solaires. Dans ce cas, ils se montrent moteurs de la dynamique d'innovation, étroitement associés aux acteurs publics (EDF, CNRS, ministère de l'Industrie, ministère de la France d'Outre-mer). On les retrouve moins dans les recherches sur l'énergie solaire, pour laquelle les laboratoires publics (universitaires, CNRS, ENS) ont été particulièrement moteurs.

Dans tous les cas, les inventeurs sont une figure presque absente : la place est aux ingénieurs-conseils, ingénieurs d'études et autres ingénieurs chefs de projet (Darrieus, Gibrat, Ailleret, Caquot, Vadot, Romani, Nizery, etc.) au sein d'entreprises privées, publiques ou les deux, ainsi qu'aux chercheurs universitaires (Trombe, Perrot, Aigrain, Savornin, Masson, etc.). Ce constat s'applique de manière flagrante aux énergies marémotrices et maréthermiques, moins à l'énergie éolienne. Les modèles de centrales marémotrices et maréthermiques se sont stabilisés dans l'imaginaire technicien des porteurs de projets (ingénieurs des grands corps de l'État et industriels du secteur de l'électricité). Des dispositions variées sont encore imaginées pour les aéromoteurs, par des inventeurs dont le nom est associé à leur machine : Andreau, Morel, Henry.

Deux grandes formes de convertisseurs sont à l'étude : les technologies les plus « modernes » : fortes puissances, avec production d'électricité, ou sophistication dans la conversion (photovoltaïque) pour les populations « évoluées » [232] ; les techniques simples, robustes et peu coûteuses pour les autres. Par conséquent, les projets concernant le territoire métropolitain ne font appel qu'aux convertisseurs de la première catégorie : il s'agit d'approvisionner le réseau électrique en augmentant la production (et la consommation) d'électricité, et/ou d'acquérir un prestige technologique international ; pour ceux

232. Pour les applications spatiales, on ne peut pas dire qu'il s'agit d'usagers métropolitains à proprement parler ; cependant, ce sont eux qui sont les bénéficiaires les plus directs de la conquête spatiale.

qui concernent l'Outre-mer, on trouve une variété des formes en fonction des territoires et des usages envisagés, de la production en grand d'électricité pour le réseau électrique au pompage de l'eau pour la mise en valeur agricole. Après les décolonisations, les recherches concernent essentiellement la seconde catégorie de convertisseurs.

Au final, pour ce qui est des réalisations, beaucoup de machines ont été construites, testées, opérationnelles ; mais très peu sont sorties du modèle unique et du banc d'essais (voir Figures 9.2 et 9.14).

D'un point de vue chronologique, deux grands phénomènes historiques sont déterminants pour l'ensemble des recherches : la pénurie d'énergie et son endiguement, décisifs pour les recherches à applications métropolitaines ; les décolonisations, qui entraînent le passage de la politique de mise en valeur à celle de l'aide au développement. Ainsi, les recherches sur les usines marémotrices et les aérogénérateurs en métropole, non compétitifs face au pétrole et au nucléaire, sont arrêtées dans les années 1960. Celles-ci étaient pourtant un objet de fierté d'acteurs puissants comme EDF ou le ministère de l'Industrie, qui mettaient un point d'honneur à souligner la position d'avant-garde technologique française en matière d'énergies marines. En outre, les décolonisations diminuent l'intérêt des acteurs français pour les énergies naturelles abondantes dans les anciennes colonies. Associées à la baisse mondiale du prix du pétrole, elles donnent un coup de grâce à la mise au point des usines maréthermiques et des aérogénérateurs en Côte d'Ivoire et au Sénégal, en Algérie et au Maroc. Elles provoquent en outre le déménagement de l'IUESA en métropole. En France, les recherches sur l'énergie solaire sont les seules à être poursuivies dans les années 1960, elles font même l'objet d'une tentative de coordination nationale avec la création de l'AFEDES, et internationale avec la création de la COMPLES. Celles-ci sont liées au fait que l'énergie solaire est l'objet d'importantes recherches à l'international, et que ces acteurs français souhaitent s'y positionner, qu'il s'agisse d'acquérir du prestige ou de s'assurer une place sur un marché où les anciennes colonies sont de nouvelles cibles, dans le cadre de l'« aide au développement ».

# Conclusion Partie 3

Sur la période (1940-1970), les énergies naturelles (marées, vent, énergie thermique des mers, soleil, houle, géothermie) dessinent un champ sémantique, social, politique et technique différent des forces naturelles de l'entre-deux-guerres. « Énergies naturelles » est une catégorie de sources d'énergie moins cohérente que « forces naturelles ». Leur aspect inépuisable, national, est moins souvent souligné par les protagonistes de nouveaux convertisseurs. Ce qui importe est qu'elles sont disponibles dans la nature et qu'elles peuvent augmenter le bilan énergétique, source de progrès et de développement.

**Acteurs - chronologie. Effacement des inventeurs. Apparition des chercheurs, chefs de projet, organisations internationales** Pendant la seconde guerre mondiale, le ministère de la Production industrielle, le secrétariat d'État aux colonies et le secrétariat d'État aux Communications intègrent les « énergies de remplacement » dans le programme de modernisation de l'appareil productif et d'intensification de la production. Le ministère de la Production industrielle souhaite ainsi alimenter réseau électrique avec les marées et le vent. Le secrétariat d'État aux colonies perçoit les centrales maréthermiques et solaires comme des outils de mise en valeur de matières premières. Ces acteurs du gouvernement de Vichy organisent ainsi des recherches afin de parvenir à la construction et à la mise en service rapide de nouveaux convertisseurs. L'administration des territoires coloniaux est alors peu impliquée, et l'organisation de ces recherches est très centralisée par l'administration métropolitaine, avec l'appui de l'ORSC et du CNRS. Après la guerre, mis à part les projets solaires, tous sont poursuivis, mais de nouveaux projets apparaissent avec d'autres paysages d'acteurs. En métropole et aux colonies, des universités et le CNRS s'inscrivent dans la dynamique internationale de l'énergie solaire. Aux colonies, de nouvelles dynamiques apparaissent dans les territoires d'Outre-mer indépendamment de l'administration centrale (ministère de la France d'Outre-mer). Tous ces acteurs entendent moderniser la France, mettre en valeur des ressources de l'Outre-mer, participer à la coopération internationale pour le développement, à la compétition industrielle pour un marché naissant ou le prestige des chercheurs français. La forme des convertisseurs étudiés, expérimentés et parfois exploités est variée en fonction de ces en-

jeux. Les territoires d'applications déterminent cette forme à plusieurs titres : d'un point de vue social, les populations visées, d'un point de vue économique, la présence de matières à extraire ou à transformer, d'un point de vue environnemental, la présence d'une énergie naturelle exploitable.

En fonction des sources d'énergie, des dynamiques d'acteurs différentes sont à l'œuvre (cf Figures 8.1, 9.1, 9.13). Pour les marées et l'énergie thermique des mers, d'importants moyens techniques et financiers sont déployés par un groupe d'acteurs composé d'ingénieurs experts de l'État et de grands industriels, grâce à une organisation centralisée. Ces acteurs prennent les décisions sur les projets à mettre en œuvre, et se chargent de les réaliser. La dynamique est différente pour le vent et le soleil où plusieurs configurations sont possibles.
En ce qui concerne le vent, le COEE puis EDF, mais aussi EGA et Énergie électrique du Maroc sollicitent des industriels de l'électrotechnique, des inventeurs et des spécialistes de l'aérodynamique pour expérimenter différents modèles d'aérogénérateurs (français et étrangers) destinés à alimenter le réseau des territoires dont ils ont la prérogative. Le service des Phares et balises coorganise ces recherches pour une utilisation particulière, l'alimentation électrique des phares éloignés du réseau. Le service de la Colonisation et de l'hydraulique algérien fait appel à des constructeur d'aéromoteurs français, allemand et américain pour installer des machines destinées au pompage de l'eau et à l'alimentation en électricité de zones arides et dépourvues de réseau, et obtient des financements de l'OECE. L'ORSC obtient des financements du FIDES pour une station de distillation éolienne de l'eau de mer à Port-Étienne et sollicite un industriel français pour construire l'aérogénérateur. Les constructeurs d'aéromoteurs ferment leur entreprise ou s'établissent dans les territoires d'Outre-mer.
Pour l'énergie solaire, le secrétariat d'État aux colonies de Vichy, avec l'ORSC et le CNRS, financent des inventeurs pour qu'ils expérimentent leurs convertisseurs. Après la guerre, des universités (Alger, Dakar) et le Laboratoire de l'énergie solaire du CNRS, conçoivent et expérimentent des convertisseurs solaires très variés : pompes, distillateurs, frigidaires, fours. Pour certains d'entre eux, les plus sophistiqués ou ceux que ces acteurs cherchent à construire en série, ils font appel à des industriels de différents domaines (matériaux, énergie, travaux publics...). Le CNES utilise les recherches du laboratoire de Chimie du solide de l'ENS pour mettre au point des photopiles pour l'espace. Aussi, la figure de l'inventeur s'estompe mais de manière nuancée en fonction des énergies naturelles : elle est désormais absente des projets marémoteurs et maréthermiques. De Rouville, ancien de la Commission de la houille bleue, présente ainsi le modèle de recherche de l'entre-eux-guerres comme un enfantillage car il donne trop de place aux inventeurs. En revanche, cette figure est encore présente, dans certains projets solaires pendant la guerre mais plus après (des conflits entre deux inventeurs et l'ORSC conduisent à l'abandon de deux

projets), et sur l'ensemble de la période pour des projets éoliens.

Le contexte international est très important, avec une compétition technologique et économique entre nations, la naissance d'institutions internationales et d'une dynamique de recherche pour la mise en œuvre de petits convertisseurs à destination des pays « en voie de développement ». La perspective de financements, le positionnement dans ces recherches internationales, la naissance d'un marché, stimulent l'implication des laboratoires publics, d'industriels de l'énergie et de responsables de l'administration de certains territoires coloniaux.

La majorité des projets est scandée par la guerre et la pénurie qu'elle induit, par les décolonisations, par la baisse internationale du coût du pétrole et le programme nucléaire. Cependant, certains projets sont moins influencés par ces éléments conjoncturels et montrent un « tuilage » possible dans les périodisations. C'est le cas des batteries photovoltaïques de l'espace, des aérogénérateurs B.E.S.T, qui se situent dans des secteurs économiques très particuliers (et de peu d'étendue), de plusieurs recherches et projets sur l'énergie solaire (pompes de l'Université d'Alger et de la Sofretes, four de Mont-Louis, quelques recherches à l'Université d'Alger et au Laboratoire de l'énergie solaire) en raison de la poursuite de la dynamique internationale sur l'énergie solaire dans laquelle les acteurs français veulent garder leur place ou se positionner, comme en témoigne la création de l'AFEDES.

**Convertisseurs et systèmes techniques. Inertie du système électrique** Le système électrique exerce une forte inertie sur les projets de convertisseurs d'énergies naturelles, mais de manière différenciée en fonction des sources d'énergie.

Le réseau électrique occupe un espace sans précédent dans l'administration, l'espace et l'imaginaire technicien. D'un point de vue technique, ramifié et alimenté par des centrales réparties sur le territoire métropolitain (et de certaines zones coloniales), il peut désormais absorber de grandes quantités d'énergie et résoudre, dans une certaine mesure, le problème de la variabilité. La logique d'une complémentarité géographique entre sources d'énergie peut désormais se combiner avec celle d'une complémentarité temporelle (journalière, hebdomadaire, saisonnière). Aussi le réseau est-il l'horizon de modernité de toutes les énergies naturelles : le convertisseur du futur est une centrale électrique. En métropole, les autres types de convertisseurs sont relégués à des espaces lointains, isolés du réseau : phares, îles, refuges de montagne, certaines zones des territoires d'Outre-mer, espace extraterrestre.

L'expérience et les connaissances des acteurs du système énergétique, ainsi que la nature de la source d'énergie, jouent beaucoup sur la forme des convertisseurs conçus. On

le voit avec les centrales marémotrices et avec les centrales maréthermiques, respectivement déjà assimilées aux centrales hydroélectriques et aux centrales thermiques par des industriels de l'énergétique et/ou par les ingénieurs de l'État dans l'entre-deux-guerres, en raison de la proximité entre marées et chutes d'eau, et de la relative facilité de convertir la chaleur des masses d'eau océaniques dans un cycle thermodynamique. Dans les projets, ces centrales ne changent pas de forme, en revanche elles montent en puissance : le banc d'essais des usines marémotrices n'est plus l'estuaire de l'Aber Wrac'h mais celui de la Rance, qui présente une puissance dix fois plus importante ; l'usine de l'avenir n'est plus celle de la Rance mais celle du Mont-Saint-Michel, dont les projets d'aménagement eux-mêmes augmentent au cours de la période. La Table 9.1 illustre l'augmentation en puissance des projets de centrales maréthermiques et marémotrices entre l'entre-deux-guerres et la période (1940-1970). Une installation particulièrement pérenne, l'usine marémotrice de la Rance, est inaugurée en 1966. Avant que les marées ne perdent de leur intérêt, elle doit servir comme banc d'essai d'une centrale gigantesque, celle du Mont-Saint-Michel, dont les énormes quantités d'énergie variable peuvent être absorbées par le réseau. Grâce à la possibilité d'une complémentarité temporelle, l'énergie éolienne est également apparentée à l'énergie hydraulique. Elle est mesurée en différents points de la métropole et de l'Union française, initiative qui mène à une cartographie de la ressource éolienne. Les convertisseurs éoliens sont assimilés aux centrales de houille blanche, et les acteurs du système électrique pensent les aérogénérateurs comme éléments du réseau interconnecté.

TABLE 9.1 – Puissance des centrales marémotrices et maréthermiques en projet sur les périodes (1919-1939) et (1940-1970)

| Période | Centrale maréthermique | Centrale marémotrice |
|---|---|---|
| (1919-1939) | Claude, Rio de Janeiro : 1.8 MW | STEPI, Aber Wrac'h (essai) : 1.2 MW ; Maire, Rance : [10-30 MW] |
| (1940-1970) | L'énergie des mers, Abidjan | EDF, Rance : 10 MW ; SEUM, Mont-Saint-Michel (1942) : 3 GW ; EDF, Mont-Saint-Michel (1956) : 10 GW |

Cependant, ces acteurs trouvent plus de difficultés à intégrer le vent au système électrique. Une expérience existe déjà : l'énergie éolienne est utilisée depuis des décennies dans différents types d'aéromoteurs, et des inventeurs et ingénieurs ont cherché à le convertir dans des aérogénérateurs lors des décennies précédentes. Mais l'énergie éolienne est très différente des marées et de l'énergie thermique des mers : elle ne se présente pas sous forme hydraulique et est plus difficile à accumuler et à stocker que les marées ; elle se présente sous forme mécanique et non de chaleur ; elle est très variable (puissance, direction) localement mais aussi géographiquement (composition de l'air, chaleur), et imprévisible. Le réseau électrique résout dans une certaine mesure le problème de la variabilité et dicte certaines dispositions d'un point de vue électrotechnique (régulation, répartition des aéro-

générateurs sur le territoire). Mais une très grande variété de possibilités existent encore pour la forme de la (ou des) roue(s), qui converti(ssen)t l'énergie mécanique du vent en énergie mécanique utilisable dans un convertisseur électrique. Les éoliennes Lykkegaard, Morel, Andreau
index[noms]Andreau, Jean-Edouard@Andreau, Jean-Édouard, Neyrpic, B.E.S.T, présentent ainsi des formes variées qu'EDF, EGA et EEM ont considérées comme potentiellement intéressantes, et expérimentées.

Le soleil est plus rarement pensé pour la production d'électricité. En Métropole, EDF juge cette ressource inutilisable pour le réseau métropolitain, et repousse cette possibilité à un avenir très lointain. Certains acteurs coloniaux envisagent tout de même cette possibilité et financent des projets : le secrétariat d'État aux colonies pendant la guerre, qui finance le projet Barbey, et EGA en Algérie, qui participe à la mise en place du four solaire d'Alger. Dans les deux cas, la forme imaginée est thermodynamique, similaire à une centrale thermique.

Les vagues sont mises de côté par le CTEV et EDF : ils considèrent définitivement les marées comme une meilleure forme d'énergie hydraulique. Énergie électrique du Maroc s'y intéresse par la SMEHV, mais ne fait pas grand chose à part quelques mesures de la source d'énergie et des expériences sur certains phénomènes potentiellement exploitables.

Les convertisseurs sous d'autres formes que les centrales électriques trouvent une place dans des espace où, soit ils constituent une réponse, par défaut ou pour un usage très spécifique, à un besoin identifié, soit ils créent de toutes pièces les conditions d'émergence d'une activité humaine (industrie, agriculture, habitat) sur le modèle des projets grandioses de l'entre-deux-guerres.
Les pompes solaires, éoliennes, les distillateurs solaires approvisionnent des populations peu exigeantes dans des lieux éloignés du réseau dans l'optique de « l'aide au développement ». Ils sont, comme les distillateurs de l'entre-deux-guerres, « simples et robustes ». Les distillateurs mis au point par l'Université d'Alger ont d'ailleurs la même forme que ceux dont l'ONRSI a encouragé la mise au point. Les éoliennes de pompage des Hauts plateaux oranais ne diffèrent de celles des campagnes françaises de l'entre-deux-guerres que par un dispositif d'huilage adaptant l'aéromoteur aux vents de sable. Les pompes solaires de l'Université d'Alger sont en revanche novatrices : des convertisseurs solaires thermodynamiques n'avaient pas été construits en série auparavant. Enfin, des aérogénérateurs de petites puissances peuvent approvisionner des populations blanches éloignées du réseau : îles (CTEV et éoliennes B.E.S.T), camp militaire dans le désert (service de la Colonisation et de l'hydraulique et éolienne SCAM).
Pour des usages très spécifiques, on trouve le four solaire du CNRS, qui est avant tout un outil de recherche, mais aussi les photopiles de l'espace et les aérogénérateurs du service

des Phares et balises.
Enfin, beaucoup plus rares que dans l'entre-deux-guerres, quelques projets ne répondent pas à un besoin et ne s'inscrivent pas dans un système énergétique préexistant : c'est le cas des « complexes solaires » que Touchais imagine implanter dans le Sahara grâce à des fours solaires similaires à l'héliodyne de la Bouzaréah, ou des « centrales hydro-solaires » que Vadot, à la suite de Gandillon, décrit dans *La houille blanche* en 1954. C'est, en moindre mesure, le cas des centrales maréthermiques comme celle d'Abidjan, qui, quoique s'inscrivant dans un territoire précis, ne répondent pas à un besoin exprimé localement. Ces projets, utopiques par leur manque d'ancrage dans un territoire, peinent à sortir de la théorie.

**Réalisations** Au final, sur les nombreuses expériences menées sur la période (1940-1970), quelques convertisseurs ont été construits de bout en bout et ont trouvé l'usage final escompté, et ceux qui ont connu une diffusion au delà du modèle unique sont beaucoup plus rares (voir9.2, 9.14).

Ceux-ci font partie des techniques les plus « simples », et sont en usage par des populations « sous-développées » (pompes solaires et éoliennes, distillateurs solaires), ou sont plus « modernes » mais concernent des usages très spécifiques (alimentation des phares et des satellites). Les grands aérogénérateurs français, algériens et marocains, sont ainsi demeurés à l'état de modèles d'essais. Les fours solaires des Pyrénées orientales et d'Algersont restés des instruments de recherches. Aucune usine maréthermique n'a finalement été construite, même si tous les éléments ont été mis au point pour une réalisation. Les seules installations à avoir pris du service sont ainsi l'usine marémotrice de la Rance (EDF) qui a bien failli ne pas voir le jour (Naegel, 2014), les cellules photovoltaïques de l'espace (SAT), les aérogénérateurs pour les phares (B.E.S.T), quelques chauffe-eau (Insol, Radiasol) et distillateurs solaires (service de la Colonisation et de l'hydraulique d'Algérie), des pompes éoliennes (service de la Colonisation et de l'hydraulique d'Algérie et CAME) et solaires (Université d'Alger).

Ces convertisseurs sont en effet ceux qui s'inscrivent le moins dans le système électrique. Au contraire, les centrales électriques (marémotrices, éoliennes, maréthermiques) sont destinées à alimenter un réseau électrique avec d'autres convertisseurs dont ils sont certes complémentaires mais aussi concurrents. Ils sont comparés selon des critères économiques globaux, le coût du kilowattheure, ce qui les favorise lorsque les autres convertisseurs font défaut (pénurie, hausse internationale du coût du combustible), mais les rend particulièrement vulnérable lorsque les autres convertisseurs deviennent concurrentiels. Les centrales maréthermiques, moins inscrites dans le système électrique en ce qu'elles ne produisent pas que de l'électricité, ont aussi été largement impactées par les décolonisations.

L'aide internationale au développement, la conquête spatiale, le fonctionnement du service des Phares et balises, expliquent donc quelques continuités techniques (les convertisseurs sont encore en usage) et institutionnelles (de nombreux acteurs du solaires poursuivent leur activité : les universités de Marseille, de Dakar, Laboratoire de l'énergie solaire, l'AFEDES, la COMPLES, etc.) entre la fin des années 1960, où la majorité des projets d'exploitation des énergies naturelles sont abandonnés, et les années 1970. Au cours de celle-ci, un nouveau paysage d'acteurs se dessine, une couche supplémentaire d'enjeux s'ajoute et une mutation de l'imaginaire technicien de la modernité s'opère.

# Quatrième partie

# Les « énergies nouvelles » face à la « crise » économique et culturelle (1970-1990)

# Introduction

## « Crise énergétique » : chocs, contre-choc pétroliers

Au début des années 1970, le processus de modernisation a transformé la société française en « société de consommation » de biens et de services [233]. Il s'est appuyé sur une explosion de la consommation énergétique [234] (voir Figure 9.21). Juste avant le premier choc pétrolier, la logique poursuivie par les grandes institutions actrices de la politique énergétique (Commissariat au Plan, ministère de l'Industrie, EDF) est toujours celle d'une croissance de la consommation, considérée comme facteur essentiel de modernité. Un vaste programme électronucléaire se dessine dores et déjà pour alimenter le réseau électrique interconnecté qui maille l'ensemble du territoire métropolitain. Le « Plan de régression des houillères » est très largement entamé, de nouveaux grands aménagements hydrauliques économiquement rentables ne sont plus envisageables. L'utilisation de « nouvelles sources d'énergie » n'a aucune place à moyen terme pour les planificateurs : le rapport de la Commission de l'énergie du V^e^ Plan (1966-1970) stipule, à propos des énergies solaire et éolienne [235] qu'« il n'est pas possible de faire une hypothèse sur leurs chances de réussite et les conséquences probables dans un avenir prévisible » et « qu'en cas de succès, elles ne modifieraient que d'une façon marginale les chiffres d'ensemble qui sont avancés dans ce rapport pour les quinze ou vingt prochaines années » [236]. Le recours très large aux exportations de pétrole à faible coût assure la croissance énergétique de la nation en attendant le relais du nucléaire (Morsel, 1996d, p. 722-729). Pour ce qui concerne l'électricité, l'année 1970 est même décidée, à EDF, une forte accentuation de la politique de l'offre, soutenue par le ministère de l'Industrie : le niveau de consommation d'électricité des Français est toujours jugé trop faible par rapport à celui de leurs voisins (Dubois,

233. Selon Chessel, (2012, p. 23), « [l]a société de consommation de masse française trouve ses origines vers 1900 et prend son envol à la fin des années 1950, lorsque la période de reconstruction est terminée. Elle est marquée par une évolution générale. L'élargissement du nombre des consommateurs, qui commencent à être segmentés, va en effet de pair avec l'apparition de nouveaux produits, fabriqués en série, et de nouveaux services. »

234. Dubois, (1996) parle, pour ce qui concerne l'électricité, de « société de consommation électrique ».

235. Le paragraphe en question traite, plus largement, des techniques nouvelles, et, outre les énergies solaire et éolienne, sont évoqués la génération magnétohydrodynamique et les piles à combustible.

236. Commissariat général au Plan. Commission de l'énergie, 1966.

1996, p. 657) ! Une vaste campagne de promotion de l'électricité dans les ménages est ainsi menée, ce secteur, pourtant déjà largement pourvu en équipement électroménager, étant considéré comme le plus facilement susceptible d'accroître sa consommation [237]. Le slogan « tout nucléaire, tout électrique » est lancé le jour du 25e anniversaire d'EDF.

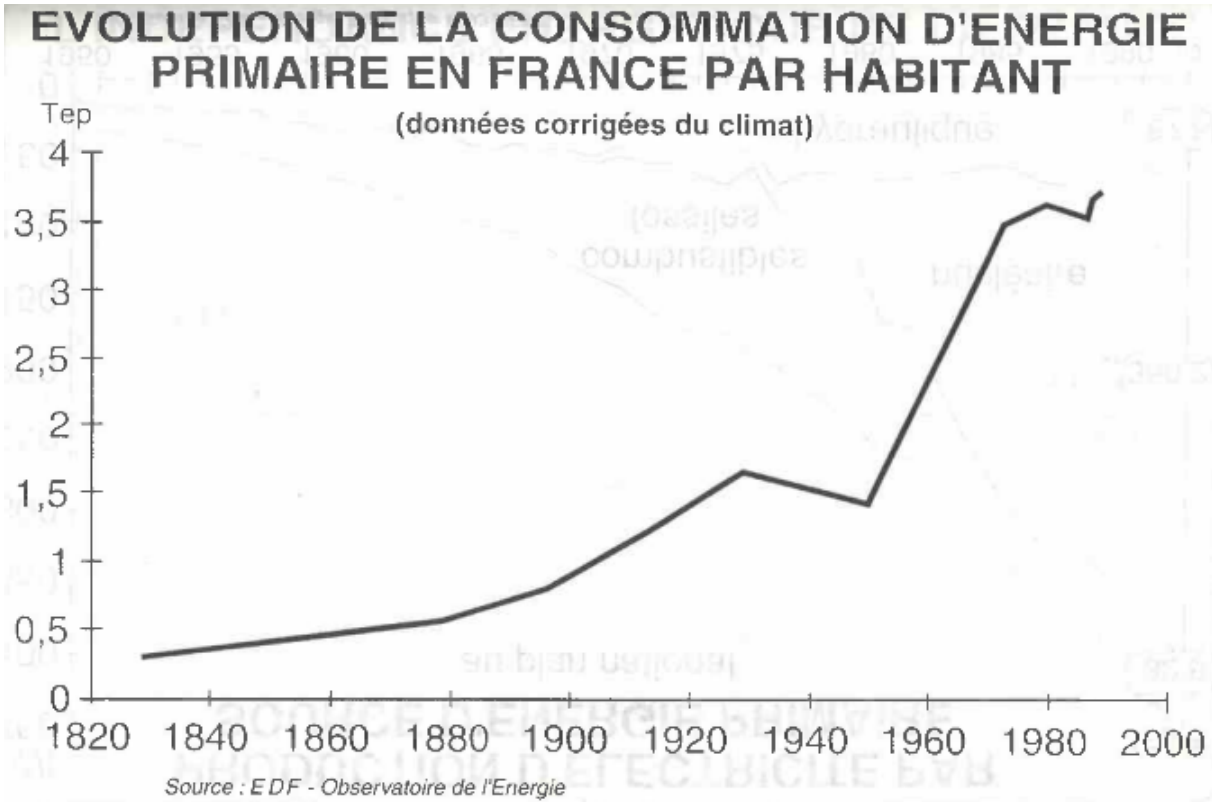



FIGURE 9.21 – Évolution de la consommation d'énergie primaire en France entre 1820 et 1996 (MORSEL, 1996d, p. 723)

En 1973, avant le premier choc pétrolier, trois quarts de l'énergie consommée en France proviennent de pétrole et de gaz importés (BELTRAN et P. CARRÉ, 2016, p. 289). Le premier choc pétrolier (fin 1973-début 1974) voit le prix du pétrole multiplié par quatre en l'espace de trois mois, et le second (1979-1981) par près de trois [238]. Le premier choc pétrolier est à l'origine d'un tournant dans la politique énergétique française. Deux « décisions majeures » sont prises : d'une part celle de l'accélération du programme nucléaire français, défini par le « plan Messmer » en 1974, d'autre part, la loi du 29 octobre 1974, relative aux économies d'énergie (BOUVIER, 2012a). On assiste ainsi au passage d'une politique très affirmée de l'offre, à une politique des « économies d'énergie », expression consensuelle

237. Le chauffage électrique est alors considéré par les responsables des programmes d'EDF comme un moyen d'écouler cette abondante production (DUBOIS, 1996, p. 657).

238. PERCEBOIS, (2009, p. 443) définit un choc pétrolier comme « une situation dans laquelle une économie fortement tributaire des importations de pétrole est soumise à une augmentation brutale, non anticipée et significative des prix du pétrole, sans qu'il lui soit possible, à courte terme du moins, de réagir autrement que par un prélèvement en termes réels sur sa richesse nationale, ou par un endettement croissant ».

propagée au fur et à mesure de la décennie et conciliant le point de vue d'acteurs parfois opposés (Rolant, 1985b). Une Agence des économies d'énergie (AEE), créée dès 1974 et placée sous la tutelle du ministère de l'Industrie, prend rapidement des mesures visant en particulier à baisser la consommation nationale de pétrole, et dont une des premières est d'interdire la publicité en faveur de la consommation d'énergie. C'est ainsi la fin du « tournant commercial » d'EDF, engagé dans les années 1960 et accéléré en 1970.

Dans les faits, Bouvier, (2012a) a cependant montré que la politique des économies d'énergie à EDF, répondant aux objectifs de l'AEE, s'est limitée à de la communication, mais que la stratégie industrielle, celle du « tournant nucléaire » est restée celle d'une croissance de la production que devait accompagner une croissance de la consommation individuelle. Elle aurait même plutôt mené à « économiser plus pour consommer plus ». C'est ainsi que « les effets des stratégies industrielles, et notamment les logiques de prix, l'ont largement emporté sur les dispositifs de communication » (Bouvier, 2012a, p. 37). Ainsi, malgré ces velléités de modération dans la croissance énergétique, celle-ci ne s'arrête pas, bien qu'elle connaisse un infléchissement. La consommation d'électricité des ménages est multipliée par 2.7 entre 1973 et 1984 (elle l'avait été par 5 entre 1950 et 1970) (Morsel, 1996b, p. 673), et elle est basée sur une intensification du taux d'équipement en électroménager ainsi que sur une diversification des usages, notamment avec celui du chauffage électrique. La proportion des ménages dans la consommation totale d'énergie en France est ainsi presque doublée [239]. Le programme nucléaire préparé avant les chocs pétroliers est mené à bien, et le slogan « tout nucléaire tout électrique » tû face à l'interdiction de publicité et à de multiples contestations (de concurrents, d'écologistes et d'une administration cherchant à mettre en œuvre des mesures d'économie d'énergie) trouve dans le silence une véritable concrétisation.

## Énergies renouvelables : nouveaux enjeux, nouveaux acteurs

Une nouvelle crise d'approvisionnement dans l'histoire énergétique de la France entraîne à nouveau une prise en considération et une institutionnalisation des énergies renouvelables aux niveau national. La première guerre mondiale avait inscrit la houille bleue dans la politique énergétique de l'entre-deux-guerres (celle du programme hydroélectrique), et la seconde avait provoqué la prise en considération des énergies marémotrice et éolienne dans l'équipement électrique de la France (programme hydraulique et recherche et développement à EDF). Avec les chocs pétroliers, c'est un ensemble de sources d'énergie, dites tantôt « nouvelles », « renouvelables » ou encore « douces », en fonction des

239. Elle passe de 18.86% en 1973 à 30.58% en 1984 (Bouvier, 2012a, p. 39).

enjeux qui y sont associés, qui se retrouvent incluses dans la politique énergétique nationale. L'expression « énergies nouvelles » sera ici utilisée car c'est celle qui a été la plus généralement usitée, non sans ambiguïtés .

Ce ne sont cependant pas les mêmes sources d'énergie, ni les mêmes types de convertisseurs, qui sont envisagés pour l'approvisionnement national par rapport aux périodes précédentes. Alors que, dans les années 1940-1960, l'attention des responsables de la politique énergétique métropolitaine était tournée vers la production de grandes puissances électriques par les énergies éolienne et marémotrice, celles-ci sont délaissées au profit des énergies solaire, géothermique, de la « biomasse » [240] et de la « mini-hydraulique » [241]. Les trois premières sources d'énergie permettent en effet d'obtenir de la chaleur à basse et moyenne températures, qui représentent un des usages les plus importants en France. En outre, la décision du Plan Messmer oriente la production électrique française vers l'énergie nucléaire, alimentant le réseau électrique interconnecté. Les responsables du secteur électrique, en particulier, EDF et la Direction générale de l'énergie et des matières premières (DGEMP), ne voient plus l'intérêt d'investir dans d'autres moyens d'alimenter le réseau électrique français, qu'ils soient nouveaux (grands aérogénérateurs) ou coûteux (centrales marémotrices). La mini-hydraulique est prise en considération pour la possibilité d'équiper de nombreuses chutes (les turbines existent et des chutes sont encore équipables), celle d'un marché à l'export, mais aussi pour leur aspect décentralisé qui répond aux attentes d'une partie contestataire de la population.

L'approvisionnement énergétique ne justifie en effet pas seul l'institutionnalisation des énergies nouvelles et leur place dans la politique énergétique. À cette liaison, récurrente sur la période 1880-1970, entre approvisionnement national et énergies nouvelles, se greffent de nouveaux enjeux. Ceux-ci découlent d'une remise en question de la société industrielle qui, si elle s'était déjà manifestée auparavant de manière cyclique (par exemple, au sortir des deux guerres mondiales), prend mondialement « une nouvelle ampleur dans les années 1960, en réponse à une industrialisation exceptionnelle » (Bonneuil et Pestre, 2015, p. 15). Ce mouvement de défiance et de revendications envers le progrès trouve dans les années 1970 une expression large dans les pays « développés », dont témoigne le rapport *Halte à la croissance* publié en 1972 par le Club de Rome. Il manifeste le souci des « limites de la croissance » et des dégâts du progrès, et connaît un retentissement international. Cette contestation regroupe un ensemble large d'acteurs, au sein duquel les scientifiques (« naturalistes défendant la nature, physiciens dissidents de la bombe, écologues alertant sur les atteintes à la biosphère », etc.) « jouent un rôle clé dans l'identi-

240. Matières organiques utilisables de diverses manières : bois et déchets agricoles et industriels pour la combustion ; produits agricoles transformables en gaz carburants par fermentation ; espèces végétales produisant des carburants.

241. Chutes d'eau de « petites » puissances (2 MW), produisant de l'électricité pour un usage souvent local.

fication des problèmes » (Bonneuil, Pessis et Topçu, 2015, p. 15). L'utilité sociale de la science est remise en question, ainsi que les pratiques techno-bureaucratiques qualifiées de « technocratie ». La planification est ainsi mise à mal [242]. Ainsi, « [l]e VI^e Plan (1971-1975) fondé sur un scénario de croissance et d'industrialisation, est interrompu » et « [l]e suivant (1976-1980) abandonne l'objectif primordial du taux de croissance-objectif pour y substituer des programmes d'action prioritaire en matière de chômage, de commerce extérieur » (Gueslin, 1997, p. 195). Pour répondre à ces critiques « se met en place une technicisation-rationalisation accrue des formes de la gestion publique » issue de techniques de gouvernement des administrations américaines qui proviennent elles-mêmes de modèles de *management* entreprenarial : les administrations adoptent des approches par programmes et projets (Pestre, 2014). La planification économique prend une nouvelle forme, celle de la « prospective », qui se substitue à la prévision : au lieu d'objectifs économiques extrapolés à partir des données du passé, plusieurs avenirs sont imaginés en fonction de différents paramètres et donnent naissance à des « scénarios » qui envisagent plusieurs futurs sur le long terme. Selon Andersson et Prat, (2015, p. 11), ce « "souci d'avenir" [...] n'est pas tant une réflexion sur les futurs possibles » du présent mais une tentative de maîtrise du changement social, exacerbée par la crise de mai 1968 ». La planification introduit « l'horizon du long terme dans le processus de décision publique », le long terme étant lui-même « un dispositif de production de sens autour de certaines promesses et menaces futures, qui seront ensuite mobilisées pour légitimer l'action étatique ainsi que des formes de rationalisation du social » (Andersson et Prat, 2015, p. 10-11). Les scénarios engendrés par les acteurs de la planification constituent ainsi des outils d'aide à la décision et de gouvernement du changement social .

Le système énergétique traditionnel se trouve également contesté comme élément intégrant de ce système industriel, et l'énergie nucléaire en cristallise tous les écueils (Topçu, 2013, Évrard, 2013). Globalement, les remises en question sont d'ordre politique : critique de la « technocratie », de la centralisation et des décisions prises par une poignée d'acteurs dans le secret ou au moins sans concertation ; culturelles : la croissance économique, et donc énergétique, n'est plus considérée comme facteur et indice de progrès et de modernité, et l'autonomie technique (et donc énergétique) individuelle est valorisée [243] ; technico-économiques : coût prohibitif du programme nucléaire, qui plus est incertain

242. Gueslin, (1997, p. 195) parle de « feu le Plan » : si dès le milieu des années 1960, l'avenir de la planification macro-économique globale était remis en question « dans une économie où, après une période de guerre et de reconstruction, les mécanismes de la concurrence et du marché ont retrouvé de leur vigueur », la crise économique des années 70 a pour effet de « [reléguer] l'outil à un rôle secondaire ».

243. La notion de « convivialité » des techniques d'Ivan Illich, penseur écologiste des années 1970, représente bien l'association entre l'autonomie technique et une société où chacun peut trouver un épanouissement personnel : « L'outil est convivial dans la mesure où chacun peut l'utiliser, sans difficulté, aussi souvent ou aussi rarement qu'il le désire, à des fins qu'il détermine lui-même. L'usage de chacun en fait n'empiète pas sur la liberté d'autrui d'en faire autant. Personne n'a besoin d'un diplôme pour s'en servir ; on peut le prendre ou non. Entre l'homme et le monde, il est conducteur de sens, traducteur d'intentionnalité » (Illich, 1973).

au long terme, et coût des combustibles importés ; socio-environnemental : risques du nucléaire, pollutions, limitation de la ressource. Les contestataires opposent à l'énergie nucléaire les énergies nouvelles, et tout particulièrement l'énergie solaire entendue dans un sens large, qui trouvent ainsi leur place au sein de revendications pour un changement politique et social. Elles sont, à l'inverse, valorisées pour leur caractère déconcentré (associé par conséquent à la décentralisation), la simplicité de leur utilisation (associée à l'autonomie, à la démocratie), qui implique l'utilisation de certains convertisseurs, et leur aspect environnemental (peu voire pas de pollutions ou de nuisances à l'exploitation). Des caractéristiques autrefois décriées (dispersion, petites puissances et simplicité des convertisseurs) deviennent ainsi des atouts des énergies nouvelles. Ces nouveaux acteurs se regroupent au sein de collectifs, d'associations, de syndicats. Au cours des années 1970, leurs revendications ont pour effet d'intégrer les énergies nouvelles dans diverses institutions publiques. Le gouvernement en crée de nouvelles, autant pour répondre à ces revendications que pour l'intérêt économique de ces sources d'énergie. Certaines institutions scientifiques y voient le moyen de répondre aux critiques de l'utilité sociale de la science, en axant davantage la recherche dans les problématiques économiques. Les recherches sur les énergies nouvelles, qui répondent à un besoin économique et à une demande sociale, rentrent dans le cadre de cette nouvelle politique de la recherche. C'est le cas du CNRS : Guthleben, 2009), de la DGRST (Bidault, 2006), du Centre national pour l'exploitation des océans (CNEXO).

Enfin, les énergies nouvelles rentrent à nouveau dans les stratégies de compétition internationale entre pays industrialisés. Cette compétition est exacerbée par l'intérêt mondial porté aux énergies nouvelles et par l'extension (réelle ou supposée) des marché qu'il engendre, que ce soit dans les pays « développés » ou dans les pays « en voie de développement ».

Ainsi, dans les deux décennies d'après-guerre, la compétition internationale se jouait principalement à trois niveaux : le premier était la contribution au bilan énergétique national, la consommation d'énergie par habitant constituant un indice de la puissance d'une nation ; cette contribution était quantitative et ne dépendait donc pas de la nature de la source d'énergie. Le second enjeu était celui de prestige technologique, qui s'attachait à la mise en œuvre de convertisseurs sophistiqués (taille importante, nouveau mode de conversion, recours à des technologies « de pointe »...). Enfin, un troisième niveau était, après les décolonisations, celui du positionnement au sein d'un marché international dans les pays « sous-développés ».

Dans les années 1970, la quantité d'énergie consommée par habitant n'est plus un critère positif pour comparer deux nations industrialisées entre elles ; en revanche, l'exploitation de sources d'énergie jugées plus écologiques, et les efforts nationaux faits dans ce sens, est un nouvel indice de modernité. Le marché international des convertisseurs

reste quant à lui une préoccupation des politiques de recherche en faveur des énergies nouvelles. Ainsi, le COMES fait toujours une distinction, dans ses programme, entre le territoire national et les DOM-TOM, pour des raisons physiques (celles-ci sont plus ensoleillées), socio-économiques (ces zones sont « défavorisées ») mais surtout commerciales : « les DOM-TOM permettent d'illustrer les possibilités des techniques françaises dans les pays voisins » (COMES, 1981, p. 45).

On distingue donc trois ensembles d'enjeux dans le développement des énergies nouvelles en France au cours des années 1970-1980 : enjeu énergétique (contribution au bilan national), enjeu économique (prise de part dans le marché international), soit deux enjeux déjà présents lors des périodes précédentes ; et, enjeu d'un nouveau type, associé à un nouveau type d'acteurs, l'enjeu politique (neutralisation d'opposants au programme énergétique).

Dans cette Partie IV, un premier chapitre (10) fait une synthèse des institutions spécifiquement dédiées aux énergies nouvelles créées dans les années 1970-1980, des actions qu'elles ont mises en œuvre et des enjeux économico-politiques qui y sont associés, à savoir, le « gouvernement de la critique » (Topçu, 2013), l'approvisionnement national et la compétition technico-économique internationale, où les pays du Sud restent un marché cible privilégié. À nouveau, à chacun de ces enjeux, correspond une forme de convertisseur. Il examine ensuite le positionnement des institutions dominantes de la politiques énergétique par rapport à ce mouvement (EDF, CEA, industriels de l'électrotechnique et des énergies fossiles). Elle se base en grande partie sur des travaux d'historiens (notamment, Topçu, (2013), Évrard, (2013), Pehlivanian, (2014)) sur les politiques des énergies nouvelles dans les années 1970-1980. Ces auteurs ont étudié certains des nouveaux acteurs des énergies nouvelles en France : groupes militants écologistes (Amis de la Terre, Groupe de Bellevue, Commission de l'énergie de la CFDT), nouvelles institutions spécifiquement dédiées à ces sources d'énergie, et thème plus large des « économies d'énergie » (Agence des économies d'énergie (AEE), Délégation aux énergies nouvelles, Commissariat à l'énergie solaire (COMES), Agence française de la maîtrise de l'énergie (AFME)). Elle donne des précisions sur certaines de ces institutions à partir de rapports et d'archives, écrites et orales. En particulier, les archives du Comité géothermie ont été consultées, car il n'a été qu'évoqué dans l'historiographie [244]. Un entretien avec Philippe Chartier, ancien membre du COMES et directeur scientifique de l'AFME sur toute la période de son existence, a permis d'obtenir des précisions sur l'action de ces institutions en faveur des énergies nouvelles, ainsi que sur leurs évolutions. Une synthèse socio-sémantique des discours de certains acteurs (planificateurs, militants écologistes, nouvelles agences d'objectifs) permet enfin de situer l'utilisation du terme, non neutre, d'« énergies nouvelles », ainsi que celle d'autres expressions couramment employées. Cette analyse sémantique complète celles qui

244. AN 1994 0148/1, p.d.

ont été effectuées pour les périodes précédentes dans chaque partie, même si elle ne se base pas sur les mêmes sources et qu'elle présente un caractère moins exhaustif. Comme *La Nature* et *Le Génie civil* ont cessé de paraître, cette analyse a été effectuée à partir de discours sélectionnés d'acteurs bien identifiés.

Un second chapitre (11) étudie un programme qui n'a pas été abordé par les historiens cités ci-dessus, car son objet ne rentrait pas dans les revendications des militants écologistes, ni dans les prérogatives des nouvelles institutions nationales dédiées aux énergies nouvelles. Il s'agit du programme de développement des énergies marines porté par le CNEXO, en dehors du COMES puis de l'AFME. Malgré cela, il entre dans le cadre de la politique française de développement des énergies nouvelles. Cette étude de cas est l'occasion d'examiner un programme de développement des énergies nouvelles, dont le but n'est pas l'approvisionnement énergétique de la France, mais un marché dans les pays du Sud. Elle permet d'identifier le traitement différent qu'ont eu les deux sources d'énergies marines que sont l'énergie thermique des mers et la houle, en termes d'acteurs impliqués, de moyens (techniques et financiers) mis en œuvre, de techniques d'exploitation imaginées, de débouchés (territoriaux, sociaux) envisagés. Cette étude de deux cas parallèles met ainsi en lumière l'influence du système technique au sens large (technologies disponibles, acteurs des projets avec leurs intérêts et leur imaginaire, infrastructures et populations des territoires), de la nature des énergies nouvelles et de leur répartition géographique, sur la forme des projets d'exploitation des énergies nouvelles. On verra ainsi comment certains industriels des secteurs classiques de l'énergie (en particulier, pétrolier et nucléaire) ont cherché à se positionner sur le marché de l'énergie thermique des mers pour la mise en place de centrales semblables aux centrales thermiques alors en usage, alors que des laboratoires de recherche spécialisés en techniques navales expérimentaient de multiples convertisseurs houlomoteurs. Cet exemple permet aussi de relativiser l'effet du contre-choc pétrolier sur l'échec des projets d'exploitation des énergies nouvelles, qui, au moins pour ce qui concerne les énergies marines, est tout autant dû à d'autres déboires, de nature non technique, dans la mise en place des projets. Cette dernière étude de cas de base sur les archives du CNEXO [245] ainsi que sur des entretiens menés avec deux acteurs de ce programme, Philippe Marchand, responsable du programme au siège social du CNEXO pendant toute sa durée, et Alain Clément, chercheur au Laboratoire d'hydrodynamique navale (LHN) de l'École nationale supérieure de marine (ENSM) de Nantes, qui y travaille sur l'énergie de la houle depuis la fin des années 1970.

On peut noter une rupture méthodologique pour cette Partie 4 par rapport aux Parties 1, 2 et 3 : utilisation plus importante des sources secondaires, car ces dernières sont plus fournies à propos des énergies renouvelables pour cette période que pour les décennies pré-

245. AN 2008 0658/56, p.d., AN 2008 0658/57, p.d., AN 2008 0658/58, p.d., AN 2008 0658/59, p.d., AN 2008 0658/60, p.d., AN 2008 0658/61, p.d., AN2000 0404/6, p.d.

cédentes ; utilisation moins importante des publications scientifiques et techniques, mais plus importante des archives, avec l'ajout d'archives orales, grâce à la possibilité d'interroger des acteurs de cette histoire. Cette rupture méthodologique liée aux types de sources consultées n'empêche pas une continuité dans les questionnements sur l'histoire des énergies renouvelables. Cette partie s'attelle à mettre en évidence, comme les autres, les institutions impliquées dans le développement des énergies renouvelables, les enjeux techno-politiques de leur action, les types de convertisseurs envisagés et l'imaginaire technicien mobilisé.

# Chapitre 10

# Institutionnalisation des énergies nouvelles

Au début des années 1970, les institutions impliquées dans le développement des énergies nouvelles sont celles qui étaient actives dans la période d'après-guerre et qui n'avaient pas abandonné leurs travaux. Ainsi du CEA, qui travaille encore avec l'université de Dakar et la Sofretes pour la mise au point et l'installation de pompes solaires dans les pays du Sud. De même, certains laboratoires du CNRS poursuivent une activité réduite sur l'énergie solaire (LES d'Odeillo et fours solaires, laboratoire de Marseille et PV...) tandis que des industriels commercialisent des cellules photoélectriques pour des applications spatiales. La société Aérowatt commercialise des aérogénérateurs dont le client principal est le service des Phares et balises. EDF a rangé dans ses placards ses travaux sur la production d'électricité par des centrales marémotrices, des grands aérogénérateurs et des centrales géothermiques. Ces années sont en effet le moment du tournant nucléaire, énergie que l'entreprise a choisie comme seul moyen de poursuivre la croissance électrique de la France.

Mais ce tournant amène un nouveau type d'acteurs, les militants anti-nucléaire, résultat d'un mouvement international de défiance envers la société industrielle. Les énergies nouvelles prennent alors une tournure politique : elles deviennent le moyen de construction d'une société alternative, utilisées avec un type particulier de convertisseurs (petites puissances et conversion directe). En réponse à cette critique, mais également au premier choc pétrolier, les gouvernements successifs créent de nouvelles institutions destinées à mettre au point et à implanter certains convertisseurs d'énergies nouvelles. À nouveau, des industriels des secteurs classiques de l'énergie (électricité, mais aussi pétrole) s'impliquent dans la mise au point de certaines technologies, car ils y voient un marché potentiel, notamment international. Certains y voient également une manière de compenser une image négative liée à leur engagement dans l'industrie nucléaire civile (EDF, CEA) et militaire

(CEA).

Ce chapitre propose une synthèse de ces enjeux et de ces acteurs. Il fait d'abord le bilan des nouvelles institutions créées pour le développement des énergies nouvelles. Ensuite, il explicite comment ces institutions ont œuvré pour répondre au trois enjeux décrits ci-dessus : d'abord, l'enjeu politique, qui mène à la création de ces institutions ; puis l'enjeu énergétique pour lequel sont mis en place des convertisseurs solaires, géothermiques et de biomasse « directs » sur le territoire métropolitain ; enfin, l'enjeu de compétition internationale (essentiellement, pays du Sud) dans lequel s'inscrivent les recherches sur de nombreux types de convertisseurs (centrales électrogènes : solaires, géothermiques, maréthermiques ; petits générateurs électriques : éoliennes, solaire thermodynamique et photovoltaïque, pompes : solaires, éoliennes, etc.). Enfin, une synthèse socio-sémantique des expressions utilisées et des sources d'énergie désignées pendant la période (1970-1990) permettra de compléter les analyses sémantiques effectuées dans les parties précédentes.

## 10.1 Les institutions dédiées aux énergies nouvelles

La période (1970-1990) se caractérise par la présence d'institutions spécifiquement créées pour mener une politique nationale des « énergies nouvelles », c'est-à-dire des énergies solaire, éolienne, micro-hydraulique, de la biomasse (ensemble regroupé dans la catégorie plus large « énergie solaire »), de la géothermie. L'énergie thermique des mers et l'énergie des vagues font également partie des énergies nouvelles mais ont fait l'objet d'un traitement à part au CNEXO, traité en 11. Cette section présente une synthèse chronologique de ces institutions, créées entre le premier choc pétrolier et les années 1980, des premières « actions concertées » de la DGRST (1974) à l'Agence française pour la maîtrise de l'énergie (1982-1991). Ces institutions restent globalement sous l'influence du ministère de l'Industrie, qui garde un pouvoir important dans toutes les décisions qui concernent la politique énergétique, mais elles dépendent aussi des acteurs nationaux de la recherche, CNRS et DGRST puis ministère de la Recherche. Leur action mobilise un panel très large d'acteurs publics et privés au sein d'une dynamique complexe. Elles se regroupent au fur et à mesure au sein d'entités qui traitent un panel de plus en plus large d'énergies nouvelles.

Le diagramme 10.1 fait une synthèse chronologique des nouvelles institutions, de leurs différentes affiliations et des actions qu'elles ont mises en œuvre. Il montre un ensemble complexe d'acteurs, où les nouveaux comités techniques et agences d'objectifs se sont petit-à-petit regroupés pour mener des actions coordonnées au niveau national.

Cette section présente ces institutions et leurs modes d'action de manière chronolo-

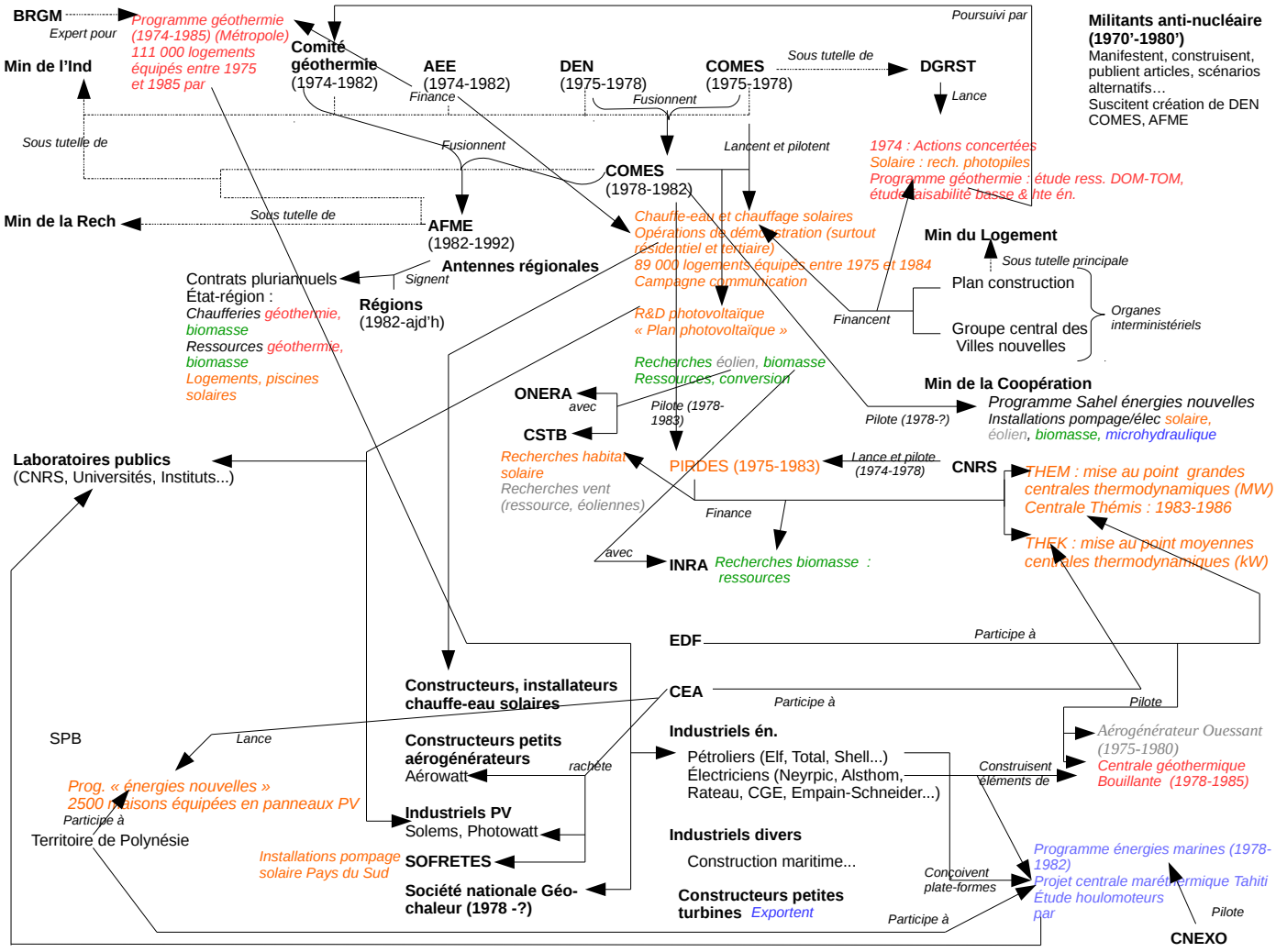



FIGURE 10.1 – Synthèse des institutions impliquées dans les énergies nouvelles (1970-1980)

gique, puis en fait une synthèse qui démêle la complexité du schéma 10.1. D'abord, elle présente les premières réponses gouvernementales au choc pétrolier, en 1974, par le biais d'« actions concertées » pour l'énergie solaire et la géothermie au sein de la DGRST. Elle relate ensuite la création, à la suite de ces actions concertées, de l'Agence des économies d'énergie (AEE) (1974-1981), du Comité géothermie (1974-1982), et de la Délégation aux énergies nouvelles (1974-1978) par le ministère de l'Industrie, ainsi que du Comité de l'énergie solaire (1975-1978) sous la tutelle du ministère de l'Industrie et de la DGRST. Puis elle relate le Programme interdisciplinaire de l'énergie solaire (PIRDES) mis en place et coordonné par le CNRS entre 1975 et 1978. La création, du Commissariat à l'énergie solaire (COMES) (1978-1981), sous la tutelle du ministère de l'Industrie et du ministère de la Recherche, est ensuite explicitée. Il reprend les missions du COMES et de la Délégation aux énergies nouvelles à leur suppression. Enfin, elle relate la création et l'action de l'AFME (1981-1991), issue de la fusion l'AEE, du COMES, du Comité géothermie et de la Mission nationale pour la valorisation de la chaleur.

### 10.1.1 Les « actions concertées » de la DGRST : solaire et géothermie (1974)

C'est par le biais de la DGRST que le gouvernement met en place les premières mesures en faveur de l'utilisation des énergies nouvelles, et ce en réponse aux chocs pétroliers. Elles concernent d'abord uniquement les énergies géothermique et solaire au moyen de deux « actions concertées ». Une « action concertée « recherches sur certaines sources d'énergie complémentaires » » est ainsi lancée en février 1974 et se décline en au moins deux autres : une « action concertée géothermie » [1] et une action « photopiles solaires » (Pehlivanian, 2014, p. 301). La première, dirigée par la direction de la Technologie, de l'Environnement industriel et des Mines (DITEIM), du ministère de l'Industrie et de la Recherche, charge un « Groupe géothermie » d'étudier les ressources en énergie géothermique disponibles en métropole et dans les DOM-TOM, ainsi que leurs possibilités d'applications domestiques (chauffage de l'eau, des locaux) et industrielles (opérations nécessitant de la chaleur, production d'électricité). Quant au groupe « photopiles solaires », il est chargé de « stimuler les applications terrestres des photopiles solaires » (Pehlivanian, 2014, p. 301) [2].

Le Groupe géothermie est composé de représentants d'administrations chargées de politique industrielle, d'urbanisme ou d'aménagement du territoire, à savoir la DITEIM, la Direction générale de l'énergie (DGE), le Plan construction, la préfecture de la Région parisienne et le Groupe central des villes nouvelles.

### 10.1.2 L'AEE : solaire et géothermie (ministère de l'Industrie, 1974-1981)

Quelques mois après ces premières actions concertées, suit, en septembre 1974 la création de l'Agence des économies d'énergie (AEE) au ministère de l'Industrie. Sur le modèle de la DGRST, l'AEE est une agence d'objectifs, sans laboratoires propres mais dotée d'un budget. Elle agit de deux manières : d'une part, une sensibilisation du public, et d'autre part, « le financement d'opérations de démonstration et d'expérimentations techniques, en collaboration avec l'ANVAR » (Chauvin-Michel, 2013, p. 29). La promotion des énergies nouvelles fait partie des quatre grands axes de l'Agence, les trois autres visant davantage à la maîtrise de la demande [3]. Les énergies nouvelles sont ainsi un objectif

1. AN 1994 0148/1, p.d., DGRST, Groupe géothermie, Appel d'offre de l' « action concertée « recherches sur certaines sources d'énergie complémentaires », 22/02/1974.

2. Je ne connais pas la composition de ce comité. Elle est probablement similaire à celle du Comité photopiles solaires intégré au premier COMES à sa création (cf suite du paragraphe).

3. Il s'agit, ainsi, outre l'objectif de « faciliter l'exploitation de nouvelles sources d'énergie », de « convaincre les agents économiques de l'intérêt d'économiser l'énergie pour eux-mêmes et pour la communauté nationale », de les « aider à réaliser ces opérations par des conseils, des soutiens financiers » ; de « diffuser, et développer, si nécessaire, des procédés performants d'utilisation de l'énergie » (Leray et

secondaire de l'AEE. Le premier directeur de l'AEE lui-même, le polytechnicien Jean Syrota, place, rétrospectivement, les énergies nouvelles en arrière plan de l'action de cette institution. Selon lui, les économies d'énergie « ont, à un prix égal, un bien plus fort potentiel que les énergies nouvelles », et sont donc à privilégier (Syrota, 2003, p. 40). Syrota considère en outre le programme nucléaire comme la principale réponse au problème de l'approvisionnement national. Cependant, l'AEE finance une partie significative des projets d'installations géothermiques menées dans le cadre du programme national pour l'utilisation de la géothermie, puis des installations solaires dans le bâtiment effectuées autour de la Délégation aux énergies nouvelles, avec l'aide du Plan construction. Selon Chauvin-Michel, (2013, p. 29), parmi les opérations de démonstration et d'expérimentations techniques soutenues par l'AEE, « la grande majorité s'appuie sur des systèmes de chauffage et chauffe-eau solaires ».

### 10.1.3 Le Comité géothermie (ministère de l'Industrie, 1974-1982)

Le Comité géothermie est créé peu de temps après l'AEE, en novembre 1974, afin de coordonner le programme géothermie mis en place par le ministère de l'Industrie par le biais du Groupe géothermie de la DGRST. Sous la tutelle du ministère de l'Industrie, ce Comité est composé de représentants de la DITEIM, du ministère de l'Équipement [4], du ministère de la Qualité de vie, de la Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale (DATAR), de l'AEE, de la DGRST, du Bureau d'études géologiques et minières (BRGM) et du Syndicat national de l'exploitation d'équipements thermiques et de génie climatique. Il « examin[e] les projets de géothermie qui lui sont soumis et [...] décid[e] des aides qui leur seront accordées » (BRGM et Délégation aux énergies nouvelles, 1978, p. 58). Contrairement à la DEN (et, plus tard, au COMES), le Comité géothermie dispose donc d'un budget du ministère de l'Industrie. Celui-ci sert à aider des projets d'exploitation de la chaleur géothermique, en particulier pour le chauffage centralisé de logements collectifs, mais également pour certaines opérations industrielles ou agricoles.

Le Comité géothermie poursuit les travaux engagés par le Groupe géothermie, en lien étroit avec le BRGM qui fait figure d'expert dans le programme géothermie national. Les projets mis en place concernent en particulier le chauffage centralisé de logements collectifs, mais également certaines opérations industrielles ou agricoles telles que la culture en serres ou la fabrication de bière [5]. Ces projets sont également financés par l'AEE et le ministère de l'Équipement par le biais du Plan construction [6]. Ils sont portés par de futurs

De la Roncière, 2003a, p. 17).

4. Direction de l'Aménagement foncier et direction de la Construction.

5. L'usine de la société Kronembourg s'équipe ainsi d'une installation géothermique.

6. La première de ces opérations est portée par l'Office intercommunal HLM de la région de Creil. Elle concerne une installation de chauffage centralisé pour 3 500 logements, dont 1 820 existants et 1 070

utilisateurs (privés : sociétés de chauffage ou publics : offices HLM, villes) et mis en œuvre par des groupements comportant en général une société pétrolière française (Elf, Total) et parfois étrangère (Shell, BP), une société de chauffage (Compagnie générale de chauffe ), le BRGM, et, à partir de 1978, la société nationale Géo-Chaleur. Cette « société nationale pour l'application de la géothermie », au capital de 1 million de francs, est fondée le 15 mars 1978. Elle est constituée de l'Union nationale des fédérations d'organismes HLM, de la Caisse de dépôts et des consignations [7], du BRGM, des Charbonnages de France et du Crédit foncier de France [8]. Sa vocation est de faciliter le montage et la réalisation de projets géothermiques, en particulier dans les logements HLM mais plus globalement dans l'ensemble du secteur résidentiel [9].

Jusqu'à la fin de la décennie, le Comité géothermie dispose d'un budget croissant [10]. Le budget accordé à la géothermie par le ministère de l'Industrie est ainsi plus important que celui accordé à l'énergie solaire, qui croît également, sur la même période [11].

### 10.1.4 La Délégation aux énergies nouvelles (ministère de l'Industrie, 1974-1978) et le Groupe interministériel des énergies nouvelles

La Délégation aux énergies nouvelles est créée par décret du ministre de l'Industrie et de la Recherche Michel d'Ornano le 9 avril 1975 au sein de la Délégation générale à l'énergie (DGE) du ministère de l'Industrie et de la Recherche. Dirigée par Jean-Claude Colli, inspecteur des Finances, elle réunit selon Liébard, (2015, p. 47), une « petite équipe de trois à quatre personnes ». La Délégation semble cependant être restée très attachée à la figure de son Délégué qui se voit parfois appeler « Monsieur énergies nouvelles » [12].

neufs. Elle obtient une subvention de 2.5 MF du Comité géothermie, pour un investissement total de 3 200 000 F.
AN 1994 0148/1, p.d., Comité géothermie, « Géothermie - Aide du Ministère à des réalisations - Note pour Monsieur le ministre », 07/02/1975.

7. Filiales « SCET » et « SCETECAL ».

8. Elle est présidée par Robert Lion, délégué général de l'union nationale des HLM, et dirigée par Xavier Lott, « ingénieur des Ponts et chaussées, précédemment secrétaire permanent du Plan construction ».

9. Elle propose ainsi d'« établir[] les programmes d'investissements, coordonner[] les études et assurer[] la conduite des opérations en tant que mandataire de maîtres d'ouvrage.
AN 1994 0148/1, p.d., Comité géothermie, Communiqué sur la création de Géo-Chaleur.

10. 7 MF en 1975, 16.5 MF en 1976, 20.5 MF en 1977, 37.5 MF en 1978 (BRGM et Délégation aux énergies nouvelles, 1978, p. 58), 40 millions de francs en 1980 .

11. Selon un article de la « Revue H » (revue d'information des Organismes HLM) présent dans les archives du Comité géothermie, les crédits du ministère de l'Industrie passent de 30.5 MF à 37.5 MF entre 1977 et 1978 pour la géothermie, alors qu'ils passent de 12 MF à 24 MF pour le solaire.
AN 1994 0148/1, p.d., Comité géothermie, « Extrait de la revue « H » », n°25, 12/1977.

12. Ainsi, dans un témoignage sur le poste de Délégué à la Qualité de vie qu'il occupe à la suppression de la Délégation aux énergies nouvelles, Colli lui-même utilise ce terme, disant que « Valéry Giscard

Sa mission est de « promouvoir l'utilisation des sources d'énergie non encore exploitées à l'échelle industrielle, notamment la géothermie, l'énergie solaire, les gaz de fermentation et l'énergie éolienne » [13]. Ne possédant pas de pouvoir décisionnel ni de budget propre, elle constitue une instance propositionnelle et consultative. Le délégué aux Énergies nouvelles « est consulté sur l'engagement de tout crédit et l'octroi de toute aide financière publics concernant les études des procédés et l'utilisation des énergies nouvelles », et « propose, sous couvert du Délégué général à l'énergie, toutes mesures réglementaires, administratives ou financières susceptibles de concourir au développement des énergies nouvelles en France et d'assurer la coopération sur le plan international » [14].

L'action de la Délégation aux énergies nouvelles a essentiellement concerné la diffusion et la promotion des énergies nouvelles via des apparitions télévisuelles de « Monsieur énergies nouvelles » [15] , et la publications d'articles, brochures et ouvrages. Ainsi, selon Liébard, (2015, p. 30), « [a]vec ses faibles moyens, elle développait juste une politique de soutien en faisant connaître les réalisations qui avaient lieu en France ». Ainsi, même si la géothermie fait partie des prérogatives officielles de la Délégation aux énergies nouvelles, le Comité géothermie reste en dehors de la Délégation aux énergies nouvelles et sous la tutelle directe de la DITEIM [16]. En octobre 1975, un Comité de l'énergie solaire, présidé par le Délégué, et sous tutelle de la DGRST et du ministère de l'Industrie complète l'action de la Délégation aux énergies nouvelles en faveur de l'énergie solaire (voir 10.1.7.1) et, à partir de ce moment, il est difficile de distinguer l'action de la Délégation aux énergies nouvelles de l'action de ce premier COMES. La Délégation aux énergies nouvelles semble cependant avoir joué un rôle dans la recherche de financements pour des projets d'exploitation de l'énergie solaire. Selon une brochure de la Délégation aux énergies nouvelles, elle obtient des crédits de l'AEE et du Plan construction pour plusieurs projets d'exploitation de l'énergie solaire, concernant notamment « le chauffage d'immeubles, de piscines, de serres, la production d'eaux chaude sanitaire pour différents bâtiments et équipements (aéroports, piscines, cantines...) » (Délégation aux énergies nouvelles, 1977, p. 9). La Délégation aux énergies nouvelles dispose de crédits croissants jusqu'à la fin de la décennie [17]. Elle encourage l'équipement des logements en chauffe-eau solaires en Métropole

d'Estaing a eu l'idée de nommer un « Monsieur Énergies nouvelles ». Selon lui, cette identification entre un poste et une institution est liée à l'essence même des « délégations », institutions très « giscardiennes » et dont le rôle est de « créer un état d'esprit favorable à une politique, et non à gérer quelque chose » (Comité d'histoire du ministère de l'Environnement, 2007).

13. *Journal officiel de la République française*, Décret n°75-231 du 9 avril 1975, instituant un délégué aux Énergies nouvelles »

14. *Journal officiel de la République française*, Décret n°75-231 du 9 avril 1975, instituant un délégué aux Énergies nouvelles »

15. Selon Pehlivanian, (2014, p. 308), Jean-Claude Colli est ainsi l'invité d'une émission d'Antenne 2 le 17 août 1977, où il annonce un vaste programme d'équipement des logements HLM en chauffe-eau solaires.

16. AN 1994 0148/1, p.d.

17. 3 millions de francs en 1975, 18 millions de francs en 1976, 20 à 25 millions en 1977 (Pehlivanian, 2014, p. 302).

grâce aux budgets de l'AEE et du Plan construction, et la construction de prototypes thermodynamiques et photovotaïques « au Sahel, en Polynésie et dans les départements d'Outre-mer » (Pehlivanian, 2014, p. 302).

Un Groupe interministériel des énergies nouvelles est constitué en 1975 pour compléter l'action de la Délégation aux énergies nouvelles. Présidé par cette dernière, le Groupe est constitué de représentants du ministère de l'Équipement, de l'Agriculture, de la Culture et de l'Environnement, de la Coopération et de l'AEE, et a « pour objectif d'optimiser les actions des divers départements dans le domaine de la démonstration ». Il « joue un rôle de conseil et de coordination auprès des administrations » et « propose toute mesure législative, réglementaire ou financière nécessaire à la réalisation de l'objectif visé : la promotion des énergies nouvelles, et notamment de l'énergie solaire » (Délégation aux énergies nouvelles, 1977, p. 8-9).

### 10.1.5 Le Comité de l'énergie solaire (DGE, min. de l'Industrie ; DGRST, min. de la Recherche) (1975-1978)

En octobre 1975, un Comité de l'énergie solaire (premier COMES) vient s'ajouter à l'AEE, au Comité géothermie et à la Délégation aux énergies nouvelles dans la liste des nouvelles institutions nationales en faveur des énergies nouvelles. Il est créé par décision du ministre de l'Industrie Michel d'Ornano auprès de la DGE (ministère de l'Industrie) et de la DGRST (ministère de la Recherche), et présidé par le Délégué aux énergies nouvelles. Il réunit une petite dizaine d'acteurs du monde académique et industriel « désignés personnellement en raison de leurs hautes compétences scientifiques, techniques et industrielles » sur l'énergie solaire (Délégation aux énergies nouvelles, 1977, p. 9) [18]. Pour cette raison, il est parfois affirmé que le COMES faisait partie de la Délégation aux énergies nouvelles (par exemple, Pehlivanian, 2014, p. 301). Mais ce n'est pas exact *stricto sensu*, puisque le Délégué aux énergies nouvelles n'en est que le président, et que si le COMES est, comme la Délégation aux énergies nouvelles, sous la tutelle de la DGE, il dépend également de la DGRST. On peut l'interpréter comme une volonté d'associer à l'aspect de politique énergétique (davantage focalisée sur des applications immédiates et à grande échelle) représenté par la DGE, celui de recherche scientifique et technique représenté par la DGRST. En témoigne la manière dont est présentée l'action publique

18. Selon Philippe Chartier, ingénieur et directeur de recherches à l'INRA intégré au COMES peu après sa création comme spécialiste de la biomasse, l'équipe du COMES ne réunissait alors pas plus de 8 personnes. Y étaient présents des acteurs qu'on retrouvera ensuite dans le futur Commissariat à l'énergie solaire : Robert Chabbal, physicien au CNRS, initiateur et directeur du PIRDES (voir 10.1.6) et directeur du CNRS de 1976 à 1979 ; et Henry Durand, directeur du Laboratoire d'électronique et de physique appliquée du groupe Philips qui travaillait alors avec le CNES sur les cellules photovoltaïques . Chartier, p.d., Entretien réalisé le 16 juin 2016 au bureau du Syndicat des énergies renouvelables (Paris).

française en faveur des énergies nouvelles dans une brochure de la Délégation aux énergies nouvelles en 1977 : le Comité géothermie, la Délégation aux énergies nouvelles et le Groupe interministériel des énergies nouvelles sont montrés comme des moyens de « promotion et de démonstration », alors que le COMES est présenté comme une institution au service de le « politique de recherche et développement » (Délégation aux énergies nouvelles, 1977, p. 8-9).

Comme la Délégation aux énergies nouvelles, le COMES constitue donc une instance de concertation auprès des responsables politiques, auxquels il dicte des « lignes d'actions à long terme », dans tous les domaines identifiés de l'énergie solaire. Le COMES absorbe ainsi le groupe « photopiles solaires » de la DGRST (Pehlivanian, 2014, p. 301), et ses thématiques sont par ailleurs élargies aux centrales thermodynamiques, à l'habitat solaire et à l'utilisation de la biomasse (Délégation aux énergies nouvelles, 1977, p. 9). Le PIRDES, programme de recherches lancé en 1975 au CNRS, traite ces thématiques et reçoit probablement des financements de la DGRST dans ce cadre (cf sous-section 10.1.6) [19].

En 1978, ce premier COMES est supprimé au profit du Commissariat à l'énergie solaire (cf sous-section 10.1.7.1).

### 10.1.6 Le PIRDES au CNRS : un programme « interdisciplinaire » pour les « énergies solaires » (1975-198[6])

Au moment des chocs pétroliers, le CNRS occupe une place particulière en France dans le domaine de l'énergie solaire, puisque plusieurs de ses équipes mènent depuis la fin des années 1940 des travaux sur ce sujet et ont mis au point des installations allant des maisons solaires au four solaire géant d'Odeillo, dont la construction vient tout juste de s'achever en 1970 (cf 9.1.4). Or, le Centre est alors le siège de changements dans ses moyens, sa structure et ses objectifs : la fin de la période gaullienne signe aussi un affaiblissement des crédits accordés au CNRS (Guthleben, 2009, p. 257). Il est aussi critiqué par des acteurs divers tels que des industriels qui « déplorent un gaspillage qui ne profite pas directement au développement de la compétitivité de leurs firmes », ou des acteurs de la mouvance écologiste qui dénonce « une science au service des intérêts des multinationales et peu soucieuse de l'environnement » (Guthleben, 2009, p. 281-282). Les dirigeants du Centre cherchent à lui donner une nouvelle impulsion pour ancrer davantage son action dans le monde économique et social auquel ses recherches apporteraient des « applications » utiles : le Centre doit devenir une « entreprise de recherche », répondant à une

19. Selon Guthleben, (2009, p. 308), le PIRDES « s'insère dans un premier temps dans l'objectif « Développement des applications de l'énergie solaire » de la DGRST », qui incombe au COMES.

« demande sociale » (Guthleben, 2009, p. 297-298). Des programmes à vocation interdisciplinaire, sollicitant de multiples laboratoires, sont mis en place, en lien plus étroits avec le Plan. Les Actions thématiques programmées (ATP) et les Programmes interdisciplinaires de recherche (PIR) font partie de ces dispositifs. Les ATP, mises en place au sein du CNRS au début des années 1970, financent par appel des laboratoires du CNRS de différentes disciplines, sur des sujets déterminés et découlant directement des objectifs du Plan (Guthleben, 2009, p. 288-293). Les PIR, programmes interdisciplinaires d'une plus grande ampleur que les ATP, prolongent leur action de mobilisation interdisciplinaire des laboratoires.

Le sujet des énergies nouvelles répond directement à la « crise énergétique » qui touche l'ensemble de la société française, et est une manière pour le CNRS de se positionner dans la politique énergétique voulue par le gouvernement, alors que l'énergie nucléaire est en quelque sorte « réservée » au CEA (Guthleben, 2009, p. 302). L'énergie solaire est un très bon candidat pour l'interdisciplinarité et la mise en cohésion de nombreux laboratoires : les recherches sur l'énergie solaire sont alors aussi variées que dispersées au sein des structures affiliées au Centre : à Odeillo, le LES poursuit ses recherches sur les fours solaires et la climatisation des maisons ; à Marseille, l'équipe désormais dirigée par Georges Peri et affiliée au Centre, traite le sujet des pompes et moteurs solaires ; à Meudon-Bellevue, l'équipe du laboratoire de Rodot travaille sur les photopiles ; à Grenoble, l'Institut économique et juridique de l'énergie (IEJE), un groupe de sociologues travaille sur l'« économie de l'énergie ». En dehors du Centre, des laboratoires se sont spécialisées sur diverses technologies : au CNES, les photopiles sont devenues une spécialité, ainsi que dans l'entreprise Philips ; le CEA s'est associé à l'Université de Dakar et plusieurs industriels pour des recherches sur les pompes solaires. L'AFEDES constituée en 1966, et dont la vocation était de coordonner les recherches sur l'énergie solaire au niveau national, semble avoir limité cette action au partage des connaissances entre ces laboratoires par le biais de colloques et de publications, sans qu'il y ait de véritable collaboration (cf 9.1.4). Le CNRS a donc une carte à jouer pour pousser la coordination nationale au-delà d'un partage de connaissances entre laboratoires. Enfin, selon Guthleben, (2009, p. 301-302), les chercheurs du CNRS sont globalement opposés à l'orientation nucléaire du programme du VI$^{e}$ Plan, certains faisant partie des signataires de l'« Appel des 400 », qui regroupe en 1975 quatre cent scientifiques français réclamant une forte modération du plan Messmer.

C'est pourquoi le CNRS établit le Programme interdisciplinaire sur l'énergie solaire (PIRDES). Il nomme à sa direction le physicien Michel Rodot, qui travaille au Laboratoire de Bellevue sur les photopiles depuis la décennie précédente. Le PIRDES mobilise, outre les laboratoires du CNRS, un ensemble large d'acteurs de l'énergie solaire en France et sur des applications diverses. En 1976, plusieurs ATP sont lancées dans le cadre du

PIRDES et concernent les thèmes suivants : l'habitat solaire, la conversion photovoltaïque, la bioconversion, la « socio-économie » ; en 1977-1978 y sont ajoutées une ATP sur les centrales thermodynamiques, les centrales à tour, la thermochimie, la climatologie, la socio-économie [20]. Selon les thèmes, le CNRS travaille, dans le cadre du PIRDES, en collaboration avec les institutions publiques suivantes : pour l'habitat solaire, avec le Plan construction et le CSTB ; pour les centrales à tour [21] avec EDF ; pour la conversion thermodynamique, avec le CEA ; pour la conversion photovoltaïque avec le CNES ; pour les biocombustibles, avec l'INRA [22].

Les crédits les plus importants concernent les conversions thermodynamique et photovoltaïque [23]. En effet, le projet « Thémis » d'une centrale thermodynamique productrice d'électricité mené en partenariat avec EDF, mobilise à partir de 1978 une part écrasante du budget du PIRDES, qui est doublé par ce projet. Les budgets consacrés au solaire photovoltaïque en France dans le cadre du PIRDES n'ont cessé d'augmenter jusqu'au moins 1979 [24].

Au vu du personnel travaillant sur l'énergie solaire dans les organismes publics selon un inventaire du COMES en 1981, le CNRS reste central sur l'ensemble du programme [25]. Selon Pehlivanian, (2014), « les principaux acteurs de ce programme sont le LES [26] dirigé par André Vialaron, qui comprend une quarantaine de chercheurs ; le département d'héliophysique de Marseille dirigé par Georges Peri, comprenant 16 personnes, ou le laboratoire d'énergie solaire de Valbonne dirigé par M. Schneider ». Cependant, avec la création du COMES en 1978, le CNRS perd de son importance dans le programme solaire français et, selon Ramunni et Deflandre, (2001), adopte désormais davantage une position de « sous-traitant de projets élaborés en dehors » (cf 10.1.7.1). Dès sa création, c'est en effet le COMES qui est chargé de coordonner la politique française en faveur des énergies renouvelables. Disposant d'un budget propre, il est à l'origine des trois quarts des crédits du

20.
« Présentation du PIRDES au conseil scientifique » en 1979 reproduit en Annexe viii de Pehlivanian, (2014).

21. Un type de centrale thermodynamique dont fait partie la centrale Themis (cf 10.2.3.1).

22. « Présentation du PIRDES au conseil scientifique » en 1979 reproduit en Annexe viii de Pehlivanian, (2014).

23. Respectivement 8 500 kF et 2 950 kF sur un budget de 19 000 kF en 1977 ; 25 300 kF et 4 500 kF sur un budget de 41 100 kF en 1978 (la somme de 20 000 F pour la centrale Thémis (cf 10.2.3.1) est mise entre parenthèses dans le tableau probablement par imprécision mais l'ordre de grandeur est très probablement bon).
« Présentation du PIRDES au conseil scientifique » en 1979 reproduit en Annexe viii de Pehlivanian, (2014).

24. « Présentation du PIRDES au conseil scientifique » en 1979 reproduit en Annexe viii de Pehlivanian, (2014)

25. Au CNRS et dans les universités : 246 « chercheurs équivalent temps plein » et 56 « ITA » (ingénieurs, techniciens et administratifs) ; au CEA : « 100 personnes environ » ; au CSTB : 25 personnes ; à l'INRA : 75 personnes ; au CEMAGREF : 25 chercheurs et 69 ITA (COMES, 1981, p. 18).

26. Devenu « d'Odeillo-Poitiers ».

PIRDES (Guthleben, 2009, p. 308), et reste dès lors le « principal bailleur de fonds » (Ramunni et Deflandre, 2001). Ainsi, « [l]a création du COMES conduit à l'abandon de la part du PIRDES des travaux concernant l'habitat solaire, des centrales à collecteurs de type « Thermo-hélio-kilowatt » (THEK), dont on pense proche le développement industriel. [...] Est aussi arrêtée l'ATP « bilan radiatif et thermique de l'atmosphère » » (Ramunni et Deflandre, 2001). Cependant, le PIRDES n'est pas abandonné et constitue même, en 1978, le second poste le plus important financé par le COMES [27]. Le CNRS porte en outre l'imposant programme Thermo-hélio-mégawatt (THEM), qui vise à la mise au point de grandes centrales thermodynamiques, dans le cadre duquel est mené le projet Themis, et qui représente la plus importante somme allouée pour un projet par le COMES [28].

Dans les années 1980, le PIRDES connaît des difficultés : son conseil scientifique constate en 1980 que le programme, « après cinq années d'existence, n'a pas encore débouché sur de grandes réalisations concrètes répondant aux objectifs qui lui avaient été assignés ». En 1983, la centrale Thémis, dont l'utilité et la nécessité de la construire a été mise en doute à plusieurs reprises, s'avère avoir coûté presque trois fois plus cher que ce qui avait été évalué. Le contre-choc pétrolier « met un coût d'arrêt à l'exploitation de la centrale dès 1986 » (Guthleben, 2011, p. 310-311). Comme en témoigne également le remplacement du COMES par l'AFME, les ambitions du Gouvernement en termes d'énergies renouvelables, et plus particulièrement d'énergie solaire, sont diluées dans les objectifs de maîtrise de l'énergie (cf 10.1.7). Ainsi, les lenteurs de mise en application technologique de la filière thermodynamique et une conjoncture économique défavorable, mettent un terme au PIRDES. Ce dernier est poursuivi comme « PIRSEM » : Programme interdisciplinaire de recherches sur les sciences pour l'énergie et les matières premières ». Le champ de la recherche sur l'énergie solaire y est réduit. N'y sont plus traités, parmi d'autres sujets [29], que le photovoltaïque, la thermique de l'habitat (en partie seulement solaire), la photosynthèse et la biomasse (Claverie, 2011) .

27. 14.2 millions de francs (Pehlivanian, 2014, p. 313).

28. Soit, 80 millions de francs sur la période 1978-1981 (Pehlivanian, 2014, p. 313).

29. Dont les énergies fossiles (nouvelles techniques d'extraction et de traitement), la géothermie, l'« utilisation rationnelle de l'énergie », l'« économie des matières premières », la « Socio-économie de l'énergie ».

## 10.1.7 Du COMES à l'AFME (1978-1992). Les énergies nouvelles consensuelles

### 10.1.7.1 Le COMES et les « énergies solaires » (ministère de l'Industrie, 1978-1981)

Le Commissariat à l'énergie solaire (deuxième COMES) est créé le 9 mars 1978 par décret du ministère de l'Industrie, du Commerce et de l'Artisanat. Il succède, au ministère chargé de l'Énergie, à la Délégation aux énergies nouvelles et à l'ancien COMES qui disparaissent, tout en disposant de possibilités d'action plus importantes. La création du COMES est liée aux enjeux politiques des élections législatives de 1978, pendant lesquelles le président Valéry Giscard d'Estaing et son gouvernement souhaitent faire preuve d'un volontarisme renouvelé envers une source d'énergie appréciée par l'électorat du parti rival (voir 10.2.1). Comme les institutions qui l'ont précédé, le COMES « a pour mission, en liaison avec les organismes et entreprises publiques et privées concernés, de développer la connaissance de l'énergie solaire et les études et recherches permettant son utilisation, et d'en promouvoir les applications » [30]. Mais il ne s'agit plus seulement d'un organisme consultatif : c'est un Établissement à caractère public et industriel, qui dispose d'une autonomie financière et d'un budget propre [31]. Il est désormais responsable de l'ensemble du programme de « recherche, de développement et d'applications » de l'énergie solaire français, dans sa conception et sa mise en œuvre. Lui sont ainsi transférés la responsabilité de plusieurs dispositifs mis en œuvre pour répondre à ce programme : ainsi de certaines parties du PIRDES (voir 10.1.6) ; du programme « Sahel énergies renouvelables » mis en place par le ministère de la Coopération (voir 10.2.3.2) , ou des projets d'habitat solaire que finançait l'AEE lorsqu'il ne concernent que l'énergie solaire (Pehlivanian, 2014, p. 307). Sur le modèle des agences, le COMES élabore, finance et veille à la mise en œuvre de programmes d'études, d'expérimentations et de diffusion de techniques d'exploitation de l'énergie solaire. Ses statuts lui permettent en outre de mener en propre des expérimentations [32], mais, dans les faits, son action s'est limitée à financer des projets techniques en tant que maître d'ouvrage, et à mener des études et des actions de communication. Pour accueillir le personnel de trente personnes qui lui est affecté, de nouveaux locaux lui sont

30. Décret n°78-268 du 9 mars 1978 instituant un Commissariat à l'énergie solaire (*Journal officiel de la république française* du 10 mars 1978).

31. Une présentation du budget du COMES compare ce budget en 1978 au budget des « départements ministériels et des établissements publics avant le transfert de leur compétence solaire au COMES », c'est-à-dire, probablement, aux crédits dont ont disposé la Délégation aux énergies nouvelles et le COMES les années précédentes. Selon cette estimation, le budget aurait été à peu près doublé (passant de 45 850 kF à 90 970 kF) entre le nouveau COMES et ses prédécesseurs.
« Présentation du PIRDES au conseil scientifique » en 1979 reproduit en Annexe viii de Pehlivanian, 2014.

32. Décret n°80-767 du 26 septembre 1980 modifiant le décret n°78-269 du 9 mars 1978 instituant un Commissariat à l'énergie solaire (*JORF* du 28/09/1980).

accordés à Paris, ainsi qu'à Sophia Antipolis (Pehlivanian, 2014, p. 311).

Son Conseil d'administration est composé de huit personnes, dont le président désigné par le ministre de l'Industrie (le premier est le physicien Henry Durand, spécialiste du photovoltaïque à Philips), le directeur général d'Électricité de France, l'administrateur général du CEA, le directeur général du CNRS, le directeur du CSTB, et quatre « personnalités qualifiées nommées par décret » [33]. Il dispose également d'un conseil scientifique composé de scientifiques, d'industriels et de représentants de l'administration publique (ministères de l'Industrie, de la Recherche, de la Qualité de vie et Plan construction) [34], nommés par les ministres de l'Industrie et de la Recherche. En 1980, le COMES est doté, en plus de son conseil scientifique, de deux comités s'occupant, pour le premier, de « la promotion de l'énergie solaire dans l'habitat », et pour le second, des « utilisations énergétiques de la biomasse », témoins de l'importance donnée à ces deux formes d'exploitation de l'énergie solaire dans les programmes nationaux [35]. En 1979, un Comité biomasse-énergie y est en effet créé par décision interministérielle, qui est chargé d'un « programme d'action biomasse » (Comité biomasse-énergie, 1980). En décembre de la même année, le COMES dispose en outre d'une Direction des plans et de la prospective [36], d'un Service des affaires internationales [37] et d'un Service des relations extérieures [38] (Pehlivanian, 2014, p. 311). La direction des Plans et de la prospective illustre la volonté de faire contribuer le COMES à la planification et à la prospective énergétiques nationales ; ce sont en effet les données issues de ses travaux qui sont utilisées par la Commission énergie et matières premières du Commissariat général au Plan pour le volet « énergies nouvelles » dans la préparation du VIII^e Plan (Commissariat général au Plan. Commission énergie et matières premières, 1980a). La création du Service des affaires internationales répond à l'ambition d'un positionnement technologique international de la part des acteurs du solaire français (voir 10.2.3.1). Quant au service des relations extérieures, il est probablement chargé de gérer les liens avec les autres organismes que le COMES, pour répondre à sa mission de coordinateur national.

33. Décret n°78-268 du 9 mars 1978 instituant un Commissariat à l'énergie solaire (*Journal officiel de la république française* du 10 mars 1978).
Ce chiffre est augmenté à cinq par un décret de 1980 (Décret n°80-767 du 26 septembre 1980 modifiant le décret n°78-269 du 9 mars 1978 instituant un Commissariat à l'énergie solaire (*JORF* du 28/09/1980).

34. Sur la période 1978-1980, on trouve : Bernard Bailly du Bois du ministère de l'Industrie ; Marcel Barrère du l'ONERA ; Claude Bienvenu d'EDF ; Jean-Pierre Causse de Saint-Gobain-Pont-à-Mousson ; Philippe Chartier de l'INRA ; André Gac du Conseil général du Génie rural ; André Garnault de la Société européenne de propulsion ; Jacques Alfon puis M. Mahl de la DGRST ; Bernard Hurez de la délégation à la Qualité de vie ; Pierre Jacquard du CEA ; Raymond Latarget de l'Institut Curie ; Alain Maugard du Plan construction ; Jean Robieux de la CGE ; Michel Rodot du CNRS ; Ionel Solomon de l'École polytechnique (COMES, 1981, p. 30).

35. Décret n°80-767 du 26 septembre 1980 modifiant le décret n°78-269 du 9 mars 1978 instituant un Commissariat à l'énergie solaire (*JORF* du 28/09/1980).

36. Dirigée par A. Perroy.

37. Dirigé par Bernard Devin.

38. Dirigé par R. Bourgeois.

Le COMES utilise trois moyens d'action : l'incitation et le soutien à la recherche d'organismes publics ou privés (40% du budget) ; le financement de mesures incitatives en faveur de l'habitat solaire et la communication auprès des utilisateurs potentiels (50% du budget (Teissier, 2013, p. 23)). Pour encourager la recherche d'organismes extérieurs, le COMES élabore des « contrats de programmes », qui « définissent pour chaque année les thèmes des travaux et les moyens consacrés par le COMES et par les organismes à ces travaux » (COMES, 1981, p. 17). Le premier contrat de programme est celui qui lie le CNRS à EDF en 1979 pour la construction de la centrale thermodynamique Themis, pour laquelle le COMES apporte des financements conséquents dans le cadre du PIRDES (cf 10.1.6). Cet exemple est « étendu en 1981 à l'INRA (sur la biomasse), au CEA (sur les centrales thermodynamiques), au CEMAGREF [39], au CSTB (sur l'habitat solaire) et au (CETIAT) [40] » (COMES, 1981, p. 17). Des contrats sont aussi signés avec des collectivités territoriales, par le biais des conventions ACSOL (« Action solaire concertée avec les collectivités locales ») (COMES, 1981, p. 42-43). Des appels d'offre sont formulés « pour promouvoir des sujets nouveaux » (COMES, 1981, p. 17). En 1980, un « Concours des 5000 maisons solaires » est également lancé (Chauvin-Michel, 2013, p. 37).
Les mesures incitatives, qui étaient autrefois assurées par l'AEE, consistent en des déductions d'impôts, des prêts aidés ou encore des subventions pour la mise en place d'installations de chauffage ou d'eau chaude solaire.
Enfin, une vaste campagne de communication en faveur des chauffe-eau solaires, allant des affiches aux spots télévisuels, est lancée en 1981 (Pehlivanian, 2014, p. 314-320).

Le COMES s'occupe donc d'énergie solaire au sens large, et ses acteurs parlent d'« énergies solaires », c'est-à-dire : rayonnement solaire « direct », mais aussi énergie éolienne, énergie issue de la photosynthèse (« énergie verte » ou « biomasse ») et énergie hydraulique (« grande » et « petite »). À noter que la biomasse et la micro-hydraulique n'entrent en compte qu'à partir de 1980 dans les bilans prospectifs du COMES, où elles (surtout la biomasse) font gonfler les chiffres de la ligne « énergies nouvelles » (voir 10.2.2.1). Mais le COMES exclut de ses prérogatives la « grande hydraulique » pour laquelle aucun avenir n'est plus envisagé (elle ne fait pas partie des « énergies nouvelles »). Le COMES ne s'occupe pas non plus de géothermie, ni d'énergies marines, bien que les rapports du COMES utilisent couramment le terme d'« énergies renouvelables » comme synonyme d'« énergie solaire ». Le Comité géothermie, le BRGM et les entreprises privées ou publiques qui se sont spécialisées dans l'exploitation de la géothermie restent en effet éloignées du COMES ; la géothermie n'est en outre pas, pendant cette période, classée parmi les énergies renouvelables (voir 10.3). Enfin, pour ce qui concerne les énergies marines, dont une partie, l'énergie thermique des mers et la houle, sont pourtant des formes d'énergie solaire au

39. Centre national du machinisme agricole du génie rural, des eaux et des forêts. Pour le bois énergie ? pour la micro-hydraulique ? Je n'ai pas trouvé de traces d'une telle collaboration.
40. Centre Technique des Industries Aérauliques et Thermiques, créé en 1960.

même titre que le vent ou le bois, les études françaises à ce sujet s'intègrent dans un programme mené par le CNEXO, sans lien avec le COMES, et qui fera l'objet du chapitre 11.

Les applications soutenues par le COMES sont donc les suivantes :

- chaleur basse température : habitat solaire (chauffe-eau et chauffage), piscines et serres,
- électricité photovoltaïque,
- énergie (électrique et mécanique) thermodynamique,
- énergie éolienne,
- à partir de 1979, « biomasse »,
- micro-hydraulique, à partir d'environ 1980 (COMES, 1981).

La structure du COMES est pensée de manière à répondre au mouvement de « décentralisation » annoncé par le gouvernement. La création d'une antenne à Sophia Antipolis doit y contribuer. En outre, les premiers programmes régionaux ACSOL sont mis en place dans le but affiché de prendre en compte les « spécificités régionales ». Une « cartographie scientifique à grande échelle des énergies nouvelles » est effectuée en collaboration avec la délégation à l'Aménagement du territoire et à l'Action régionale (DATAR, 1980). Un rapport du COMES se félicite que la « diversité régionale » ait ainsi conduit à « favoriser le développement d'une technologie adaptée aux ressources » (COMES, 1981, p. 42-43). Le développement de ces « spécificités » est cependant à interroger, au moins en termes de ressources, puisque l'un des exemples montrés comme une réussite est le programme « piscines solaires » en Pays de la Loire, qui, pourtant peu pourvue en ressources solaires par rapport à la majorité du territoire français, se voit parée de plusieurs installations de chauffage solaire dans les piscines municipales, installations qui ne connaîtront d'ailleurs pas de pérennité (cf 10.2.2.2.2).

Le COMES entend par ailleurs mener « une politique internationale en matière d'énergies renouvelables », dont deux axes principaux se dégagent : le positionnement dans la compétition entre pays industrialisés (il s'agit de « favoriser le développement de l'industrie solaire à l'étranger ») et la création d'un marché dans les pays dits « en voie de développement » pour assurer, selon les mots du COMES lui-même, le « rayonnement de la France » (COMES, 1981, p. 49) (cf 10.2.3).

Les technologies qui ont mobilisé la plus grande part du budget du COMES sont le solaire thermodynamique et photovoltaïque, suivis par la biomasse et le solaire thermique, auxquels il faut ajouter une petite contribution en faveur de l'énergie éolienne [41]. L'intérêt

41. Sur la période 1978-1979, 10.8 MF sont consacrés à l'habitat solaire sur un total de 123 MF, soit 8% (Pehlivanian, 2014, p. 441). En 1979, 42% du budget du COMES sont alloués au solaire thermodynamique, « les 58% restants [sont] consacrés en grande partie à la biomasse et aux applications photovoltaïques », (Pehlivanian, 2014, p. 489). En 1980, « un peu plus de 20% des programmes financés par le COMES sont des programmes photovoltaïques », avec un budget de 26.3 MF sur 128.7 MF

des programmes de recherche et développement nationaux ont en effet glissé du solaire thermodynamique au solaire photovoltaïque, présentés tour à tour comme filières pour la production d'électricité dans un marché à l'export à moyen terme, et pour une production sur le territoire français à long terme (COMES, 1981, p. 23). Les historiens donnent plusieurs arguments pour ce changement. Selon Pehlivanian, (2014), ce basculement est lié aux déboires technico-économiques rencontrés dans la construction de la centrale Themis, mais également au passage de la Délégation aux énergies nouvelles et de l'ancien COMES au nouveau COMES et à leurs directeurs : Henry Durand est l'ancien directeur d'un laboratoire privé spécialiste du solaire photovoltaïque, alors que Jean-Claude Colli est un partisan de la filière thermodynamique. Pour Liébard, (2015, p. 32), ce changement de direction aurait été délibérément opéré dans le but de défavoriser cette filière, et Durand aurait eu « pour mission principale d'arrêter les aides publiques au thermodynamique de haute, moyenne ou basse température et de consacrer l'argent public au développement du photovoltaïque ».

En ce qui concerne les centrales thermodynamiques, le COMES finance le projet Themis, qui représente le financement le plus conséquent de l'agence pour un projet : 80 millions sont ainsi répartis sur quatre ans (entre 1978 et 1981) (Pehlivanian, 2014, p. 313-314). En outre, une somme de 11.3 millions de francs est allouée pour la construction d'une centrale solaire thermodynamique à Vignola, en Corse, par un consortium dont fait partie le CEA (Pehlivanian, 2014, p. 395) (cf 10.2.3.1).

Quant à la chaleur basse température, elle est l'application la plus largement mobilisée par les programmes nationaux pour une mise en œuvre opérationnelle immédiate (cf 10.2.2.2). Le COMES soutient cette technologie, essentiellement par des mesures incitatives et de communication. Des installations sont effectivement mises en place entre 1978 et 1981 en France, mais leur nombre n'est pas à la hauteur des ambitions du COMES (Pehlivanian, 2014, p. 314-320).

En ce qui concerne l'énergie éolienne, les seuls convertisseurs considérés par le COMES sont les éoliennes de petite et de moyenne puissance dont les membres du Conseil scientifique estiment que les problèmes techniques « ont été largement résolus » et qu'il ne s'agit plus que de « stimuler la fabrication et la vente de petites séries d'éoliennes ». La prospection éolienne est considérée comme acquise. Les applications concerneraient quelques points isolés de France, les DOM-TOM et, surtout, un marché à l'export (COMES, 1981, p. 24). Cependant, le COMES n'a finalement engagé aucune action en faveur des aérogénérateurs faute de budget [42].

(Pehlivanian, 2014, p. 405). La même année, le solaire thermodynamique représente 13% du budget avec un total de 16.9 MF, et le solaire thermique 10% du budget avec 13.5 MF. Au total, « les investissements du COMES [en faveur des énergies nouvelles] se répartissent comme suit : biomasse (32%), photovoltaïque (19%), basse température (15%), météorologie et vent (4%) » (Teissier, 2013, p. 23).

42. Conseil d'administration du COMES, « Présentation du projet de budget de 1979 », 24/11/1978,

La « micro-hydraulique » apparaît dans les objectifs de production d'énergies nouvelles donnés par le COMES pour préparer le rapport sur l'énergie et les matières premières du VIII[e] Plan (COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU PLAN. COMMISSION ÉNERGIE ET MATIÈRES PREMIÈRES, 1980a, p. 245). Les centrales « micro-hydrauliques » y sont définies comme les installations hydroélectriques d'une puissance inférieur à 2 000 kW. Le rapport souligne l'importance du potentiel français, la nécessité d'effectuer un inventaire des ressources (80 ans après la campagne de mesures de la houille verte commanditée à De la Brosse par le ministère de l'Agriculture !), mais aussi les « problèmes réglementaires » auxquels se confrontent les porteurs de projets. Comme en témoignent plusieurs sources, ces aménagements ont en effet été une source importante de conflits locaux. Le COMES n'a probablement rien fait de spécifique vis-à-vis de cette ressource. Les premiers financement nationaux de cette période envers les micro-centrales semblent en effet venir de l'AFME, à partir de 1985 [43] (voir 10.1.7.2).

#### 10.1.7.2 L'AFME et la « maîtrise de l'énergie » (1981-1992)

L'Agence française pour la maîtrise de l'énergie (AFME) est créée le 13 mai 1982 en remplacement de l'AEE, du COMES, du Comité géothermie et de la Mission nationale pour la valorisation de la chaleur [44]. Elle est placée auprès du ministère chargé de l'Énergie (Industrie) et de la Recherche. Comme le COMES, c'est un Établissement public à caractère industriel et commercial, et sa vocation est de poursuivre les missions des quatre entités auxquelles elle succède. Elle est ainsi chargée de « mettre en œuvre la politique nationale de maîtrise de l'énergie, c'est-à-dire l'ensemble des actions de recherche, de développement, de démonstration et de diffusion dans le domaine :

— De l'utilisation rationnelle de l'énergie, et notamment des rejets thermiques ;
— Des énergies nouvelles ou renouvelables, et notamment des énergies tirées du rayonnement solaire, de la biomasse, du vent, de la géothermie et des déchets. » [45].

Le décret portant création de l'Agence précise que les « économies de matières premières et la recherche de produits de substitution entrent également dans ses attributions » [46].

Les deux ministères de tutelle nomment les membres du conseil d'Administration de l'AFME par décret. Ils sont au nombre de seize et comprennent, outre le président, « un représentant de chacun des ministres chargés de la Recherche, de l'énergie, du budget, du logement et de l'environnement », « quatre représentants élus du personnel », « cinq personnalités qualifiées dans le domaine de l'énergie », « une personnalité qualifiée dans le

reproduit en Annexe IX de PEHLIVANIAN, (2014)

43. Le premier budget « petite hydraulique » apparaît en effet en 1985 dans les documents de l'AFME (PEHLIVANIAN, 2014, p 493).
44. Décret n°82-404 du 13 mai 1982 (*Journal officiel de la République française*, 14/05/1982.
45. Décret n°82-404 du 13 mai 1982 (*Journal officiel de la République française*, 14/05/1982).
46. Décret n°82-404 du 13 mai 1982 (*Journal officiel de la République française*, 14/05/1982.

domaine des économies de matières premières ». L'AFME possède également un directeur général, un directeur scientifique et un conseil scientifique, nommés de la même manière que le conseil d'administration.

Comme celle du COMES, la création de l'AFME est inextricablement liée aux enjeux électoraux pesant sur les acteurs politiques professionnels, c'est-à-dire les partis politiques et les syndicats. Il s'agit cette fois-ci de la campagne présidentielle de 1981, pendant laquelle le Parti socialiste se positionne dans le combat anti-nucléaire et séduit une partie de l'électorat sensible aux questions environnementales. Le nouveau gouvernement étant en place, la création de l'AFME, à la tête de laquelle sont placés certains acteurs de ce combat, lui permet de satisfaire cet électorat, et, parallèlement, de poursuivre le programme nucléaire mis en place par ses prédécesseurs (Topçu, 2013, p. 121-125, Évrard, 2013) (cf 10.2.1). C'est ainsi que Michel Rolant, « numéro deux » de la Confédération française démocratique du travail (CFDT) au sein de laquelle il fut moteur de revendications anti-nucléaires, est nommé président de l'Agence, et qu'il est entouré de scientifiques de différentes institutions (notamment, EDF, CEA, INRA, CNRS) qui sont, comme lui, militants anti-nucléaires (voir 10.2.1).

Des ressources importantes sont mises à la disposition de l'AFME pour mener à bien sa mission pendant les premières années qui suivent sa création (1982-1986) : ses effectifs ainsi que son budget sont plus importants que le cumul de ceux des deux agences qui l'ont précédée [47]. Malgré l'importance de ces moyens, les objectifs poursuivis par l'AFME en termes d'énergies nouvelles s'avèrent moindres que ceux du COMES, et d'autant plus en termes d'énergie solaire. Chauvin-Michel, (2013, p. 39) parle ainsi d'un « déclin des programmes solaires français », et Pehlivanian, (2014, p. 324) d'une « dilution des objectifs solaires » avec l'absorption du COMES dans l'AFME. En effet, comme l'indique le nom de la nouvelle agence, qui ne fait plus de mention aux énergies nouvelles, c'est la politique de « maîtrise de l'énergie » qui est mise en avant par ses responsables, militants anti-nucléaire et auteurs du projet Alter. Celle-ci fait de la production d'énergie, quelle qu'elle soit, un objectif secondaire face à celui des économies d'énergie (voir 10.2.1) : l'utilisation d'énergies renouvelables passe ainsi au second plan par rapport à « l'utilisation rationnelle de l'énergie » [48]. Par ailleurs, les objectifs nationaux de production à partir d'énergies nouvelles chutent dès les premières années du gouvernement socialiste : alors que ce dernier choisit de poursuivre le programme nucléaire, les objectifs de production d'énergies nouvelles pour 1990 passent de 10 à 14 Mtep en 1981, à 8.2 à 9.1 Mtep en

47. Ainsi, alors qu'« en 1981, l'AEE disposait de 690 MF de crédits d'intervention et d'un effectif de 275 personnes », et que effectifs du COMES étaient d'environ 130 personnes (Chartier, 2003, p. 104) et son budget annuel de l'ordre de 120 MF, « en 1983, première année de plein exercice de l'AFME, ses crédits d'intervention atteignent 1 378 MF [...] et ses effectifs 494 personnes ».

48. Sur la période 1982-1985, le seul budget de recherche et développement en faveur de l'utilisation rationnelle de l'énergie est de 680 MF, contre 506 MF pour les énergies nouvelles (Chartier, 1987, p. 51).

1982 (Commissariat général au Plan, 1983). En outre, si les objectifs de production géothermique sont maintenus (0.6 à 0.8 Mtep pour 1990), ainsi que ceux d'« énergies vertes » (7 à 10 Mtep pour 1990), les objectifs solaires sont considérablement réduits : 1.3 à 2.2 Mtep en 1981, 0.2 Mtep en 1982 pour 1990 (solaire thermique) (voir 10.2.2.1).

Dès sa conception, l'AFME considère les énergies nouvelles (regroupées dans l'ensemble « énergies nouvelles et renouvelables ») au sein de quatre grandes thématiques : chaleur dans l'habitat et le tertiaire, chaleur et combustible dans l'agriculture, carburants, et « production décentralisée d'électricité »(Chartier et Tazieff, 1982) [49]. Ce sont ces dernières qui regroupent la plus grande diversité de sources d'énergie, et, synonymes d'« énergies renouvelables », elles sont presque exclusivement destinées à une activité à l'export, en particulier dans les pays du Sud (Chartier et Tazieff, 1982). Au contraire, les trois premières thématiques concernent des applications en métropole. La première thématique regroupe ainsi les installations solaires thermiques et géothermique ; la seconde et la troisième, la transformation de la biomasse ; la quatrième, un ensemble comprenant la mini-hydraulique, les énergies marines (énergie thermique des mers, houle), l'énergie éolienne, la conversion photovoltaïque et la géothermie moyenne et haute température. Il est notable que l'AFME exclut de ses prérogatives la « production centralisée d'électricité » : celle-ci ne fait « pas partie du champ de la mission » qui lui est confiée (Chartier et Tazieff, 1982, p. 40). Cette dernière reste, explicitement, l'apanage d'EDF. C'est ainsi que dans le rapport du groupe de travail préparant la création de l'AFME, l'énergie marémotrice n'est mentionnée que pour mémoire. En revanche, le sujet des centrales maréthermiques et géothermiques, faisant pourtant partie des technologies de production centralisée d'électricité, est traité dans ce document, car elles font partie des technologies à débouché uniquement étranger.

Il est difficile de chiffrer l'effort (financier) global de l'AFME pour chacune des énergies nouvelles, puisque celles-ci entrent dans plusieurs catégories d'action de l'Agence (diffusion et recherche) et, pour certaines d'entre elles, dans plusieurs thématiques. Effectivement, la géothermie est classée avec les réseaux de chaleur, tandis que la biomasse présente des intersections avec la « filière bois » mais aussi avec les réseaux de chaleur. Ainsi, il n'y a pas de budget global « énergies renouvelables » clairement affiché dans les rapports consultés [50]. Cependant, globalement, ce sont le solaire thermique et photovoltaïque, la biomasse et la géothermie basse température qui ont représenté les budgets les plus conséquents. En termes de diffusion, ce sont les seules technologies à avoir été encouragées (8% du

49. Le rapport « Chartier-Tazieff » dont sont issues les informations de ce paragraphe a été commandé par le ministre de la Recherche et de l'Industrie Jean-Pierre Chevènement à un groupe d'experts dirigé par Haroun Tazieff et Philippe Chartier en 1982, et remis en juillet 1982)

50. En 1983, sur le budget total, le thème solaire/énergies nouvelles et renouvelables représente 153.05 MF ; biomasse, 99.26 MF ; « géothermie-réseaux de chaleur » : 200.12 MF, sur 1 430.22 F de crédits affectés.

budget de diffusion en 1983) [51]. En termes de recherche, une part significative du budget est consacrée aux « énergies nouvelles et renouvelables », bien que plus faible que celle de « l'utilisation rationnelle de l'énergie » : 39% entre 1983 et 1987 (AFME, 1988, p. 80). Or, l'activité de recherche prend une place importante au sein de l'Agence. Elle dispose d'une direction à part entière, à la tête de laquelle se trouve Chartier qui entretient de bons rapports avec le ministère de la Recherche, et estime disposer d'une bonne marge de manœuvre (Chartier, 2003 ; Chartier, 2015) [52]. Une équipe d'experts travaille sur cet aspect aux sièges sociaux de l'Agence (Paris et Sophia Antipolis) (Chartier, 2015, p. 50). En termes d'énergies nouvelles, l'AFME finance majoritairement les recherches sur le solaire photovoltaïque, la biomasse (carburants de substitution et bois) et la géothermie (voir diagramme Figure 10.2).

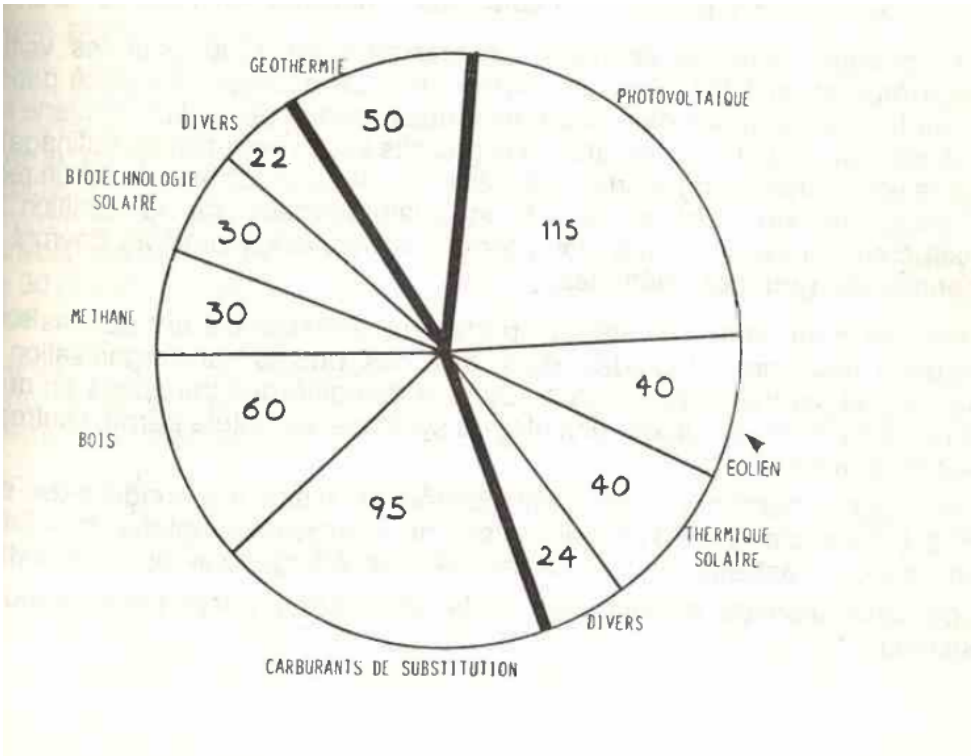



Figure 10.2 – « ENR : répartition par thème des crédits incitatifs » (MF - 1982-1985) (Chartier, 1987, p. 51)

L'AFME accentue l'action régionale en faveur des énergies nouvelles que le COMES souhaitait mettre en œuvre. Elle accompagne la politique plus globale de décentralisation initiée par le nouveau gouvernement en 1981, qui se traduit par la mise en place des Régions comme collectivités territoriales [53]. C'est ainsi qu'en 1985, l'AFME crée une direc-

51. En 1983, la géothermie, le solaire et la biomasse représentent 140 MF du budget « diffusion » (sur 1 775 MF) (AFME, 1984)

52. En 1983, le budget de l'AFME consacré à la recherche est de 1 775 MF, tandis qu'il est de 450 pour la recherche (AFME, 1984).

53. C'est-à-dire comme entités administratives distinctes de l'administration d'État, et dont le Conseil général, élu au suffrage universel, se voit attribuer de nouveaux outils décisionnels, tels qu'un budget

tion de l'Action régionale et, sous son égide, vingt-six délégations régionale (Laponche, 2015, p. 47-48). Ces délégations, qui comportent au départ un personnel de cinq à huit personnes, signent avec les Conseils régionaux des contrats pluriannuels pour la maîtrise de l'énergie (Leray et De la Roncière, 2003a, p. 65). Ils disposent en outre de crédits conséquents du Fonds spécial grands travaux (FSGT), mis en place en 1982 pour financer « transports publics, circulation routière et maîtrise de l'énergie », et « alimenté par un prélèvement sur la taxe intérieure sur les carburants routiers » (Van Corneval et Subra, 2017).

Selon Chartier et Laponche, les délégations régionales possèdent une certaine autonomie : elles disposent de budgets conséquents, sont libres d'établir des contrats avec les Régions pour la mise en place de projets. Cette autonomie revendiquée doit refléter la décentralisation promue par l'Agence (Laponche, 2003 ; Chartier, 2003 ; Laponche, 2015) . Cependant, cette autonomie et cette liberté de décisions sont à relativiser. Ainsi, les orientations stratégiques, que ce soit en termes de diffusion, et encore plus en termes de recherche, sont déterminées par l'AFME nationale. L'action des délégations régionales concerne exclusivement des opérations de diffusion, et non de recherche. Selon Chartier, directeur de la Recherche de 1982 à 1999, la politique de recherche doit en effet être définie au niveau national, car elle possède une dimension générale, et le fait de donner des compétences de recherche aux délégations régionales les aurait stérilement mises en concurrence [54]. En outre, pour ce qui concerne les opérations de diffusion, le type d'opération et les moyens de soutien sont également définies au niveau national. C'est pourquoi les Régions suivent globalement les orientations édictées au niveau national. L'AFME Pays de la Loire exprime clairement ce partage entre politique de recherche et action de diffusion en valorisant le travail « de terrain » :

> « Si la mise en œuvre d'une politique cohérente de maîtrise des consommations d'énergie relève, notamment dans sa composante recherche et développement, d'initiatives centralisées, les activités d'animation et d'aide aux utilisateurs ne peuvent par contre efficacement se développer qu'au contact étroit des acteurs économiques locaux. Si les choix stratégiques demeurent de la compétence de l'État, il apparaît, dans un contexte de renforcement des responsabilités locales, qu'une politique de maîtrise de l'énergie, prioritairement tournée vers l'analyse des besoins des consommateurs, ne peut s'opérer qu'à travers une présence « sur le terrain » (AFME Pays de la Loire, 1986, p. 32).

propre. Source ?

54. Selon Chartier, s'il faut une concurrence, elle devrait pouvoir opérer entre deux acteurs d'une même région : le but serait de trouver le « champion » de chaque filière.Chartier, p.d., Entretien réalisé le 16 juin 2016 au bureau du Syndicat des énergies renouvelables (Paris).

Les acteurs régionaux soutiennent particulièrement les actions en faveur de l'utilisation de la biomasse [55] , mais aussi de solaire thermique et, là où la ressource est présente, d'installations géothermiques [56], c'est-à-dire des sources d'énergie dont l'ADEME nationale a choisi d'encourager le développement (voir 10.2.2.1). Aussi, comme c'était le cas pour le COMES, on peut questionner la mise en œuvre de politiques énergétiques adaptées aux ressources locales, lorsqu'on constate que, par exemple, les régions de l'Ouest ont privilégié l'utilisation du solaire thermique, et non, par exemple, celle de l'énergie éolienne, pour laquelle était pourtant reconnue, par l'AFME, l'existence d'appareils opérationnels. En effet, l'achat de chauffe-eau solaires individuels ou de piscines solaires est subventionné par l'AFME, mais pas celui d'aérogénérateurs, dont le marché est identifié par les politiques nationales essentiellement comme un produit d'export (Neel, 1985, p. 223). La décorrélation entre la cartographie des ressources et les politiques territoriales des énergies nouvelles sont détaillées en 10.2.2.2.2.

L'action internationale est toujours très valorisée à l'AFME, selon les mêmes axes que celle du COMES : collaboration européenne dans une compétition internationale plus large ; positionnement sur le marché des énergies nouvelles dans les pays du Sud, dans le cadre de l'« aide au développement » et avec l'aide du ministère de la Coopération (Leray et De la Roncière, 2003b ; Chartier, 2003).

En 1986, l'AFME subit un affaiblissement drastique de ses effectifs et de ses moyens financiers sous le double jeu du contre-choc pétrolier et d'un changement de majorité politique au gouvernement. D'une part, la pression du « déficit de la balance des paiements » est amoindrie avec la chute du prix du pétrole. D'autre part, le nouveau ministre de l'Industrie est un « libéral partisan du moins d'État », donc moins favorable à l'action de l'AFME pour de la maîtrise de l'énergie. Il aussi hostile à la direction de l'AFME, d'origine syndicaliste et marquée à gauche (Laponche, 2015, p. 100). De son côté, le Corps des Mines, opposé, depuis le début de l'AFME, à la présence de ces acteurs à la tête de l'Agence, en raison de leur origine institutionnelle, de leur coloration politique et de leur vision de la politique énergétique, est prêt à « prendre [sa] revanche » (Laponche, 2003, p. 100). Les effectifs ainsi que le budget de l'AFME sont réduits d'un tiers, ce qui s'ajoute à l'arrêt du Fonds spécial grands travaux qui augmentait considérablement le budget de l'Agence (Leray et De la Roncière, 2003b, p. 80). Trois des quatre chefs de services rattachés à la Direction générale sont licenciés (Laponche, 2015, p. 56). La direction de l'Agence est confiée à l'ingénieur des Mines Jacques Bouvet. Ainsi, si les relations avec la

55. Ce constat est corroboré par le témoignage d'un ancien ingénieur à l'Agence nationale de récupération et d'élimination des déchets (ANRED), qui a intégré une ADEME région avec un poste à responsabilité à la création de l'ADEME.

56. Voir un bilan dressé par l'AFME des Pays de la Loire en 1986 sur la maîtrise de l'énergie : dans la catégorie « énergies nouvelles », seule apparaît, dans le bilan énergétique, la biomasse, c'est-à-dire ici le bois et les déchets. Des installations solaires sont aussi décrites, qui n'ont pas un poids quantitatif suffisant pour apparaître dans le bilan (AFME Pays de la Loire, 1986).

tutelle du ministère de l'Industrie sont tendues depuis la création de l'AFME, la conjoncture politique et économique de 1986 donne le dessus aux opposants à l'AFME et ses dirigeants.

Selon Laponche, lui-même licencié lors du changement de gouvernement, « [l]a belle aventure était finie et l'Agence était meurtrie pour des années » (Laponche, 2003, p. 100). Ainsi, « l'AFME entre, à partir de cette période, en phase d'hibernation » (Topçu, 2013, p. 125). Les réductions de budget concernent essentiellement l'action de diffusion de l'Agence, c'est-à-dire d'encouragement à la diffusion de technologies existantes [57]. L'aide à l'investissement est sensiblement réduite, « communication, études économiques, formation, action internationale » étant moins affectées par les réductions de budget (Leray et De la Roncière, 2003b, p. 74). La communication voit même son budget accru (Leray et De la Roncière, 2003b, p. 78). Les Agences régionales sont maintenues, grâce aux élus locaux qui apprécient leur action, mais leurs moyens sont réduits (Laponche, 2015, p. 56) [58].

La recherche est moins impactée par le changement politique de l'AFME : Chartier est le seul des dirigeants de l'AFME à ne pas être licencié, et il parvient à maintenir les moyens de la mission de recherche au même ordre de grandeur que les années précédentes, grâce à la tutelle du ministère de la Recherche [59], bien que les budgets soient également réduits [60]. En outre, jusqu'à sa suppression en 1992, l'AFME doit une grande part de la poursuite de ses activités d'une part à l'Union européenne, qui soutient des projets de maîtrise de l'énergie depuis les chocs pétroliers, et d'autre part à l'action régionale. Le budget de la recherche est le seul à poursuivre l'effort en faveur des énergies nouvelles. L'action de l'AFME se focalise alors sur les « énergies vertes » pour la métropole, et sur l'export de technologies à l'international, avec les filières photovoltaïque, éolienne, la mini-hydraulique et la géothermie moyenne et haute température (AFME, 1988) (cf 10.2.2.1, 10.2.2.2, 10.2.3.1). Elle n'y consacre plus que 19.5% de son budget de recherche sur la période 1988-1992, contre 39.2% sur la période 1983-1987.

La création de l'ADEME en 1992, par la fusion de l'AFME, de l'Agence de la qualité de l'air (AQE) et de l'Agence nationale de récupération et d'élimination des déchets (ANRED), achève de signer le désintérêt des responsables de la politique énergétique

57. Chartier, 2015, p. 80.
Chartier, p.d., Entretien réalisé le 16 juin 2016 au bureau du Syndicat des énergies renouvelables (Paris).

58. Bouvet lui-même dit avoir « été amené à freiner un excès d'enthousiasme pour l'insertion [des] aides [de l'AFME] dans les objectifs locaux » : « il fallait surveiller l'équilibre des coopérations locales pour ne pas laisser [les] moyens [de l'AFME] s'asservir à des objectifs d'action sociale ou d'actions de développement s'écartant de[s] objectifs [de l'AFME] (Bouvet, 2003, p. 116)

59. Chartier, 2015, p. 80.
Chartier, p.d., Entretien réalisé le 16 juin 2016 au bureau du Syndicat des énergies renouvelables (Paris).

60. Ils passent d'une moyenne annuelle de 362.3 MF/an à moins de 270 MF/an entre la période (1983-1987) et la période (1988-1992) ; ils sont successivement de 390, 286 et 186 MF de 1985 à 1987 (AFME, 1988, p. 13).

pour les énergies nouvelles - de plus en plus appelées énergies renouvelables. En effet, si l'ADEME reprend l'activité énergie de l'AFME, celle-ci se centre sur la gestion et la valorisation des déchets [61]. Elle fonde en outre l'institutionnalisation des liens faits entre problématiques énergétiques et problématiques environnementales.

### 10.1.8 Synthèse 10.1

Au cours des années 1970-1980, un nombre de plus en plus restreint d'institutions déterminent les orientations et coordonnent les actions nationales en faveur des énergies nouvelles. Ces institutions intègrent au fur et à mesure une palette de plus en plus large d'énergies nouvelles et de convertisseurs, mais aussi de types de projets, allant, dans le processus d'innovation, de la mise au point des convertisseurs à leur diffusion. L'évolution du modèle institutionnel de ces entités et leur structuration progressive en agences d'objectifs est caractéristique de la mutation opérée dans la manière de penser et d'organiser la recherche scientifique et technique à partir de la fin des années 1960. Le modèle des agences d'objectifs est opposé à celui des grands organismes de recherche de l'après guerre (CEA, CNES, CNEXO, Institut national agronomique (INRA)...) qui disposent à la fois des moyens financiers et de recherche, et financent leurs recherches en interne avec des domaines disciplinaires bien définis. Les protagonistes du nouveau modèle valorisent son caractère interdisciplinaire, sa « légèreté », le fonctionnement par programmes, l'ancrage dans les problématiques économiques et sociétales [62] (Bidault, 2006).

Ainsi, au début de la période deux Comités d'experts (géothermie et solaire) sont constitués sous la tutelle du ministère de l'Industrie. Le Comité géothermie est très proche des comités techniques pour l'utilisation des énergies marines de l'entre-eux-guerres et de l'après-guerre (Commission de la houille bleue , CTEM). Il est constitué d'industriels d'un secteur de l'énergie (non pas, de l'électricité mais du pétrole), d'ingénieurs des grands corps de l'État rattachés au ministère de tutelle du Comité (ingénieurs des Mines plutôt qu'ingénieurs des Ponts) et d'acteurs concernés par les applications de la géothermie (tels que le ministère de l'Équipement et les entreprises de chauffage), et est chargé de la mise en place rapide de convertisseurs géothermiques pour l'approvisionnement énergétique national, et son action relève d'une politique énergétique. Au même moment, le Comité de l'énergie solaire, sous la double tutelle du ministère le l'Industrie et de la DGRST, est chargé d'orienter la recherche nationale sur l'énergie solaire. Celle-ci est mise en œuvre

61. Bal, 2015, Entretien réalisé le 11 décembre 2015 au bureau du Syndicat des énergies renouvelables.

62. Ceux-ci connaissent des détracteurs : le PIRDES est mis en place par Robert Chabbal qui s'oppose en cela à Raymond Castaing (Guthleben, 2009) ; l'AFME est créée avec des acteurs comme Philippe Chartier, membre des deux COMES puis directeur de la Recherche à l'AFME, qui défendent le modèle des agences d'objectifs, et Chartier est opposé à la manière dont le programme énergies marines est mis en place au sein du CNEXO.
Chartier, p.d., Entretien réalisé le 16 juin 2016 au bureau du Syndicat des énergies renouvelables (Paris).

dans le cadre du PIRDES, programme interdisciplinaire sur toutes les applications de l'énergie solaire, et porté par le CNRS qui finance des recherches internes et externes dans de nombreux laboratoires. Enfin, l'AEE et la DEN contribuent au financement de la diffusion des applications, et leur action relève d'une politique de l'énergie. En 1978, le COMES absorbe tous les organismes qui travaillent sur l'énergie solaire, et coordonne toutes les actions nationales en faveur de l'énergie solaire au sens large (rayonnement solaire, biomasse, micro-hydraulique), sous toutes ses formes, et pour tout le processus d'innovation. Il dépend du ministère de la Recherche et du ministère de l'Industrie. L'AFME cumule les missions du COMES et du Comité géothermie, et se préoccupe donc d'énergie solaire et de géothermie. Elle intègre son action en faveur des énergies nouvelles à une politique de maîtrise de l'énergie. Elle coordonne et encourage les projets allant, selon les textes officiels, de la recherche, au développement, à la démonstration et à la diffusion [63]. Elle est sous la double tutelle de la Recherche et de l'Industrie, ce qui témoigne d'une hybridité de son action entre une politique de recherche et une politique de l'énergie.

D'un point de vue institutionnel, les énergies marines (énergie thermique des mers, marémotrice, houlomotrice) font exception parmi les énergies nouvelles. Elles sont en effet étudiées au sein d'un programme mené par le CNEXO, institution spécialisée dans le domaine de l'exploitation des océans. Elles ne font donc pas partie des programmes établis par les institutions dédiées aux énergies nouvelles mentionnées ci-dessus, et sont d'ailleurs beaucoup moins médiatisées. EDF ne souhaite pas en effet construire de nouvelles usines marémotrices, et le CNEXO destine les centrales maréthermiques et houlomotrices à l'export, les premières en raison de la disponibilité de la ressource, les secondes car elles sont classées parmi les moyens de « production décentralisée d'électricité », avec le vent et le soleil (cf 11).

Par rapport à la période (1940-1970), il y a une multiplication des instances ministérielles en faveur des énergies nouvelles. Alors que c'étaient, pour l'entre-deux-guerres, le ministère des Travaux publics puis de l'Industrie ; pour l'après-guerre, les ministères de l'Industrie et des Territoires d'Outre mer puis de la Coopération ; les années 1970-1980 voient s'impliquer les ministères de l'Industrie, en tête de file, avec le ministère de la Recherche, mais aussi les ministère de l'Équipement, de l'Agriculture, de l'Environnement, Lamare, de la Coopération. Ils agissent de manière de plus en plus coordonnée, et les mesures nationales en faveur des énergies nouvelles ont un caractère interministériel remarquable. La DGRST est un organe interministériel, bien que constituant de plus en plus, dans les années 1970, un outil au service du ministère de la Recherche (Bidault, 2006). L'action de la Délégation aux énergies nouvelles est associée à celle d'un Groupe interministériel des Énergies nouvelles. De plus, le Plan construction (ministère de l'Équipement) montre une forte implication dans toutes les projets d'installations thermiques

63. Décret n°82-404 du 13 mai 1982 (*Journal officiel de la République française*, 14/05/1982).

(solaire, géothermie puis biomasse) en Métropole. Le ministère de la Coopération est toujours présent (il l'est depuis la décennie précédente) dans les projets d'installations solaires (pompes, panneaux photovoltaïques) à destination des pays « en voie de développement ». Le ministère de l'Agriculture est concerné par les recherches sur la biomasse et y engage ses experts de l'INRA.

En moindre mesure, le ministère de l'Environnement s'engage dans cette dynamique : il possède peu de moyens et cherche à montrer son implication sur le sujet par de petites participations éparses (Laponche, 2015, p. 52). Le caractère environnemental des énergies nouvelles, très présent dans les discours (voir 10.3.2) ne s'institutionnalise qu'à la création de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) en 1991, dans un contexte de nouveaux enjeux environnementaux à l'international. Le réchauffement climatique causé par les gaz à effet de serre est en effet de plus en plus reconnu par la communauté scientifique internationale et devient, en France, un problème public (Guillemot, 2014).

Les institutions de recherche (CNRS, DGRST, ministère de la Recherche) sont moteurs de la dynamique nationale. Elles sont déjà impliquées avant le premier choc pétrolier, ce qui leur permet de répondre aux nouvelles orientations que prend la politique française de la recherche au début des années 1970. Lorsque, en 1986, le nouveau gouvernement décide la restructuration de l'AFME et la diminution de ses moyens, la tutelle du ministère de la Recherche s'avère fondamentale pour la poursuite de l'Agence. Pour le programme énergies marines, le CNEXO, qui dépend directement du premier ministre, reçoit ses principaux financements de la DGRST. Mais, globalement, le ministère de l'Industrie, acteur historique des politiques énergétiques, reste présent et même prépondérant parmi ces institutions : il représente la seule tutelle de l'Agence des économies d'énergie (AEE ; 1974-1978), de la Délégation aux énergies nouvelles (1975-1978) et du Comité géothermie (1974-1981), et reste la tutelle principale du Comité de l'énergie solaire (premier COMES ; 1975-1978) et du Commissariat à l'énergie solaire (second COMES ; 1978-1981) ; il partage ensuite la tutelle de l'AFME avec le ministère de la Recherche, et est responsable de l'affaiblissement de l'AFME en 1986 (cf 10.2.1). Ainsi, si l'AFME est dirigée par des opposants au programme nucléaire mené par le ministère de l'Industrie et constitue un « "foyer" pour les experts critiques de la politique énergétique » (Évrard, 2013, p. 197), qui parviennent à mettre en œuvre des actions conformes à leur positionnement, le ministère garde le contrôle sur la politique énergétique, y compris pour ce qui concerne les énergies nouvelles (cf 10.2.1).

Le contexte international apparaît très important. Le COMES et l'AFME consacrent une partie significative de leurs moyens à cette action. L'Union européenne, qui s'est impliquée ponctuellement pendant la période précédente (distillateur solaire de l'Université

d'Alger, financé par l'OECE : cf 9.2.3), a des liens forts avec les nouvelles institutions dédiées aux énergies nouvelles. Elle se révèle un soutien décisif pour l'action de l'AFME en faveur des énergies nouvelles lorsque le gouvernement décide d'une baisse drastique de ses moyens en 1986.

Les dirigeants du COMES puis l'AFME cherchent à épouser la politique de décentralisation mise en place par les gouvernements successifs à partir de la fin des années 1970. Ils créent des agences régionales qui impulsent des dynamiques locales, et mettent en place des installations solaires et géothermiques. L'aspect déconcentré de l'action du COMES puis des AFME régionales est cependant à nuancer : toutes les grandes tendances sont décidées au niveau national. Ce sont les tutelles nationales qui décident de l'entièreté de la politique de recherche, et des types de technologies à encourager, indépendamment du territoire.

Par rapport à la période (1940-1970), où EDF était un acteur central, l'entreprise semble s'effacer dans ce panorama des acteurs des énergies nouvelles. Il est en effet très peu mentionné dans cette synthèse, et il apparaît secondaire sur le schéma de la Figure 10.1. Pourtant, bien au contraire, EDF est, d'une manière ou d'une autre (dsous-irectement ou indirectement, et généralement comme frein) omniprésent dans cette dynamique nationale. Ainsi, EDF est un acteur des énergies nouvelles pendant toute la période, et ses motivations sont de deux ordres : canaliser les contestations écologistes (anti-nucléaire, pro-« sobriété énergétique »), participer au développement de technologies hors métropole. L'entreprise influence les politiques des énergies nouvelles, que ce soit de manière directe (participation aux projets) ou indirecte (le programme nucléaire qu'elle met en place a un poids crucial dans le (non-)développement des énergies nouvelles en France dans les années 1970-1980. C'est ce dont il est question dans la prochaine section (10.2).

Dernier changement palpable dans ce panorama, les enjeux de la politique professionnelle (partis et gouvernement) se révèlent importants dans l'évolution de ces institutions : stratégies électorales du parti socialiste en 1981, changement de gouvernement (ministre de l'Industrie) en 1986. De ce fait, elles sont instrumentalisées par le Parti socialiste pour les élections de 1981, et laissées pour compte par le nouveau gouvernement de droite en 1986 pour un ensemble de raisons dont fait aussi partie l'argument politique. La section suivante (10.2) traite de l'enjeu politique associé à la dynamique des énergies nouvelles dans les années (1970-1990), ainsi que d'autres enjeux palpables dans ce panorama : approvisionnement énergétique, marché international, aide au développement, et des actions mises en œuvre pour y répondre.

## 10.2 Enjeux et réalisations : « gouvernement de la critique », politique énergétique et positionnement international

Cette section met en lumière les enjeux dans lesquels s'est inscrite l'action des institutions décrites en 10, ainsi que les résultats de cette action. Ils sont les suivants et seront présentés dans cet ordre : la neutralisation des contestations anti-nucléaire, la contribution au bilan énergétique national, le positionnement dans une compétition technique et économique internationale. Ils font appel à différentes formes de convertisseurs et différentes sources d'énergie, et induisent une répartition territoriale de ces convertisseurs qui diffère de celle de la période (1940-1970). Selon cette nouvelle distribution géographique, les acteurs des énergies nouvelles organisent l'équipement de la métropole en installations de chauffage solaire, géothermique et de biomasse, de petites et moyennes puissances, ainsi que, en très moindre mesure, de petites centrales hydrauliques. Cette répartition tranche remarquablement avec celle qui prévalait lors de la période (1940-1970), où EDF cherchait à alimenter la métropole par des centrales marémotrices et des aérogénérateurs puissants. L'enjeu international mobilise toujours une palette large de sources d'énergie et de types de convertisseurs en termes de moyens de conversion (directs ou électriques) et de puissance (petites, moyennes et grandes).

Le premier de ces enjeux est le mouvement écologiste, et plus particulièrement anti-nucléaire, français, très important dans les années 1970 et considérablement affaibli dans les années 1980. La création de la Délégation aux énergies nouvelles, puis celles des deux COMES et de l'AFME ont en effet été une manière de répondre à ce mouvement et de le canaliser. L'énergie solaire étant l'étendard positif des opposants au programme nucléaire, ceci explique en partie qu'elle ait été visée par les politiques des nouvelles institutions décrites en 10 . Le lien entre énergies nouvelles, et en particulier énergie solaire, et lutte anti-nucléaire sera donc rapidement synthétisé à partir d'analyses d'historiens (en particulier, Évrard, (2013) et Topçu, (2013)) et de témoignages d'acteurs.

Les trois autres enjeux sont similaires à ceux de la période (1940-1970). Ils sont énoncés clairement dans le discours prononcé par Michel Rolant, encore directeur de l'AFME, à l'occasion des Journées de la technologie et de l'Industrie sur le thème de la maîtrise de l'énergie organisées par l'AFME en décembre 1985 : trois « critères » sont retenus pour le soutien aux techniques de maîtrise de l'énergie :

— « l'importance des secteurs concernés dans le bilan énergétique 1990,
— l'apport de la maîtrise de l'énergie à une plus grande compétitivité de l'industrie française,
— la contribution à la coopération Nord-Sud » (Rolant, 1985a, p. 13)

Le premier est ainsi l'enjeu énergétique à proprement parler. Il mène à la mise en place de nombreuses installations solaires, géothermiques et surtout d'utilisation de la biomasse, le tout en « basse énergie » et majoritairement dans les secteurs résidentiel et tertiaire, au cours des années 1970-1980. Le COMES puis l'AFME prennent également des mesures pour encourager l'installation de petites centrale hydroélectriques à la fin des années 1970 et au début des années 1980 mais redéfinissent rapidement le marché de ces convertisseurs à l'international en raison de la concurrence du kilowattheure nucléaire. C'est ainsi que les énergies nouvelles apparaissent pour la première fois dans les bilans énergétiques nationaux (Table 10.1). Les sous-sections 10.2.2.1 et 10.2.2.2 étudient la place de ces sources d'énergie dans les politiques énergétiques et les résultats obtenus en termes de bilan énergétique. Le 10.2.2.1 examine ainsi les rapports des commissions de l'énergie nommées successivement par le Conseil central de planification, qui indiquent des tendances globales dans l'intégration des énergies nouvelles dans les programmes d'équipement énergétique nationaux, ainsi que des stratégies de gouvernement de la critique. Le 10.2.2.2 étudie plus finement les programmes par type de conversion et d'usage et source d'énergie par source d'énergie : géothermie, solaire puis biomasse à basse température, puis petites centrales hydroélectriques.

TABLE 10.1 – « Consommation française d'énergie primaire par énergie en Mtep » (1970-1984) (AFME, 1985)

| Source d'én. | 70 | 71 | 72 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pét. | 94.6 | 102.2 | 114.5 | 126.6 | 122.2 | 110.1 | 118.6 | 115.3 | 118 | 118.8 | 110.9 | 100.5 | 94.2 | 90.5 | 86.8 |
| Gaz | 8.2 | 9.6 | 11.4 | 13.3 | 14.3 | 15.6 | 16.9 | 18 | 18.7 | 21 | 21.2 | 22.1 | 21.5 | 22.5 | 23.6 |
| Char. | 34.9 | 31.9 | 28.4 | 27.8 | 28.8 | 24.8 | 29.2 | 28.3 | 29.4 | 31.9 | 31.1 | 28.5 | 29.2 | 26.3 | 25.2 |
| EN | 2 | 2 | 2 | 2 | 2.2 | 2.3 | 2.5 | 2.6 | 2.8 | 3 | 3.2 | 3.4 | 3.6 | 3.7 | 3.8 |
| Élec. [65] | 13.9 | 12.7 | 12.9 | 13.3 | 16 | 18.1 | 14.9 | 24.5 | 23.1 | 25.1 | 29.7 | 38.9 | 39.7 | 45.0 | 52.2 |
| Total | 153.6 | 158.4 | 69.1 | 183 | 183.6 | 170.9 | 182 | 186.7 | 192 | 199.8 | 196.1 | 193.3 | 188.2 | 188 | 191.6 |

Le second et le troisième enjeux, la compétition technologique entre pays du Nord, et le positionnement de l'industrie française dans un marché international dans le Sud, seront évoqués en dernier lieu (10.2.3). Ils concernent une partie importante des technologies faisant l'objet de programme de recherche en France : il s'agit du solaire thermodynamique de petites (pompes), moyennes et grandes puissances (centrales électriques) et photovoltaïque (petites et moyennes puissances), des aérogénérateurs de petites et moyennes puissances, des centrales maréthermiques (grandes puissances) et des houlomoteurs (moyennes

65. Nucléaire et hydraulique. La production hydraulique est comprise entre 10.69 et 13.46 entre 1970 et 1976 et entre 15.1 et 17.11 entre 1977 et 1984. La production nucléaire augmente régulièrement de 1.27 en 1970 à 42.5 en 1984, avec une accélération notable en 1978.

puissances).

### 10.2.1 « Gouvernement de la critique » : énergies nouvelles contre énergie nucléaire (1972-1981)

Plusieurs historiens ont montré comment les énergies nouvelles, et plus particulièrement l'énergie solaire, furent un étendard pour les militants anti-nucléaires qui ne souhaitaient pas rester figés sur une position « anti », et comment les pouvoirs politiques ont intégré l'énergie solaire dans des institutions, étouffé de ce fait cette critique et renforcé le pouvoir en place. La notion de « gouvernement de la critique », proposée par l'historienne Sezin Topçu, caractérise cette stratégie politique. Elle reprend la notion foucaldienne de « gouvernement » comme « mode productif du pouvoir, basé sur l'adoption de stratégies « positives », combinant des techniques de domination et des technologies de soi [66], à partir de quoi le pouvoir se nourrit et se renforce » (Topçu, 2013, p. 30). Le sujet est très bien développé par ces historiens (en particulier, Topçu, (2013) et Évrard, (2013)). Il me semble important de le signaler et de l'expliciter brièvement dans la mesure où le gouvernement de la critique a largement modelé les politiques publiques des énergies renouvelables en France après le premier choc pétrolier, et la création des institutions décrites plus haut (10.1).

#### 10.2.1.1 Les énergies nouvelles, étendard du mouvement anti-nucléaire

Le mouvement anti-nucléaire des années 1970 est protéiforme. Il prend place de manière plus large dans une remise en question post-soixanthuitarde et écologiste de la société industrielle, à laquelle la production d'énergie est associée. Parmi les acteurs de ce mouvement, certaines associations et périodiques écologistes promeuvent les énergies « douces » comme alternative au nucléaire, parfois avant les chocs pétroliers et l'annonce du Plan Messmer. Le journal critique *La gueule ouverte*, fait paraître, en 1972, dans son premier numéro, une « Chronique du solaire » de l'auteur de bandes dessinées Jean-Marc Reiser (Pehlivanian, 2014, p. 263-270). L'association Les Amis de la Terre fait passer dans ses campagnes de communication des messages pro-solaire, notamment par le biais d'affiches éditées entre mars 1973 et 1986 ( Évrard, 2013 ; Pehlivanian, 2014, p. 270-279).

Les militants anti-nucléaire critiquent l'énergie nucléaire pour des raisons environnementales, mais aussi politiques, sociales, culturelles et économiques. Ils lui reprochent plusieurs éléments : les pollutions avérées (« pollution thermique », radioactivité), les

66. Définie par Foucault, dans son cours sur les « systèmes de pensée », comme « réflexion sur les modes de vie, sur les choix d'existence, sur la façon de régler sa conduite, de se fixer à soi-même des fins et des moyens (disponible sur le site internet du Collège de France .

risques et les incertitudes du fonctionnement des centrales (gestion des déchets, risques d'accident), l'aspect « technocratique » (voire « totalitaire ») de la mise en place et de la gestion des centrales, monopolisées par un nombre limité d'experts sans participation citoyenne, l'inscription de cette technologie dans une politique énergétique de la demande au service de la croissance, les coûts colossaux et à l'évaluation incertaine (Évrard, 2013).

C'est en cela que l'exploitation des énergies nouvelles, comprenant généralement un ensemble de manifestations de l'énergie solaire (solaire direct, vent, biomasse), apparaît comme une alternative politique au programme nucléaire (Évrard, 2013 ; Pehlivanian, 2014, p. 256-288). Des variantes dans l'ensemble des sources d'énergies désignées ainsi que dans les expressions utilisées sont révélatrices des projets politiques portés par les auteurs des discours (qui seront catégorisés en 10.3). En tout cas, ce qui était considéré comme des inconvénients des énergies naturelles pendant les périodes précédentes, devient un atout pour des alternatives politiques : leur dispersion et leur intermittence vont de pair avec la « décentralisation » ; la simplicité de certaines techniques [67] déjà opérationnelles va de pair avec l'autonomie (la « convivialité » d'Ivan Illich (Illich, 1973)) en rupture avec la technocratie et le monopole des experts ; elles sont de plus reconnues comme exemptes de « nuisances » et de « pollutions », ou comme en présentant moins que l'énergie nucléaire, mais également que les énergies fossiles. Reprenant le schéma tracé par un physicien et écologiste américain, Amory Lovins, qui a grandement influencé les militants français, décrit deux systèmes énergétiques opposés, correspondant à deux projets politiques : le *soft energy path*, qui « s'appuie sur une forte maîtrise de la demande, le développement des énergies renouvelables adaptées à la bonne échelle territoriale et aux réels besoins énergétiques », et le *hard energy path*, « qui repose sur l'expansion rapide de hautes technologies centralisées pour augmenter l'offre d'énergie, et notamment l'électricité » (Évrard, 2013, p. 99). Il y a en fait un panel large de positionnements, du refus absolu du nucléaire, à la critique du tout nucléaire, qui tolère tout de même le nucléaire dans un système énergétique pluriel.

L'adoption du Plan Messmer, et sa présentation par les décideurs traditionnels comme la seule solution possible, amène la mobilisation d'un panel plus large d'acteurs, dont les scientifiques qui amènent une légitimité au mouvement anti-nucléaire [68]. Cette mobilisation des scientifiques, tardive par rapport au mouvement déjà existant, commence avec l'« Appel des 400 », lancé en février 1975, qui récolte en quatre mois la signature de plus

67. Non pas ,« sans sophistication, mais dont le fonctionnement et l'usage doivent être compréhensibles par le plus grand nombre » (Évrard, 2013, p. 100).

68. Le Plan Messmer a pour conséquence de « renforcer [...] la prise de conscience du caractère résolument politique des choix énergétiques ». Avant le Plan Messmer, « la contestation prend la forme de conflits localisés, en réaction à la construction des centrales et mettant en cause sa fiabilité technique » et, « à partir des années 1974-1975, le mouvement antinucléaire gagne de l'importance, relayé par les informations diffusées dans une presse marginale mais active (Évrard, 2013, p. 83)

de quatre mille scientifiques émanant de la physique, d'autre disciplines des sciences de la nature mais aussi des sciences humaines et sociales (Topçu, 2013, p. 79-83). Celui-ci alerte « l'opinion publique sur la nature "irréfléchie" du plan Messmer et sur les risques graves qu'il fait courir à la population » (Évrard, 2013, p. 83).

Dans ce mouvement, deux groupes de scientifiques qui se sont positionnés en proposant des scénarios alternatifs incluant les énergies nouvelles : un groupe de chercheurs en sciences économiques de l'Institut économique et juridique de l'énergie (IEJE) de Grenoble, et le « Groupe de Bellevue », qui sont maintenant traités successivement.

L'IEJE publie le premier scénario alternatif à celui du gouvernement, et faisant appel aux énergies nouvelles. Il paraît en février 1975 et s'intitule « alternatives au nucléaire » (Institut économique et juridique de l'énergie, 1975). Dans ce scénario, les économistes de l'IEJE prônent une réduction de la croissance énergétique, une réduction de la production d'électricité nucléaire et le recours aux énergies nouvelles. L'examen rapide de ce scénario est intéressant car il montre une proposition particulière de programme alternatif incluant les énergies nouvelles, et la variété des positionnements des acteurs anti-nucléaire et pro-renouvelables. Ainsi de manière qui peut aujourd'hui paraître étonnante, il prône une augmentation de la consommation de pétrole. Il a donc bien été formulé, non en réaction au choc pétrolier et pour y répondre, mais en réaction à la réaction du gouvernement au choc pétrolier, qui fut le Plan Messmer. En outre, il prend en considération l'énergie solaire, la petite hydraulique, mais également, et dans la plus large proportion, la géothermie, qui est alors souvent considérée comme non renouvelable.
Comme les militants s'opposant au « *hard energy path* », les auteurs du scénario critiquent le programme énergétique national de la manière suivante : les « méthodes d'évaluation de la demande » ; le « coût économique » ; les « coûts sociaux » ( « atteintes à l'environnement et à la santé publique ») ; le « processus décisionnel » ; le « monolithisme de la solution » (choix « sans discussion », « sans information » et « sans contrôle »). Par rapport aux objectifs choisis par le gouvernement à l'horizon 1985, ils modèrent la contribution de l'énergie nucléaire de moitié de la manière suivante : un abaissement global de la consommation d'électricité (diminution de moitié) ; une diversification des sources d'énergie, et notamment une substitution de l'énergie nucléaire par le pétrole (qui atteindrait 50% de la consommation d'énergie primaire !), puis par les énergies géothermique et solaire, celles-ci n'atteignant toutefois que 4% de la consommation d'énergie primaire. Ces économistes privilégient en effet les sources d'énergie « nationales [...] sûres et décentralisées », mais considèrent nécessaires des sources d'énergie additionnelles. Comparant les « coûts sociaux » des filières nucléaire et pétrolière, c'est-à-dire les « atteintes à l'environnement et à la santé publique », les auteurs concluent qu'ils sont sans commune mesure [69]. Contre

69. Ils considèrent les « pollutions » inhérentes à chacune des filières, ainsi que les accidents, et estiment que [l]es coûts sociaux des hydrocarbures sont importants mais [que] la plupart d'entre eux sont

une « visions trop étroitement nationaliste », ils imaginent en outre la mise en place de contrats entre États producteurs et États consommateurs « sur la base d'un échange de biens et de services qui assure à chaque partenaire le maintien de son pouvoir d'achat », et qui permettrait une « véritable attitude de coopération vis-à-vis des pays producteurs de pétrole » (Institut économique et juridique de l'énergie, 1975, p. 80) !
La « cible » des chercheurs de l'IEJE est donc bien l'énergie nucléaire, à laquelle ils ne sont d'ailleurs pas farouchement opposés, puisqu'ils préconisent uniquement une réduction importante des prévisions de production.

L'appel des 400 a des répercussions importantes dans la presse et « provoque un grand choc » au gouvernement français : « [l]a critique anti-nucléaire, jusqu'alors considérée comme une provocation de quelques "gauchistes chevelus", gagne une légitimité incontestable grâce à la mobilisation des savants » (Topçu, 2013, p. 83). La commission énergie du VII^e^ Plan est créée après cet événement médiatique, et elle préconise justement l'adoption dans les objectifs du Plan l'utilisation des énergies géothermique et solaire, qui, faisant l'objet de recherches à la DGRST et déjà promues par la Délégation aux énergies nouvelles, n'apparaissaient pourtant pas dans les objectifs initiaux. On peut supposer que les propositions comme celles de l'IEJE ont joué un rôle dans le choix de faire contribuer ces sources d'énergie aux objectifs de production énergétique nationale, même de façon marginale (voir 10.2.2.1).

Des scientifiques de la CFDT se positionnent également dans le combat anti-nucléaire, et certains d'entre eux, regroupés avec d'autres dans le « Groupe de Bellevue », élaborent le Projet Alter en 1978. Celui-ci explicite la pensée qui sera ensuite celle de l'AFME, puisque les acteurs placés à la tête de cette institution à sa création [70] ont tous participé à la construction de ce projet. Son but est « d'évaluer ce que peut être pour la France un avenir énergétique axé, à long terme, sur l'énergie solaire et ne faisant pas ou très peu (et seulement à court terme) appel à l'énergie nucléaire » (Groupe de Bellevue, 1978, p. 1). La sortie à long terme du nucléaire est donc le point de départ de l'étude, et les auteurs adoptent la démarche de la « maîtrise de la demande » plutôt que de la politique de l'offre : il s'agit, en premier lieu, de limiter la consommation d'énergie, et ensuite d'évaluer les moyens de répondre à la « demande ». La position est celle d'une remise en cause de « l'impératif catégorique de croissance industrielle qui règne sur l'économie depuis deux siècles » et d'une substitution par « un impératif de stabilisation de l'activité productrice (et de la population) du microcosme humain ».
Ainsi, le projet Alter est proche de celui des auteurs du scénario de l'IEJE en 1975, mais,

contrôlables lorsqu'on met en œuvre des mesure réglementaires appropriées : limitation des émissions, suppression du plomb tétraéthyle, contrôle de la navigation pétrolière ». Au contraire, « [l]es coûts sociaux du nucléaire sont plus difficilement quantifiables et contrôlables » (Institut économique et juridique de l'énergie, 1975, p. 31-32).

70. Michel Rolant, Bernard Laponche, Benjamin Dessus, Philippe Chartier.

prospectant jusqu'à très long terme (2050), il est plus ambitieux en termes de contribution des énergies nouvelles au bilan national et de réduction de la production d'électricité nucléaire, bien que relativement modéré sur le court terme (6 Mtep pour 1985, contre 3 Mtep selon le Conseil central de planification). Il projette un arrêt total de la production d'énergie nucléaire dès 1985 et une diminution à long terme (2000 et plus) de la consommation d'énergies fossiles (charbon, pétrole, nucléaire, mais aussi géothermie). Il préconise une diversification des sources d'énergie en faveur des « énergies solaires » : d'abord biomasse et solaire thermique, ensuite solaire « électrogène » (centrales thermodynamiques et panneaux photovoltaïques), éolien. Il mise sur la diffusion à long termes de technologies encore en cours de mise au point (en particulier, centrales thermodynamiques et panneaux photovoltaïques). Enfin, il recommande une plus grande utilisation du potentiel hydro-électrique : grande et petite hydraulique, mais aussi énergie marémotrice [71]. La géothermie n'apparaît pas dans les sources mobilisées à très long terme, classée parmi les « énergies fossiles ».

Le projet Alter est élaboré par des scientifiques du domaine des mathématiques ou des sciences de la nature, dont certains spécialistes des sujets traités [72], et se montre soucieux de ne prendre en considération que des technologies qui ont prouvé leur caractère opérationnel. Il dispose de ce fait de la légitimité que procure l'allure scientifique d'une proposition [73]. En outre, la forme choisie, prospective et prescriptive, est similaire à l'approche par scénarios utilisée par les planificateurs (voir III), auxquels elle propose une alternative, qui constitue une voie (technique, économique) différente mais comparable. Enfin, si l'objectif explicite de ce scénario est un avenir à long terme non nucléaire, ses auteurs insistent sur le caractère apolitique de leur proposition [74]. Ils cherchent ainsi à se démarquer de leurs alliés non scientifiques et de leur position politique [75]. Ceci confère à leur projet une plus grande force aux yeux des pouvoirs publics. De plus, leur proposition est, en elle même, plus réformatrice que celle des écologistes qui s'opposent catégoriquement à toute utilisation de l'énergie nucléaire : elle propose un « scénario de transition » faisant appel à court et moyen terme au nucléaire. Comme le souligne Fressoz, (2013), la notion de transition énergétique, qui est popularisée à l'international vers 1975, « rendait le futur beaucoup moins anxiogène [que « crise énergétique »] en l'arrimant à une

71. Celle-ci est présentée comme solaire et « lunaire ».

72. Chartier, l'expert de la biomasse, est directeur de recherches à l'INRA et spécialiste de la croissance des végétaux. Dessus est , connaît bien le sujet du solaire thermodynamique.

73. Selon le témoignage de Chartier, la présence du mathématicien Philippe Courrège a contribué à avoir l'avantage qu'« au point de vue méthodologique, on a bâti quelque chose qui était carré ».
Chartier, p.d., Entretien réalisé le 16 juin 2016 au bureau du Syndicat des énergies renouvelables (Paris).

74. « On ne cherche ici ni à motiver, ni à situer politiquement l'option non nucléaire retenue : elle constitue un point de départ de l'étude (Groupe de Bellevue, 1978, p. 1) ».

75. « Ainsi, bien que les hypothèses retenues n'impliquent pas un projet politique au sens usuel du terme, ce travail peut apporter un certain éclairage sur les limites physiques d'un tel projet ». (Groupe de Bellevue, 1978, p. 2).

rationalité planificatrice et gestionnaire » [76]. Il prend également en compte des moyens de production centralisés, même si « le régime énergétique envisagé à long terme s'inscrit davantage dans la perspective d'une société « déconcentrée » et valorisant l'auto-subsistance que dans celle d'une hyper spécialisation » (Groupe de Bellevue, 1978, p. 2). Ainsi, dans le projet Alter, les énergies solaires s'intègrent à la fois dans le « *soft energy path* » et le « *hard energy path* ».

Selon Évrard, (2013, p. 84), à la suite du projet Alter, le mouvement écologiste s'est « empar[é] de la solution préconisée pour appuyer leur critique du programme nucléaire, reprenant le terme de « tout solaire » pour l'opposer au « tout nucléaire » attribué à EDF ». Ceci peut étonner au vu du positionnement du Groupe de Bellevue qui s'affirme lui-même à tendance « technocratique », et qui n'exclut pas des techniques envisagées les convertisseurs « centralisés », deux aspects combattus avec virulence par les militants des années 1970. Cependant, c'est bien le cas des Amis de la Terre par exemple, qui écrivent en 1978 un livre « Tout solaire ; une autre vie, une autre politique, d'autres énergies » et reconnaissent que « sans [l]e Projet Alter, le livre des Amis de la Terre n'aurait pas vu le jour » (Les Amis de la terre. Commission de l'énergie, 1978). C'est bien probablement l'aspect à la fois réaliste et prescriptif du projet Alter qui en fait un outil pour ces militants. Ceux-ci, intégrant à leur tour le vocabulaire et certains aspects de l'organisation du Commissariat général au Plan, constituent d'ailleurs une « Commission de l'énergie », qui réalise ce scénario, mais également des « bilans énergétiques » alternatifs, tels que celui d'une communauté autogérée. Ils détournent ainsi les outils de la planification nationale pour montrer l'intérêt des organisations locales. En l'occurrence, le bilan montre que les habitants de la communauté de l'Arche, comprenant 70 personnes cherchant à vivre en autonomie, présente une consommation individuelle environ quatre fois inférieure à la moyenne des Français (Les Amis de la terre. Commission de l'énergie, 1978). En tout cas, la position modérée et réformatrice du Groupe de Bellevue explique que des acteurs de la politique professionnelle aient pu également se l'approprier, pour des raisons électorales puis de gouvernement de la critique, avec la création de l'AFME.

#### 10.2.1.2 Intégration de la critique par les institutions : COMES, AFME

En effet, la création des institutions dédiées aux énergies nouvelles, mais aussi l'implication des acteurs du nucléaire dans l'utilisation de ces sources d'énergie, est motivée par l'objectif de contourner ou d'atténuer ces oppositions au programme nucléaire. C'est d'abord le cas du COMES. Selon Liébard, (2015), alors architecte à son compte dans l'habitat solaire, mais aussi selon Jean Deflandre, alors responsable à l'Agence natio-

76. Selon cet auteur, cette notion aurait ainsi été forgée pour « conjurer le thème de la crise énergétique » (Fressoz, 2013, p. 174).

nale pour la valorisation de la recherche (ANVAR) des questions d'énergie solaire, le volontarisme affiché par l'annonce de la création du COMES est ainsi lié aux enjeux des élections législatives de 1978, où la majorité gouvernementale est menacée par une possible cohabitation. Deflandre parle d'un « coup médiatique » (Ramunni et Deflandre, 2001). L'image positive dont bénéficie l'énergie solaire dans les mouvances écologistes et anti-nucléaire, dont le Parti socialiste se rapproche avec une partie non négligeable des électeurs, peut en effet jouer lors de cet événement politique. Le nom de Commissariat à l'énergie solaire n'est pas sans rappeler le Commissariat à l'énergie atomique. Il a très certainement été choisi pour donner l'impression que le gouvernement ne s'implique pas seulement dans un grand programme électronucléaire, mais aussi dans un « programme solaire ». Cette idée d'une annonce opportuniste est renforcée par le fait que, les élections passées, le ministre de l'Industrie, réduit les effectifs programmés pour l'année suivante [77].

L'AFME a ensuite été un moyen d'affaiblir l'opposition au programme nucléaire et de l'intégrer au système techno-politique. C'est, selon Topçu, (2013, p. 121-125), un cas typique de « récupération de la critique ». En période d'élections présidentielles le sujet des énergies nouvelles est devenu incontournable dans les discours des partis politiques pour les élections. Ce sujet rentre dans la stratégie du Parti socialiste pour séduire une partie de l'électorat sensible aux questions environnementales. Associé à la CFDT dont il est proche, le PS base son programme de 1981 sur un discours anti-nucléaire et pro-renouvelables. Une fois élu, le PS trahit ses promesses d'un affaiblissement du programme nucléaire, mais il répond aux attentes de son électorat, et tente d'apaiser les oppositions, en créant l'AFME. Ainsi, selon le premier directeur de l'AFME lui-même, celle-ci fut créée « à titre de compensation pourrait-on dire » par le nouveau gouvernement socialiste qui n'a pas tenu ses promesses vis-à-vis du nucléaire (Laponche, 2015). À la tête de celle-ci, le gouvernement Mauroy place certaines figures du militantisme anti-nucléaire, dont une partie des auteurs du projet Alter. Cette concentration d'acteurs importants du militantisme anti-nucléaire dans une structure disposant de petits moyens est une manière d'affaiblir leur opposition (Topçu, 2013 ; Évrard, 2013 ; Liébard, 2015, p. 34). La « flamme » (Évrard, 2013) de militantisme anti-nucléaire et pro-renouvelables ainsi entretenue est suffisamment vulnérable pour que le gouvernement issu du changement de majorité, en 1986, l'affaiblisse ensuite considérablement. C'est ainsi que tous les éléments étiquetés anti-nucléaires sont chassés de l'AFME. Il est significatif qu'à la tête de cette agence, le seul acteur du Groupe de Bellevue qui ait été épargné par cette purge soit Philippe Chartier qui, selon ses propres dires, avait un positionnement politique moins affirmé que ses collègues [78].

77. De 40 salariés à 30 salariés, sous prétexte d'une plus grande « légèreté » que cette mesure donnerait à la structure (Pehlivanian, 2014, p. 309).

78. Chartier, p.d., Entretien réalisé le 16 juin 2016 au bureau du Syndicat des énergies renouvelables (Paris).

La communication par le biais des nouvelles agences d'objectifs est un autre mode de gouvernement de la critique. Ces agences sont en effet dotées d'un budget de communication très important, et, selon certains acteurs, disproportionnés par rapport à ce qui devrait être affecté à la recherche pour la mise au point ou l'amélioration des technologies prônées (Pehlivanian, 2013). La campagne de communication déployée, notamment par le biais d'affiches dont le vocabulaire graphique est parfois emprunté aux milieux contestataires, est une manière d'exposer une réelle activité des pouvoirs publics en faveur de l'énergie solaire. Au même moment, le programme nucléaire se déploie dans le silence, avec des moyens et une ampleur incomparables [79]. En outre, les messages relayés dans ces affiches, tout en imitant le style des milieux contestataires, sont modifiés en faveur de leur neutralisation : alors que les affiches de ces derniers prônent l'action, représentant des techniques à l'usage, celles de l'AFME, désincarnées et allégoriques, incitent plutôt à la passivité . Enfin, plusieurs affiches de l'AFME représentent l'énergie solaire dans un système énergétique comprenant les énergies nouvelles, mais aussi les énergies fossiles (pas, par contre, l'énergie nucléaire), les intégrant dans le système en place comme des sources d'énergie comme les autres, et leur enlevant, de ce fait, leur caractère d'alternative politique (Pehlivanian, 2013, p. 48-50).

#### 10.2.1.3 EDF, le CEA et les énergies nouvelles

Les acteurs de l'énergie nucléaire en France que sont EDF et, quoique en moindre mesure et de manière différente, le CEA, ont eu parmi leurs motivations à la participation à l'effort national envers l'énergie solaire de rendre invisible ou acceptable leur rôle dans le développement contesté des technologies nucléaires.

EDF est, en surface, favorable aux énergies nouvelles, et en particulier à l'énergie solaire. Mais c'est pour l'entreprise, chargée d'une mission de service public, une manière de rendre acceptable le programme nucléaire largement contesté, et de montrer un certain « volontarisme » envers une source d'énergie qui a la faveur du public et pour lequel le gouvernement affiche un engagement. L'action d'EDF apparaît ainsi bien plutôt comme un frein à un développement conséquent des énergies nouvelles sur le territoire métropolitain, où le nucléaire doit devenir la source d'énergie majoritaire. Ainsi, EDF finance des recherches et des projets dans toutes les énergies nouvelles à la mode (solaire, géothermique, éolienne, marémotrice), ce qui représente une part significative des efforts financiers français en ce sens. Elle est présente dans presque toutes les nouvelles institutions consa-

79. Pour ne parler que des moyens financiers, entre 1975 et 1980, les dépenses d'EDF ont été de 120 millions de francs pour l'ensemble des énergies nouvelles (dont la moitié pour l'énergie solaire) contre 50 milliards de francs pour l'énergie nucléaire (Pehlivanian, 2014, p. 248). En termes de puissance installée, le nucléaire doit constituer, en 1985, 25% de la production nationale, contre 2% pour les énergies nouvelles (Bouvier, 2012b).

crées aux énergies nouvelles : représentée dans les conseils d'administration de l'AEE, partenaire du COMES, de l'AFME, du PIRDES, pour certains projets. Mais le budget consacré aux énergies nouvelles est minime au regard du budget de l'énergie nucléaire. En outre, la majorité des efforts (financiers) sont consentis envers la production d'électricité solaire, destinée à des applications hors métropole. Certains témoins du projet de centrale Themis, selon lesquels EDF aurait été hostile à sa réussite, considèrent d'ailleurs la contribution de l'entreprise publique comme plutôt contre-productive : les défauts techniques de la centrale thermodynamique de Targassonne auraient été dus à des négligences, voire à une volonté d'EDF de discréditer cette technologie [80]. De même, d'anciens acteurs de l'AFME mentionnent le rôle inhibiteur d'EDF envers l'action de la nouvelle agence [81], que les membres tentent de contourner (Liébard, 2015, p. 37 ; Laponche, 2015, p. 53) [82]. Si EDF contribue aux recherches sur l'habitat solaire, cela ne doit pas faire perdre de vue la part minuscule que lui réserve l'entreprise par rapport aux installations de chauffage électrique [83], pointées du doigt au même titre que le programme nucléaire par certains militants. Par ailleurs, EDF finance des recherches sur la géothermie « haute température » qui, comme les centrales thermodynamiques, représente un marché hors métropole (et en premier lieu dans les DOM-TOM) [84], mais l'entreprise ne participe pas du tout aux recherche sur le chauffage géothermique en France. Si EDF figure comme experte de l'éolien, elle oriente les politiques des énergies nouvelles vers l'absence d'électricité éolienne sur le réseau électrique, cantonnant le rôle des aérogénérateurs à des applications hors métropole. En ce qui concerne l'énergie marémotrice, dont elle peut s'enorgueillir de posséder un savoir-faire exclusif, son implication se limite désormais au fonctionnement de l'usine de la Rance et à des études infructueuses sur l'« aménagement des îles Chausey », pour des raisons environnementales (cf 11.1).

Dans une moindre mesure, on peut mentionner le CEA parmi les acteurs ayant utilisé les énergies renouvelables pour compenser l'image négative de son implication dans les technologies nucléaires, et, plus précisément, dans la bombe atomique. Ainsi, la participation du CEA dans un programme d'équipement en panneaux photovoltaïque en Polynésie française avait parmi ses objectifs de compenser la barbarie les essais d'explo-

80. Témoignages d'acteurs du CNRS ayant participé au projet Themis, recueillis par Denis Guthleben en 2011 et 2012, dont l'historien a bien voulu me donner les transcriptions.

81. Dont un ancien administrateur de l'AFME interrogé par Topçu, (2013).

82. Ainsi, selon Laponche, dans la campagne de promotion des économies d'énergie, l'AFME évite d'encourager explicitement les économies d'électricité (Laponche, 2015, p. 53).

83. D'après un rapport de 1978 sur l'énergie solaire par le Service d'études et de promotion de l'énergie solaire, « il paraît optimiste de penser que le solaire puisse contribuer à 1% des besoins thermiques de l'habitat en l'an 2000 » (Pehlivanian, 2014, p. 246). À l'inverse, la proportion de logements équipés en chauffage électrique passe, de 1974 à 1982, de 10% à 50%, et de 1982 à 1988, de 50% à 72% (Bouvier, 2012b, p. 38).

84. Elle participe à un projet de centrale électrique à Bouillante, par un accord avec la société Eurafrep, initiatrice du projet, qui travaille avec la société locale de production d'électricité (Ministère de l'Industrie, 1977, p. 220). EDF finance le projet à hauteur de 54 MF en 1983 et 99 MF en 1984 (Rapport d'EDF reproduit par Pehlivanian, (2014, p. 781)). Cette centrale est toujours en activité.

sions nucléaires effectués dans le sous-sol de ces territoires — profitant de la docilité d'une population dispersée, peu informée et impuissante face à une telle décision (et qui en subit encore les conséquences aujourd'hui) (Akrich, 1988, Liébard, 2015).

Ainsi, au cours des années 1970-1980, les énergies nouvelles sont ré-appropriées dans le projet politique classique qui voit dans la croissance économique et dans le progrès technique un bien universel. Les énergies nouvelles, qui étaient devenues un étendard des écologistes anti-nucléaires, deviennent rapidement consensuelles, comme les économies d'énergie en faveur desquels tous les acteurs se positionnent (Rolant, 1985b). Jean Fourastié lui-même, figure emblématique des « Trente glorieuses » dont l'idéologie s'oppose à celle des militants écologistes, ou du moins les plus radicaux (ceux qui s'opposent à l'injonction à la croissance, énergétique ou économique), se fait le défenseur de l'énergie solaire : si celle-ci subit la « lenteur du progrès », elle « est réellement la source, aussi durable que la vie terrestre, où l'homme des prochains millénaires puisera librement sinon toute l'énergie qu'il désirera consommer, du moins la plus grande partie de l'énergie qu'il consommera en fait » (préface à l'ouvrage de Vaillant, (1980)).

Les énergies nouvelles sont ainsi progressivement intégrées dans les programmes énergétiques nationaux et apparaissent pour la première fois dans les bilans énergétiques officiels. Ceci révèle non seulement les résultats de l'effort qu'ont déployé les acteurs des énergies nouvelles pour la mise en place de nombreux convertisseurs, mais aussi peut-être d'une stratégie d'affichage de la part de ces acteurs souhaitant prouver leur efficacité, et de la part des acteurs dominants de la politique énergétique souhaitant faire preuve d'un volontarisme envers ces sources d'énergie appréciées des citoyens.

### 10.2.2 Politique énergétique : des convertisseurs « basse température » pour le territoire national (biomasse, géothermie, solaire)

Cette sous-section étudie la place des énergies nouvelles dans la politique énergétique nationale. Elle étudie d'abord la place des énergies nouvelles dans la prospective énergétique officielle à partir des rapports des Commissions de l'énergie du Commissariat général au Plan, qui sont un indicateur des grandes tendances de la politique énergétique. Elle explicite ensuite les actions que les nouvelles institutions dédiées aux énergies nouvelles ont mises en œuvre pour mettre en place des convertisseurs géothermiques, solaires et de biomasse « basse énergie », ainsi que pour les petites installations hydroélectriques, sur le territoire français. Elle présente enfin une série de cartes des ressources françaises en énergies nouvelles éditées par la Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale, qui illustre la répartition territoriale des convertisseurs d'énergies nouvelles des

acteurs de la politique énergétique, en rupture avec celle de la période (1940-1970).

#### 10.2.2.1 Les énergies nouvelles dans les scénarios et bilans prospectifs (1975-1990)

Cette sous-section étudie les scénarios prospectifs qu'ont élaborés les commissions de l'énergie désignées par le Commissariat général au Plan pour les les VII^e^ (1976-1980), VIII^e^ (1981-1985) et IX^e^ (1984-1989). Le X^e^ et dernier Plan (1989-1992) est étudié pour mémoire : l'absence de Commission de l'énergie pour son élaboration suffit à montrer le désintérêt des politiques publiques pour l'énergie, avec le contre-choc pétrolier et l'achèvement du programme nucléaire. Ils permettent d'étudier les tendances dans la manière dont les acteurs de la politique énergétique ont intégré les convertisseurs d'énergies nouvelles dans leurs programmes. Les bilans énergétiques qu'ils contiennent indiquent également l'évolution de la consommation d'énergies nouvelles en France, et la prépondérance du bois-énergie dans l'augmentation de cette consommation. Cette « énergie nouvelle » apparaît en effet dans les bilans énergétiques prospectifs et rétrospectifs à partir de 1980 et contribue à faire augmenter la part des énergies nouvelles dans les chiffres de la consommation nationale.

Dans les années 1970, la planification énergétique connaît, à l'instar de la planification nationale, des changements dans ses méthodes et ses objectifs . Lors des décennies précédentes, elle donnait des objectifs de production, et se basait sur des prévisions construites à partir d'extrapolations rétrospectives ; à partir des années 1970, la planification « en crise » tend à devenir prospective. Elle ne prédit plus l'avenir à partir du passé, imagine différents futurs et les exprime dans des « scénarios », en fonction de différents paramètres conjoncturels (Dupas, 2013, p. 16-17), mais aussi en fonction d'objectifs politiques plus ou moins explicites. Selon Andersson et Prat, (2015, p. 11), ce « « souci d'avenir » [...] n'est pas tant une réflexion sur les futurs possibles » du présent mais une tentative de maîtrise du changement social, exacerbée par la crise de mai 1968 ». La planification introduit « l'horizon du long terme dans le processus de décision publique », le long terme étant lui-même « un dispositif de production de sens autour de certaines promesses et menaces futures, qui seront ensuite mobilisées pour légitimer l'action étatique ainsi que des formes de rationalisation du social » (Andersson et Prat, 2015, p. 10-11). Les scénarios engendrés par les acteurs de la planification constituent ainsi à la fois des outils d'aide à la décision et de gouvernement du changement social . Les scénarios prospectifs se multiplient dans les années 1970, de la part d'acteurs variés : acteurs officiels de la politique énergétique, mais aussi opposants à ce programme. Ils montrent à la fois les doutes sur la capacité à anticiper la conjoncture énergétique, la conscience que les choix énergétiques reflètent des choix politiques (contestables), et la volonté de proposer des

alternatives à la politique énergétique officielle pour l'infléchir (cf 10.2.1).

Les « énergies nouvelles » apparaissent dans les bilans énergétiques et les scénarios prospectifs des rapports des commissions de l'Énergie désignées pour l'élaboration des Plans successifs. Ces bilans résultent de la prise en compte des énergies nouvelles de la part des acteurs de la politique énergétique, à l'issue de décisions prises de manière parfois conflictuelle entre ses différents protagonistes [85] qui ne sont pas l'objet de cette section. Les rapports et leurs bilans prospectifs sont ici étudiés comme révélateurs des inflexions de la politique des énergies nouvelles de ces deux décennies, et ce, même si les préconisations qu'ils donnent n'ont pas toujours été suivies [86]. La prise en considération quantitative (objectifs chiffrés), mais également qualitative (sources d'énergie désignées) des énergies nouvelles varie en effet en fonction des Plans, ce qui révèle des changements dans les orientations des programmes en faveur de ces sources d'énergie.

Les Tables 10.2, 10.4, 10.5, 10.6 représentent les chiffres donnés dans les rapports des commissions de l'énergie successifs (il n'y a pas de chiffres dans le Xe Plan). Elles contiennent chacune un bilan énergétique, un objectif un moyen terme (environ dix ans), et souvent, une étape à court terme et l'objectif 2000 qui reste, de 1975 à 1983, l'horizon symbolique du long terme. Le tableau présenté en Figure 10.3 synthétise les bilans et scénarios prospectifs donnés successivement par la Commission de l'énergie.

Les paragraphes suivants précise le statut de ces tableaux et en donne une analyse en termes de politique énergétique et, le cas échéant, de stratégie d'affichage.

**VIIe Plan (1976-1980)** La Commission de l'énergie du VIIe Plan est créée en avril 1975 afin de donner son avis sur des objectifs déjà déterminés par le Conseil central de planification. Elle publie deux rapports, l'un en juillet 1975 et l'autre quelques mois plus tard en 1976. Elle n'a qu'un rôle consultatif, et, d'après les témoignages de certains de ses membres insérés en annexe du rapport, en plus de n'avoir eu que trois mois pour répondre à la demande du Conseil, elle ne voit pas ses préconisations pleinement prises en considération par le gouvernement [87]. Les chiffres des bilans et prospectives qui apparaissent dans ses rapports émanent ainsi du Commissariat général au Plan, et le rôle consultatif de la Commission se limite à commenter les choix effectués par le Commissariat et préconiser

85. À savoir, toujours, acteurs traditionnels de l'énergie (publics : ministère de l'Industrie, EDF, GDF, CEA, etc ; industriels : Creusot-Loire, Shell, Elf, etc), de la recherche (CNRS), mais aussi syndicaux (CFTC, CGT, CFDT), et représentants des collectivités territoriales (voir Annexe).

86. Les VIIIe et IXe Plans n'ont en effet finalement pas été adoptés, à cause des changements successifs de gouvernement (Dupas, 2013, p. 21-22).

87. Ainsi, selon Michel Rolant, présent en tant que responsable syndical CFDT, « Il est [...] inadmissible que le gouvernement ait pris des décisions importantes dans ce domaine à la fin du mois de juillet, avant même que le rapport de la Commission lui ait été remis (Commissariat général au Plan. Commission de l'énergie, 1975). »

| Plan | Source d'énergie | Usage | Objectifs de consommation | |
|---|---|---|---|---|
| VII (1976-1980) | Géothermie | Chauffage logements : Basse température (résidentiel) | Immédiat | |
| | | Production électricité : haute température (industrie) | Pas possible en France | |
| | Solaire | ECS, chauffage (résidentiel) | Applications d'ici 1980 | |
| | | Photovoltaïque : balises (navigation marimitime, aérienne) | Applications d'ici 1980 | |
| | | Production électricité : centrales thermiques (industrie) | 1980 : CNRS, prototype 25 MW | |
| | Vent | Production électricité (sites isolés) | Immédiat | |
| | Méthane, biogaz | Besoins domestiques agriculteurs (résidentiel) | 1977 : applications "industrielles" | |
| VIII (1981-1985) | Energies vertes: Bois | Chauffage collectif, individuel (résidentiel) Alimentat° chaudière (industrie) | 1990 : 7-8Mtep/an | 1985 :5.5;7 |
| | Paille | Déshydratation fourrage (agriculture) | 1985 : 2Mtep/an | 1990 : 7;10 |
| | Biogaz | Alimentat° chaudière (agriculture) | | 2000 : 10;15 |
| | Géothermie | Chauffage, ECS (résidentiel) Chauffage serre (agriculture) | 1985 : [0.2;0.4] Mtep/an; 1990 : [0.6;0.9] Mtep/an ; 2000 : [1.5;2] Mtep/an | |
| | Solaire | Chauffage, ECS (résidentiel) Chauffage serre (agriculture) | 1985 : 0.5;0.8Mtep/an; 1990 : 1.3;2.2Mtep/an ; 2000 : 3;5Mtep/an | |
| | Microcentrales | Production électricité (industrie locale) | 1985 : 0.1;0.1Mtep/an ; 1990 : 0.2;0.4Mtep/an ; 2000 : 0.8;1Mtep/an | |
| | Eolien | Product° élec (site isolé) | 1990 : 0;0.1Mtep/an | |
| IX (1984-1989) | Géothermie | Chauffage, ECS (résidentiel) Chauffage serre (agriculture) | 1982 : 0.05 Mtep/an ; 1990 : 0.6; 0.8 Mtep/an ; 2000 : 2.5 Mtep/an | |
| | Biomasse sèche | Chauffage collectif, individuel (résidentiel) Alimentat° chaudière (industrie) | 1982 : 2.5 Mtep/an ; 1990 : 4.8; 5.1 Mtep/an ; 2000 : 9.6 Mtep/an | |
| | Micro-centrales | Production électricité (industrie locale) | 1982 : 0.1 Mtep/an ; 1990 : 0.3 Mtep/an ; 2000 : 0.8 Mtep/an | |
| | Déchets agric., ind. & urbains | Production électricité (industrie locale) | 1982 : 0.9 Mtep/an ; 1990 : 1.8 Mtep/an ; 2000 : 2.1 Mtep/an | |
| | Solaire BT | Chauffage, ECS (résidentiel) | 1982 : - ; 1990 : 0.2 Mtep/an ; 2000 : 1 Mtep/an | |
| | Carburol | Alimentation moteurs (transports) | 1982 : - ; 1990 : 0.5; 0.6 Mtep/an ; 2000 : 2.5 Mtep/an | |
| | Solaire bioclim. | Chauffage, climatisation (résidentiel) | 1982 : - ; 1990 : 1.2;1.4 Mtep/an ; 2000 : - | |

FIGURE 10.3 – Les énergies nouvelles dans les bilans et scénarios prospectifs du Commissariat général au Plan

certaines orientations (par exemple, allouer plus d'argent à la mise en place d'installations géothermiques). Les Tables 10.2 (en Mtep) et 10.3 (en %) reproduisent ces tableaux, qui contiennent donc un bilan (état en 1973), un objectif à moyen terme (1985) et un chiffre prospectif à long terme (2000).

La part respective de chacune des énergies nouvelles n'est pas détaillée. Ceci s'explique de plusieurs façons : il n'y a pas, parmi les membres de la Commission, d'acteur des énergies nouvelles (que ce soit, par exemple, du CNRS, de la DGRST, de la Délégation aux énergies nouvelles ou du Comité géothermie) ; les chiffres du Conseil semblent avoir été eux-mêmes donnés « à la louche » ; les possibilités « économiques » des énergies nouvelles pour le court terme sont jugées très faibles, et incertaines pour l'avenir. Ainsi, mon analyse de la planification énergétique porte, en ce qui concerne le VII[e] Plan, sur les propositions

89. COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU PLAN. COMMISSION DE L'ÉNERGIE, 1976, p. 18.

93. Ces chiffres sont, tout comme les chiffres « évolution 2000 », des propositions de la Commission de l'énergie pour atteindre les objectifs du Conseil central de planification (COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU PLAN. COMMISSION DE L'ÉNERGIE, 1975).

93. Ces chiffres émanent du Conseil central de planification.

TABLE 10.2 – VII[e] Plan : bilan de la consommation énergétique en France en 1973 et objectifs pour 1985 (en Mtep) [89]

| Source d'énergie | État en 1973 | Objectifs pour 1985 |
|---|---|---|
| Pétrole | 116 | 96 |
| Gaz | 15 | 37 |
| Charbon | 30 | 30 |
| Énergies nouvelles | 0 | 3 |
| Électricité primaire dont nucléaire | 14 | 74 |
| Total | 175 | 240 |

TABLE 10.3 – VII[e] Plan : bilan de la consommation énergétique en France en 1975 et objectifs pour la fin du siècle (en %)

| Source d'énergie | État en 1975 | Étape en 1980 [92] | Objectifs pour 1985 [93] | Tendance 2000 |
|---|---|---|---|---|
| Énergies fossiles | 90 | 85 | 68 | 51 à 67 |
| Énergies nouvelles | - | - | 1 | 3 à 7 |
| Hydraulique | 8 | 7 | 6 | 4 à 5 |
| Nucléaire | 2 | 8 | 25 | 26 à 36 |
| Total | 100 | 100 | 100 | 100 |

chiffrées du Conseil central de planification puis du Commissariat général au Plan, et sur les commentaires faits, pour chaque filière d'énergies nouvelles, par les membres de la Commission.

Les objectifs du Conseil central de planification en termes d'énergies nouvelles sont nuls à court terme (cinq ans). À moyen terme, ils sont faibles au regard des économies de pétrole et, encore plus, de l'augmentation de la production d'électricité nucléaire ambitionnées : 3 Mtep (1% de la consommation totale) sont projetés pour 1985, alors que les économies de pétrole projetées s'élèvent à 20 Mtep et l'augmentation de la production d'électricité nucléaire à au environ 80 Mtep [94]. À long terme, les tendances visées sont plus ambitieuses : l'objectif est de 3 à 7% du bilan énergétique total. L'état d'esprit exprimé par la Commission est qu'« il importe peu, pour le bilan global énergétique de l'époque, qu[e le pourcentage] n'atteigne que 0,5% ou au contraire qu'il s'élève à 1,5 ou 2% » mais que, « s'agissant de techniques encore dans l'enfance pour la plupart, il est certain, ou

94. La Table 10.2 ne donne que le chiffre de l'« électricité primaire », mais le plan Messmer prévoit bien une augmentation de la production d'électricité exclusivement partir du nucléaire. L'« électricité nucléaire » pourrait bien être une forme de camouflage par les mots.

tout au moins très hautement probable, que vers la fin du siècle elles pourront jouer un rôle très sensiblement plus important dans [l']approvisionnement [français], à condition que dès [lors] d'importants programmes de recherche et d'expérimentation soient lancés avec un financement allant en se développant dans les années à venir. » Autrement dit, les membres de la Commission considèrent qu« une grande part des actions à mener relève encore de la recherche et échappe au domaine strict de compétence de la Commission » (Commissariat général au Plan. Commission de l'énergie, 1976, p. 70).

Les énergies nouvelles ici mentionnées sont la géothermie, le solaire, mais aussi les marées, le vent et les gaz de fermentation ou « biogaz ». Les deux seuls types d'installations la Commission envisage des applications immédiates sont les installations d'utilisation directe des chaleurs géothermique et solaire. Une première installation de chauffage centralisé par « doublets géothermiques » a en effet été mise en place en 1970 dans un ensemble de bâtiments d'une Ville nouvelle, Melun l'Almont, et est considérée comme une opération-type qu'on peut multiplier dans les différentes régions où une ressource géothermique « basse énergie » a été identifiée (voir 10.1.1). Pour l'énergie solaire, il existe sur le marché des chauffe-eau proposés par quelques petites entreprises, dont le surcoût est cependant encore important par rapport aux solutions « classiques ». Des prototypes de « maisons solaires » ont en outre déjà été construites en France. Les cellules photovoltaïques et les centrales thermodynamiques sont considérées comme des technologies d'avenir pour le long terme, à mettre au point par des efforts de recherche et développement. Le second rapport ne mentionne que le solaire thermodynamique, et invoque en premier lieu la possibilité d'exporter la technologie française, qui possède une certaine « avance » sur le sujet, dans les pays ensoleillés (Commissariat général au Plan. Commission de l'énergie, 1976, p. 70).

L'énergie marémotrice a fait l'objet d'une commission à part, la « Commission d'études de la production d'énergie d'origine hydraulique et marémotrice, constituée à l'initiative du Ministère de l'Industrie et de la recherche et présidée par les Sénateur Pintat ». En effet, elle est rangée parmi les « énergies renouvelables », et non « nouvelles ». Cette Commission étudie en fait le projet particulier des îles Chausey, encore appelé « projet Caquot », qui est alors ressorti des vieux dossiers d'EDF, pour y être presque aussitôt définitivement rangé. La conclusion de la Commission Pintat est en effet reprise par la Commission énergie du Plan : « Il semble [...] que les chances d'atteindre une rentabilité convenable soient faibles dans l'état actuel du projet. Il s'agit d'ailleurs d'un projet qui dépasse largement le seul cadre énergétique et met en cause tout l'aménagement d'une région, notamment sous les aspects industriels et touristiques ». Un argument certainement plus important est le désintérêt d'EDF pour la production de grandes puissances électriques dans le réseau métropolitain autrement que par l'énergie nucléaire, dans laquelle l'entreprise a jeté tout son dévolu. C'est aussi la raison pour laquelle il n'est pas question de faire des recherches

sur les grands aérogénérateurs : l'énergie éolienne n'est mentionnée que pour mémoire, les auteurs du rapport recommandant des efforts de recherche pour le stockage de l'énergie, donc pour des installations déconnectées du réseau.

Pour conclure à propos des énergies nouvelles, la Commission recommande donc qu'un effort financier conséquent permette : « de lancer un nombre suffisant de réalisations géothermiques afin d'en vérifier les possibilités économiques » (elle ne donne pas de chiffres) et « de poursuivre les recherches théoriques et les mises au point pratiques pour les autres énergies, et plus particulièrement pour l'énergie solaire ».

**VIII^e Plan (1981-1985)** La Commission de l'énergie du VIII^e Plan est constituée suite au deuxième choc pétrolier, en septembre 1979, pour formuler des recommandations afin de « mener à bien une politique énergétique volontariste de croissance sobre en énergie, sobre en pétrole [...] et faisant concourir le plus possible la politique énergétique au développement de l'emploi » [95]. Elle est également consultative, mais elle bénéficie de plus de considération de la part du gouvernement que la précédente : elle est constituée en amont des décisions quant à la politique énergétique, et dispose de plusieurs mois pour rendre ses résultats. La place accordée aux énergies nouvelles y est plus grande : parmi les cinq groupes de travail constitués, un groupe est chargé d'étudier spécifiquement « l'apport des énergies nouvelles à court terme (échéance VIII^e Plan) et à plus long terme (1990 et 2000)) » [96]. Ce groupe de travail comprend des représentants du nouveau COMES [97] et l'on retrouve des acteurs de ces énergies nouvelles [98] [99]. Par ailleurs, les scénarios ont été établis par le COMES.

Le tableau 10.4 représente les objectifs retenus par le Gouvernement après consultation de la Commission. Le tableau 10.5 reproduit les préconisations données par la Commission de l'énergie vis-à-vis de la production d'énergies nouvelles, qui sont issues de travaux du COMES. En termes quantitatifs, les objectifs à court et moyen termes retenus pour le Gouvernement sont plus ambitieux que pour le Plan précédent : 6 Mtep pour 1985 (6.3 à 8.3 Mtep recommandés par la Commission), 10 à 12 Mtep pour 1990 contre 3 Mtep pour 1985 et 3 à 7 Mtep en tendance pour 2000 dans le VII^e Plan. Si l'on regarde les prospectives par secteur, la majorité concerne le secteur résidentiel et tertiaire (7 Mtep fixés sur 10 à 12 pour 1990), le reste étant partagé entre l'industrie (1 Mtep), l'agriculture (1 à 2 Mtep) et les transports (1 à 2 Mtep).

95. Commissariat général au Plan. Commission énergie et matières premières, 1980b, p. 22.
96. Commissariat général au Plan. Commission énergie et matières premières, 1980b, p. 22.
97. L'un, Toth, est co-animateur du groupe, avec Tessier du ministère de l'Industrie, et l'autre, Drouot, rapporteur.
98. Par exemple, un représentant du BRGM pour l'énergie géothermique, et deux représentants du ministère de l'Agriculture pour la biomasse.
99. Commissariat général au Plan. Commission énergie et matières premières, 1980b, p. 261.

Mais, contrairement au rapport pour le VII^e Plan, parmi ces énergies nouvelles figurent les « énergies vertes » (la « biomasse »), mais aussi la « mini- » ou « micro-hydraulique », qui sont classée plus généralement au sein des « énergies solaires » par le COMES. Les énergies vertes désignent ici un ensemble contenant le bois, la paille et les matières agricoles susceptibles de produire du « biogaz » (le méthane) par fermentation. Cet ensemble hétérogène regroupe donc des sources d'énergie pour lesquelles des convertisseurs existent déjà sur le marché et sont en usage (le bois brûlé dans les poêles, cheminées et chaudières), d'autres dont les procédés de fabrication et/ou d'utilisation sont presque au point (voir 10.2.2.2). Pour ce qui concerne la mini et la micro-hydraulique, il s'agit des chutes d'eau équipées en turbines hydroélectriques dont la puissance est inférieure à 2 MW et pour lesquelles, comme pour le bois, des installations existent déjà, et des convertisseurs disponibles sur le marché (voir 10.2.2.2.1).

TABLE 10.4 – VIII^e Plan : bilan de la consommation énergétique en France en 1979 et objectifs du Gouvernement pour 1990 (en Mtep)(COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU PLAN. COMMISSION ÉNERGIE ET MATIÈRES PREMIÈRES, 1980c, p. 39 ;117)

| Source d'énergie | État en 1979 | Objectifs pour 1985 | Objectifs pour 1990 |
|---|---|---|---|
| Pétrole | 108.5 | 87 | 68 à 80 |
| Gaz | 23 | 30 | 37 à 42 |
| Charbon | 34.5 | 34 | 28 à 33 |
| Énergies nouvelles | 3 | 6 | 10 à 12 |
| Hydraulique | 16 [101] | 14 | 14 |
| Nucléaire | 8.5 | 43 | 73 |
| Total | 193.5 | 219 | 242 |

Or, les énergies vertes représentent une part écrasante du bilan prospectif pour les court, moyen et long termes (5.5 à 7 Mtep sur 6.3 à 8.4 pour 1985 ; 7 à 10 Mtep sur 9.3 à 13.8 Mtep pour 1990 ; 10 à 15 Mtep sur 2.35 à 15.4 Mtep pour 2000), et les énergies géothermique et solaire y prennent beaucoup moins de place (voir 10.5). La mini-hydraulique, bien qu'également minoritaire, fait gonfler les chiffres prospectifs. L'horizon 1985 projette ainsi 7 Mtep d'énergies vertes, 0.8 Mtep d'énergie solaire, 0.4 Mtep d'énergie géothermique et 0.2 Mtep pour les mini-centrales hydrauliques.

101. L'abaissement de la consommation d'électricité hydraulique entre 1979 et 1985 peut paraître surprenant. Il est en effet question, dans le rapport, d'augmenter la puissance installée ainsi que la puissance disponible, essentiellement par des installations de pompage régularisant le production (COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU PLAN. COMMISSION ÉNERGIE ET MATIÈRES PREMIÈRES, 1980c, p. 84). Le rapport stipule ainsi que « la quantité d'énergie disponible [...] passera de 14 Mtep en 1979 [et non 16] à environ 15 ou 16 à la fin du siècle ». Ce n'est pas stipulé dans le rapport, mais il s'agit probablement de supprimer une petite part d'énergie hydraulique importée : dans un autre rapport, on peut lire qu'en 1978, il y a une production nationale de 15 Mtep par an, pour une consommation nationale de 16 Mtep par an (COMITÉ BIOMASSE-ÉNERGIE, 1980, p. 9).

TABLE 10.5 – VIII[e] Plan : « Évaluation des productions d'énergies nouvelles d'ici 2000 » par la Commission de l'énergie (en Mtep)(COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU PLAN. COMMISSION ÉNERGIE ET MATIÈRES PREMIÈRES, 1980c, p. 87)

| Source d'énergie | 1985 | 1990 | 2000 |
|---|---|---|---|
| Géothermie | 0.2 à 0.4 | 0.6 ; 0.9 | 1.3 à 2 |
| Énergies vertes | 5.5 à 7 | 7 ;10 | 10 à 15 |
| Énergie éolienne | - ; - | - ; 0.1 | 0.2 à 10 |
| Micro-centrales | 0.1 à 0.2 | 0.4 ; 0.6 | 0.6 à 1 |
| Énergie solaire | 0.5 à 0.8 | 1.3 ; 2.2 | 3 à 5 |
| Total | 6.3 à 8.4 | 9.3 ; 13.8 | 15.4 à 23.2 |

L'énergie éolienne n'apparaît pas dans le court terme : elle est incluse dans les prospectives comme une solution à long terme, et ce pour une très faible contribution. En effet, les convertisseurs éoliens ne sont considérés comme pratiquement utilisables et intéressants en Métropole qu'au niveau des sites isolés tels que les îles. Les aérogénérateurs en question sont de petites et moyennes puissances, et ne sont pas conçus pour être couplées au réseau national interconnecté. C'est dans ce cadre qu'EDF pilote le test d'un aérogénérateur de 100 kW à Ouessant.

Les convertisseurs solaires sollicités dans ces prospectives sont les convertisseurs directs basse énergie pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire. Il n'est pas question de solaire thermodynamique ou photovoltaïque, même si ceux-ci sont étudiés dans les programmes de recherche du COMES.

Le combustible ancestral qu'est le bois devient donc la ressource la plus sollicitée pour répondre aux objectifs de production d'« énergies nouvelles », conformément aux orientations promues par le COMES. Celui-ci considère en effet que « parmi les modes d'exploitation indirecte, [...] l'utilisation de la biomasse [est] la mieux à même de prendre une extension apte à assurer la fourniture de 8 Mtep [d'énergies nouvelles] en 1990 » (COMITÉ BIOMASSE-ÉNERGIE, 1980). Chose amusante, ce nouvel intérêt pour le bois fait rétrospectivement apparaître une production d'« énergies nouvelles » non nulle pour l'année en cours dans le bilan énergétique national. Ainsi, « [l]es données de 1979 sont évaluées à 193.5 Mtep et non à 190.5 Mtep, comme précédemment, en raison de la prise en considération de 3 Mtep d'énergie produite à partir du bois, non comptabilisées jusqu'à présent » (COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU PLAN. COMMISSION ÉNERGIE ET MATIÈRES PREMIÈRES, 1980c, p. 39)). Alors que son usage, pourtant toujours bien réel, n'était pas comptabilisé pendant des décennies dans le bilan énergétique, il devient l'énergie nouvelle providentielle. Le tableau récapitulant les bilans énergétiques des différents Plans donne ainsi l'illusion que les politiques énergétiques ont permis de produire 3 Mtep d'énergies

nouvelles entre 1973 et 1979, alors que ce chiffre résulte d'un regain d'intérêt pour une source d'énergie d'un usage séculaire.

**IXe Plan (1984-1989)** La commission de l'énergie pour le IXe Plan, est créée en juin 1982 pour « explorer la prospective de la demande et de l'offre aux horizons 1990 et 2000 », et est baptisée « Groupe long terme énergie » (Commissariat général au Plan, 1983). Comme la commission précédente, le Groupe travaille en amont de la définition du Plan, qui prend en considération ses recommandations. Malgré le changement de gouvernement, la création de l'AFME (dont un représentant, Pierre Cubaud, fait partie du Groupe) et l'expression d'une volonté de rompre avec les politiques énergétiques précédentes (primat de la maîtrise de la demande ; décentralisation), la ligne directrice qui concerne les énergies nouvelles reste globalement similaire. Le Tableau 10.6 montre le bilan énergétique de 1983 et les objectifs pour l'ensemble des sources d'énergie retenus par le Groupe. Le Tableau 10.7 en montre le détail par type d'énergie nouvelle.

Table 10.6 – IXe Plan : bilan de la consommation énergétique en France en 1972 et 1978 ; objectifs pour 1990 et 2000 (en Mtep) (Chateau, 1985, p. 106)

| Source d'énergie | État en 1973 | État en 1982 | 1990 | 2000 |
|---|---|---|---|---|
| Pétrole | 117.3 | 85.3 | [60-65] à [60-70] | [55-65] |
| Gaz | 14.9 | 23.4 | [28-30] | [20-30] |
| Charbon | 30.5 | 32.5 | [18-20] à [20-23] | [25-35] |
| EN & ENR [103] | 2 | 3.6 | [6-8] à [8-9] | [10-16] |
| Hydraulique | 9.8 | 15.8 | 15 | 16 |
| Nucléaire | 3.1 | 22.9 | 54 à [57-65] | [70-85] |
| Total | 177.6 | 182.7 | [177-178] à [190-200] | [220-235] |

Tout d'abord, en ce qui concerne le bilan pour 1982, il annonce 3.6 Mtep d'énergies nouvelles en 1982 contre 3 Mtep en 1979. Mais à nouveau, cela ne signifie pas une augmentation de 0.6 Mtep de la production à partir d'énergies nouvelles. eux nouvelles lignes sont en effet visibles dans le bilan : « déchets agricoles, industriels et urbains » et « carburol », qui rentrent tous les deux dans la catégorie « biomasse ». La majeure partie des déchets, représentant 0.9 Mtep, ne résulte pas de nouvelles consommations . Il y a même une révision à la baisse des objectifs de consommation de bois (compris, et pour une part essentielle, dans la « biomasse sèche »), alors qu'une augmentation suite au programme biomasse-énergie a été enregistrée (voir 10.2.2.2). En tout cas, la biomasse représente

103. « Énergies nouvelles et renouvelables ».
105. Pour les énergies nouvelles ici envisagées, il ne s'agit ni d'importer ni d'exporter, ce qui fait que production et consommation sont équivalentes.

TABLE 10.7 – IX[e] Plan : « Objectifs pour les énergies nouvelles et renouvelables » à moyen terme et possibilités pour l'horizon 2000 (consommation) [105]par le Groupe long terme énergie (en Mtep)(COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU PLAN, 1983, p. 18 ; 106)

| Source d'énergie | État en 1982 | Objectif 1990 | Tendance 2000 |
|---|---|---|---|
| Géothermie | 0.05 | 0.6 à 0.8 | 2.5 |
| Biomasse sèche | 2.5 | 4.8 à 5.1 | 9.6 |
| Micro-centrales | 0.1 | 0.3 | 0.8 |
| Déchets agric., ind. & urbains | 0.9 | 1.8 | 2.1 |
| Solaire basse température | | 0.2 | 1 |
| Carburol | - | 0.5 à 0.6 | 2.5 |
| Solaire bioclimatique | - | 1.2 à 1.4 | - |
| Total | 3.6 | 9.4 à 10.5 | 18.1 |

la quasi totalité du bilan des énergies nouvelles (3.4 Mtep sur 3.6 Mtep). L'utilisation de l'énergie solaire, qui a pourtant augmenté avec la mise en place d'installations d'eau chaude sanitaire et de chauffage (voir 10.2.2.2), est encore jugée négligeable. Ainsi, la seule réelle augmentation de la production d'énergies nouvelles, qui ne résulte pas de la prise en compte d'usages jusqu'alors négligés dans les bilans, concerne la géothermie, estimée à 0.05 Mtep pour 1982. Elle résulte des installations faites dans le cadre du programme national (voir 10.2.2.2).

En termes de prospective, on trouve les mêmes ordres de grandeur, et les mêmes sources d'énergie envisagées à peu près selon mêmes proportions, quoique avec une diminution des ambitions par rapport à ce qui avait été annoncé en 1979. Ainsi, l'objectif pour l'ensemble des « énergies nouvelles et renouvelables » retenu par le Gouvernement est, pour 1990, de 6 à 9 Mtep (9.4 à 10.5 Mtep proposé par le Groupe long terme) contre 10 à 12 Mtep précédemment, et l'objectif à long terme (2000) de 10 à 16 Mtep (18.1 Mtep évalué par le Groupe long terme) contre 15.4 à 23.2 Mtep. La prééminence des énergies vertes est confirmée : pour 1990, la biomasse sèche, qui contient essentiellement le bois de feu et la paille dans l'habitat rural et dans les villes petites et moyennes, représente la moitié de la production. En outre, deux nouvelles ressources font partie de ces énergies vertes : les déchets, et les matières végétales transformables en huiles et alcool carburants (« bio-carburants »), appelés « carburol ». Un « Plan carburol » est en effet lancé en 1980 en réaction au second choc pétrolier, visant à substituer le pétrole par du bio-carburant, et des recherches, animées par l'AFME, sont alors initiées à l'IFP, pour la mise au point des procédés de production de ces carburants (Patrice DEVAUX, 1987, p. 426) (voir 10.2.2.2). Ceux-ci font apparaître les transports comme secteur utilisateur des énergies nouvelles.

Les contributions des énergies géothermiques et solaire (basse énergie) restent simi-

laires, et petites en comparaison des énergies vertes, avec une légère augmentation pour la géothermie (2.5 Mtep au lieu de 1.3 à 2 Mtep pour 2000) et une diminution pour l'énergie solaire (2.5 Mtep au lieu de 3 à 5 Mtep pour 2000). Ceci traduit la lenteur de la diffusion des installations solaires vis-à-vis des précédentes prévisions, ainsi que les difficultés rencontrées par cette filière qui rendent les planificateurs moins optimistes ; et, en parallèle, la relative réussite du programme géothermique. Pour les mini et micro-centrales hydrauliques, les objectifs restent similaires. Quant à l'énergie éolienne, elle ne figure plus dans les lignes du bilan, et disparaît même des objectifs à long terme. Pour l'AFME, comme pour EDF, les éoliennes sont entérinées comme intéressantes à l'export et pour des utilisations très marginales en Métropole (voir 10.2.3.1).

**X^e Plan (1989-1992)** Le X^e Plan de modernisation et d'équipement est aussi le dernier. Il est constitué de dix commissions, dont pas une ne traite spécifiquement d'énergie. Dans les rapports rendus par ces Commissions, le sujet n'est pas traité [106]. Le contre-choc pétrolier, l'achèvement du programme nucléaire, font de la maîtrise de l'énergie et, *a fortiori*, des énergies nouvelles, un sujet obsolète.

Un document synthétique sur le X^e Plan mentionne toutefois l'énergie dans l'axe stratégique intitulé « Valoriser nos atouts sectoriels pour une meilleure compétitivité » (Commissariat général au Plan, 1989). Si le souci de « maîtrise de l'énergie » est rappelé, il n'est pas du tout question d'énergies nouvelles. En revanche, il est question de « [v]aloriser [la] politique énergétique », en mettant à profit l' « accroissement de [la] capacité d'exportations d'énergie à destination de[s] partenaires européens », c'est-à-dire de la conséquente production française d'électricité nucléaire. En effet, le X^e Plan s'ancre fortement dans la perspective du nouveau marché européen [107], qui prépare la libéralisation du marché de l'énergie sur le territoire des pays membres de la Communauté économique européenne (CEE). Ainsi, le principal souci est d'être en mesure de vendre le surplus d'électricité nucléaire aux pays voisins.

Comme l'a montré Évrard, (2013, p. 206-208), cette ouverture du marché européen s'avère en fait, dans la suite de la décennie 1990, un argument favorable à la production française d'énergies renouvelables — terme désormais plus couramment employé qu'énergies nouvelles. En effet, alors que le nucléaire dispose d'une mauvaise image internationale, ce n'est pas le cas des énergies renouvelables, bien au contraire, auxquelles les programmes européens continuent de donner une place. Afin de rendre acceptable la vente d'électricité française, les grand acteurs du secteur de l'électricité (EDF et la Direction générale de l'énergie et des matières premières (DGEMP)) décident une « ouverture contrôlée » aux énergies nouvelles (Évrard, 2013, p. 199) .

106. Commissariat général au Plan, 1990.
107. Le sous-titre du document compilant les rapports est d'ailleurs : « la France. L'Europe ».

Pour ce qui est de 1989, les énergies nouvelles disparaissent donc de l'agenda énergétique national. L'AFME, considérablement amoindrie, se recentre sur les économies d'énergie (cf 10.1.7.2), et, avec une suppression de ses moyens d'aide à la diffusion, n'est plus en mesure d'accompagner la mise en place des procédés d'exploitation des énergies nouvelles qu'elle encourageait jusqu'alors. Sans aide publique, et avec la baisse des énergies concurrentes (pétrole et électricité nucléaire), les convertisseurs géothermiques et solaires sont laissés de côté, et ce d'autant que les installations déjà effectuées connaissent des déboires techniques (encrassement des circuits, voir 10.2.2.2, qualifiées par l'AFME d'« erreurs de jeunesse » (AFME, 1988, p. 31).

Seule son activité de recherche permet à l'AFME de poursuivre l'effort en faveur des énergies nouvelles. Il s'agit, à la fois, d'une politique de « long terme » pour l'énergie en métropole, et d'une politique d'exportation industrielle. Ainsi, selon la direction de la Recherche, les énergies renouvelables doivent « rester présentes dans le programme en raison de leur probable réémergence en cas de remontée des prix du pétrole, de leur impact dans un Tiers-Monde majoritairement rural, difficile à raccorder à des réseaux de distribution » (AFME, 1988, p. 33).

Dans ce cadre, les seules énergies nouvelles précédemment encouragées par les politiques énergétiques précédentes à faire l'objet de recherches sont la biomasse et la géothermie (AFME, 1988, p. 147-162). Pour la biomasse, l'AFME finance des recherches sur la production de biocarburants (ressource en biomasse et transformation en carburant), et l'amélioration des performances des chaudières à bois. Quant à la géothermie, à défaut de financer de nouvelles installations, l'AFME anime des recherches visant à résoudre les problèmes techniques et à réparer les installations endommagées (AFME, 1988, p. 188-204). Il n'est plus du tout question de solaire thermique. Les autres technologies étudiées sont toutes destinées à l'export : éoliennes, panneaux photovoltaïques, micro-centrales hydrauliques, géothermie moyenne et haute énergie. En effet, comme le stipule un rapport de la direction scientifique de l'AFME en 1988 :

> « Certains pays industrialisés comme les USAenvisagent à moyen ou long terme dans les régions dotées de conditions climatiques appropriées l'intégration de centrales photovoltaïques ou à plus court termes de générateurs éoliens dans les réseaux de production d'électricité ; la spécificité du réseau en France métropolitaine et l'équipement de production en place ou en construction ne permettent pas d'envisager actuellement de façon économiquement rentable l'insertion de tels équipements (AFME, 1988, p. 163) ».

**Synthèse 10.2.2.1** D'un point de vue prospectif, les Plans successifs présentent la géothermie, l'énergie solaire, l'énergie éolienne et la micro-hydraulique parmi les énergies

nouvelles dont la France doit augmenter la consommation. La biomasse (et en particulier le bois) apparaît à partir du VIII$^{e}$ Plan. Parmi les énergies nouvelles étudiées dans cette Partie 4, les énergies solaire et géothermique, puis de biomasse, sous forme de chauffage dans les secteurs résidentiel et tertiaire, sont investies des objectifs les plus ambitieux pour des applications à court terme, relevant de la politique énergétique. Les solaires thermodynamique et photovolaïque, évoqués comme des applications intéressantes à long terme, apparaissent dans le IX$^{e}$ Plan mais il n'en est plus question dans les suivants, car ils sont considérés comme relevant d'une politique de recherche. En 1988, l'énergie, et *a fortiori* les énergies nouvelles, disparaissent de la planification, elle-même en désuétude.

En termes de résultats, l'AFME présente en 1985 un bilan énergétique où la consommation d'énergies nouvelles connaît une croissance régulière depuis le premier choc pétrolier (cf Table 10.1). Plusieurs constats s'imposent cependant, qui montrent qu'une place minime a été donnée aux énergies nouvelles dans la politique énergétique de la période (1970-1990). D'abord, les objectifs sont toujours faibles par rapport au reste du bilan, ne serait-ce que par rapport au économies d'énergie. De plus, les résultats se révèlent décevants, particulièrement pour le solaire, qui est pourtant un avatars de la politique des énergies nouvelles, mais aussi pour la géothermie. Ainsi, dans le VII$^{e}$ Plan (écrit en 1975), les objectifs sont une augmentation de 3 Mtep d'ici 1985, comprenant essentiellement des installations solaires et géothermiques. Dans le VIII$^{e}$ Plan, ces objectifs sont revus à la baisse (+0.5 à 0.8 pour le solaire, +0.2 à 0.4 pour la géothermie). Il sont très loin d'être atteints en 1983. Le bilan fait en effet apparaître un chiffre de 3.6 Mtep, mais la part du solaire n'apparaît même pas, jugée probablement négligeable, et celle de la géothermie n'est que de 0.05 Mtep. Dans le même temps, les « énergies vertes » sont apparues dans le bilan et, par la consommation déjà effective du bois qui n'était auparavant pas comptabilisée, font gonfler les chiffres de l'utilisation d'énergies nouvelles. Le bois, source d'énergie devenue paradoxalement nouvelle, connaît quant à lui une croissance dans sa consommation : des particuliers et des industriels s'équipent en chaufferies au bois, car il devient économiquement plus intéressant que le pétrole, mais aussi grâce à des incitations du COMES puis de l'AFME qui financent ces installations.

L'ajout du bois parmi les énergies nouvelles relève d'une réelle efficacité dans l'action du COMES puis de l'AFME envers l'utilisation de cette source d'énergie (l'AFME y consacre une partie significative de son budget entre 1982 et 1985, comme le montre la Figure 10.2), mais aussi probablement d'un jeu d'écriture pour donner l'image d'un volontarisme et d'une efficacité des politiques des énergies nouvelles, décevantes en ce qui concerne le solaire et la géothermie.

La sous-section 10.2.2.2 examine maintenant les actions qui ont été mises en place pour répondre aux objectifs d'augmentation de la consommation française d'énergies nouvelles

annoncés dans les Plans successifs, ainsi que les résultats obtenus source par source.

#### 10.2.2.2 Programmes et résultats. Le renouveau des « énergies vertes » (1974-1986)

**Les convertisseurs basse température (biomasse, géothermie, solaire)** Les premières réponses gouvernementales aux chocs pétroliers faisant appel aux énergies nouvelles concernent les applications directes des chaleurs solaire et géothermique dites de « basse énergie » ou « basse température », et, un peu plus tard, du bois-énergie [108]. Ces applications connaissent la plus large diffusion de toute la période (1970-1990), au croisement de politiques énergétiques (ministère de l'Industrie), de recherche (DGRST puis ministère de la Recherche), mais aussi urbaines (Plan construction). C'est ce dont il est question dans cette sous-section.

Dans les années 1970, l'utilisation de la chaleur basse énergie représente une très grande proportion du bilan énergétique français [109]. Les secteurs résidentiel et tertiaire, dont la part dans le bilan énergétique national est devenue prépondérante, sont le poste de consommation le plus important de cette chaleur, pour le chauffage des locaux et de l'eau chaude sanitaire. On en trouve aussi l'usage dans certaines applications des secteurs industriel et agricole. Comme le souligne Chauvin-Michel, (2013), « [l]e secteur du bâtiment est particulièrement touché par les nouvelles mesures et programmes qui se mettent en place [pour les économies d'énergie], car le chauffage des édifices représente alors un tiers de la consommation énergétique nationale » [110].

Ainsi que le COMES le met en évidence, la chaleur basse énergie « n'impliqu[e] pas nécessairement le recours à des sources d'énergie nobles comme le pétrole ou l'électricité » (Comité biomasse-énergie, 1980, p. 11). Le ministère de l'Industrie et la DGRST identifient les chaleurs solaire et géothermique comme rapidement mobilisables pour un programme d'équipement national : pour l'énergie solaire, des convertisseurs ont déjà fait la preuve de leur caractère opérationnel (des maisons solaires ont été construites par le CNRS) voire existent déjà sur le marché pour une utilisation en métropole (chauffe-

108. Cette chaleur est ainsi qualifiée car elle se présente sous des conditions de température et de pression qui « n'entraînent pas une vaporisation suffisante pour être employée directement à des fins mécaniques ». Pour la géothermie, la chaleur basse énergie est celle qui est contenue dans les nappes souterraines dont la température est inférieure à 150°C.
AN 1994 0148/1, p.d., Ministère de l'Industrie, du commerce et de l'artisanat, DGRST, « Géothermie, rapport du groupe de travail réuni depuis le 25/05/1973 », 21/05/1974.

109. En 1978, elle représente encore 44% de l'énergie mobilisée en France (Comité biomasse-énergie, 1980, p. 11)

110. Ainsi, « [l]a première réglementation thermique apparaît en avril 1974. Le 29 octobre 1974, une loi est votée pour limiter la température de chauffage des secteurs résidentiels et tertiaires à 20 °C. En juin 1979, cette loi est revue pour réduire la température moyenne maximale autorisée à 19 °C (Chauvin-Michel, 2013, p. 29).

eau). Pour ce qui concerne la ressource en énergie géothermique, un chauffage central géothermique est en usage à Melun l'Almont depuis 1971 (BRGM, 1980). Les forages effectués en métropole au cours des années précédentes dans le cadre de la prospection pétrolière ont en outre permis d'identifier des zones présentant ce type de ressource, et celles-ci se trouvent précisément « à la verticale de zones à urbanisation rapide qui sont des zones d'utilisation potentielle, notamment du point de vue du chauffage urbain » [111].

L'usage de ces chaleurs naturelles est donc d'abord une partie du volet « production » d'un programme de maîtrise de l'énergie dans les bâtiments. Cet usage direct de chaleur primaire (solaire ou géothermique), qui avait été déconsidéré par les pouvoirs publics pour des applications en Métropole lors de la période précédente, vient donc au premier rang des politiques publiques des énergies nouvelles en réaction au premier choc pétrolier. Ainsi, la géothermie basse énergie, qu'EDF avait mise de côté dans les années 1960 à cause de l'impossibilité de l'utiliser dans de puissantes centrales de production d'électricité [112], se trouve au premier plan du programme géothermique français. Dès le printemps 1974, suite aux conclusions du Groupe géothermie, la DGRST lance un appel d'offres pour la mise au point des applications domestiques de la géothermie, avec l'aide du Plan construction [113]. L'AEE finance quant à elle rapidement des « opérations de démonstration et d'expérimentations techniques, en collaboration avec l'ANVAR », ainsi qu'une campagne de communication « pour inciter les populations à s'équiper » en chauffe-eau solaires (Chauvin-Michel, 2013, p. 30). Le Plan construction, organisme rattaché au ministère de l'Équipement et chargé de mettre en place des programmes d'innovation dans le secteur de la construction, lance un programme de recherche sur l'architecture solaire (Chauvin-Michel, 2013, p. 32), et finance des installations de chauffage géothermique [114]
.

En effet, outre leur contribution à la politique énergétique post-choc pétrolier, les réalisations d'installations géothermiques et solaires entrent dans le cadre de la politique d'« innovation » voulue par les responsables de la construction de nouveaux bâtiments pour tenir compte des échecs des programmes nationaux dans ce secteur lors des décennies précédentes. Créé en 1972, le Plan construction, organisme administratif « de

111. AN 1994 0148/1, p.d., Ministère de l'Industrie, du commerce et de l'artisanat, DGRST, « Géothermie, rapport du groupe de travail réuni depuis le 25/05/1973 », 21/05/1974.
112. Les ingénieurs d'EDF se sont en effet déjà intéressés à l'utilisation de la géothermie pour la production centralisée d'électricité. En 1966, un rapport sur les « possibilités géothermiques de la France » pour la production d'électricité conclut à leur absence : « on ne peut attendre [en France] de l'énergie géothermique que l'installation de centrales électriques de quelques centaines de MW, ce qui est trop faible et ne représente qu'une part très marginale de l'équipement annuel français ».
AN 1994 0148/1, p.d., Ministère de l'Industrie, du commerce et de l'artisanat, DGRST, « Géothermie, rapport du groupe de travail réuni depuis le 25/05/1973 », 21/05/1974.
113. DITEIM, Compte-rendu de la réunion « politique d'intervention de l'État pour le développement de la géothermie », 02/04/1974.
114. AN 1994 0148/1, p.d.

mission » [115] dépend de plusieurs ministères dont, au premier rang, le ministère chargé du logement [116] . Il a pour mission d'« d'impulser et de coordonner les efforts de recherche et d'innovation dans le secteur » du bâtiment (Cloarec et Perrocheau, 2012, p. 21). Il s'agit de faire peau neuve face aux réalisations des décennies précédentes dans ce secteur, et l'« innovation » est son maître-mot. Doté au départ de six « groupes de travail », il en reçoit en 1973 trois nouveaux dont un qui s'intitule « énergie et bâtiment » (Cloarec et Perrocheau, 2012, p. 22). De même, le Groupe central des Villes nouvelles [117] est ainsi institué pour coordonner le projet national de mise en place de neuf « villes nouvelles », créées entre 1968 et 1975 majoritairement en Région parisienne [118]. Le programme des « villes nouvelles » qu'il coordonne entend rompre avec les conceptions urbanistiques qui avaient régi la construction des « grands ensembles » [119]. Sont ainsi pris en compte des « impératifs économiques de décentralisation industrielle et de développement du secteur tertiaire, démographiques et, souvent, environnementaux » (Étienne et Girard, 2007, p. 79), et pour répondre à ces derniers des mesures de « prévention des nuisances sonores et atmosphériques » sont prises (Étienne et Girard, 2007, p. 81). Aussi, l'énergie géothermique a-t-elle déjà été choisie pour le chauffage urbain dans une des villes nouvelles, Melun l'Almont, et ce sujet n'est pas une nouveauté pour le Groupe central des Villes nouvelles lorsque survient le choc pétrolier [120]. Cette installation sert de modèle pour toutes les installations géothermiques mises en place par la suite. Villes nouvelles, nouveaux bâtiments selon de nouvelles conceptions, puis attention tournée vers les économies d'énergie : les énergies nouvelles sont une bonne opportunité pour donner au secteur du bâtiment l'allure de nouveauté souhaitée. Des bâtiments neufs, souvent collectifs, sont donc équipés en installations solaires, géothermiques, puis en chaufferies au bois.

Les bâtiments neufs ne sont pas les seuls à être équipés en installations solaires et géothermiques, et jusque 1982, le COMES et l'AEE soutiennent l'équipement des bâtiments résidentiels et tertiaires existants en chauffe-eau et chauffage solaires, tandis que le Comité géothermie et, toujours, l'AEE, financent des installations de chauffage géother-

115. Cela signifie qu'il « n'existe que par la lettre de mission adressée au président du comité directeur » (Cloarec et Perrocheau, 2012, p. 21.). Le comité directeur est lui-même constitué de personnalités désignées « *intuitu personae* » pour leurs compétences (représentants du CSTB, architectes, professeurs d'architecture...), et fixe les orientations du Plan.

116. Les autres ministères de tutelle sont le ministère chargé de la recherche (par la DGRST) et le ministère de l'Industrie (Cloarec et Perrocheau, 2012).

117. C'est un organe interministériel comportant, outre des représentants des ministères concernés (notamment Finances, Équipement, Culture), des préfets de Régions et Départements des villes d'implantation (Vadelorge, 2003).

118. Évry, Sénart, Saint-Quentin-en-Yvelines, Cergy-Pontoise, Marne la Vallée. Sont aussi établies des villes nouvelles autour de Rouen (Val de Reuil), de Lille (Villeneuve d'Ascq), de Lyon (L'Isle d'Abeau) et de Marseille (Étang de Berre)

119. Ceux-ci, qualifiés de « cités-dortoirs », ont été rapidement décriés à cause du « « zoning », séparation rationaliste des fonctions (habitat, activités, loisirs) jugé néfaste » (Étienne et Girard, 2007).

120. Le chantier d'implantation de cette ville, commencé en 1969, est terminé en 1971, date à laquelle une installation de chauffage géothermique central est mis en service (BRGM, 1980).

mique. C'est ensuite l'AFME qui prend le relais, et qui finance, en outre, des recherches et la mise en place de chaufferies au bois, une des « énergies vertes ».

Les énergies vertes font en effet l'objet de programmes de recherche et de mise en exploitation à partir de 1980, suite aux préconisations du COMES. Elles se basent sur des études de l'INRA, et leur donnent une place prépondérante parmi les énergies nouvelles dans les bilans énergétiques prospectifs (cf 10.2.2.1). En effet, de manière plus évidente que les énergies solaire et géothermique, l'énergie issue de la biomasse peut être rapidement mobilisée. D'une part, elle est aisément exploitable pour la production de chaleur. Des chercheurs de l'INRA travaillent en outre déjà indirectement ce sujet puisque la mobilisation de la biomasse comme ressource énergétique croise des problématiques qui concernent d'autres domaines industriels. Ainsi, par exemple, « les importants travaux financés par le COMES sur les forêts à rotation rapide ou sur le machinisme forestier s'appliquent à l'approvisionnement de l'industrie de la pâte à papier » (COMES, 1981, p. 5). Pour une mise en application directe, le COMES puis l'AFME financent donc des recherches sur des sujets comme les techniques de récolte du bois, la ressource en paille et en sous-produits de l'agriculture, de la forêt et des industries, leur préparation comme combustible (transformation en plaquettes ou granulés), ou encore l'adaptation des chaudières à ces combustibles (AFME, 1988, p. 147-162). Des recherches sur les biocarburants, les biogaz et les biotechnologies sont également financées mais ne trouvent pas d'applications immédiates.

Au cours de années 1980, des particuliers s'équipent en chaudières à bois en zone rurale. De grands ensembles de logements sociaux, des bâtiments tertiaires (hôpitaux) et certaines industries. s'équipent en chaufferies collectives , alors que, « sous ses déclinaisons collectives et industrielles, [ce type d'installation] était inexistant dans l'hexagone avant les chocs pétroliers des années 1970, si l'on excepte les chaufferies qui brûlent des sous-produits et déchets de process » (Defaye, 2016, p. 131) [121]. Le bois, source d'énergie utilisée de tous temps fait donc, paradoxalement, partie des énergies nouvelles largement mobilisées pour se substituer au pétrole . Les recherches financées par l'AFME sur la paille et les déchets (transformation en granulés et adaptation des chaudières à ce combustible) aboutissent également à des installations.

Entre 1975 et 1985, une soixantaine d'opérations géothermiques sont réalisées, totalisant, pour le seul secteur de l'habitat (qui représente la majorité des installations), 111 000 logements (AFME, 1985, p. D-VI.2-3), dont la majorité sont mis en service entre 1982 et 1984 (voir Table 10.8). De 1975 à 1979, en moyenne une opération géothermique a été réalisée chaque année par an (Le Monde, 1981) [122], puis le mouvement s'est accéléré :

121. Cet article m'a été indiqué par Philippe Chartier que je remercie.
122. Parmi celles-ci, on comptabilise l'équipement de :
— L'OPIHLM de Creil : 4000 logements (mise en service en 1977),

huit opérations sont lancées en 1979-1980 et une quinzaine en 1981. Entre 1981 et 1986, une cinquantaine de nouvelles installations sont réalisées, majoritairement pour le chauffage collectif (Jaudin, 1993) [123]. Ainsi, en 1984, 110 000 logements sont chauffés à l'aide d'une installation géothermique (AFME, 1985). Cela vaut à la géothermie d'apparaître dans le bilan énergétique de 1986 pour environ 0.2 Mtep, soit 0.1% de la consommation nationale [124]. Le nombre d'installations baisse à partir de 1984 (voir, en Annexe O, la liste chronologique des installations géothermiques) pour devenir nul après 1986.

Table 10.8 – « Parc de logements consommant de l'énergie géothermale » (en milliers) (AFME, 1985)

| Année | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 |
|---|---|---|---|---|---|
| Nb logements | 10 | 11 | 29 | 70 | 111 |

Pour ce qui concerne le solaire, 10 000 logements sont équipés en chauffe-eau solaires en 1978, 60 000 en 1982 (Pehlivanian, 2014, p. 441), et 89 000 en 1984, représentant 76% des installations solaires [125]. Le reste concerne des bâtiments tertiaires tels que des piscines (6%) ou des bâtiments administratifs (6%) (AFME, 1985, p. D-VI.1-2). Cela ne suffit pas à la faire apparaître dans le bilan énergétique (cf 10.2.2.1).

Quant à l'utilisation du bois, elle concerne un ménage sur quatre en 1985, majoritairement en habitat individuel rural (Riedhacker, 1987, p. 464-465). Ces usages existaient déjà avant le choc pétrolier mais ce dernier en a fait augmenter l'importance [126]. Ils représentent 2 Mtep en 1980 (1% de la consommation énergétique nationale) (DATAR, 1980,

— la maison des Arts et loisirs de la ville de Luxeuil-les-bains, (mise en service en 1978),
— 1700 logements à Villeneuve la Garenne, par Total-CFR (mise en service en 1976, interrompu en 1978),
— 1800 logements à Mont-de-Marsan, par Elf-CGC (mise en service en 1978),
— 3000 logements de la ZAC des Courtilleraies à Melun-Senart, par PDI, la Compagnie générale de chauffe, STG et le BRGM (mise en service en 1980),
— 1800 logements à Tarbes (mise en service en 1979, interrompue presque immédiatement),
— ZAC du Masage à Beaumont : 1800 logements, par la « SERC » (mise en service en 1980),
— 5000 logements à Strasbourg par Shell, SFBP, CdF, Elf, CGC, SAC, STREC, SOCALGEO (mise en service en 1980) (se regroupent au sein de « SOCALMIG »,
— 1000 logements à Dax, par Ville de Dax : 51, BRGM (SEREM), Compagnie générale de chauffe, Elf-Aquitaine, SCET (mise en service 1980),
— 800 logements à Issoudun (mise en service en 1980).

BRGM et Délégation aux énergies nouvelles, 1978 ;
AN 1994 0148/1, p.d., Comité géothermie, Opérations réalisées (ou en cours de montage), situation au 31 décembre 1978, 12/01/1979.

123. Ce chiffre n'est pas à la hauteur des ambitions du VIIIe Plan qui, en 1981, projette « [d']atteindre cinquante opérations annuelles en 1985 » (Le Monde, 1981).

124. Les données sur l'énergie de l'AFME en 1984 chiffrent à 145 510 Mtep la production d'énergie, et prévoient 61 010 Mtep pour les deux années suivantes en prenant en compte les opérations en cours de réalisation (AFME, 1985, p. D-VI.2-3).

125. En surface de capteurs plans.

126. Ainsi, pour la seule année 1984, « 20 000 nouveaux chauffages centraux à bois » ont été installés (Riedhacker, 1987, p. 465).

p. 12), et 6.7 Mtep en 1987 . L'autoconsommation dans l'industrie du bois augmente également et représente un millier de chaufferies dans le secteur. Dans l'habitat collectif, le tertiaire et les industries hors filière bois, où l'usage du bois constitue une nouveauté, elles sont environ cent en 1984 (AFME, 1985, p. 147) et trois cent en 1987 « chauffant des HLM, des hôpitaux, des serres, des piscines, des laiteries, des briquetteries, des blanchisseries d'hôpitaux, etc » (Riedhacker, 1987, p. 465). L'utilisation de la paille et des déchets est très faible au regard de l'utilisation du bois. En ce qui concerne les biogaz, les travaux sur ce sujet ne dépassent pas le stade de la recherche : « les développements concernant la gazéification de la biomasse, la carbonisation du bois ou la fabrication de combustibles liquides se sont heurtés à des obstacles techniques certes surmontables mais à des coûts qui grèvent très souvent leur exploitation » (AFME, 1988). Enfin, pour les bio-carburants, des pilotes ont été construits et l'éthanol devient un additif officiel à l'essence sans plomb à partir de 1989 (AFME, 1988, p. 151), mais ils ne rentrent pas dans la consommation d'énergie avant cette date.

Les installations solaires et géothermiques, réalisées en série entre 1975 et 1985, connaissent des difficultés techniques [127] , auxquelles la conjoncture économique défavorable du contre-choc pétrolier vient s'ajouter après 1985. La compétition du pétrole et de l'énergie nucléaire, ainsi que l'effondrement des aides publiques envers les énergies nouvelles faisant suite aux chocs pétroliers, non seulement stoppent l'installation de nouveaux équipements, mais également freinent la réparation des installations existantes qui finissent par être remplacées par des convertisseurs classiques [128].

Enfin, on peut signaler quelques recherches sur l'énergie éolienne effectuées pour la métropole : entre 1976 et 1980, EDF achète ainsi à la société Aérowatt (filiale du CEA) un aérogénérateur d'une puissance nominale de 100 kW qu'elle expérimente sur l'île d'Ouessant dans le but de tester l'approvisionnement électrique des sites isolés. Mais une pale de l'aérogénérateur est vite brisée et EDF stoppe ses recherches à ce sujet. Le CSTB fait aussi des recherches sur les ressources métropolitaines, et travaille avec l'ONERA sur l'amélioration des aérogénérateurs. Il semble bien que le principal acheteur métropolitain d'aérogénérateurs reste le service des Phares et balises.

Ainsi, la seule des énergies nouvelles qui trouve une utilisation durable après le contre-choc pétrolier en métropole est le bois, énergie nouvelle qui, est-il besoin de le répéter, n'était pas si nouvelle que cela.

127. Pour l'énergie géothermique, « des problèmes liés au fluide (corrosion, dépôts) ou au réservoir (colmatage) affectent un certain nombre de ces opérations » (AFME, 1988, p. 188).
128. Ainsi, selon Liébard, (2015, p. 35) « [i]l y eut de grandes réalisations solaires de capteurs-plan, dans des opérations HLM qui donnèrent progressivement naissance aux contre-performances des années 1990 ; aussi le développement des énergies renouvelables chuta-t-il fortement ».

**10.2.2.2.1 Mini/micro-hydraulique. L'échec d'un programme d'équipement national** Avant le choc pétrolier, il existe en France de nombreuses installations entrant dans les catégories « mini- » et « micro-hydraulique ». Une « micro-centrale est une installation de production d'énergie hydro-électrique dont la puissance varie de quelques dizaines de kilowatts à quelques milliers de kilowatts » (DATAR, 1980, p. 19). Les acteurs des énergies nouvelles tentent de multiplier les installations en France. Le COMES les considère en effet comme une solution de court terme pour approvisionner le réseau électrique national, et envisage que des sites anciennement munis de moulins à eau soient réinvestis, en attendant la mise en service des centrales nucléaires. De nombreuses constructeurs commercialisent des turbines. Au début des années 1980, le CNEXO s'intéresse de même à l'étude de micro-centrales marémotrices sur le littoral breton, au niveau d'anciens moulins à marées (voir 11).

Des actions sont ainsi mises en œuvre pour faciliter l'équipement de petites chutes : réglementaires, d'abord, avec un « nouveau seuil au-delà duquel une concession d'État est nécessaire pour l'exploitation » (à 4 500 kW), et la mise en vigueur de la possibilité pour les collectivités territoriales d'exploiter des micro-centrales (DATAR, 1980, p. 19-20). L'AFME finance un recensement du potentiel hydro-électrique, car l'inventaire de la ressource par EDF s'arrêtait aux chutes d'eau de puissance supérieure à 2 000 kW. L'AFME encourage également des travaux de recherche sur la standardisation du matériel : alors que les matériels sont encore mis au point et dimensionnés au cas par cas, selon la disposition du terrain de la chute d'eau, l'idée est de pouvoir produire des turbines en série pour abaisser leur coût (AFME, 1988, p. 178).

Mais ces mesures semblent n'avoir eu qu'une faible efficacité. Selon un constructeur de turbines, en 1985, certains sites ont été équipés « [s]uite à la hausse des prix de l'énergie », mais le marché français se restreint à cause du prix compétitif de l'électricité nucléaire (Lebrun, 1987) [129]. Des obstacles d'ordre socio-environnemental s'ajoutent à cette concurrence économique, avec des oppositions locales suite aux déséquilibres que peuvent engendrer ces installations : modifications du milieu, perturbation de certaines activités économiques (piscicoles, touristiques), dégradation esthétique [130].

Encore une fois, le réseau électrique chasse les petits convertisseurs électriques du

129. En 1981, il y a en France plus de mille installations hydroélectriques de puissance inférieure à 2 000 kW : 177 sont exploitées par EDF, et 983 par un ensemble comprenant la SNCF, des industriels, des auto-producteurs (AFME, 1985, p. D-VI.11).

130. C'est ainsi que de chercheurs en géographie publient une « contribution à l'étude de l'impact sur l'environnement » des microcentrales hydrauliques en 1987 dans la revue *Norois*. Ils répondent ainsi à la « querelle sur les microcentrales » entrées dans une « phase paroxysmique » au début des années 1980 dans le Limousin : elle serait ainsi « devenue le mal absolu », et l'on ne « cesse[rait] d'avancer les arguments les plus divers pour souligner la malignité de cette source d'énergie qui empêcherait les poissons de vivre et se reproduire et les pêcheurs de pêcher » (Chaisemartin, Balabanian et Bouet, 1987). Cet article constitue une sorte de plaidoyer pour les minicentrales, qui relativise les impacts environnementaux de ces installations.

territoire français. Cette absence de débouchés en métropole explique un redéploiement de l'activité vers un marché à l'export dans les années 1980 (cf 10.2.3).

**10.2.2.2.2 Nouvelle cartographie des ressources : un arc-en-ciel des énergies nouvelles ?** La géothermie, l'énergie solaire, la biomasse, au titre de ressources mobilisables sur le territoire national, se sont vues à leur tour cartographier, après la houille bleue (dans l'entre-deux-guerres) et l'énergie éolienne (années 1940-1960). On trouve ainsi dans un rapport de la Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale (DATAR) de 1980, intitulé « La France des énergies nouvelles », un ensemble de cartes des ressources en énergie nouvelles à mobiliser selon les objectifs de la planification nationale (DATAR, 1980). Cet ensemble de cartes illustre la rupture de la politique énergétique en termes d'énergies nouvelles entre la période (1940-1970) et la période (1970-1990) : au lieu d'énergies éolienne et des marées, destinées à alimenter un réseau électrique *via* des centrales puissantes, les énergies géothermique, solaire et de la biomasse doivent être utilisées localement avec une utilisation directe de la chaleur, et des petites turbines hydrauliques convertir des chutes d'eau en électricité également consommée localement.

La DATAR a été créée en 1963, justement pour assister le Commissariat général au Plan dans la politique d'aménagement du territoire (Bodiguel, 2006). À ce titre, elle « a fait réaliser une étude globale sur les potentiels de production énergétique régionaux », avec l'aide du COMES et à partir des travaux d'organismes spécialisés. Elle a ainsi élaboré cette « cartographie scientifique et à grande échelle des énergies nouvelles », mais aussi l'étude de « l'impact économique régional du développement de ces énergies ». Ce travail se veut être un « fonds documentaire et technique qui permettra aux régions comme à l'État de mieux orienter ses actions » : il s'adresse ainsi, non aux particuliers, mais aux acteurs institutionnels tels que les collectivités territoriales. Un ensemble de sources d'énergie sont mentionnées, mais seules sont cartographiées celles dont des usages sont envisagés à court et moyen terme, c'est-à-dire les énergies solaire, géothermique, verte, éolienne et la mini-hydraulique. Toutes celles-ci n'ont en outre pas le même statut. À titre indicatif, les micro-centrales marémotrices et l'énergie thermique des mers sont mentionnées comme des solutions potentielles à long terme, objet de recherches en cours.

Les cartes reproduites en Figures 10.4 et 10.6 ont ainsi été obtenues à partir de données du BRGM pour la géothermie [131] ; du COMES et de l'IGN (Institut géographique national)

131. Dans le cadre du programme géothermie, une campagne de mesure du potentiel géothermique métropolitain a ainsi été menée par le BRGM. Certaines collectivités locales sont également à l'origine de sondages prospectifs. Le Conseil régional des Hauts de seine finance ainsi une étude du potentiel par la Société Geoservice : 112 000 F sont ainsi financés par le Conseil général, et une somme équivalente par le Comité géothermie. Ces sondages viennent compléter les données qu'avaient permis d'obtenir les sondages pétroliers lors des décennies précédentes.
AN 1994 0148/1, p.d., Comité géothermie, compte-rendu de la Réunion du 16/03/1978.

pour ce qui concerne l'énergie solaire. La provenance de la carte des énergies vertes (Figure 10.5) n'est pas précisée, mais il est probable qu'elle soit issue de données de l'INRA qui est l'organisme de référence pour les questions de biomasse dans les années 1970-1980 .

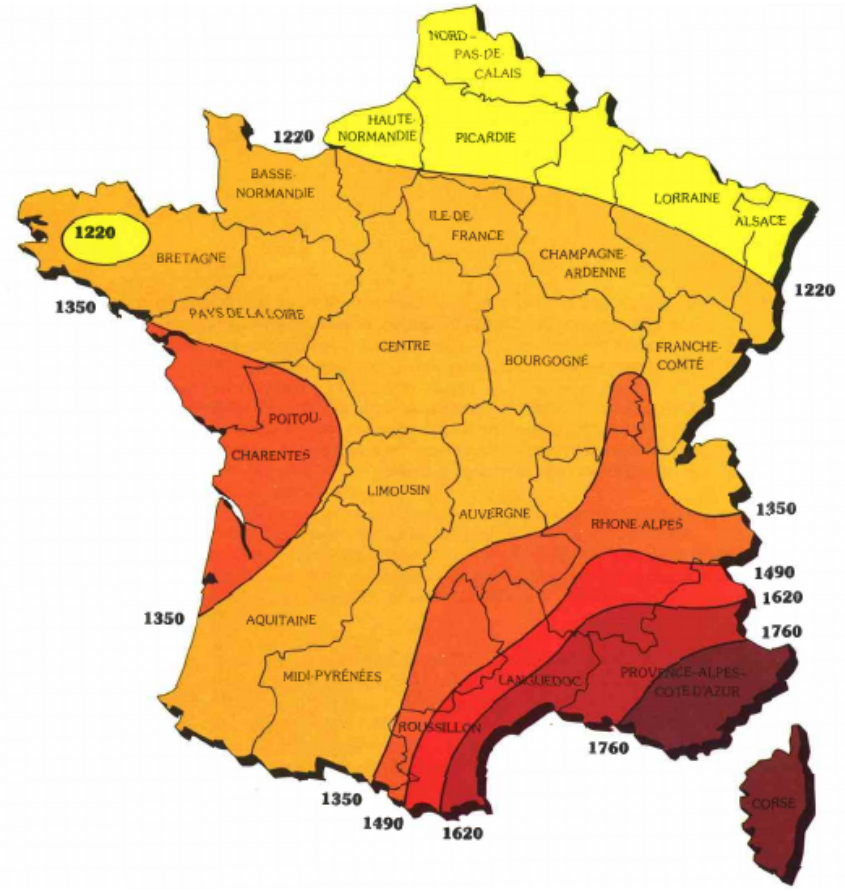



FIGURE 10.4 – « Carte d'ensoleillement » ; « Valeur annuelle en kWh/m² du rayonnement solaire reçu sur un plan d'inclinaison égale à la latitude et orienté vers le sud ») (DATAR, 1980, p. 6)

Ces cartes représentent donc le potentiel énergétique « brut » moyen, par grandes zones : intensité du rayonnement solaire disponible par m², présence et température de nappes d'eau profondes, ressources en biomasse en valeur énergétique. Elles sont toutes associées à un encart sur les techniques disponibles (capteurs plans pour chauffe-eau et chauffage solaire ; chaudières à bois ; chauffage central géothermique), les recherches en cours (solaire thermodynamique, méthanisation...) et les objectifs nationaux donnés par le Plan.

Une autre carte est représentée, intitulée « énergie hydraulique, énergie éolienne » (Figure 10.7). Elle est présentée de la même manière que les autres, laissant entendre que ces sources d'énergie ont également été cartographiées et sont incluses dans les programmes d'équipement. Elles sont en effet toujours mentionnées dans les rapports sur les énergies nouvelles pour la planification nationale (cf 10.2.2.1), mais elles n'y ont pas le même statut que les trois autres énergies nouvelles, et la carte en représentant le « gisement » en est le

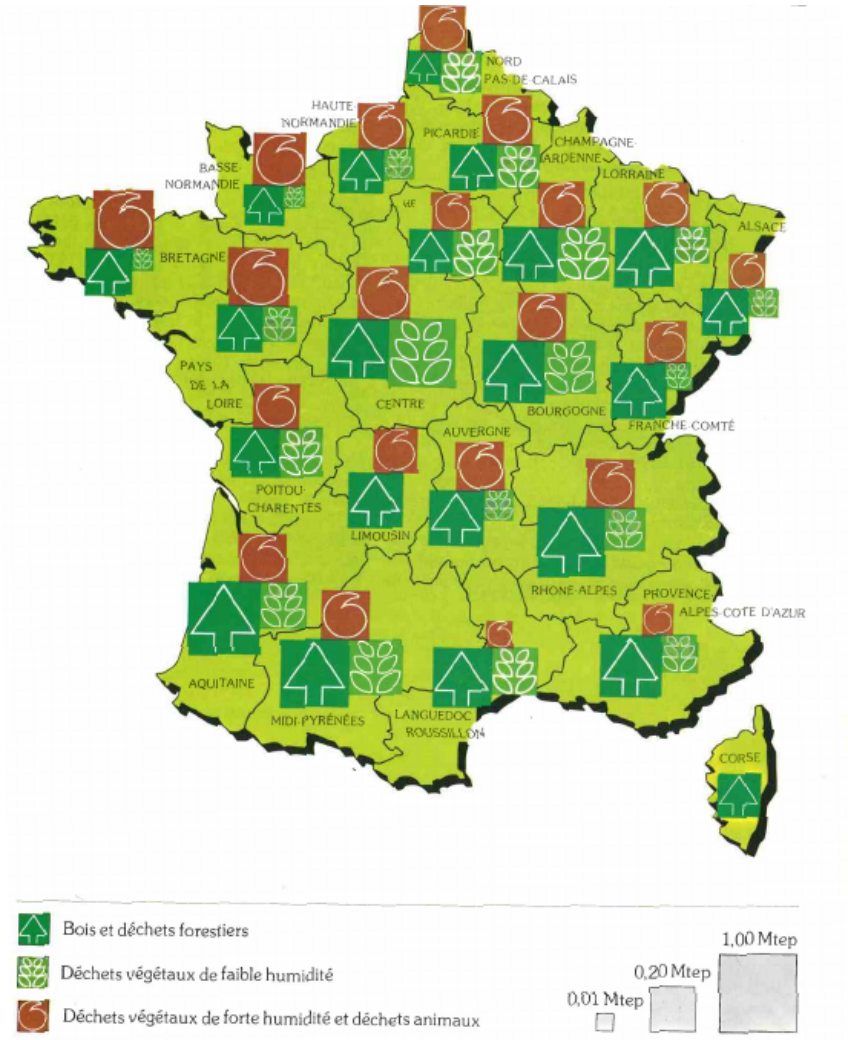



FIGURE 10.5 – « L'énergie verte » (DATAR, 1980, p. 10)

reflet. On a vu que les convertisseurs éoliens attiraient l'attention des pouvoirs publics essentiellement pour les possibilités d'export, et de manière marginale pour des sites isolés. Quant à la mini-hydraulique, il y a en fait une méconnaissance de la ressource, ignorée par les grands aménageurs (EDF et la Compagnie nationale du Rhône) qui ne s'intéressent qu'aux grandes centrales, et l'inventaire de la ressource est en cours en 1980 sous la direction du COMES (cf 10.2.2.2.1). Ainsi, dans la carte présentée par la DATAR, les données sur les énergies éolienne et hydraulique sont-elles très floues. Pour ce qui concerne le vent, de grandes zones sont dessinées avec la quantité d'énergie annuelle disponible par unité de surface ; elle est bien moins précise, et présente un caractère moins opérationnel, que celle qui avait été fournie par la Division énergie du vent d'EDF en 1953 et reproduite dans la revue *La météorologie* (cf Figure 9.4). Celle-ci donnait ainsi la quantité d'énergie productible par unité de surface et par an, en plus de la ressource brute en énergie. Quant à l'énergie hydraulique, ce sont les grands aménagements qui sont représentés, ce qui est hors sujet par rapport au propos du document, qui vise à encourager l'aménagement de mini-centrales.

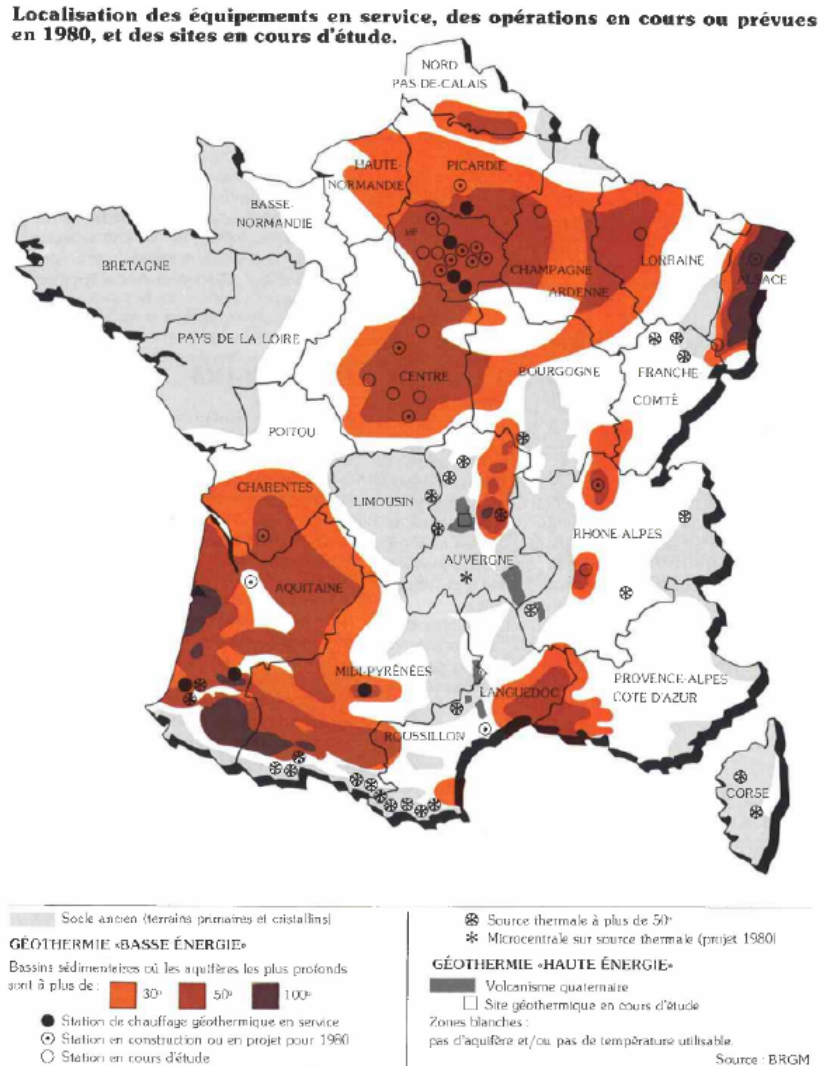



FIGURE 10.6 – « Ressources géothermiques » (DATAR, 1980, p. 10)

Ces cartes des ressources ne sont données qu'à titre indicatif, et, en termes de cartographie, le véritable outil d'aide à la décision que la DATAR entend fournir est un ensemble de cartes représentant « le potentiel récupérable par habitant » en 2000. Le potentiel représenté provient d'études de l'IEJE et de la DATAR, est obtenu en combinant la cartographie des ressources brutes, mais également l'importance des utilisations potentielles de chaque source d'énergie (évaluation du marché), et la présence d'une organisation de la récolte de la ressource (cas de la biomasse). Les seules ressources à être représentées de cette manière sont les énergies solaire, éolienne et géothermique (voir Figure 10.8), ce qui illustre à nouveau que l'utilisation de ces seules ces sources d'énergie est envisagée pour le territoire français à moyen terme. La cartographie obtenue est sensiblement différente de la cartographie « brute ». Le Nord de la France est aussi adapté aux développements de l'énergie solaire que le Sud !

Les spécificités régionales que le COMES puis, de manière plus affirmée, l'AFME, disent vouloir mettre en valeur dans le développement des énergies nouvelles (cf 10.1.7.1,

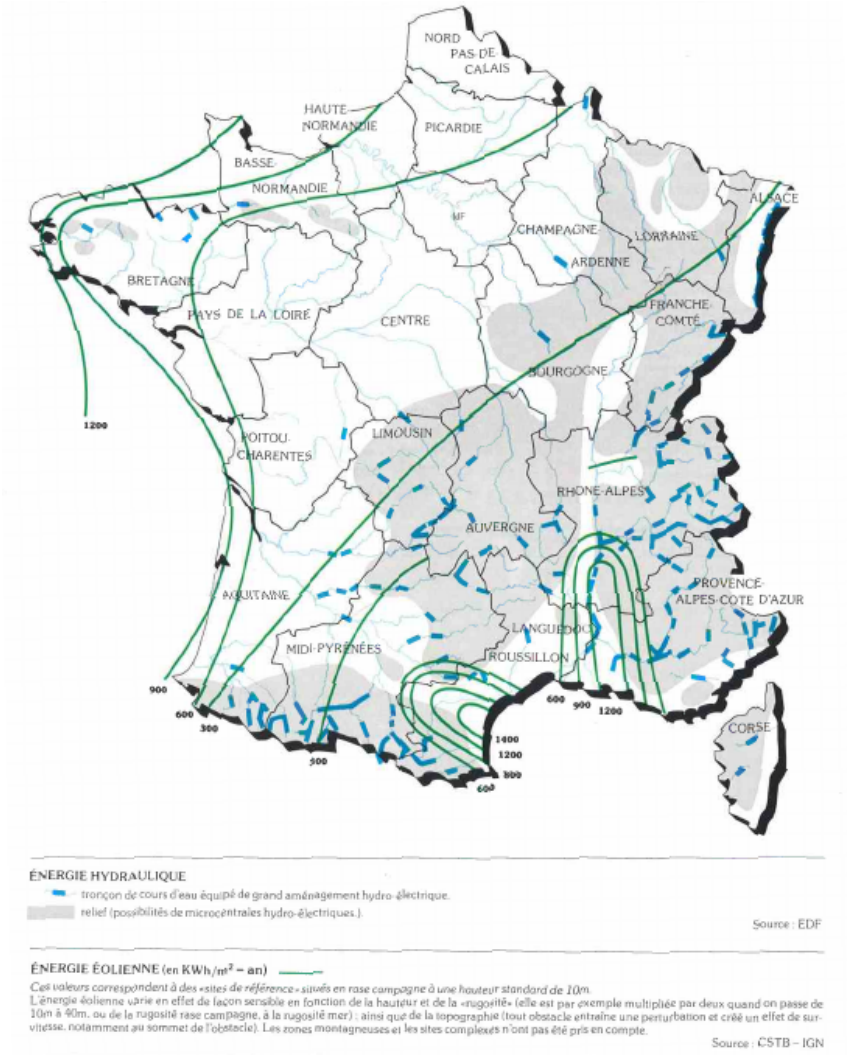



FIGURE 10.7 – Énergie hydraulique. Énergie éolienne (DATAR, 1980, p. 18)

10.1.7.2), tiennent donc compte de la ressource brute mais aussi de données prospectives sur l'économie locale. Ceci explique que le COMES annonce fièrement, comme exemple de développement régional spécifique, la réussite du programme « piscines solaires » en région Pays de la Loire, pourtant *a priori* moins concernée que d'autres régions par les développements de l'énergie solaire. La carte de la DATAR montre en effet tout le Nord ouest français comme bien adapté à l'utilisation de l'énergie solaire. Ainsi, la région Pays de la Loire est présentée comme une « zone de fort ensoleillement », ce qui justifie sa décision de « réaliser un programme pilote d'utilisation du chauffage solaire de l'eau » ! Ce programme, poursuivi ensuite avec l'aide de l'AFME, mène à l'équipement de vingt-deux piscines solaires en Pays de la Loire en 1986 (RÉGION PAYS DE LA LOIRE et AFME, 1986, p. 21) [132]. Ce choix de la part de la Région est lié au fait que le COMES puis l'AFME

132. Il est probable qu'aucune de ces installations ne subsiste aujourd'hui. Pour ce qui concerne la piscine de Vertou, on apprend dans PEHLIVANIAN, (2014, p. 450) qu'« elle a connu de nombreux déboires techniques ce qui a entraîné le gel des circuits dès le premier hiver », ce qui est quelque peu ironique pour une installation de chauffage solaire de l'eau.

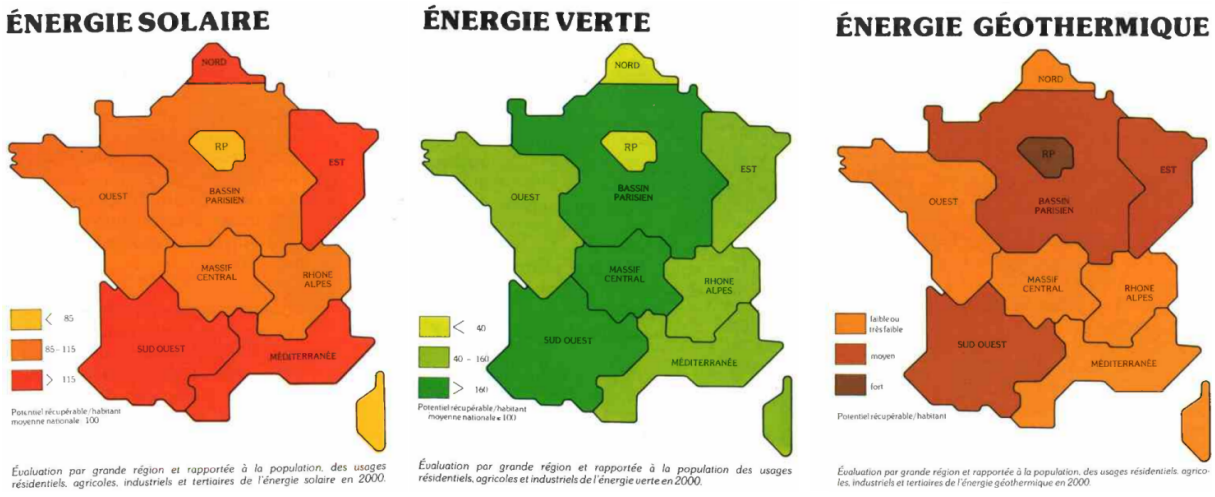



FIGURE 10.8 – Cartographie de la ressource hydraulique et éolienne (DATAR, 1980, p. 8 ; 12 ; 17)

financent l'installation de technologies définies au niveau national pour l'ensemble de la Métropole. Les piscines solaires en font justement partie, mais pas, par exemple, les aérogénérateurs. On voit mal comment les spécificités régionales pourraient être prises en considération de cette façon. C'est l'avis exprimé par un représentant du Comité d'études et de liaison des intérêts bretons (CELIB), consulté parmi d'autre acteurs par le nouveau gouvernement en 1981 à propos de la politique française des énergies nouvelles : il demande ainsi que « la Bretagne soit traitée par le COMES à hauteur du potentiel d'énergie solaire qu'elle représente », à savoir des ressources intéressantes en gaz de fermentation, en énergie éolienne et en énergie houlomotrice, dont, seule, la première semble soutenue par le COMES [133].

La carte présente en couverture du document de la DATAR est très intéressante pour montrer la différence entre les politiques des énergies nouvelles des années 1970-80, les politiques des nouvelles sources d'énergie dans les années 1940-1960 et celle de la houille bleue ainsi que l'imaginaire de l'arc-en-ciel des houilles dans l'entre-deux-guerres (voir Figure 10.10).

En effet, cette carte est, en quelque sorte, une représentation de l' « arc-en-ciel des énergies nouvelles ». Elle suggère que chaque région de France est bien pourvue en un type d'énergie nouvelle, de manière complémentaire. Le Nord-ouest bleu suggère les énergies marines, le sud orange l'énergie solaire, le nord-est vert la biomasse [134]. En cela, cette carte illustrative est similaire aux cartes des périodes précédentes où étaient représentées

133. Le Douarin, Compte rendu d'audition, 06/07/1981, reproduit à l'Annexe VII de PEHLIVANIAN, (2014)

134. D'après les cartes de la ressource brute, le Nord-Est serait plutôt bien pourvu en énergie géothermique, mais la couleur orange est déjà utilisée par le soleil ! Le vert donne au dessin un équilibre chromatique et une impression de complétude des couleurs, donc des sources d'énergie

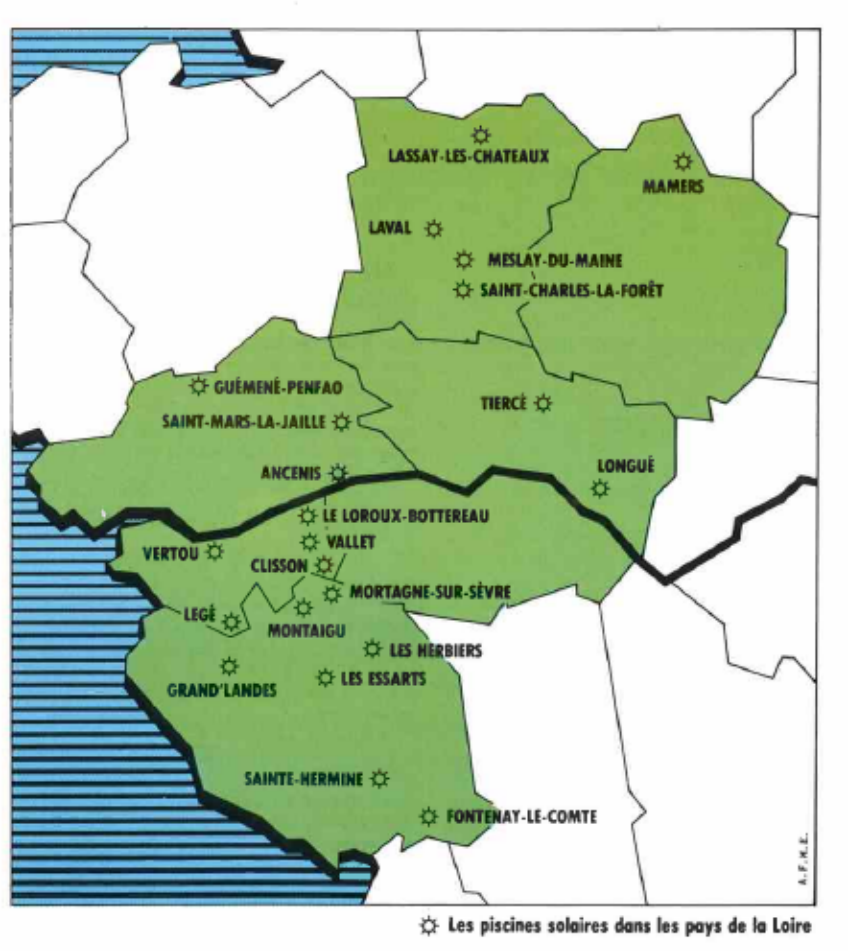



FIGURE 10.9 – Piscines solaires issues de programmes Région-COMES puis Région-AFME en Pays de la Loire en 1986 (RÉGION PAYS DE LA LOIRE et AFME, 1986, p. 21)

des sources d'énergie complémentaires dans chaque région. Cela donne aux politiques des énergies nouvelles l'image d'une prise en compte des spécificités naturelles de chaque région, et de décentralisation.

Pourtant, cela est moins vrai que jamais, puisque la répartition envisagée de l'utilisation des énergies nouvelles est presque décorrélée de la ressource. Elle n'est pas pensée en termes de complémentarité des ressources, mais, au niveau national, de marché et de contribution au bilan énergétique. On l'a vu en 10.1.7.2, les délégations régionales de l'AFME ne font qu'appliquer, en termes d'énergies nouvelles, de grandes orientations prises au niveau national, et ce de manière indifférenciée pour l'ensemble du territoire (cf 10.1.7.2). Aussi, les énergies marines, suggérées sur le dessin, sont peut-être à l'étude avec le programme du CNEXO, mais le recours à ces sources d'énergie n'est envisagé que dans le long terme, et le plus gros de l'effort de recherche concerne l'énergie thermique des mers pour un marché à l'export (cf 11).

En outre, le réseau électrique ne figure pas du tout sur cette carte, contrairement à celles qu'on a pu voir pour le territoire métropolitain dans les périodes précédentes.

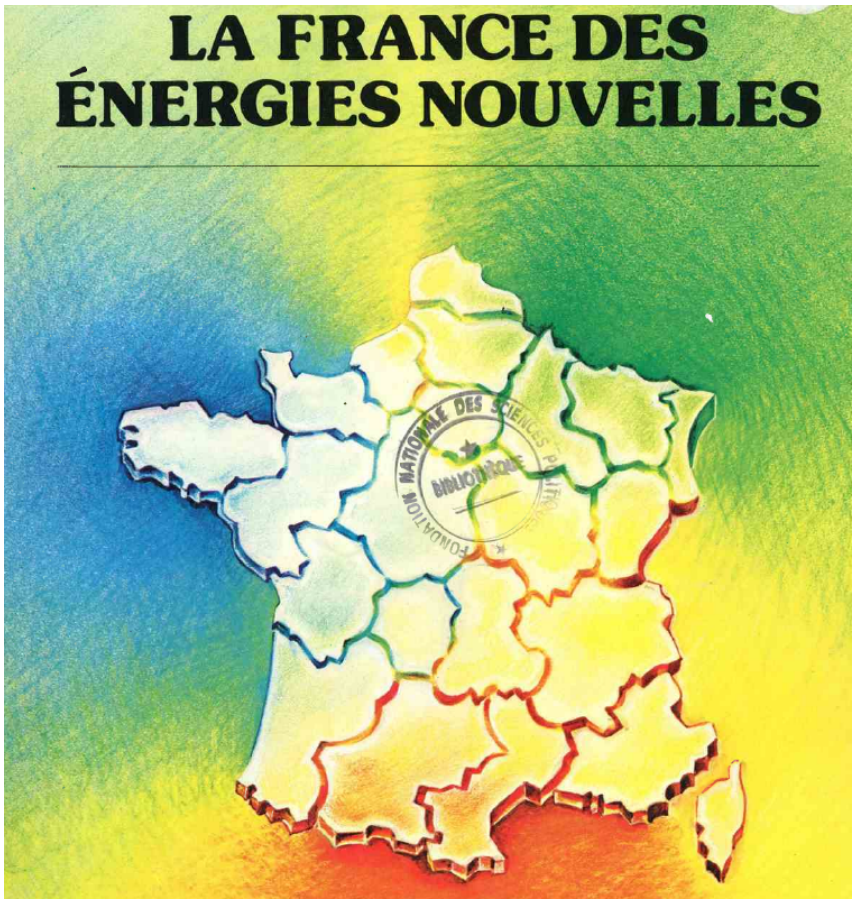



FIGURE 10.10 – Arc-en-ciel des énergies nouvelles ? Couverture de la brochure « La France des énergies nouvelles » (DATAR, 1980)

Celui-ci est en fait en toile de fond de toutes les cartes présentées par la DATAR, et fait que la complémentarité entre les sources d'énergie n'est plus nécessaire : le réseau maille l'ensemble du territoire, et est alimenté par des centrales nucléaires implantées également sur l'ensemble du territoire indépendamment (ou presque) des conditions naturelles [135] .

**10.2.2.2.3 Synthèse 10.2** Bien que marginales, les énergies nouvelles sont présentes dans la politique énergétique française des années 1970-1980 : incluses dans les scénarios prospectifs du Commissariat au plan, elles trouvent pour la première fois une place dans les bilans énergétiques français. Les mesures et programmes coordonnés par les institutions qui ont été successivement chargées du développement de leur utilisation mènent à la diffusion de dizaines de milliers de convertisseurs solaires et géothermiques. Mais ils n'atteignent pas leurs objectifs, et cela est particulièrement vrai pour l'énergie solaire, qui fait pourtant l'objet du plus grand effort de communication (PEHLIVANIAN, 2013). L'apparition du bois, ce combustible ancestral, parmi les énergies nouvelles à la fin des années

135. Certains paramètres naturels sont pris en compte bien entendu dans l'implantation des centrales nucléaires, ne serait-ce que la présence d'une réserve d'eau pour le refroidissement du circuit. Mais, comme c'est le cas des énergies fossiles depuis leur utilisation industrielle, c'est une énergie délocalisée.

1970, sa place prépondérante parmi les énergies nouvelles dans les bilans et prospectives énergétiques, ainsi que l'augmentation constatée de sa consommation appellent plusieurs constats. L'action du COMES puis de l'AFME envers cette sources d'énergie rentre bien dans le cadre de l'approvisionnement en énergie du territoire et de la politique de « maîtrise de l'énergie ». Elle a certainement joué dans l'augmentation de la consommation de bois. Cependant, cette augmentation se serait probablement produite sans ces mesures et programmes, même si elle aurait été moindre, en raison de la disponibilité des chaudières à bois, de leur familiarité et du coût compétitif du bois. La prise en compte du bois parmi les énergies nouvelles relève probablement aussi d'une stratégie de communication pour montrer le volontarisme du gouvernement français envers les énergies nouvelles et l'efficacité de son programme. Ainsi, le bois est une « énergie nouvelle » bien commode pour une action, mais aussi pour une communication, efficaces.

Par rapport à la période (1940-1970), on constate un renversement de la répartition territoriale des convertisseurs d'énergies nouvelles dans les années 1970-1980. Ce renversement concerne le type de sources d'énergie et de convertisseurs et la logique de la répartition, qui est, paradoxalement, à la fois localisée et déterritorialisée. Alors que les acteurs de la période précédente (COEE) puis EDF) voyaient des séries de grands aérogénérateurs et des centrales marémotrices alimenter le réseau électrique interconnecté, les acteurs des énergies nouvelles n'envisagent que des convertisseurs de petites ou moyennes puissances, directs, exploitant le soleil, la géothermie, la biomasse. La répartition des aérogénérateurs et des centrales marémotrices permettait une complémentarité spatio-temporelle, et elle prenait en considération les caractéristiques géographiques des ressources, implantant les convertisseurs là où la ressource est la plus intéressante. Cette répartition stratégique permettait une délocalisation de l'énergie convertie. À l'inverse, les acteurs des énergies nouvelles définissent au niveau national les sources d'énergie et les modèles de convertisseurs dont il faut encourager l'utilisation, ainsi que modalités de ce soutien, ce qui s'applique indifféremment selon l'endroit du territoire. Les spécificités en termes de ressources ne sont pas prises en compte, à l'inverse de ce que suggère la carte représentée en Figure 10.10. Ce sont des acteurs locaux qui mettent en œuvre cette politique, mais ils choisissent leurs actions parmi un ensemble défini de possibilités. En revanche, l'énergie n'est pas délocalisée.

Ce renversement est déterminé par la présence d'EDF et du réseau électrique, qui, absents des acteurs (directs) des énergies nouvelles, imposent le choix de ne pas développer de convertisseurs électriques d'énergies nouvelles pour le territoire français. L'exemple de la mini-hydraulique, encouragée par l'AFME mais rapidement reléguée à d'autres territoires, en est emblématique. L'électricité nucléaire et le contre-choc pétrolier induisent une conjecture économique défavorable aux programmes de diffusion des convertisseurs solaires et géothermiques.

### 10.2.3 Compétition internationale : des convertisseurs variés (solaire, éolien, énergie thermique des mers, houle, mini-hydraulique)

Le paramètre international joue un grand rôle dans les politiques des énergies nouvelles des années 1970-1980 : outre l'importance du choc pétrolier, événement en soi international, se joue une concurrence (technologique et économique) notamment avec les États-Unis, mais également une tentative de construction économique européenne par le biais de la recherche et de l'innovation, et, enfin, une volonté d'asseoir une domination technico-économique sur les pays du Tiers-Monde. L'action internationale constitue ainsi une réponse indirecte au choc pétrolier, qui ne relève pas de la politique énergétique française. En 1981, le COMES décrit ses « objectifs d[e] politique internationale en matière d'énergies renouvelables » par le « développement de l'industrie française à l'étranger », le « rayonnement de la France » et les « actions d'accompagnement » aux différentes politiques publiques étrangères. Celles-ci incluent la politique énergétique, mais aussi la « politique tout court, comme par exemple les atouts que les énergies renouvelables peuvent donner à la France dans une négociation Nord-Sud » (COMES, 1981, p. 49). Ces enjeux expliquent les importants investissements de recherche et développement que des acteurs français effectuent pour des technologies qu'ils ne destinent pas à des applications métropolitaines. Le rapport Chartier-Tazieff préparant la politique française de maîtrise de l'énergie, parle ainsi d' « énergies [qui] ne peuvent avoir qu'un rôle très modeste dans l'indépendance énergétique métropolitaine, mais peuvent contribuer de façon significative au bilan énergétique des DOM-TOM » et qui, « [d]u point de vue de l'activité industrielle et de l'exportation, notamment dans les pays en voie de développement, [...] peuvent avoir un impact important » (Chartier et Tazieff, 1982, p. 158). Selon le même rapport, les convertisseurs concernés par cette action internationale sont, par ordre décroissant de priorité (en termes de budget) : le solaire photovoltaïque, l'énergie thermique des mers, la géothermie moyenne et haute énergie, l'énergie de la houle, les éoliennes et la petite hydraulique (Chartier et Tazieff, 1982, p. 158). Les acteurs qui se positionnent sur ce créneau travaillent également sur solaire thermodynamique (PIRDES) et la mini-hydraulique (AFME).

Le COMES consacre ainsi une part significative de son budget à l'action internationale : entre 1981 et 1982, il est de 41.8 milliards de francs, soit environ 20% de son budget global (Chauvin-Michel, 2013, p. 37). L'AFME suit la même ligne de conduite, et déploie une importante activité internationale, soutenue par des financements de l'Union européenne (Leray et De la Roncière, 2003b ; Chartier, 2003). Le CEA, qui cherche à diversifier son activité à partir de 1969 suite à l'abandon par le programme nucléaire français de la filière UNGG, s'implique dans les applications des énergies solaire et éolienne dans les pays du Sud.

Ainsi, la concurrence internationale qui opérait dans la mise au point de convertisseurs exploitant les nouvelles sources d'énergie dans les années 1950-1960 est toujours moteur des recherches françaises sur cette thématique. Le prestige technologique, qui stimulait les recherches françaises sur les fours solaires, le photovoltaïque, les usines marémotrices, les centrales maréthermiques, en tant que « hautes » technologies, motive l'implication d'acteurs français dans le développement de certains convertisseurs d'énergies nouvelles, en particulier les centrales thermodynamiques et maréthermiques [136]. Mais une nouvelle modalité de comparaison entre les pays motive les programmes de développement des énergies nouvelles : c'est aussi sur l'effort consacré aux recherches sur ces convertisseurs, en tant que convertisseurs d'énergies nouvelles (et non, uniquement, en tant que haute technologie), que ces pays sont comparés. Les programmes français sont ainsi inspirés par la dynamique de recherche internationale : programmes européens, américains, japonais. Cette dynamique est elle-même fortement stimulée par un marché dans les pays du Sud.

La sous-section 10.2.3.1 examine l'influence des programmes menés à l'international sur les programmes français dans la « course » à l'innovation. La sous-section 10.2.3.2 étudie l'enjeu du marché dans les pays du Sud, les programmes menés par le COMES, l'AFME et le CEA pour y répondre et le type de convertisseurs concernés.

#### 10.2.3.1 Course à l'innovation. Union européenne, USAet Japon

Dans les rapports des institutions dédiées aux énergies nouvelles, une question revient de manière récurrente : quel pays est leader sur les énergies nouvelles (ou sur tel convertisseur) ? Comment la France se situe-t-elle par rapport aux autre pays industrialisés ? Un leitmotiv se dessine, celui du retard, de l'avance, du leadership. Les acteurs des énergies nouvelles comparent la France aux autres pays, non seulement pour la puissance ou le caractère novateur des convertisseurs expérimentés, mais aussi sur des critères comme le budget qu'ils consacrent à la recherche et développement sur les énergies nouvelles, ou encore le nombre de projets mis en œuvre.

En 1981, le COMES se félicite, non pas d'une quantité d'énergie moyenne consommée par habitant (comme le faisaient les acteurs de la politique énergétique dans les décennies précédentes), mais des crédits de recherche dépensés par habitant pour les énergies nouvelles : « [l]a rapidité de mise en place d'une politique française vigoureuse et efficace a

136. Pour ces convertisseurs, la présence historique française et son caractère « pionnier » sont régulièrement invoqués (recherches autour de l'équipe de Trombe au CNRS, projets de Georges Claude puis de la société L'énergie des mers. Pour justifier le PIRDES, le CNRS invoque ainsi l'« avance scientifique indéniable » de la France en termes d'énergie solaire, grâce aux « outils mis en œuvre depuis les années 1940 au CNRS et dans le milieu universitaire » (Pehlivanian, 2014, p. 344). Aussi, lorsque, en 1976, à Odeillo, un prototype de centrale solaire thermodynamique délivre ses premiers kilowatts électriques au réseau, « l'origine française de cette « première fois au monde » est souvent soulignée dans les articles et autres documents français » qui en rendent compte (Pehlivanian, 2014, p. 346).

permis à la R&D française d'être sans conteste la deuxième du monde, avec des dépenses publiques par habitant tout-à-fait comparables à celles des États-Unis » (COMES, 1981, p. 29). La Commission de l'énergie du XVIII[e] Plan utilise la comparaison de budgets nationaux sur la recherche en énergie pour appuyer ses recommandations en faveur d'un budget plus conséquent en France (qui s'alignerait, en l'occurrence, avec celui de la RFA, situé en deuxième position derrière les USA). On voit le budget de la France en faveur des énergies nouvelles dans une position moyenne, juste derrière les États-Unis et la Suède, et devant la RFA, le Japon, le Royaume-Uni et (voir tableau Figure 10.11). La Commission préconise d'augmenter le budget accordé à l'utilisation rationnelle de l'énergie et aux énergies nouvelles (voir tableau Figure 10.13) [137] (COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU PLAN. COMMISSION ÉNERGIE ET MATIÈRES PREMIÈRES, 1980a, p. 155-156). Un dernier exemple provient des actes d'un colloque de l'AFME sur l'avenir de la recherche française en maîtrise de l'énergie, en 1985. La contribution de François Moisan, « chargé de mission auprès du directeur scientifique de l'AFME », traite spécifiquement d'« éléments de comparaison internationale » sur la maîtrise de l'énergie (MOISAN, 1987). Le budget français de recherche et développement en maîtrise de l'énergie y est comparé, en termes d'intensité et de part entre utilisation rationnelle de l'énergie et énergies nouvelles, avec ceux des USA, du Japon, de la RFA et du Royaume-Uni, pour l'année 1983. Ce rapport conclut à une position « moyenne de la France » sur l'ensemble ces sujets, avec un budget plus faible que celui des États-Unis et du Japon, mais aussi avec la spécificité d'une plus grande part accordée à l'utilisation rationnelle de l'énergie qu'aux énergies nouvelles.

CREDITS BUDGETAIRES DE RECHERCHE ET DEVELOPPEMENT
POUR L'ENERGIE EN 1978

Millièmes du P.N.B.

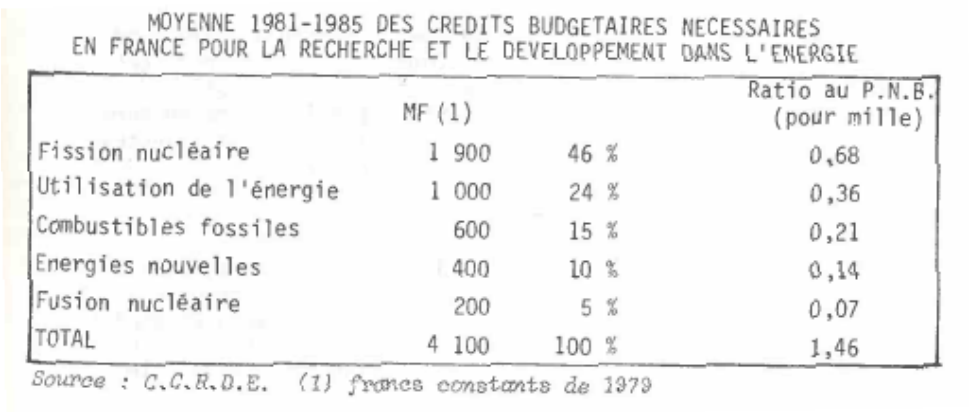
| | Etats Unis | Japon | R.F.A. | Royaume Uni | Italie | Suède | France |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Utilisation de l'énergie | 0,34 | 0,08 | 0,20 | 0,13 | 0,06 | 0,49 | 0,12 |
| Combustibles fossiles | 0,25 | 0,01 | 0,20 | 0,10 | - | 0,03 | 0,10 |
| Fission nucléaire | 0,57 | 0,64 | 0,94 | 0,70 | 0,57 | 0,15 | 0,69 |
| Fusion nucléaire | 0,19 | 0,06 | 0,07 | 0,05 | 0,09 | 0,05 | 0,05 |
| Energies nouvelles | 0,18 | 0,03 | 0,05 | 0,03 | 0,03 | 0,22 | 0,10 |
| TOTAL | 1,54 | 0,82 | 1,46 | 1,01 | 0,75 | 0,94 | 1,06 |

*Source : A.I.E. sauf France*
*C.C.R.D.E.*

FIGURE 10.11 – « Crédits budgétaires de recherche et développement pour l'énergie en 1978 » (millièmes du PNB) (COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU PLAN. COMMISSION ÉNERGIE ET MATIÈRES PREMIÈRES, 1980a, p. 155) [139]

137. La Commission préconise de se centrer sur l'énergie solaire et la biomasse : amélioration des capteurs, utilisation de la biomasse pour la production de méthanol, gazéification et fermentation de déjections animales.

139. URE : Utilisation rationnelle de l'énergie. ENR : énergies nouvelles et renouvelables.



MOYENNE 1981-1985 DES CREDITS BUDGETAIRES NECESSAIRES
EN FRANCE POUR LA RECHERCHE ET LE DEVELOPPEMENT DANS L'ENERGIE

| | MF (1) | | Ratio au P.N.B. (pour mille) |
|---|---|---|---|
| Fission nucléaire | 1 900 | 46 % | 0,68 |
| Utilisation de l'énergie | 1 000 | 24 % | 0,36 |
| Combustibles fossiles | 600 | 15 % | 0,21 |
| Energies nouvelles | 400 | 10 % | 0,14 |
| Fusion nucléaire | 200 | 5 % | 0,07 |
| TOTAL | 4 100 | 100 % | 1,46 |

*Source : C.C.R.D.E. (1) francs constants de 1979*

FIGURE 10.12 – « Moyenne 1981-1985 des crédits nécessaires en France pour la recherche et développement dans l'énergie » (COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU PLAN. COMMISSION ÉNERGIE ET MATIÈRES PREMIÈRES, 1980a, p. 155)

Ces comparaisons sont un signe de la compétition dans laquelle s'engagent les acteurs français des énergies nouvelles, mais aussi de la veille technologique qu'ils mènent. Cette veille, tout particulièrement focalisée sur ce qu'il se passe aux États-Unis et son Department of energy (DOE), oriente les programmes de recherche sur les énergies nouvelles [140].

Le contexte européen est important dans les programmes français, car l'Union européenne finance, à partir d'environ 1975, des programmes sur les énergies nouvelles, et cette politique est elle-même très influencée par le programme américain. Selon Chartier, la présence européenne opère dès 1975, et vise à obtenir « une capacité d'innovation en Europe du niveau de la Californie et des États-Unis » [141]. Ces programmes européens ne relèvent pas au départ d'une politique énergétique mais d'une politique de l'innovation,

140. Philippe Marchand, nommé responsable du programme énergie thermique des mers du CNEXO en 1979, mène dans ce cadre une veille technologique internationale, et étudie en particulier les programmes américains, mais aussi japonais.
MARCHAND, p.d., Entretien réalisé le 26 février 2016 au domicile de Philippe Marchand.
Autres exemples : en 1976, un état des lieux assez flou sur les indicateurs choisis est donné à propos du solaire thermodynamique dans un rapport du CNRS synthétisé par PEHLIVANIAN, (2014, p. 344), « [e]n 1976, ce sont les États-Unis qui restent en tête avec divers projets allant 1 MWe à 100 MWe, l'URSS a démarré un projet de 1 MWe, tandis que la RFA aurait déjà vendu une petite dizaine aux pays arabes, de puissance 1 MW, constructibles en trois ans. » Il sert à justifier la nécessité pour le gouvernement français de soutenir cette technologie afin de rester « dans la course ».
En 1988, dans un rapport sur son programme de développement, l'AFME annonce la poursuite du programme de recherche sur les biocarburants en raison de son aspect internationalement stratégique, les États-Unis et le Japon y consacrant eux-même une part significative de leur budget de recherche. L'Agence annonce que « face à cette compétition, la plate-forme de Soustons qui constitue un prototype unique en Europe, se transformera en plate-forme européenne » (AFME, 1988).

141. Avant de devenir directeur scientifique à l'AFME, Chartier est nommé spécialiste de la biomasse à la Commission européenne, en 1978. À ce titre, il est « allé aux États-Unis voir ce qui s'y faisait », puis a « réfléchi à ce qu'on pouvait faire en Europe ». À noter que, justement, Chartier a insisté sur les grandes différences de ressources entre les États-Unis et l'Europe en termes de biomasse, nécessitant un autre type de gestion.
CHARTIER, p.d., Entretien réalisé le 16 juin 2016 au bureau du Syndicat des énergies renouvelables (Paris).

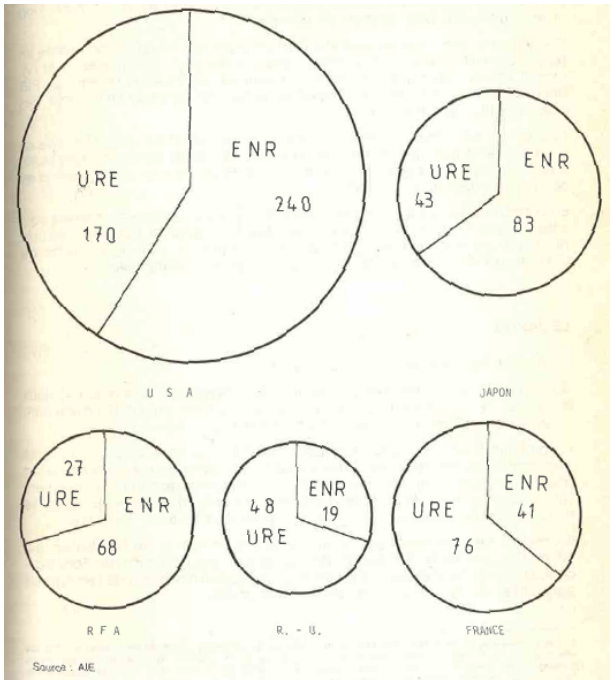



FIGURE 10.13 – « Effort public de différents pays dans le domaine de la maîtrise de l'énergie » (millions de $ US) - 1983 (MOISAN, 1987, p. 67)

menée par la direction de la Recherche (la « DG XII ») (BOUVIER, 2016) [142]. La DG XII est néanmoins rapidement suivie de la direction de l'Énergie (la « DG XVII »), au plus tard à partir de 1979 (MOISAN, 1987), dans son soutien aux énergies nouvelles.

Le solaire est prépondérant dans le programme européen, et est suivi de la biomasse, de la géothermie et de l'éolien (voir tableau Figure 10.14 et diagramme Figure 10.15). De manière générale, le programme français en faveur des énergies nouvelles s'aligne remarquablement sur celui de l'Union européenne, en termes de sources d'énergie valorisées, mais aussi en termes de technologies. Ainsi, le solaire thermodynamique est encouragé de manière similaire, avec l'expérimentation parallèle des centrales d'Odeillo et de Vignola, entre 1975 et 1982, avant d'être supplanté, en raison de problèmes technico-économiques (BOUVIER, 2016) [143], par les programmes en faveur du photovoltaïque. C'est ainsi qu'un Plan photovoltaïque est lancé par l'Union européenne dans les années 1980 (CHABOT, 1987), qui mène à la construction de trois centrales solaires en France métropolitaine, en Corse et en Guyane entre 1980 et 1983 : une centrale de 35 kW est construite en Guyane par SERI-Renault pour alimenter des habitations, une autre de 50 kW dans le Gard pour un émetteur de télédiffusion, et une en Corse de 44 kW par Leroy-Somer, qui alimente

142. Les premiers Programmes-cadres de recherche et développement (PCRD) européens sont mis en place en 1982, dans le but de structurer la recherche européenne. Des PCRD sur les énergies nouvelles seront mis en place. Avant les PCRD, ces premiers programmes de recherche montrent ainsi déjà la volonté de structurer une recherche européenne (sur la maîtrise de l'énergie) concurrentielle avec celle des États-Unis et du Japon.

143. Selon BOUVIER, (2016), la centrale de Vignola utilise plus d'énergie qu'elle n'en produit !

une quinzaine d'habitations dans les montagnes (Pehlivanian, 2014, p. 433).

| Millions d'E.C.U. | R & D | | Démonstration |
|---|---|---|---|
| | 2e Programme 1979-1983 | 3e Programme 1985-1989 | Budgets 1978-1985 |
| URE | 27 | 43,6 | 181,3 |
| Solaire | | 35,5 | 37,4 |
| Éolien | 46 | 17 | 19,9 |
| Biomasse | | 20 | 44,8 |
| Géothermie | 18 | 20 | 10,8 |
| Hydraulique | | | 5,8 |
| Total ENR | 64 | 92,5 | 118,7 |
| Analyse de systèmes | 6 | 9 | |
| Total | 97 | 145 | 300 |

Figure 10.14 – Budget consacré à la maîtrise de l'énergie par la Commission européenne (1979-1985) (Moisan, 1987, p. 82)

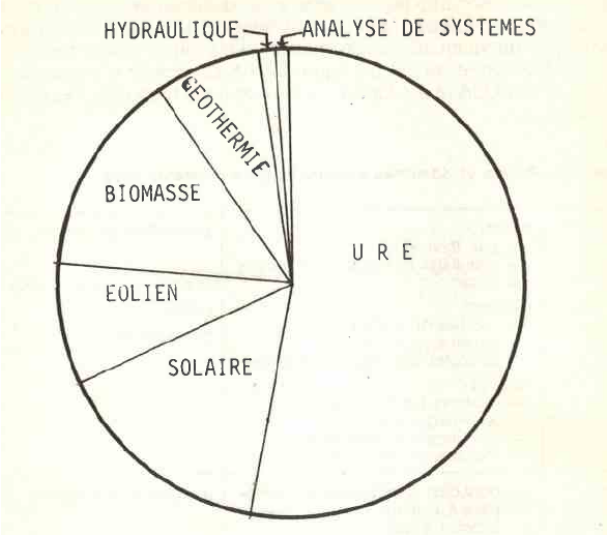



Figure 10.15 – Répartition thématique des budgets de la Commission européenne en maîtrise de l'énergie (1979-1985) (Moisan, 1987, p. 83)

On ne peut cependant pas en conclure que les programmes européens ont dicté les programmes français sur les énergies nouvelles. D'une part, cette connivence n'est pas étonnante dans la mesure où des experts français sont présents à l'Union européenne, qui sont également acteurs des énergies nouvelles en France [144]. On peut ainsi plutôt retenir une influence réciproque entre les deux programmes, et de manière différenciée selon les technologies. Le programme énergie thermique des mers du CNEXO a ainsi été directement influencé par les programmes américain et japonais, et non européen, qui ne prend pas cette source d'énergie en considération. Le CNEXO s'affiche comme « leader » en termes d'énergie thermique des mers en Europe, et l'est dans une certaine mesure

144. C'est le cas de Chartier, mais aussi de Wolfgang Palz, spécialiste de l'énergie photovoltaïque.

puisque les acteurs du programme énergie thermique des mers figurent comme expert de la question à l'Union européenne [145].

#### 10.2.3.2 « Guerre économique » pour un marché international

Le marché international est un moteur crucial de l'implication des acteurs français des énergies nouvelles. Il s'agit en particulier du marché dans les pays en voie de développement, qui achèteraient des convertisseurs auxquels les acteurs de la politique énergétique française ne laissent pas de place, ou laissent une place marginale [146]. L'implantation de technologies françaises est considérée dans le cadre de la coopération Nord-Sud. Ainsi, dès 1974, le rapport d'un groupe d'experts placés auprès du Premier ministre pour orienter les actions à mener en faveur des énergies nouvelles conclut qu'« il faut concevoir l'énergie solaire pour la France comme une activité où la part « exportation » de techniques et de licences, pourrait l'emporter rapidement sur les usages intérieurs » (Ministère de la protection de la nature et de l'environnement, 1974). Une grande part de l'activité internationale du COMES puis de l'AFME est dédiée à cet enjeu [147]. Le programme énergies marines du CNEXO s'inscrit aussi très explicitement dans cette stratégie de positionnement technologique et commercial international (cf 11). Il explique que certains fabricants de convertisseurs d'énergies nouvelles aient continué leur activité dans les années 1990, tels que Photowatt [148] (panneaux photovoltaïques), Aérowatt (éoliennes de petites et moyennes puissances).

Les convertisseurs destinés à l'export sont de deux types principaux :

— les techniques de production décentralisées d'électricité (photovoltaïque, éolien, mini-centrales hydrauliques et houlomotrices), d'énergie mécanique (pompage solaire) ou de chaleur (panneaux solaires - seul point de convergence avec le programme énergétique national).

145. Philippe Marchand est ainsi appelé à effectuer un rapport sur cette technologie pour l'Union européenne en 1983.
Marchand, p.d., Entretien réalisé le 26 février 2016 au domicile de Philippe Marchand.

146. Marc Vergnet, chargé du programme énergie solaire à l'AFME — qui fondera ensuite l'entreprise Aérowatt, productrice d'éoliennes de petites et moyennes puissance vendues dans les DOM-TOM et les PVD —, parle ainsi de la recherche française sur le photovoltaïque : « c'est en termes d'enjeu énergétique mais aussi de développement, que se pose [...] le problème de l'énergie photovoltaïque dans les pays en développement ; pour les pays développés, l'enjeu est essentiellement industriel. » (Vergnet, (1987, p. 524)).

147. Leray et De la Roncière, (2003b, p. 69), mentionnant que les activités internationales au COMES « étaient importantes pour un organisme de cette taille », n'évoque ainsi que des accords de « coopération » signés « avec de nombreux pays en développement (PED) [...] [et] portant sur la promotion des énergies renouvelables ». Bernard Devin, ingénieur CEA et responsable du Service des affaires internationales, au COMES puis à l'AFME, a ainsi lui-même travaillé sur le solaire thermique et thermodynamique à destination des pays du Sud (selon le site internet de Global Chance, association philanthropique de scientifiques œuvrant pour l'aide au développement des pays du Sud, et dont fait partie Bernard Devin : http ://www.global-chance.org/index.php).

148. Filiale de la CGE et d'Elf-Aquitaine.

Ils s'adressent aux territoires isolés (îles et archipels) ou dont un développement se produirait de manière différente des pays industrialisés, c'est-à-dire avec le maintien d'une population rurale, sans concentration de population qui nécessiterait également une concentration de l'énergie [149] ; ce marché est supposé croître simultanément au processus de développement de ces pays. Les convertisseurs photovoltaïques, éoliens et microhydrauliques trouvent en outre un marché restreint en France qui existait déjà pour les aérogénérateurs dans les années 1950-1960, à savoir l'équipement en France d'installations isolées de faibles puissances (phares et balises, relais hertziens (cf 9.1.3.3)).

— Les technologies de production centralisée d'électricité (centrales solaires thermodynamiques, centrales maréthermiques), vendues « clé en main », dont la France détiendrait le savoir-faire scientifique.

L'enjeu est donc double : obtenir un « leadership » mondial en termes de parts de marché, et, plus particulièrement dans le cas des centrales clé-en-main, asseoir une position de domination technico-économique vis-à-vis des pays du Sud. Les industriels qui s'impliquent dans les recherches sur l'énergie thermique des mers parlent ainsi de « guerre économique dans laquelle les armes du « savoir faire » et du « pouvoir produire » prennent, face aux atouts politiques et financiers, une importance d'autant plus grande que [les] ressources minérales et énergétiques [françaises] sont modestes » [150]. L'industrie française est évaluée avec des indicateurs comme le chiffres d'affaire de vente de machines ou le nombre de machines vendues à l'étranger. Elle est, là encore, comparée avec l'industrie américaine, japonaise, européenne, avec qui il faut donc être « dans la course », comme l'affirme Michel Rolant à propos de l'industrie française du photovoltaïque (Rolant, 1985b, p. 13).

La Délégation aux énergies nouvelles, le COMES puis l'AFME, mènent ainsi des programmes pour l'énergie solaire, l'éolien et la micro-hydraulique dans le cadre de la coopération et du marché des énergies nouvelles dans les pays du Tiers-Monde. En 1976, un programme « Sahel énergies renouvelables » est lancé par le ministère de la Coopération et la Délégation aux énergies nouvelles, qui est ensuite confié au COMES puis à l'AFME. Ce programme finance, dans les pays francophones d'Afrique de l'Ouest, des projets d'installations d'irrigation, d'alimentation en eau potable, de chauffage, de cuisson,

149. Pour le COMES, dans les pays en voie de développement, le « développement » envisagé n'est pas « industriel » (et la possibilité d'utilisation des énergies renouvelables à cette fin est « souvent surestimée ») (COMES, 1981, p. 50), mais rural : « l'énergie solaire et la biomasse décentralisée comme parfois l'énergie éolienne, sont [...] des instruments de choix pour améliorer la qualité de vie en milieu rural » (COMES, 1981, p. 54).
Michel Rolant tient « à rappeler que le développement énergétique des pays du Tiers monde pourrait suivre des voies différentes du nôtre. [...] Il y a donc, outre la nécessité humanitaire de favoriser le développement économique, et au delà des difficultés liées à la rareté actuelle du capital, des perspectives de marché intéressantes pour les systèmes énergétiques délocalisés (Rolant, 1985b, p. 13).

150. AN2000 0404/6, p.d., rapport d'Asteo, Groupement interprofessionnel pour l'exploitation des océans comprenant les industriels concernés par l'énergie thermique des mers, dont Empain-Schneider, Aslthom Atlantique et la CGE, envoyé au secrétaire d'État à la recherche le 12 juillet 1978.

et de production d'électricité décentralisée, par des convertisseurs solaires thermiques, thermodynamiques, photovoltaïques, par des éoliennes de pompage et électrogènes, par la micro-hydraulique ou par l'utilisation de la biomasse (SEMA-ÉNERGIE, 1982) [151].

Les programmes THEK et THEM sont également mis en place dans l'optique d'exporter des technologies dans les pays du Sud. Ils sont lancés pour le premier en 1976 par le CNRS et le laboratoire d'héliotechnique de Marseille, et pour le second en 1978 par le CNRS et EDF, et entrent dans le cadre du COMES à sa création, puis de l'AFME. Ils prévoient de « mettre en place des centrales solaires, fonctionnant sur le principe des centrales thermiques classiques qui pourraient dores et déjà être compétitives dans les pays les plus ensoleillés », et prennent en considération « le marché d'exportation des centrales solaires [qui] serait déjà convoité par les États-Unis, l'URSS, la RFA, le Japon dans des programmes plus ou moins ambitieux » (PEHLIVANIAN, 2014, p. 340-344). Des expérimentations sont lancées pour des moyennes (programme THEK pour thermo-électro-kilowatt : de l'ordre de la centaine de kilowatts) et grandes (THEM pour thermo-électro-mégawatt, de l'ordre du mégawatt) puissances. Le programme THEM s'ancre de manière très nette dans les deux enjeux de prestige technologique et de positionnement dans le marché mondial. Selon Robert Chabbal, son but est d'affirmer un « "engineering" français capable d'exploiter le savoir faire et les brevets des établissements publics afin d'assurer dans l'avenir la vente à l'exportation des centrales à tour » [152]. Le projet phare du programme THEM, Themis, présente en effet une « originalité française » parmi les projets mondiaux similaires [153] (PEHLIVANIAN, 2014, p. 371) : la technologie des centrales à tour utilisant les sels fondus comme liquide caloporteur et moyen de stockage [154]. Les centrales THEK, qui ne possèdent ni tour, ni fluide de stockage, sont moins novatrices mais doivent trouver un débouché industriel plus immédiat. Deux prototypes sont construits entre 1976 et 1978 et installés à Marseille. Le CNRS arrête ses recherches sur la filière thermodynamique dans les années 1980 au profit de la filière photovoltaïque pour des raisons économiques, avec un dépassement conséquent des budgets dans la construction de la centrale Thémis, mais

151. En 1979, le programme Sahel énergies renouvelables a bénéficié d'un crédit total de 34 MF dont 25 MF du ministère de la Coopération, 8 MF de la Délégation aux énergies nouvelles, 1 MF du COMES. Une nouvelle convention est passée entre le ministère de la Coopération et le COMES pour un nouveau programme d'un montant annuel de 15 MF.
Brochure du ministère de la Coopération et du développement et du ministère des Relations extérieures : « Énergies renouvelables et développement », éditée vers 1979, disponible sur le site du Centre de Documentation et des Archives de l'Organisation pour la mise en valeur du Fleuve Sénégal .

152. Lettre de Robert Chabbal, directeur du PIRDES, à Jean-Pierre Causse, 22/03/1978, cité par PEHLIVANIAN, (2014, p. 348).

153. À l'inauguration de la centrale, en 1983, il y a déjà six centrales de cet ordre de grandeur dans le monde, dont la plus puissante est Solar One, aux États-Unis, avec une puissance de 10 MW (PEHLIVANIAN, 2014, p. 377)

154. La centrale est constituée d'une chaudière située en haut d'une tour et d'un champ d'héliostats concentrant le rayonnement sur la chaudière. Le rayonnement solaire chauffe le mélange de sels fondus (nitrates de sodium et de potassium) à 450°C, qui vaporise l'eau actionnant un groupe turbo-alternateur à vapeur . D'après Philippe Chartier, cette technologie intéresse EDF pour le stockage de l'énergie nucléaire. CHARTIER, p.d., Entretien réalisé le 16 juin 2016 au bureau du Syndicat des énergies renouvelables (Paris).

aussi probablement de difficultés similaires dans des projets d'autres centrales de ce type dans le monde.

Le COMES encourage l'industrie des panneaux photovoltaïque en considérant « ses capacités de production (et d'emploi) à court terme en tant qu'industrie de pointe exportatrice », en particulier dans les pays du Tiers-Monde (COMES, 1981, p. 23). En 1985, Rolant annonce ainsi que « [s]ous l'égide de l'AFME, un plan photovoltaïque a été lancé avec l'ambition de conquérir dans un proche avenir 15% du marché mondial ». En effet, « la maîtrise des techniques de conversion photovoltaïque est l'un des grands enjeux des années à venir », car il y a, « outre la nécessité humanitaire de favoriser le développement économique, et au delà des difficultés liées à la rareté actuelle du capital, des perspectives de marché intéressantes » (Rolant, 1985b, p. 13). La participation à l'industrie photovoltaïque a été vécue comme particulièrement concurrentielle, toujours avec les États-Unis et le Japon. Le ministère apporte son soutien à l'entreprise Photowatt, filiale du CEA, qui doit ainsi prendre une place de choix dans le marché européen et mondial de l'industrie photovoltaïque [155]. Au niveau européen, le programme « Eureka » visant à renforcer l'industrie européenne finance des contrats avec des industriels français, dont le premier associe l'entreprise française Solems à la société allemande MBB pour le développement des applications du silicium amorphe (Chabot, 1987, p. 560).

Dans les années 1980, l'AFME soutient le redéploiement de l'activité des constructeurs de petites turbines du territoire français aux pays du Sud (cf 10.2.2.2.1). En effet, en 1985, les minicentrales hydro-électriques en déréliction en France « sont très demandées pour l'électrification des zones isolées », et « le marché mondial des centrales hydroélectriques de petite puissance est en croissance continue » (AFME, 1988). L'Agence finance ainsi des recherches pour la mise au point de turbines « plus rustiques, mieux adaptées aux conditions d'exploitation des [pays sous-développés] » (Lebrun, 1987, p. 578). En 1988, un état des lieux de l'AFME peut affirmer que, dans les pays du Tiers-Monde, « 40 principaux constructeurs de turbines sont présents, dont 6 français qui réalisent 15% du chiffre d'affaires mondial » (AFME, 1988, p. 179).

Le COMES puis l'AFME consacrent une petite partie de leur budget aux aérogénérateurs de petites et moyennes puissances ($< 750$ kW) [156] à un programme éolien lancé afin de « mettre en place une industrie compétitive et fortement exportatrice » (Duchêne-Marulaz, 1987, p. 566). Ils destinent ces convertisseurs aux pays en voie de développement, comme l'Amérique latine et le Moyen-Orient, mais aussi la Californie qui s'intéresse

155. En 1985, Bernard Chabot, « chargé de mission des techniques nouvelles de l'AFME », place ainsi Photowatt comme « leader » européen avec l'autre entreprise française Solems, mais aussi AEG et MBB (RFA) et Pragma (Italie) (Chabot, 1987, p. 5660).

156. En 1980, 4% des investissements du COMES sur les énergies nouvelles concerne la « météorologie et le vent » (Teissier, 2013, p. 23). En termes de R&D, l'énergie éolienne représente 8% du budget consacré aux énergies nouvelles par l'AFME entre 1982 et 1985.

à un approvisionnement en électricité éolienne, car « le taux de pénétration de l'énergie nucléaire [y] est nettement plus faible que celui de la France » (Vergnet, 1987, p. 531). Ainsi, en 1985, « ces installations californiennes représentent 95% des installations américaines et 75% des installations mondiales », dont 40% sont importées d'Europe, ce qui en fait donc « un marché très attractif pour les constructeurs européens » (Duchêne-Marulaz, 1987, p. 564). Des recherches sont menées, non par EDF, mais par l'ONERA , qui assure la « coordination du travail de recherche, de l'instrumentation, des essais et de l'assistance technique aux constructeurs », en collaboration avec le CSTB, qui effectue l'étude du potentiel éolien et le comportement des éoliennes en fonction des différents vents (Duchêne-Marulaz, 1987, p. 567).

Le CEA finance des expérimentations sur de petites unités de distillation éolienne pour les pays en voie de développement. Avec sa filiale Aerowatt, et avec l'aide du service des Phares et balises, premier grand client d'Aerowatt (cf 9.1.3.3), une unité de distillation de l'eau de mer par un aérogénérateur de 4 kW est mise en place et opérationnelle en 1982 sur l'île du Planier au large de Marseille, et deux autres sont prêtes à être expédiées en Polynésie (Maurel, 1982). Des projets de démonstration sont en outre financés par l'Union européenne, comme la« première ferme éolienne française constituée de 10 machines Aérowatt de 10 kW installées à Lastours et couplées au réseau interconnecté », installée en 1986. Selon Philippe Duchêne-Marulaz, chef de la division climatologique du CSTB, l'Union européenne « joue un rôle moteur dans le développement de l'énergie éolienne par l'intermédiaire d'opérations de démonstration (DG XVII) et de programmes pluri-annuels de recherche et développement (DG XII) » (Duchêne-Marulaz, 1987, p. 562). Selon cet acteur, malgré ces moyens mis en place pour la recherche sur l'énergie éolienne, le budget français est « encore trop modeste par rapport à des pays comme les USAou la RFA par exemple. » [157]. Le CEA s'implique également dans le solaire thermodynamique, et ce avant le premier choc pétrolier. Il prend ainsi part au capital de la Sofretes, fabricant de pompes solaires depuis la fin des années 1960, dont le marché se situe dans les pays en voie de développement (cf Partie III). À la faveur du choc pétrolier et de l'intérêt accru des pouvoirs publics pour l'énergie solaire, il fait construire une plate-forme d'essais de technologies solaire à Cadarache. Avec Renault, il construit une centrale solaire thermodynamique de 100 kW à Vignola, en Corse (Pehlivanian, 2014, p. 395). Le CEA s'implique également dans les recherches sur le photovoltaïque, en créant un Groupe pour les énergies nouvelles qui équipe, entre 1980 et 1988, 2500 maisons de Polynésie française en panneaux photovoltaïques Photowatt (Pehlivanian, 2014, p. 435-440). Outre l'entreprise Photowatt, il rachète Aérowatt, entreprise qui, faisant suite au B.E.S.T fondé dans les années 1950 (cf 9.1.3.3), commercialise des petits aérogénérateurs, que le CEA cherche également à implanter en Polynésie. La participation au développement des énergies re-

157. En 1985, ce budget est de 16 MF, contre 21 millions de dollars aux USA.

nouvelables par le CEA en Polynésie est liée à sa présence massive sur le territoire pour des raisons militaires, car il y a réalisé des essais nucléaires. Il cherche ainsi à se forger une image philanthropique pour compenser la « barbarie » de ces essais (Akrich, 1988).

### 10.2.4 Synthèse 10.2

La création par les gouvernements successifs d'institutions dédiées aux énergies nouvelles relève autant d'une politique énergétique en réponse aux chocs pétroliers que d'une volonté de rendre le programme nucléaire acceptable voire invisible aux yeux de ses opposants. Les acteurs de la politique des énergies nouvelles pour le territoire français privilégient les convertisseurs géothermiques, solaires et de biomasse pour des usages directs dans les secteurs résidentiels et tertiaires. En termes de résultats, c'est la biomasse, et surtout le bois, qui contribue le plus à un approvisionnement en énergies nouvelles. L'intégration du bois dans l'administration des énergies nouvelles est à la fois le moyen d'une politique énergétique, au sens où des mesures efficaces sont prises pour l'augmentation de sa consommation, mais aussi d'une stratégie de communication pour montrer le volontarisme et l'efficacité des mesures nationales. Malgré une réelle multiplication des installations géothermiques et solaire sur le territoire français, les bilans énergétiques révèlent des résultats en-deçà des objectifs fixés par les acteurs officiels de la prospective énergétique. Ce n'est pas le cas de la biomasse. Ainsi, rangée parmi les « énergies solaires », elle est un moyen de baisser la facture nationale de pétrole, mais aussi de satisfaire les citoyens pro-solaire et anti-nucléaires.

La cartographie des énergies nouvelles en France tranche avec celle que le COEE puis EDF proposaient dans les années 1950-1960 : les sources d'énergie, la forme des convertisseurs et leur intégration au système énergétique est radicalement différente. L'utilisation des énergies nouvelles est à la fois localisée (utilisations directes) et déterritorialisée (le choix de la ressource et des convertisseurs est peu influencé par les caractéristiques locales). Cette nouvelle répartition des convertisseurs montre l'importance d'EDF et du réseau électrique dans les choix énergétiques métropolitains, et la place marginale laissée dans le système énergétique à d'autres convertisseurs primaires que les centrales nucléaires. En outre, la forme des convertisseurs d'énergies nouvelles encouragés en France est conforme à certaines revendications des militants écologistes, qui souhaitent une décentralisation du système énergétique. Cette décentralisation n'est que partielle, car les décisions sur les types de convertisseurs à implanter et sur les manière d'encourager leur diffusion sont prises au niveau national.

Comme dans les années (1940-1970), le paramètre international est crucial en termes de coopération (subventions de l'Union européenne) et de compétition technologique et

économique entre pays industrialisés, et fait appel à tous les types de convertisseurs. Le marché international permet à des industriels (CEA, constructeurs de petites turbines hydrauliques, d'aérogénérateurs, de panneaux photovoltaïques, de pompes solaires) de trouver des débouchés inexistants en France. Il motive des programmes de développement de grandes centrales électriques (solaires : PIRDES, maréthermiques : CNEXO). Les choix de programmes étrangers en termes d'énergies nouvelles influencent les programmes français. Contrairement à la période (1880-1970), des acteurs de la politique énergétique valorisent les énergies nouvelles pour elles-mêmes, et non comme des sources d'énergie qu'il faut utiliser par défaut, et, si les bilans énergétiques sont toujours utilisés pour évaluer la puissance relative de chaque nation, ce n'est plus la quantité d'énergie consommée qui compte, mais, parmi d'autres critères tels que le budget consacré à la maîtrise de l'énergie, la quantité d'énergies nouvelles. Cette valeur désormais accordée aux énergies nouvelles induit des jeux sémantiques dont il est maintenant question dans le 10.3.

## 10.3 Énergies douces, nouvelles et renouvelables : un point socio-sémantique

Cette section propose une analyse socio-sémantique des énergies nouvelles. Elle fait d'abord une synthèse d'expressions utilisées et des sources d'énergie désignées par certains acteurs, ainsi que des représentations et des enjeux qu'ils y associent. Elle étudie ensuite plus précisément la place de l'écologie parmi ces enjeux. Cette analyse sémantique n'a pas le caractère systématique de celle des revues *La Nature* et *Le Génie civil* pour les périodes précédentes. Mais l'extraction de discours dont les auteurs sont bien identifiés (Amis de la Terre et militants anti-nucléaires proches de cette association ; Commissariat général au Plan ; Délégation aux énergies nouvelles ; AFME puis ADEME) permet, d'une part, de compléter l'analyse faite pour les périodes précédentes, et d'autre part d'éclairer les enjeux politiques de l'utilisation des énergies nouvelles de la période (1970-1990).

### 10.3.1 Contenus politiques et appropriations sémantiques

Certains auteurs ont déjà souligné les enjeux politiques contenus dans les mots choisis pour désigner les énergies renouvelables. Ainsi, Liébard, acteur des énergies nouvelles dans les années (1970-1990), fait l'analyse suivante :

> « [l]es tenants de l'énergie nucléaire ont toujours voulu s'approprier les termes développés par les partisans des énergies renouvelables. Dès 1974, ils

> se présentaient comme les protagonistes des énergies nouvelles. Pour les citoyens, les énergies nouvelles signifiaient les énergies renouvelables. Mais, dans les conférences publiques ou dans les actions publicitaires, les défenseurs du nucléaire civil utilisaient tout le temps le terme d' « énergies nouvelles », ce qui a fait naître une sorte de confusion volontairement entretenue. Cette politique a toujours été menée sur le terrain de l'appropriation sémantique, d'où une ambiguïté depuis lors, sur le thème « le nucléaire en fait partie » ou « le nucléaire n'en fait pas partie ». [...] Dans les années 1970, l'idée était donc d'habiller l'image du nucléaire civil des vêtements des énergies renouvelables, avec toutes leurs qualités. Ce procédé n'a jamais cessé d'exister (LIÉBARD, 2015, p. 30-31). » .

Les acteurs du nucléaire ont ainsi recouru à des jeux sémantiques comme outils de gouvernement de la critique anti-nucléaire, en utilisant des catégories plus englobantes et moins spécifiques que celles des militants anti-nucléaire. J'ai choisi d'expliciter quatre expressions couramment utilisées sur la période, bien que des variantes aient existé : sources nouvelles d'énergie, telles qu'« énergies naturelles », « énergies de flux » ou encore « énergies éternelles ». Ces expressions sont, de la plus englobante à la plus spécifique : « énergies nouvelles », « énergies renouvelables », « énergie solaire » et « énergies douces ». Elles sont synthétisées en Table 10.9.

Les militants anti-nucléaire tels que les Amis de la Terre ou les journalistes de *La Gueule ouverte* ou le Groupe de Bellevue construisent la proposition d'un système énergétique basé sur les énergies renouvelables, en opposition à l'utilisation de l'énergie nucléaire. Les contenus politiques de ces propositions sont variés et plus ou moins assumés. Il est cependant possible d'en tirer quelques lignes directrices, qui résultent de l'opposition (absolue ou plus souple) à l'utilisation de l'énergie nucléaire centralisée, risquée, polluante, productiviste (10.2). Comme on l'a vu, ces acteurs promeuvent en premier lieu l'utilisation de l'énergie solaire, qui contient l'énergie solaire *stricto sensu* mais aussi l'énergie éolienne, et la biomasse. Certains parlent également d'« énergies douces », ce qu'ils associent aux « technologies douces », mais aussi à une société alternative, refusant ainsi de dissocier la source d'énergie du convertisseur et du système énergétique dans les qualités conférées aux moyens d'utilisation de l'énergie [158]. Ils en promeuvent l'utilisation par une pluralité d'acteurs, et de manière diversifiée, ce qu'ils opposent au monopole des savoirs, pratiques et techniques par les experts, dont l'énergie nucléaire est emblématique. Ainsi, les centrales solaires sont assimilées par certains d'entre eux, comme tout type de centrale, à la « technocratie », et donc à une récupération par le pouvoir en place des mouvements

158. Voir ainsi l'article du biologiste Philippe Lebreton dans la revue *Après-demain*. Selon lui, le caractère « doux » ou « dur » des technologies en général peut être jaugé par trois critères : celui du recyclage, celui de l'« homéostasie (la stabilité et l'optimum » et celui de la diversité (ou de la complexité) de l'ensemble qui contient la technologie (acteurs, sources d'énergie...) (LEBRETON, 1974).

TABLE 10.9 – Énergies nouvelles : synthèse socio-sémantique

| Expression | Sources d'énergie | Caractéristiques | Locuteur |
|---|---|---|---|
| Énergies nouvelles | Vent, soleil, géothermie, biomasse, ETM, houle. [Marées, Hydraulique, Nucléaire] | Gratuites, peu polluantes | EDF, CEA, Comm. général au Plan, DEN, COMES, AFME |
| Énergies renouvelables | Vent, soleil, biomasse, ETM, marées, houle | Illimitées, gratuites, peu polluantes | Comm. général au Plan, COMES, Gpe Bellevue, AFME |
| Énergie solaire | Vent, soleil, biomasse. [ETM, hydraulique] | Illimitées, gratuites, déconcentrées, locales, peu polluantes | DEN, COMES, AFME, Gpe Bellevue, militants écolo (Amis de la Terre, *Gueule ouverte*) |
| Énergies douces | Vent, soleil, biomasse, [géothermie] | Illimitées, gratuites, déconcentrées, locales, peu polluantes | militants écolo |

écologistes. En 1974, Laurent Samuel, journaliste à l'hebdomadaire de critique écologique *La Gueule ouverte*, reprend ainsi le discours de l'ethnologue Robert Jaulin, en affirmant que « l'aspect centrale [lui] paraît aussi inquiétant que l'aspect nucléaire » ; et que « le capitalisme ne s'est, jusqu'à une époque récente, guère préoccupé des énergies douces, si ce n'est sous la forme de projets « géants » à son échelle : fermes solaires de milliers de km ; satellites captant l'énergie du soleil, etc. » Militant pour « l'autogestion », il affirme qu'elle « ne fera pas avec des centrales nucléaires, ni même avec des centrales solaires », mais avec des énergies douces et décentralisées » (SAMUEL, 1974). En 1978, la Commission de l'énergie des Amis de la Terre explicite son scénario de « transition » vers une « alternative solaire », inspirée du projet Alter, comme la mise en place d'« installations petites et moyennes », par de « petites et moyennes équipes » : « le petit bureau d'études, [...] la coopérative artisanale ou ouvrière, [...] l'équipe d'ingénieurs ouvrant les ateliers de quelques dizaines de travailleurs », à l'inverse de la construction de « matériels géants » grâce à des « technologies lourdes » (« satellites géostationnaires captant le rayonnement solaire au dessus de l'atmosphère ; énormes centrales marines selon le procédé Georges Claude ; étendues immenses de photopiles sous le soleil d'Afrique », au moyen de « grandes concentrations de capitaux [et] de grands laboratoires d'essais et de recherches » par de « grandes

organisations techno-bureaucratiques »). Selon ce point de vue, les centrales hydrauliques et marémotrices, dans leurs utilisations classiques, sont également à prohiber. Le recours à la géothermie n'est pas une solution unanimement « douce » : son caractère écologique ou renouvelable est moins évident que celui de l'énergie solaire ou éolienne. Ainsi, selon Lebreton, la géothermie est moins douce que le solaire ou l'éolien, en vertu du principe d'« homéostasie », car, avec les moyens alors mis en œuvre (les doublets géothermiques), la chaleur est extraite irréversiblement du sous-sol, engendrant l'épuisement d'un côté, et le réchauffement (« pollution thermique ») de l'autre.

Le Groupe de Bellevue promeut également l'exploitation de l'énergie solaire en opposition à l'énergie nucléaire, mais n'exclut pas, dans un « régime à long terme tout solaire », les techniques centralisées de production d'électricité, bien qu'il privilégie l'utilisation locale de l'énergie en raison de la limitation des pertes d'énergie qu'elle permet (Groupe de Bellevue, 1978). Le Groupe parle aussi d'« énergies renouvelables » comme synonyme d'énergie solaire, mettant ainsi l'accent sur leur aspect inépuisable. Ainsi la proposition du Groupe vise davantage un équilibre dans la consommation des ressources, qu'une transformation politique de la société.

L'expression « énergies nouvelles » est au contraire moins restrictive, et est la plus communément employée sur la période 1970-1980. Elles regroupe toutes les sources d'énergie étudiées dans cette partie, mises à part, pour certains, les énergies marémotrice et hydraulique qui ne présentent pas de caractère novateur, sauf, paradoxalement, sous leur forme « mini ». En outre, certains y ajoutent la « chaleur nucléaire » (production de chaleur à partir des « rejets thermiques » des centrales nucléaires), et certains convertisseurs ne s'attachant pas à une source d'énergie spécifique tels que l'hydrogène ou la magnétohydrodynamique. Cette manière de rassembler des sources d'énergie, ainsi que des types de convertisseurs très hétérogènes peut relever du « pluralisme » défendu par certains militants écologistes, mais aussi, d'une tentative de récupération politique, justement en dépolitisant une partie des propositions des écologistes. Dans le décret créant la Délégation aux énergies nouvelles, les énergies nouvelles sont définies, de la manière la moins descriptive possible, comme « les sources d'énergie non encore exploitées à l'échelle industrielle » (Colli, 1979), ce qui ne présage rien de leurs caractéristiques ni de la forme de leur exploitation. En 1975, le Délégué aux énergies nouvelles Jean-Claude Colli, décrivant les énergies géothermique, solaire (thermique, thermodynamique sous forme de centrales, photovoltaïque), méthanique, éolienne mais aussi l'hydrogène, leur confère cependant, et d'une manière assez floue (définition à tournure tautologique), un caractère écologique et décentralisé, faisant écho aux discours écologistes :

« Les énergies nouvelles ont la particularité d'être diffuses et naturelles, c'est-à-dire provenant d'une utilisation directe des phénomènes de nature existant au lieu de consom-

mation. De ce fait, elles s'intègrent aisément dans le cycle de vie et, par voie de conséquence, elles ne présentent que des risques réduits de pollution. Elles représentent une production locale et sont donc un facteur de réduction des matières importées. Leur utilisation et leur développement contribueront à industrialiser des techniques et des systèmes qui pourraient constituer des apports appréciables pour nos consommations. » [159]

Dans ce discours, les énergies nouvelles sont valorisées pour leur caractère peu polluant, la possibilité d'une utilisation locale, la contribution au bilan énergétique (national).

En 1974, un groupe d'experts sur les énergies nouvelles présidé par Gibrat est chargé de « faire le point de l'état actuel et des perspectives de développement des *techniques nouvelles de production de l'énergie* » dans le cadre d'un rapport sur l'énergie et l'environnement élaboré pour le premier ministre. Étudiant les « réacteurs avancés de fission nucléaire, [l']énergie de fusion, [l']énergie solaire, [l']énergie géothermique », il conclut que la production de chaleur nucléaire est « en tête » de ces techniques nouvelles, au vu de ses possibilités industrielles et de son « bon classement » pour ce qui concerne « l'environnement et la sûreté » (Ministère de la protection de la nature et de l'environnement, 1974).

On a vu que pour la Commission de l'énergie du Commissariat général au Plan, les expressions et les définitions étaient mouvantes : pour le VII^e^ Plan (1976-1980), il est question des « énergies et techniques nouvelles » mais aussi des « formes nouvelles d'utilisation de l'énergie », qui seraient un « facteur de diminution de notre dépendance énergétique et de progrès dans la sécurité de nos approvisionnements ». Les sources d'énergie et techniques ainsi désignées sont, de même, la géothermie, l'énergie éolienne, l'énergie des gaz de fermentation méthanique, l'énergie solaire, la chaleur nucléaire et l'hydrogène (Commissariat général au Plan. Commission de l'énergie, 1975)). Pour le VIII^e^ Plan, les énergies renouvelables regroupent l'hydraulique et les énergies nouvelles, ces dernières regroupant les « énergies vertes » (bois, paille, fermentation), le solaire, la géothermie, les « micro-centrales », le thermique nucléaire, et l'éolien. L'énergie hydraulique qui n'est pas nouvelle est associée aux autres pour son caractère renouvelable ; le thermique nucléaire qui n'est pas renouvelable est rangé parmi les énergies nouvelles. Toutes sont caractérisées par leur disponibilité « au lieu de consommation sous une forme directement utilisable ». Enfin, dans le IX^e^ Plan, les « sources nouvelles et renouvelables » regroupent la biomasse, le soleil, la géothermie et la micro-hydraulique. La Commission de l'énergie du XIX^e^ Plan reprend en fait les termes de l'AFME (en y ajoutant le nucléaire et la micro-hydraulique) qui a contribué à la définition de ce Plan. Celle-ci parle d'« énergies nouvelles et renouvelables » en désignant le solaire (photovoltaïque, thermodynamique, thermique), la géothermie, la microhydraulique, la biomasse. L'AFME ne distingue pas (au moins, dans les

159. Jean-Claude Colli, « Note sur les perspectives des énergies nouvelles », 1976-1980 dans Commissariat général au Plan. Commission de l'énergie, 1975.

documents que j'ai consultés) explicitement ce qui est nouveau de ce qui est renouvelable.

Ainsi, la plus spécifique des expressions de la Table 10.9 est « énergies douces », utilisée par les militants écologistes, qui mettent en avant non seulement la nature de la source d'énergie mais également la manière de la convertir et de l'intégrer dans un système technopolitique. Les énergies douces s'opposent au système électrique centralisé et à l'énergie nucléaire.
Ces militants utilisent également l'expression d'énergie solaire comme synonyme : l'énergie solaire est l'étendard écologique et démocratique de la lutte anti-nucléaire. Mais énergie solaire est déjà moins spécifique sur le type de convertisseur utilisé et peut aussi comprendre les convertisseurs puissants avec une production centralisée. C'est ainsi que l'entendent les membres du Groupe de Bellevue. C'est aussi ainsi que les acteurs du PIRDES (CNRS puis COMES) entendent l'énergie solaire dont ils doivent organiser l'utilisation sur le territoire.
D'énergie solaire à énergies renouvelables, c'est la spécificité des sources d'énergie qui change et qui élargit leur spectre. L'énergie marémotrice peut ainsi en faire partie, car c'est une énergie renouvelable. Le COMES puis l'AFME, le Commissariat au Plan, utilisent cette expression.
Enfin, énergies nouvelles n'est spécifique ni sur le type de convertisseurs, ni sur la nature de la source d'énergie. Elle est même assez floue pour pouvoir contenir des ressources aussi peu novatrices que le bois. Elle peut évidemment contenir l'énergie nucléaire et est, ce ce fait, l'expression qui a été la plus largement utilisée par les acteurs du système énergétique : ministère de l'Industrie (Délégation aux énergies nouvelles), EDF, CEA. Avec les énergies nouvelles, le combat écologiste se retourne parfois contre lui-même. Les acteurs du nucléaire utilisent ainsi des arguments écologistes pour défendre l'atome qui présente certaines qualités reconnues écologiques comme l'absence de rejets de gaz à effet de serre.

### 10.3.2 Des sources d'énergie écologiques ?

Avant que le climat ne devienne un argument phare des promoteurs des énergies renouvelables, pendant les années 1990, le thème de l'écologie ou de l'environnement, ou, plus précisément, de l'impact de l'exploitation de sources d'énergie sur l'environnement, revient de façon récurrente dans les discours sur les énergies nouvelles à partir des années 1970. Comme l'a montré Évrard, (2013, p. 97-99), l'environnement devient une « norme de référence » de tous les promoteurs des énergies nouvelles : elles sont valorisées pour leur caractère illimité et peu polluant (en comparaison des énergies nucléaire et fossile), et ce, avant les chocs pétroliers, à la faveur d'un essor international des préoccupations environnementales concernant la limitations des ressources planétaires et l'impact des activités humaines sur la biosphère . Ainsi, si certaines énergies nouvelles avaient déjà,

ponctuellement mais explicitement, été valorisées au cours des années 1950 et 1960 comme des énergies « propres » ou moins risquées que le nucléaire (voir 7.1, deux auteurs parlant de solaire et d'éolien), elles deviennent des sources d'énergie intrinsèquement écologiques dans les années 1970, et ce de manière consensuelle, même si cet argumentaire n'est pas systématique, revêt selon les acteurs différentes formes et ne s'applique pas de la même manière en fonction des sources d'énergie.

On peut d'abord souligner que dans les institutions nationales, le lien entre énergies nouvelles et écologie n'est pas systématique, et que si, au sein de l'AFME, l'environnement fait partie des thèmes « transversaux », son action n'est pas considérée comme relevant d'une politique environnementale. C'est avec l'émergence du réchauffement climatique comme problème public que l'AFME devient l'ADEME et « met en avant le couplage nécessaire entre énergie et environnement » voyant dans la « question climatique une opportunité de renforcer sa légitimité et sa place au sein du processus décisionnel » (Évrard, 2013, p. 208). On peut d'ailleurs souligner la quasi absence du ministère de l'Environnement dans les actions en faveur des énergies nouvelles [160].

Pour les militants anti-nucléaire, les énergies nouvelles, et tout particulièrement l'énergie solaire, sont avant tout des alternatives, techniques mais aussi politiques, à l'énergie nucléaire, ce qui en fait en soi des sources d'énergie favorisant une société plus respectueuse de l'environnement. En plus du caractère illimité de ces ressources et du faible impact environnemental de leur exploitation, est valorisée l'absence de gaspillage que confère une utilisation locale (par la limitation des intermédiaires et des déperditions notamment thermiques du réseau électrique). On a vu que certains acteurs des énergies nouvelles promouvaient également la production centralisée d'électricité (centrales marémotrices, solaires, maréthermiques...), et, pour ceux-là aussi, et, malgré les déperditions engendrées par ce type de configuration, le fait d'exploiter une énergie nouvelle revêt une dimension écologique.

Outre la plus ou moins grande proximité entre lieu de production et lieu de consommation (paramètre pris en compte par les acteurs opposés aux solutions centralisées et non par les autres), d'autres critères sont utilisés pour démarquer les énergies nouvelles selon leurs qualités écologiques. Celles-ci sont toutes liées à leur caractère renouvelable et à la plus ou moins grande « nuisance » causée à l'environnement, étant entendu que toute

160. Ainsi, selon Laponche, « [l]e ministère de l'Environnement était assez absent » dans les actions de l'AFME (Laponche, 2015, p. 52). Pour Liébard, le ministère n'est pas absent mais participe de façon très ponctuelle à certains projets, en raison de ses faibles moyens : « [a]u ministère de l'Environnement et du Cadre de vie de Michel d'Ornano, il y avait eu une politique,incarnée par Serge Antoine, qui consistait à « s'accoler » à toutes les réalisations innovantes qui se faisaient en France, en distribuant des subventions à chaque fois petites mais très émiettées. Cela permettait de laisser penser que le ministère jouait un rôle très moteur dans le développement des politiques telles que les énergies nouvelles. Ce ministère n'avait pas les moyens de soutenir avec force le développement et la production. Il avait choisi de montrer qu'il était très actif, en soutenant tout (Liébard, 2015) ».

conversion de l'énergie engendre une perturbation locale mais aussi globale. Cette grille d'analyse permet aussi aux acteurs du nucléaire de construire un argumentaire « verdissant » l'atome, dès le début des années 1970.

Ainsi, en 1971, un Groupe interministériel d'évaluation de l'environnement est créé auprès du premier ministre, en réponse à la Conférence des nations unies sur l'environnement de Stockholm. Composé de représentants des institutions chargées de la politique énergétique et de l'environnement, dont EDF et le CEA , il est chargé de rédiger un rapport sur les liens entre l'énergie et l'environnement. Citant la documentation préparatoire à la Conférence de Stockholm, il affirme que « chaque étape du cycle énergétique, depuis celle de la promotion jusqu'à l'utilisation finale dans les foyers domestiques, les usines et les moyens de transport, s'accompagne d'effets secondaires qui, lorsqu'ils atteignent un certain volume, exercent une action nuisible sur un ou plusieurs aspects de l'environnement ». Il doit ainsi étudier les « incidences à long terme du secteur de l'énergie sur l'environnement » et présenter « toutes propositions utiles quant aux orientations à donner au secteur de l'énergie pour tenir compte des exigences de l'environnement et de l'aménagement du territoire » (Ministère de la protection de la nature et de l'environnement, 1974). Un sous-groupe « énergies nouvelles » est constitué, et celui-ci est présidé par Gibrat, acteur historique de l'énergie marémotrice mais aussi du nucléaire. Ce sous-groupe étudie la fission nucléaire, la chaleur nucléaire issue des centrales à fusion, les énergies solaire, marémotrice, maréthermique et géothermique, toutes étant présentées comme des solutions à l'épuisement du pétrole et, de ce fait, favorablement d'un point de vue environnemental. Elles sont cependant classifiées en fonction de paramètres qui sont les suivants : la « pollution atmosphérique » (« effets sur la santé, effets sur les végétaux, effets divers (surtout dégradation des propriétés bâties par corrosion des toitures de zinc) » des « oxydes de soufre, particules en suspension, oxyde de carbone, oxydants photochimiques, hydrocarbures, oxydes d'azote » ; de l'« influence sur le climat » (« combustion des végétaux, combustibles et pollution de l'air par les particules CO2, H2O et O3 qui absorbent les radiations solaires ») ; des effets sur l'eau (pollution thermique, chimique, perturbation du régime d'écoulement), du bruit, des odeurs, de la sûreté, de « l'encombrement des routes » (!), de « l'atteinte au paysage ». En utilisant cette grille d'analyse, l'énergie nucléaire est présentée comme particulièrement avantageuse : pas de bruit, pas d'odeurs, pas d'« effets sur l'air » et en particulier pas d'émissions de gaz à effet de serre (« l'émission de CO2 devrait ralentir après 1985 avec l'utilisation de l'énergie atomique » [161]). Les auteurs du rapport déplorent ainsi le paramètre « psychologique » du refus du nucléaire, « source de pollution qui fait actuellement l'objet d'attaques les plus violentes, alors que niveaux de pollution si bas qu'ils échappent souvent à la détection par la technique ». Les énergies éolienne et maréthermique ne sont pas considérées comme

161. Ministère de la protection de la nature et de l'environnement, 1974, p. 76.

permettant de contribuer au bilan énergétique français et ne sont donc pas davantage étudiées. En revanche, l'énergie solaire et l'énergie marémotrices sont présentées comme particulièrement intéressantes d'un point de vue environnemental : « l'énergie solaire répond seule positivement par l'absence de toute pollution », malgré une altération locale de l'« albédo » par les « surfaces nécessaires au captage pour une puissance importante » ; les usines marémotrices n'engendrent « aucune pollution chimique ou nucléaire ». L'utilisation de l'énergie géothermique est en revanche présentée comme ayant un impact sur l'environnement, comparable à celui des centrales thermiques bien que plus faible : elle n'est pas renouvelable, provoque une pollution thermique et parfois chimique (soufre), son utilisation est « bruyante », confère un « aspect de zone industrielle à la région concernée ».

Dans le rapport de la Commission de l'énergie du VII[e] Plan, la même position est tenue à propos de l'énergie nucléaire et des énergies nouvelles, dont la première ne devrait pas « poser[] dans l'avenir des problèmes environnementaux plus sérieux que les autres sources d'énergie », et dont les secondes « ne sont pas non plus exemptes de nuisances » (Commissariat général au Plan. Commission de l'énergie, 1975) [162].

On peut noter que l'énergie géothermique est souvent mise à part parmi les énergies nouvelles, pour les raisons invoquées ci-dessus. Elle est souvent comparée aux énergies fossiles (dans le Projet Alter, elle est même classifiée parmi les énergies fossiles), d'autant que les techniques d'exploitation de la géothermie nécessitent une extraction du sous-sol. Elle dépend ainsi du régime minier à partir de 1977, et la mise en place du programme géothermique mobilise les acteurs traditionnels du pétrole et du charbon : les ingénieurs du service des Mines, le BRGM et les industriels du pétrole. Les acteurs de la politique des énergies nouvelles la classent cependant bien parmi les énergies nouvelles, en tant que ressource non encore exploitée qui peut contribuer au bilan énergétique.

### 10.3.3 Synthèse 10.3

Selon les acteurs, les énergies nouvelles ont donc été désignées par différentes expressions, qui montrent qu'elles ont été investies de projets politiques divergents au centre desquels se situe le système énergétique. Elles révèlent différentes appropriations sémantiques et politiques des propositions des militants écologistes et anti-nucléaires. Ainsi, pour les militants écologistes, les énergies douces doivent soutenir une transformation radicale du système énergétique (utilisation exclusive de sources d'énergie écologiques et gestion décentralisée du système), tandis que, pour les acteurs du système énergétique

162. « pollution des eaux chaudes utilisées en géothermie » et « refroidissement des nappes profondes dont les effets sont inconnus » ; « superficie occupée par les capteurs solaires si l'on devait réaliser des installations importantes (de l'ordre d'une cinquantaine de km$^2$ pour 1000 MW électriques) » ; « bruit des grandes éoliennes ».

classique, les énergies nouvelles doivent assurer son maintien (addition des énergies nouvelles aux sources classiques d'énergie mais conservation de la configuration socio-politique du système). Des énergies douces aux énergies nouvelles, le contenu politique de la proposition des militants écologistes se désagrège pour faire des énergies nouvelles des sources d'énergie additionnelles du système énergétique. Seule reste la valorisation de leur aspect écologique, selon des critères cependant différents et parfois opportunistes.

## 10.4 Synthèse Chapitre 10

Pendant la période (1970-1990), les énergies nouvelles sont pour la première fois institutionnalisées dans leur ensemble. Les nouvelles institutions nationales créées ancrent leur action dans une politique énergétique et une politique de recherche. Leur évolution est caractéristique d'une nouvelle manière d'organiser la recherche, dont le modèle est l'agence d'objectifs, qui fonctionne par programmes interdisciplinaires et qui ancre son action dans des problématiques économiques et sociales. Les énergies nouvelles permettent de répondre aux deux : approvisionnement national en énergie suite aux chocs pétroliers, revendications écologistes. Elles sont donc aussi un moyen de neutraliser les contestations contre le programme nucléaire. L'AFME puis le COMES mettent beaucoup en avant leur programme en faveur de l'énergie solaire. Si, en 1985, l'AFME peut afficher dans son bilan énergétique une part croissante d'énergies nouvelles, celle-ci est essentiellement due à l'augmentation de l'utilisation du bois, en moindre mesure de l'énergie géothermique, et de manière encore moins significative de l'énergie solaire. Les installations géothermiques et solaires se multiplient pour atteindre quelques centaines de milliers dans les décennies 1980 mais elles ne connaissent pas de pérennité. Le contre-choc pétrolier, le succès du programme nucléaire, un ministre de l'Industrie défavorable à la maîtrise de l'énergie, stoppent l'allocation de financements pour la diffusion de ces convertisseurs, et seule l'activité énergies renouvelables tournée vers l'international est maintenue à l'AFME, grâce aux subventions de l'Union européenne.

L'Union européenne est un nouvel acteur important, et, en continuité avec les décennies 1950-1960, l'international s'avère un élément crucial de la période : la compétition technologique avec les pays du Nord, le marché essentiellement dans les pays du Sud, motive des industriels à s'investir dans des technologies de production décentralisée d'énergie, comme le CEA, ou à redéployer leur activité vers ces territoires par manque de débouchés en France, comme les constructeurs de petites turbines hydrauliques. Le maintien d'une activité énergies renouvelables en France à partir des années 1990 doit beaucoup à ce contexte international.

La répartition des convertisseurs d'énergies nouvelles est ainsi radicalement différente

sur le territoire français, mais similaire dans les territoires du Sud, par rapport à la décennie 1950-1960. Cette nouvelle répartition s'accompagne de nouvelles représentations : suite aux revendications des militants écologistes, les institutions dédiées aux énergies nouvelles accordent à ces sources d'énergie un caractère écologique, mais les vident de leur contenu politique. Elles valorisent ces sources d'énergie pour leurs qualités intrinsèques (écologiques), et mettent en avant leur utilisation locale, que les acteurs des décennies précédentes associaient au passé. Cependant, l'organisation de la diffusion de ces convertisseurs reste centralisée par les agences nationales (COMES puis AFME).

Le Chapitre 11 examine le programme énergies marines mené par le Centre national d'exploitation des océans (CNEXO) dans les années 1970-1980, et s'inscrit dans la « course » à l'innovation décrit en 10.2.3. Il permet d'affiner la périodisation et de nuancer l'importance de la compétition des sources d'énergie classiques liées au succès du programme nucléaire et au contre-choc pétrolier dans l'abandon des programmes pour les énergies nouvelles dans la deuxième moitié des années 1980.

# Chapitre 11

# Les énergies marines dans la course internationale à l'innovation (1973-1987)

En 1978, le Centre national d'exploitation des océans (CNEXO) met en place un programme « énergies marines » visant au développement de l'exploitation de l'énergie thermique des mers et de l'énergie houlomotrice, programme qui s'arrête en 1986. Elle n'a pas été étudiée par l'historiographie des énergies nouvelles sur les années 1970-1980, centrée, d'une part, sur l'énergie solaire, et d'autre part sur les institutions qui ont précédé l'ADEME. En effet, au moins au départ, les énergies marines sont à part dans les programmes nationaux sur les énergies nouvelles : il s'agit d'autres sources d'énergie, et le programme est porté par une structure qui ne noue pas (ou peu) de relations avec ces différentes institutions dédiées aux énergies nouvelles, de la Délégation aux énergies nouvelles à l'AFME. Elles sont pourtant bien considérées comme des « énergies nouvelles » par les acteurs internes et externes au programme. Si elles ne sont pas du tout étudiées dans le cadre du COMES, et que l'AFME n'y a a apporté aucun financement, elles sont ainsi, par exemple, mentionnées par la DATAR dans la brochure sur les énergies nouvelles en France, et suggérées par la carte sur la « France des énergies nouvelles ». Les travaux préparatoires à la création de l'AFME prennent en outre en considération les énergies marines dans les orientations à donner aux programmes de recherche, en tant qu'énergies nouvelles.

L'étude de ce programme permettra cependant de montrer des enjeux similaires à ceux qu'on a pu rencontrer avec les autres énergies nouvelles et les autres institutions : compétition technologique internationale, recherche d'un marché dans les pays du Sud, utilisation des DOM-TOM comme « vitrines » technologiques.

L'analyse des deux sous-programmes « Énergie thermique des mers » et « houle » montre les différences de traitement entre deux sources d'énergie qui se raccrochent de manières différentes au système technique : l'une, étudiée par des grandes entreprises de l'énergie et ce depuis les années 1920, et l'autre, que les ingénieurs peinent à capturer avec les moyens que le système énergétique propose. On voit ainsi un programme et un acteur pilote, mais deux sources d'énergie, deux réseaux d'acteurs, deux imaginaires techniciens, deux stades de développement technologique différents.

Enfin, aucun des deux programmes n'a abouti à une mise en œuvre opérationnelle, et la mise en évidence de facteurs divers permettra de relativiser l'importance du contre-choc pétrolier dans ces échecs technologiques.

Ces deux études de cas sont basées sur les archives du CNEXO disponibles aux archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine et, pour certaines, sur le site des archives en ligne d'Ifremer [1]. Ces archives sont enrichies d'entretiens menés avec deux acteurs de ces programmes : Philippe Marchand, responsable du programme énergies marines pendant toute sa durée, et Alain Clément, chercheur au Laboratoire d'hydrodynamique de Nantes et qui a travaillé sur l'énergie houlomotrice dans le cadre de ce programme.

Ce chapitre présente d'abord l'émergence du programme « énergies marines » du CNEXO et son contexte institutionnel. Elle examine ensuite le programme énergie thermique des mers. Elle décrit d'abord les étapes de la définition d'un avant-projet, puis les raisons de l'abandon du programme, et, enfin, la similarité entre cette source d'énergie et les autres énergies classiques, du point de vue des acteurs et des convertisseurs en jeu dans le programme. Elle étudie ensuite le programme houle, et met en évidence la différence de traitement entre ces deux sources d'énergie.

## 11.1 Le programme « énergies marines » au CNEXO (1978-1986)

Le CNEXO est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) créé en 1967 dans la même mouvance que les autres centres nationaux de recherche tels que le Centre national d'études spatiales (CNES) et le Centre national d'études des télécommunications (CNET), avec pour mission de coordonner et de financer les recherches françaises à finalité industrielle. En 1984, il devient l'Institut français de recherche sur la mer (Ifremer). Il est placé sous la tutelle directe du Premier ministre, et sa vocation est l'exploitation « plus étendue et plus rationnelle des ressources de la mer » [2]. Dès le

1. Archimer, cf Archives du CNEXO, p.d. dans la bibliographie.
2. Archives du CNEXO, p.d., « Programme d'orientation Océan », 08/1968.

départ, l'énergie fait partie de ses thématiques, mais, si les énergies nouvelles sont mentionnées parmi les ressources océaniques, cette activité concerne uniquement le pétrole, le gaz et l'énergie nucléaire. Ainsi, en 1968, le CNEXO distingue cinq types de « ressources » que l'océan met à disposition : nourriture, matières premières, voies de communication, espace stratégique, énergie. Mentionnant l'énergie « directe des mers » (courants, marées, houle, énergie thermique des mers), il affirme que « de nouvelles techniques peuvent naître, mais [qu'] il serait peu réaliste de les escompter à court terme » [3]. En revanche, « il en va tout autrement de l'énergie produite grâce à des éléments du sol et du sous-sol océaniques, ou contenus dans les masses des eaux », à savoir non seulement le pétrole et le gaz, mais aussi les éléments radioactifs légers (deutérium et tritium) dont la future maîtrise de la fusion nucléaire promet de faire une « source nouvelle d'énergie pour l'humanité ». Ainsi, l'activité énergie du CNEXO concerne essentiellement au départ les activités *offshore* de prospection et d'exploitation de pétrole et de gaz (notamment, en mer du Nord), mais aussi l'industrie nucléaire — non pas cependant la recherche sur la fusion, mais sur l'impact environnemental des centrales nucléaires [4]. Le CNEXO mène également des recherches pour l'alimentation en faible puissance par des « sources autonomes d'énergie » de dispositifs fixes (signalisation, plate-formes pétrolières) ou mobiles (probablement, des sous-marins), mais il n'y est pas question d'énergies nouvelles (ce sont des piles à combustible et « générateurs à radio-isotopes » qui sont expérimentés).

Aussi, l'activité énergies marines commence-t-elle en 1973 au CNEXO, de manière cependant diffuse et mal identifiée, et en réaction indirecte aux chocs pétroliers. D'une part, les recherches sur la mise au point de convertisseurs « autonomes » intègre désormais l'expérimentation d'aérogénérateurs et de « bouées houlomotrices » [5], qui ne connaissent cependant pas de suites [6]. D'autre part, le dossier énergie thermique des mers est à nouveau ouvert, en raison d'une intense activité américaine dans ce sens, et des recherches sont menées par des industriels, à la demande du CNEXO ou de leur propre initiative. EDF confie par ailleurs au CNEXO une étude d'impact environnemental du projet d'usine marémotrice du Mont-Saint-Michel (encore appelé « projet Caquot »), en 1975. Selon Philippe Marchand, plusieurs études d'impact sur les usines marémotrices ont été confiées au

3. Archives du CNEXO, p.d., « Programme d'orientation Océan », 08/1968.

4. C'est dans ce cadre que Philippe Marchand est embauché au CNEXO : après de études d'ingénieur à l'ENSTA, il a suivi un master de physique, s'est spécialisé en océanographie et vient de terminer un mémoire de fin d'études sur les centrales nucléaires littoriales, en co-tutelle d'EDF (laboratoire de Chatou) et du CNEXO. Poursuit ses travaux sur les centrales nucléaires littorales au CNEXO, toujours en lien avec le laboratoire EDF de Chatou.

5. Archives du CNEXO, p.d., Rapport d'activité de 1973.

6. Il n'en est plus question dans les rapports d'activité après 1974. Les aérogénérateurs, déjà utilisés depuis plusieurs années par le service des Phares et balises pour la signalisation maritime (cf 9.1.3.3) sont en effet considérés comme inadaptés pour l'autre potentiel identifié, c'est-à-dire les plate-formes pétrolières. Pour les plate-formes d'extraction, le combustible est déjà présent et bon marché ; pour les plate-forme de forage, le poids et les efforts induits par l'aérogénérateur sur la structure sont trop importants.
Archives du CNEXO, p.d., Y. Bongars, « Le marché des aérogénérateurs ».

CNEXO et ont, à chaque fois, provoqué des « levées de boucliers » à cause des nombreuses perturbations causées par ces centrales [7]. Le CNEXO commandite par ailleurs une étude économique sur les possibilités des « micro-centrales marémotrices » à des chercheurs en sciences économiques en 1982. Le but de cette étude est, d'une part, d'évaluer le potentiel équipable en Bretagne, au niveau des sites d'anciens moulins à marée, mais aussi et surtout de mettre au point une technologie « exportable, car nombreux sont les pays baignés par des mers à amplitudes de marée suffisante pour de tels équipements » — une étude de marché pour le Brésil et le Canada est effectuée dans ce cadre [8]. Néanmoins, ces études n'ont pas eu de suites, stoppées au même moment que l'ensemble du programme « Énergies marines » du CNEXO.

En 1978, un programme « Énergies marines » est mis en place au CNEXO. Un changement dans la direction et la structure du CNEXO, lui-même lié à des mesures gouvernementales en matière de politique industrielle, oriente son activité vers la mise en place de grands projets à caractère industriel, au sein duquel l'énergie des mers se trouve avantagée. Le gouvernement français porte en effet une attention accrue aux possibilité industrielles de l'exploitation des océans. Il convoite en effet l'extraction et la transformation de matières premières, au premier rang desquelles le pétrole. De plus, une nouvelle législation internationale du domaine maritime élargit les prérogatives des États sur le domaine marin, et les nouvelles « zones d'économie exclusive » permettent d'exploiter les ressources maritimes sur une surface plus large autour des territoires dont ils sont souverains. Cet intérêt renouvelé relève aussi d'une volonté d'asseoir une « avance technologique » française en termes de technologies marines. Le ministre de l'Industrie André Giraud affirme ainsi l'ambition « d'affermir et de développer la position de [la France] dans [l]e domaine [des technologies marines] » [9]. Une « mission interministérielle de la mer » est mise en place auprès du Premier ministre, et, munie d'un Comité interministériel de la mer, est chargée de « délibérer sur la politique du gouvernement dans le domaine de la mer sous ses divers aspects nationaux et internationaux et de fixer les orientations gouvernementale dans tous les domaines de l'activité maritime » [10]. L'énergie thermique des mers est placée parmi quatre actions sectorielles privilégiées, au sein desquelles figurent avant tout les technologies relatives à l'exploitation du pétrole sous-marin [11].

Pour mener à bien son ambition industrielle renouvelée, le CNEXO passe de la tutelle directe du Premier ministre à celle d'une nouvelle délégation à l'Innovation et à la

7. Marchand, p.d., Entretien réalisé le 26 février 2016 au domicile de Philippe Marchand.

8. AN 2008 0658/60, p.d., Joël Jallais, André Fady, « Les micro-centrales marémotrices sur le littoral breton. Rapport d'étude de marché », 10/1983.

9. Archives du CNEXO, p.d., Rapport d'activité, 1978.

10. Archives du CNEXO, p.d., Rapport d'activité, 1978.

11. Outre le secteur pétrolier, sont considérés celui des ressources minières sous-marines ainsi que l'aquaculture.
Archives du CNEXO, p.d., Rapport d'activité, 1978.

technologie du ministère de l'Industrie. Par ailleurs, Gérard Piketty est nommé président directeur général du Centre. Il s'agit d'un ingénieur des Mines, bien établi dans la politique énergétique française menée par le ministère de l'Industrie puisqu'il quitte alors la Direction des carburants où il a contribué à la définition de la politique pétrolière depuis 1973 [12]. Enfin, une direction de la Technologie et des relations industrielles est instituée, et, en son sein, un service Énergie, dont Philippe Marchand est nommé responsable [13]. Ce service traite d'« énergie des mers », désormais identifiée en tant que telle. La même année, un programme énergie thermique des mers est lancé par le CNEXO et dirigé par ce service. Jusqu'en 1986, il sera le projet « phare » du Service, mais également de toute la Direction.

Selon Philippe Marchand, la mise en place de ce programme est très liée à la nouvelle direction assurée par Piketty. Ce dernier possède en effet une marge de manœuvre importante dans la définition des programmes de recherche du CNEXO. Ceux-ci sont financés majoritairement par la DGRST, et Piketty, en tant qu'ingénieur des Mines, a un pouvoir de négociation important. Il présente en outre un penchant affirmé pour les projets à caractère technologique. Ainsi, selon Marchand, « [l]'Ifremer est devenu encore plus un monde d'ingénieurs grâce à Piketty ». Comme son successeur Yves Sillard qui suivra la même ligne de politique industrielle, il s'agit d'un polytechnicien, « brillant ingénieur des Mines », et son intérêt pour les projets d'ingénierie tranche avec celui de son prédécesseur, Jacques La Prairie, officier de marine, davantage porté sur la construction de navires d'océanographie et le financement de recherches universitaires [14]. On peut ajouter à cela qu'il est bien intégré dans le milieu de l'industrie pétrolière, dont les connaissances techniques seront largement mobilisées lors de la réalisation du programme énergie thermique des mers.

Le service de l'Énergie pilote également deux activités qu'il considère comme de moindre envergure. Il s'agit de l'étude des machines houlomotrices, et de travaux disparates sur l'énergie marémotrice. Ainsi, une veille technologique, cette fois-ci en direction du Royaume-Uni et du Japon, convainc les responsables des programmes du CNEXO de l'intérêt d'étudier les possibilités des machines houlomotrices pour la production d'électricité. En outre, EDF commande une nouvelle étude d'impact pour l'usine marémotrice des Îles Chausey en 1980, et le CNEXO finance une étude sur les possibilités des microcentrales marémotrices, effectuée par des chercheurs en sciences de gestion de l'Université de Rennes entre

12. Il a également contribué, au ministère de l'Industrie, à la mise en place du programme nucléaire et, auparavant, du Plan de régression des houillères.

13. Selon Philippe Marchand, ce choix est lié à ses connaissances sur l'énergétique en milieu marin, puisqu'il a travaillé entre 1975 et 1977 sur la signature thermique des centrales nucléaires au Centre océanologique de Bretagne de Brest, la plus importante antenne du Centre. Il est ensuite devenu chargé de mission auprès du directeur des Opérations à Paris.
MARCHAND, p.d., Entretien réalisé le 26 février 2016 au domicile de Philippe Marchand.

14. MARCHAND, p.d., Entretien réalisé le 26 février 2016 au domicile de Philippe Marchand.

1982 et 1983.

## 11.2 L'énergie thermique des mers et le consortium Ergocéan. Compétition internationale pour un marché tropical (1975-1987)

### 11.2.1 De la conquête rêvée d'un marché mondial au prototype avorté de Tahiti. Chronologie

**Premières études en réaction au programme américain. CNEXO, laboratoires publics, entreprises (1973-1978)** Les premières recherches en France sur l'énergie thermique des mers, suite aux chocs pétroliers, sont effectuées en réaction aux importants moyens mis en œuvre par le gouvernement américain pour la mise au point de centrales pilotes. En effet, aux États-Unis, des recherches sont en cours dans certaines universités depuis 1965 [15], et, en 1973, le gouvernement, par l'Energy research and development administration (aspect recherche) puis par le Department of energy (aspect industrie), soutient les études universitaires puis lance un appel à projets pour une centrale de 25 MW, pouvant être rapidement extrapolée à 100 MW, auquel répondent plusieurs grands industriels [16]. En réponse à cet éveil d'intérêt du gouvernement et des industriels américains, le CNEXO mène une veille technologique, et met à jour les connaissances scientifiques et techniques sur le sujet, y compris celles qui sont issues des anciennes expériences françaises [17]. Ces études concluent à l'intérêt de mettre au point un avant-projet détaillé en collaboration avec des industriels. Une équipe du Muséum d'histoire naturelle, sous la direction d'Henri Lacombe [18], est chargée d'effectuer un inventaire de la ressource disponible. Le CNEXO finance des études sur le préchauffage solaire de la source froide à l'Université de Montpellier [19], et effectue avec un grand groupe, la CGE, la « préétude » d'un projet de centrale de 50 MW [20]. Le Centre suit les travaux américains, et des chercheurs assistent aux colloques internationaux où le sujet est traité : un colloque américain spécifiquement

15. Parmi elles, l'université Carnegie-Mellon et à l'université du Massachussetts.

16. AN2000 0404/6, p.d., Rapport d'Asteo, « Proposition pour l'exploitation de l'énergie thermique des mers », Juin 1978.

17. C'est-à-dire les travaux de Georges Claude et de la société L'énergie des mers dont les archives sont étudiées en détails.
AN 2008 0658/56, p.d., Georges Massart, S. D. Winter, « Les possibilités de l'énergie thermique des mers », 16 septembre 1974.

18. Ingénieur hydrographe en chef de la Marine, spécialiste national de l'océanographie physique, Henri Lacombe a écrit l'ouvrage *Les énergies de la mer* en 1968. C'est en partie en suivant ses cours à l'ENSTA puis en lisant son ouvrage que Philippe Marchand s'intéresse aux énergies marines.

19. Archives du CNEXO, p.d., Rapport annuels d'activité (1975).

20. Archives du CNEXO, p.d., Rapports annuels d'activité (1975 ; 1977).

dédié au sujet est institué. En France, c'est à l'occasion d'un colloque sur l'énergie solaire que deux chercheurs du CNES et du CNRS présentent les travaux effectués à Montpellier sur le préchauffage de l'eau dans les étangs solaires.

D'autres industriels suivent l'exemple de leurs homologues américains et effectuent des études prospectives [21]. Certains mènent, en auto-financement, une étude au sein de l'association Eurocéan regroupant des entreprises de cinq pays européens [22]. Ils effectuent des études technico-économiques sur la faisabilité de centrales maréthermiques, et cherchent des financements internationaux.

Jusqu'en 1978, malgré l'intérêt manifeste de ces différents acteurs pour l'énergie thermique des mers, les travaux français sont épars, les projets restent à l'état de « pré-études », et l'activité principale du CNEXO en ce sens consiste à suivre de près les travaux américains menés en ce sens. À partir de 1978, le CNEXO cherche à coordonner ces recherches avec un programme énergie thermique des mers.

**Exploitation des océans et énergie thermique des mers : le programme du CNEXO. Deux groupes privés, deux choix de filières (1978-1980)** En 1978, la DGRST, principal financeur du CNEXO pour les programmes de recherches, décide de passer un contrat-programme avec le Centre pour lancer un programme énergie thermique des mers en lien étroit avec des industriels, dont certaines entreprises françaises ont déjà manifesté leur intérêt pour cette thématique. Ce programme est stimulé par une intensification de l'activité internationale pour le développement de l'énergie thermique des mers, avec l'implication de pays comme le Japon, ainsi qu'une accélération du programme américain, du côté du gouvernement comme du côté des industriels, et la volonté de leurs homologues français de pénétrer ce créneau. Au Japon, un prototype est construit à Toku Noshima en 1978. La même année, un contrat entre le D.O.E américain et la société TRW est signé pour la mise en œuvre d'une centrale maréthermique expérimentale, d'une puissance de 1 MW, nommée « OTEC [23] 1 », qui sera mise en place au large d'Hawaï. La société Lokheed est sur le point de commencer la construction d'un modèle réduit de 50 kW. Lors de son huitième colloque international sur l'exploitation des océans en février 1978, l'Asteo [24], groupement interprofessionnel pour l'exploitation des océans réunissant

21. AN2000 0404/6, p.d., Rapport d'Asteo, « Proposition pour l'exploitation de l'énergie thermique des mers », Juin 1978.
D'après Philippe Marchand, l'exemple américain a fortement stimulé les industriels français à prendre en considération l'énergie thermique des mers.
Marchand, p.d., Entretien réalisé le 26 février 2016 au domicile de Philippe Marchand.

22. Son siège est à Monaco. Trois entreprises françaises en font partie, mais aussi trois suédoises (qui ont obtenu un financement de leur gouvernement), deux italiennes, une belge et une néerlandaise.
AN2000 0404/6, p.d., Rapport d'Asteo, « Proposition pour l'exploitation de l'énergie thermique des mers », Juin 1978.

23. « Ocean thermal energy », équivalent d'énergie thermique des mers en anglais.

24. « Association scientifique et technique pour l'exploitation des océans ».

plusieurs de ces entreprises [25], aborde le thème de l'énergie thermique des mers et reçoit la société TRW, qui présente le projet OTEC 1 [26]. La DGRST sollicite donc l'Asteo pour l'écriture d'une proposition de programme à l'intention du Secrétariat d'État à la recherche [27].

En juin 1978, l'Asteo soumet au secrétaire d'État à la recherche Pierre Aigrain une proposition de programme en cinq phases, allant de la conception technique et de l'évaluation du marché à l'industrialisation des centrales maréthermiques, en passant par la mise au point et la construction de prototypes [28]. Les entreprises mettent en avant l'importance du potentiel mondial de cette ressource [29], son avantage par rapport aux autres énergies nouvelles [30], et la multiplicité des débouchés possibles à moyen terme. Elle pourrait en particulier être mise à profit pour le développement économique des DOM-TOM, permettant l'extraction de matières premières grâce à l'électricité produite, le développement de la maréculture grâce à l'eau extraite, l'agrandissement des zones agricole grâce à la fabrication d'eau douce et d'engrais azotés. Enfin, le savoir-faire des entreprises françaises sur l'ensemble des composantes d'une centrale maréthermique est mis en avant, et les entreprises exposent leur stratégie dans la « guerre économique »internationale de « fourniture de centrales complètes, nécessitant un haut niveau de technicité », qui « s'inscrit bien dans la nouvelle Politique industrielle définie par les Pouvoirs publics qui peut s'exprimer par la nécessité, pour l'industrie, de s'orienter vers des activités ayant une technicité élevée dans la conception des produits et dans leur processus de fabrication. »

Suite à cette proposition, et au vu des nouvelles orientations du gouvernement français en termes de recherche à vocation industrielle, le Conseil des ministres du 15 novembre 1978 choisit de confier au CNEXO l'élaboration et l'exécution d'un programme énergie thermique des mers [31]. Ce programme a pour but d'évaluer les possibilités technico-économiques et, si elles s'avéraient avantageuses, de construire dans les DOM-TOM une

25. Parmi elles : Neyrtec (Alsthom), la CGE, Bertin, l'Union industrielle et d'entreprises, ou encore Électronique Marcel Dassault.

26. AN2000 0404/6, p.d., TRW, « Ocean energy conversion, status and prospects. Presentation to : Association scientifique pour l'exploitation des océans », 02/1978.

27. AN2000 0404/6, p.d., Asteo, « Proposition pour l'exploitation de l'énergie thermique des mers », 06/1978.

28. Ont participé à la rédaction de ce document des représentants de : la Société métallurgique et navale Dunkerke Normandie (filiale d'Empain-Schneider), Neyrtec (filiale d'Alsthom Atlantique), Compagnie générale d'électricité, Constructions métalliques de Provence, Électronique Marcel Dassault, Union industrielle et d'entreprises.

29. Il est évalué à partir des données du Congressional research service of the US Congress : 18 milliards de tep/an.
AN2000 0404/6, p.d., Asteo, « Proposition pour l'exploitation de l'énergie thermique des mers », 06/1978.

30. Par rapport à la géothermie et à l'énergie solaire : leur sont reprochés un potentiel géothermique limité, des installations solaire trop exigeantes en surfaces qui pourraient être utilisées pour des usages agricoles, ainsi que leur intermittence, et la puissance jugée limitée des centrales.

31. AN2000 0404/6, p.d., Lettre de Gérard Piketty à Pierre Aigrain, 23/10/1979.

centrale prototype de moyenne puissance (1 à 10 MW), essentiellement productrice d'électricité. Les sous-produits possibles ne sont donc considérés que comme un avantage facultatif. Cette puissance est modeste par rapport aux projets américains et japonais (>= 100MWe), car les usagers des centrales construites ensuite en série seraient les « nombreuses petites collectivités de la zone intertropicale » qui importent un carburant coûteux pour leur production d'électricité. Les premiers usagers seraient les DOM-TOM qui joueraient le rôle de « vitrine » pour un marché étranger, et qui n'ont pas besoin de grandes puissances. Cette limitation dans la taille des centrales permet en outre de minimiser les risques technico-économiques. L'originalité de ce choix, d'abord dicté par des contraintes économiques, est revendiqué comme un atout en termes de marché. Ainsi, « un tour d'horizon du marché mondial potentiel de l'énergie thermique des mers 1-10 MWe montre qu'au moins 20 millions de personnes sont concernées, ce qui correspondrait à 10 GW au minimum, soit 1 000 centrales de 10 MW », que les recherches américaines et japonaises sur de grandes centrales ne permettent pas de satisfaire [32] .

Le programme doit suivre trois phases :

— I. étude de faisabilité,
— II. définition d'un projet de centrale prototype et « test de certains composants reconnus comme critiques »,
— III. construction de l'usine-pilote.

La première phase commence en novembre 1978, et se termine en 1980 [33]. Elle comprend, d'une part, le recensement, dans les DOM-TOM, des sites propices à l'implantation d'une centrale maréthermique, et d'autre part l'étude de faisabilité technico-économique préalable à la définition d'un projet de centrale prototype. Il s'agit ainsi d'explorer les diverses voies technologiques possibles, d'évaluer le coût de chacune d'elles et d'émettre des préconisations pour orienter le CNEXO vers le choix d'une filière.

La recension des sites potentiels est effectuée par le CNEXO. Elle est réalisée selon des critères océanographiques et météorologiques [34], mais aussi économiques [35]. À ce titre, le CNEXO retient trois sites : Tahiti, la Guadeloupe et la Martinique, et choisit finalement Tahiti pour la suite du programme. Ce choix est justifié par les débouchés estimés de l'électricité produite.

En effet, le Territoire de la Polynésie et Électricité de Tahiti (EdT, concessionnaire de

32. AN 2008 0658/57, p.d., CNEXO, Rapport final de synthèse de l'étude de faisabilité, 03/1980.
33. Elle a coûté 3 989 000 F au CNEXO et 2 659 226 F aux industriels.
AN2000 0404/6, p.d., G. Martinot, « Note à l'attention de Monsieur Farge », 16/02/1984.
34. Différences de température suffisantes à 1 000 m de profondeur, hauteur bathymétrique pas trop importante (pour les centrales à terre), absence de cyclone.
35. Infrastructure, zone « développée » ou non, concurrence avec d'autres sources d'énergie.
Archives du CNEXO, p.d., Rapport annuel d'activité (1979).

la production et de la distribution électrique sur l'île de Tahiti), cherchent à augmenter les disponibilités du réseau local en énergie électrique. La croissance démographique, un important exode rural, ainsi qu'une augmentation de la consommation électrique par habitant, liée d'une part à la présence d'occidentaux, et d'autre part à l'adoption des modes de vie occidentaux par les autres habitants, a induit une augmentation importante de la consommation d'électricité. Or, le réseau est alors alimenté par des centrales diesel au coût prohibitif [36]. La micro-hydraulique est déjà entrevue pour alimenter le réseau électrique : deux chutes doivent être équipées en 1981 et deux autres en 1982 pour une puissance de 30 MW. Mais elles ne suffisent pas à fournir le besoin estimé en électricité, et une centrale maréthermique pourrait s'avérer moins coûteuse pour la poursuite du programme d'équipement.

La Polynésie française dans son ensemble est déjà la cible d'un « programme énergies renouvelables » lancé en juillet 1978, fruit d'un accord entre le CEA et le Territoire de Polynésie, et co-financé par le ministère de l'Industrie (Délégation aux énergies nouvelles) et le CEA (Pehlivanian, 2014, p. 436-437). Les acteurs de ce programme ont étudié les possibilités des énergies solaire, éolienne et micro-hydraulique, ainsi que les gazogènes utilisant la biomasse (Akrich, 1988), mais n'ont pas étudié l'énergie thermique des mers. Le programme énergies renouvelables du CEA et le programme énergies marines du CNEXO ont ainsi été menés en parallèle jusqu'en 1980. À cette date, les acteurs du programme Énergies renouvelables ont choisi de privilégier le solaire photovoltaïque, et présentent leurs objectifs comme ceux d'une production décentralisée d'énergie, visant à stopper l'exode rural (Akrich, 1988). Le projet de centrale maréthermique ambitionne au contraire l'alimentation en électricité de Tahiti, destination principale de l'exode rural. Le Territoire de Tahiti et le CNEXO le considèrent ainsi comme une « extension » du programme Énergies renouvelables mené par le CEA.

L'étude de faisabilité est confiée à deux groupes d'industriels, qui ont tous participé à la proposition de programme initiale d'Asteo. Il s'agit d'un groupe dirigé par Empain-Schneider [37] et d'un autre groupe dirigé par la CGE [38]. Les deux études évaluent les possibilités technico-économiques de centrales maréthermiques d'une puissance de 5 à

36. « EdT se trouve confronté au double problème de croissance de la demande (7%/an) et de l'évolution considérable du coût des combustibles qui pèsent de plus en plus lourd dans le prix de revient du kWh. » EdT dispose d'une puissance installée de 40 MW qu'elle aimerait ainsi amener à 100 MW.
AN2000 0404/6, p.d., CNEXO, « Compte-rendu de mission Énergie thermique des mers effectuée du 9 au 13 mars 1981 à Tahiti », 16/03/1981.

37. Il est composé de : SGTE pour le pilotage des travaux, le génie civil et diverses parties de la centrale ; Creusot-Loire pour le cycle et les installations diverses d'ammoniac ; SPIE Batignolles (SBTP) pour la conduite d'eau froide ; Jeumont-Schneider pour les moto-pompes à eau de circulation d'eau de mer et pour les alternateurs ; SPIE Capag.
AN2000 0404/6, p.d., Groupement de sociétés du groupe Empain-Schneider, ETM, rapport final 1e partie, 01/1980.

38. Participent à l'étude, pour la CGE : Câbles de lyon, Sea Tank Co, Sogelerg, Sogreah ; pour Alsthom Atlantique : A.C.B, Neyrtec, Rateau ; pour ETMP : EPM.

10 MW, pour un premier marché dans les DOM-TOM puis dans le monde entier. Ils concluent tous deux en 1980 à la compétitivité de l'énergie thermique des mers dans certains DOM-TOM, mais ne préconisent cependant pas les mêmes technologies.

Deux grands choix technologiques sont en effet en balance dans les solutions examinées : cycle ouvert/cycle fermé, centrale à terre/centrale flottante. Ils induisent des avantages et inconvénients d'ordre technique (maîtrise ou non) et économique (coût, débouchés : produits et sous-produits, marché : nombre de sites d'implantation possibles). Pour chacun d'entre eux, le fonctionnement global est le même, et est identique à ce qu'avaient préconisé Claude et Boucherot dans l'entre-deux-guerres (cf 5.3) : l'eau de surface est la source chaude d'un cycle thermodynamique dans lequel un fluide est vaporisé pour actionner une turbine, puis refroidi par l'eau pompée en profondeur.
Le choix cycle ouvert/cycle fermé est lié à la présence ou non de liquide intermédiaire entre la source chaude et la turbine : dans un cycle ouvert, l'eau de surface est directement vaporisée, à très basse pression, pour être utilisée dans la turbine. Une fois condensée, elle est ensuite rejetée à la mer, ou, dans le cas d'une production d'eau douce, récupérée (ce qui empêche d'utiliser des condenseurs par mélange) (voir Figure 11.1). Dans le cycle fermé, un fluide intermédiaire, à faible température d'ébullition, est vaporisé par l'eau chaude de surface via des échangeurs de chaleur, actionne la turbine, est liquéfié par l'eau de profondeur dans un condenseur puis recommence un nouveau cycle (voir Figure 11.1).
Les différences entre centrale à terre et centrale flottante sont les suivantes. Les premières sont construites sur le rivage ; l'eau froide est pompée en profondeur grâce à des conduites pour lesquelles plusieurs dispositions sont envisagées, de la pose au fond jusqu'à la flottaison sous-marine. Les secondes sont construites en mer comme des plate-formes *offshore*, l'eau froide est pompée *via* une conduite plongeant directement dans les profondeurs.

Les avantages et inconvénients de ces quatre solutions techniques sont résumés dans le Tableau 11.1 pour ce qui concerne le choix du cycle, et dans le Tableau 11.2 pour ce qui concerne l'emplacement de la centrale.

40. Archives du CNEXO, p.d., Philippe Marchand, « L'énergie thermique des mers », rapport préparé pour la CCE, 05/1984.

41. Archives du CNEXO, p.d., Philippe Marchand, « L'énergie thermique des mers », rapport préparé pour la CCE, 05/1984.

47. Lié à l'absence de déperditions au niveau de l'échangeur entre l'eau de surface et un liquide intermédiaire.

47. L'échange de chaleur engendre des pertes thermiques d'autant plus importantes que le rendement global du cycle est faible. Il faut alors compenser par une grande surface d'échanges qui augmente le coût des échangeurs. La présence de ceux-ci représente dans tous les cas un coût par rapport à son absence en cycle ouvert.

47. Espèces animales et végétales marines qui peuvent entrer dans les circuits et les encrasser, notamment au niveau des échangeurs. Les échangeurs utilisés dans les cycles indirects entre l'eau de mer et le fluide intermédiaire sont au nombre de deux (au niveau de l'évaporateur et du condenseur, alors qu'il n'y en a qu'un pour le cycle ouvert) peuvent ainsi être endommagés ou voir leur fonctionnement altéré par ces « biosalissures ».

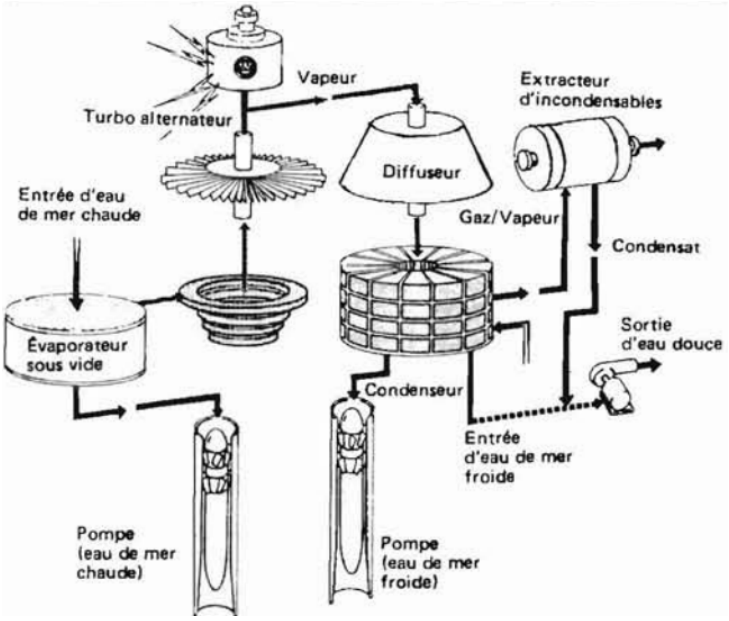



FIGURE 11.1 – Schéma de fonctionnement d'une usine maréthermique à cycle ouvert (avec production d'eau douce) [40]

TABLE 11.1 – Comparaison cycle ouvert/cycle fermé

| | Cycle ouvert | Cycle fermé |
|---|---|---|
| Avantages | Possibilité production eau douce au condenseur (débouchés) | Taille réduite turbine (coût centrale) |
| | Meilleur rendement [45](coût élec) | Pas besoin de dégazage (coût centrale, coût élec) |
| Inconvénients | Turbine imposante (coût centrale) | Échangeurs imposants (rendement : coût élec ; coût centrale) [46] |
| | Nécessité extracteur d'air (coût centrale, coût élec) | Vulnérabilité « biosalissures » (sécurité, coût (maintenance)) [47] |

Donnant chacun un poids différent aux possibilités présentées par ces quatre grandes solutions ainsi qu'à leurs contraintes, et cherchant à valoriser leurs savoir-faire, les deux groupements d'industriels choisissent donc de privilégier deux combinaisons de solutions différentes.

Le groupe CGE, suivant la solution choisie pour la majorité des projets américains, conclut au plus grand intérêt des centrales en mer. Il considère ainsi les incertitudes technico-économiques plus grandes pour les stations au rivage, mais surtout, il met en avant le caractère « universel » de cette solution, puisque l'implantation de ces centrales ne dépend pas des conditions topologiques du littoral [48]. Le marché visé est ainsi considé-

48. AN 2008 0658/56, p.d., Groupement CGE, Rapport final de l'étude de faisabilité énergie thermique des mers pour le CNEXO, 31/01/1980.

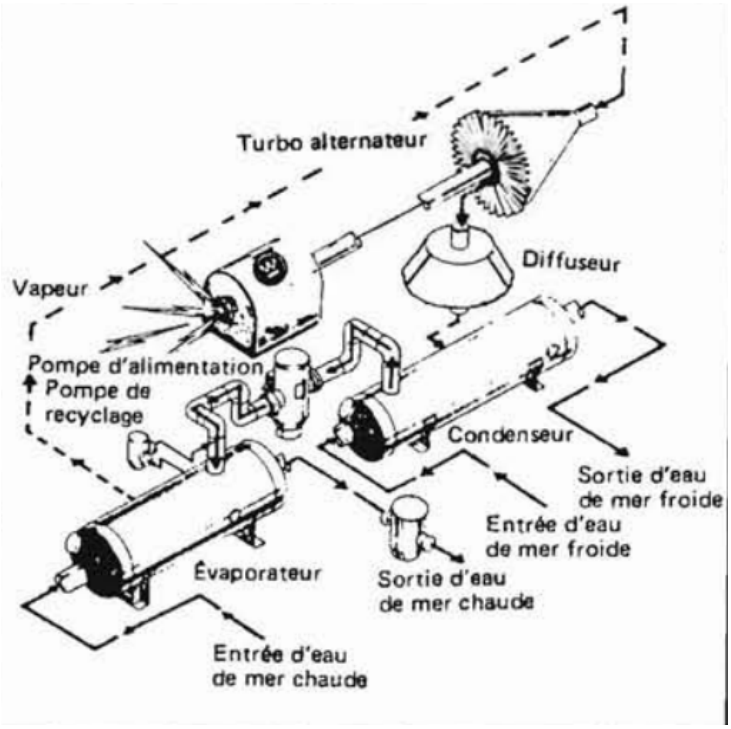



FIGURE 11.2 – Schéma de fonctionnement d'une usine maréthermique à cycle fermé [41]

rablement multiplié par rapport aux centrales à terre. Il ne se prononce en revanche pas sur le choix du cycle ouvert ou fermé, qu'il évalue comme économiquement équivalents, et se contente de rappeler la nécessité du cycle ouvert pour la production d'eau douce au condenseur, dont il estime également le coût.

Le groupe Empain-Schneider préfère quant à lui les centrales à terre, pour la « très grande sécurité résultant du fait que les centrales sont entièrement soustraites aux « fortunes de la mer », la réduction des coûts qu'elle suppose, et la facilitation d'acheminer les produits et sous produits de la centrale (eau douce, eau froide, eau tiède) [49]. En outre, le cycle fermé à l'ammoniac est choisi pour la taille réduite de la turbine permise par ce fluide dense à faible température de vaporisation, et en considérant que les recherches en cours en France sur les échangeurs de chaleur devraient à l'avenir réduire leur coût considérablement [50]. Le groupe suit en cela les choix faits pour la majorité des projets américains.

Les deux groupes concluent à la possibilité de construire rapidement des centrales ré-

49. AN2000 0404/6, p.d., Groupement de sociétés du groupe Empain-Schneider, ETM, rapport final 1e partie, 01/1980.

50. C'est en effet un axe sur lequel travaillent de nombreux acteurs de l'énergie. L'AFME finance des recherches pour des entreprises comme Elf, Alsthom ou encore Creusot-Loire. Ce sujet valorisé à l'AFME comme « intersectoriel » touche en effet le système énergétique dans son ensemble, aussi PIERRE, (1985) souligne-t-il qu'en 1985, « chacun d'entre nous, que ce soit pour nos activités industrielles ou collectives, pass[e], en moyenne et pour 80 à 90% de l'énergie primaire, par trois ou quatre échangeurs ou série d'échangeurs ».

TABLE 11.2 – Comparaison centrale flottante/centrale à terre

| | Centrale à terre | Centrale flottante |
|---|---|---|
| Avantages | Pas besoin de câble électrique (incertitude technique, coût installation) | Solution « universelle » (débouchés) |
| | Sécurité de la terre ferme (sécurité) | Accès direct à l'eau froide (coût, sécurité : tuyau) |
| Inconvénients | Dépendance conditions topographiques littoral (débouchés) | Vulnérabilité intempéries (sécurité) |
| | Conduite eau froide (incertitude technique, sécurité) | Nécessité câble raccordement électrique/acheminement sous-produits (incertitude technique, coût installation) |

pondant à leurs préconisations.

D'un point de vue technique, ils considèrent ces centrales comme un assemblage de composantes connues et ne comportant aucune nouveauté fondamentale. Ces centrales sont en effet constituées de sous-ensembles familiers dans les centrales thermiques (fossiles ou nucléaires) et dans des industries connexes : groupe turbo-alternateur, échangeurs de chaleur (évaporateur et condenseur), pompes, appareils électriques et auxiliaires divers. Pour les deux types de solutions, chacune de ces composantes doit cependant être adapté au cycle et aux conditions physiques choisis : en ce qui concerne le cycle, la turbine à très basse pression de grands volumes de vapeur pour la CGE, à ammoniac pour Empain-Schneider, et, pour les échangeurs de chaleur, l'adaptation à de grands débits d'eau [51] ; pour les conditions physiques, adaptation des composantes à l'eau de mer, corrosive et, surtout, présentant des biosalissures [52], conception des conduites de prise d'eau froide [53]. Ils estiment cependant disposer des connaissances nécessaires pour résoudre ces problèmes. Économiquement, ils concluent à un prix avantageux de l'électricité produite par rapport au coût de l'électricité sur une île comme Tahiti. Alors qu'en 1979, il est de 0.7 F/kWh pour les centrales diesel en place, il est estimé à 0.6 F/kWh pour une centrale de 10 MW par le groupement CGE, et à 0.45 F/kWh pour une centrale de 10 à 12 MW par le groupe Empain-Schneider [54] .

51. D'un point de vue énergétique, cette question est problématique surtout pour le cycle fermé : il faut des échangeurs à contact de très grandes dimensions pour l'échange eau/ammoniac. Pour le cycle ouvert, c'est dans le cas de production directe d'eau douce au condenseur, qui nécessite également des échangeurs à contact, que la question est la plus délicate.

52. Problématiques pour les échangeurs à contact (donc, surtout pour le cycle fermé).

53. Surtout problématique pour la centrale au rivage, avec les difficultés posées par l'interface sol-eau. Pour les centrales flottantes, la maîtrise des technologies *offshore* par l'industrie pétrolière laisse envisager des transferts de connaissance.

54. AN 2008 0658/57, p.d., CNEXO, Rapport final de synthèse de l'étude de faisabilité, 03/1980.

Les deux groupes rendent leurs études en 1980 (voir, en Annexe P, des vues d'artiste de ces centrales), et les ingénieurs du CNEXO se rangent à leurs conclusions sur la faisabilité des solutions préconisées. Quant au choix de la technologie à mettre en œuvre, c'est la solution prônée par la CGE qui est préférée. La solution flottante est en effet retenue, principalement en raison de son caractère « universel », et de la possibilité de réduire les coûts par les économies d'échelle de la construction en série. Le cycle ouvert est par ailleurs retenu, malgré la préférence exprimée par Empain-Schneider et la neutralité de la CGE sur cette question. Les ingénieurs du CNEXO invoquent une plus grande simplicité technique et des facilités de maintenance par rapport au cycle fermé. Il semble cependant qu'un autre argument ait pesé en faveur de cette solution : la possibilité de produire de l'eau douce à coût réduit, qui est soulignée par les ingénieurs du CNEXO, et ce, malgré les spécifications données aux industriels pour l'étude de faisabilité, selon lesquelles il fallait rechercher avant tout l'optimum technico-économique pour la production d'électricité. On a vu que la CGE a calculé à titre indicatif le coût de production directe d'eau douce au condensateur de l'usine énergie thermique des mers. Empain-Schneider a également souhaité évaluer la possibilité de produire de l'eau douce avec une centrale à cycle fermé, grâce à la présence d'une unité de dessalement additionnelle, utilisant, à son tour, les différences de températures entre deux masses d'eau, à savoir l'eau chaude et l'eau froide résiduelles. Le CEA vient de mettre au point, dans sa plate-forme de Cadarache, des unités de dessalement capables d'utiliser de faibles différences de température, pour l'utilisation de l'énergie solaire, et se dit prêt à collaborer avec Empain-Schneider et à participer au financement d'une unité incluse dans une centrale maréthermique à cycle fermé [55]. Mais l'eau douce ainsi produite n'est donc pas à proprement parler un sous produit du cycle comme c'est le cas pour une installation à cycle ouvert, ce qui explique le surcoût par rapport à un cycle ouvert [56].

Le CNEXO préconise ainsi l'étude de l'installation, à Tahiti, d'une centrale d'une dizaine de mégawatts, flottante et à cycle ouvert, qui est en fait la solution la plus ouverte en termes de marché : les centrales flottantes sont la solution dite universelle, le cycle ouvert laisse la possibilité de produire directement de l'eau douce. Cette solution permet de disputer le marché international pour lequel les États-Unis et le Japon sont en bonne place. Le CNEXO s'annonce donc favorable à la poursuite du programme et recommande, en mai 1980, de passer à la phase II, qui consiste à la formulation précise du projet : la filière (centrale flottante cycle ouvert) et la zone d'implantation (Tahiti) ayant été choisis, cette phase consiste à préciser le site d'implantation et effectuer les mesures de ses caractéristiques, ainsi qu'à mettre au point toutes les composantes non encore éprouvées

55. AN 2008 0658/58, p.d., Empain-Schneider, Étude de faisabilité, Rapport final de synthèse, 01/1981.

56. Solution Empain-Schneider : 5 F/m$^3$ ; solution CGE (cycle ouvert, condenseur à surface) : 1.7 à 2 F/m$^3$.

industriellement [57].

Mais le choix du CNEXO est rapidement remis en question par une expertise externe, qui n'est que le début d'une longue période de revirements sur le type de centrale maréthermique à adopter pour le premier prototype français.

**Une centrale maréthermique à Tahiti. Ergocéan, les « champions » du secteur électrique pour un impossible choix de filière (1980-1983)** Pour commencer la phase II du programme, le CNEXO demande des crédits de la DGRST. Celle-ci sollicite, en juin 1980, un groupe d'experts, pour évaluer « l'intérêt pour la France [du programme du CNEXO], ainsi que les chances et les conditions de son succès » [58]. Une telle expertise fait partie de la procédure pour obtenir une aide à l'innovation de l'ANVAR (ministères de l'Industrie et de la Recherche), sur laquelle le CNEXO compte pour financer une partie du projet. Les experts sollicités sont des ingénieurs d'EDF Chatou, de Total Exploitation, et un chercheur de l'Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA). Leur avis est défavorable à la construction d'une usine-pilote telle que le préconise le CNEXO, car ils jugent les coûts pris en compte dans les calculs sous-estimés vis-à-vis de la réalité, ainsi que les incertitudes technologiques trop grandes pour la solution flottante, notamment à cause du problème de la conduite d'eau froide. Les experts recommandent, si une construction doit avoir lieu en dépit de rendement économique immédiat, de considérer la solution utilisant les technologies qu'ils jugent les plus éprouvées — c'est-à-dire celles dont EDF et Total sont familiers — : centrale à terre ou au rivage, cycle fermé, c'est-à-dire exactement l'inverse de ce que préconisent les ingénieurs du CNEXO [59]. Ceux-ci sont très critiques sur les travaux d'expertise menés par le groupe EDF-ONRA-Total, et considèrent en général que les experts n'ont pas lu les rapports des industriels dans les détails et méconnaissent les travaux américains menés sur le sujet [60].

57. Les points sur lesquels les recherches sont à mener en priorité seraient les suivants :
— sur les problèmes d'ancrage et le « comportement dynamique de l'attelage « support de surface – conduite d'eau froide » », qui devraient bénéficier de l'expérience des industriels français du pétrole dans les technologies *offshore* ;
— sur les échangeurs de chaleur à surface eau-eau, pour la production d'eau douce au condenseur.
AN2000 0404/6, p.d., CNEXO (Équipe « Technologie du Centre océanologique de Brest (COB)), ETM, « Rapport de lecture critique des groupes CGE et Empain-Schneider », 05/1980.

58. AN2000 0404/6, p.d., Lettre de Claude Fréjacques et de Claude Pierre à Barrère, directeur de la Recherche à l'ONERA, Godin, d'EDF Chatou, et Rederon, de Total Exploitation, 03/06/1890.

59. AN2000 0404/6, p.d., Lettre de Gérard Piketty au ministre de l'Industrie, 27/01/1981.

60. Selon les ingénieurs du CNEXO : À propos de la conduite d'eau froide, les travaux de modélisation et d'expérimentation américains sont sur la voie d'une mise au point fiable ; à propos des rendements, la précision des rapports est sous-estimée : calculs de sensibilité en fonction des variations de température mensuelle, prise en compte des variations de perte de charge, sensibilité négligeable aux gaz dissous ; à propos des coûts, la sous-estimation prétendue n'est pas justifiée et semble exagérée. Les composants utilisés sont tous classiques et c'est leur assemblage qui est « audacieux ».
AN2000 0404/6, p.d., CNEXO (COB), « Dossier Énergie thermique des mers. Remarques du CNEXO sur le rapport d'expertise », 21/10/1980.

Si cet avis négatif n'est présenté que comme « élément d'aide à la décision » [61], il mène à une remise en question du programme établi par le CNEXO. En septembre 1980, à la suite d'une réunion entre la DGRST, le CNEXO, la mission interministérielle de la mer, la délégation à l'Innovation et l'ANVAR, il est décidé de ne poursuivre le programme que s'il est possible de construire une centrale sans subventions conséquentes « sur la base de garanties qu'apporteraient les constructeurs », et le choix de la filière est conditionné à l'engagement proposé par chacun des groupements. L'avis des experts, dont font partie deux grands acteurs du secteur énergétique « classique », qui sont très liés au ministère de l'Industrie (tutelle de l'ANVAR et de la délégation à l'Innovation), est donc suffisamment influent pour contraindre le CNEXO à réduire les ambitions de son programme. En outre, la poursuite du programme ne doit se faire qu'avec un « partenaire industriel », afin « d'éviter la concurrence franco-française », choix de stratégie industrielle qui provoquera des réticences de la part d'EDF [62].

Le CNEXO demande donc à la CGE et à Empain-Schneider de préciser leurs engagements techniques et financiers pour la mise en œuvre d'une centrale prototype. En janvier 1981, Empain-Schneider se dit prêt à s'engager pour la construction d'une centrale-pilote, à terre et à cycle fermé, de 10 MWe. Le prix maximum serait de 47.5 MF et le coût de production du kWh de 70 c [63]. La CGE propose de s'engager dans la construction d'une centrale flottante à cycle ouvert : un pilote de 7 MWe coûterait 280 MF et le coût du kWh serait de 70 c, un pilote de 10 MWe coûterait 330 MF et le coût du kWh serait de 60 c. Malgré le coût plus faible de la solution CGE, ainsi que la préférence initiale du CNEXO pour cette option, c'est finalement la proposition d'Empain-Schneider qui est retenue. L'engagement d'Empain-Schneider est en effet plus important, que ce soit en termes de participation à l'investissement initial, ou aux études complémentaires nécessaires, qui sont en outre de moindre envergure que celles que nécessite la solution CGE [64]. Cette filière est celle qu'ont préconisée les experts, et, pour ce qui est du cycle fermé, celle qui est la plus en vogue au niveau international. Le CNEXO fait donc une croix sur ses ambitions d'ouverture maximale au marché, et d'originalité française.

Suite à cette prise de position du CNEXO en faveur du projet d'Empain-Schneider,

61. AN2000 0404/6, p.d., CNEXO, « Relevé des conclusions de la réunion du 16 septembre 1980 tenue à la DGRST au sujet de l'énergie thermique des mers ».

62. AN2000 0404/6, p.d., CNEXO, « Relevé des conclusions de la réunion du 16 septembre 1980 tenue à la DGRST au sujet de l'énergie thermique des mers ».

63. AN2000 0404/6, p.d., Gérard Piketty, Lettre au ministre de l'Industrie, 27/01/1981.

64. Ces études complémentaires coûteraient 6 MF, portant sur la réduction des coûts dans les circuits d'ammoniac et des essais et calculs sur la conduite d'eau froide. Pour la CGE, elles s'élèveraient à 24MF, portant sur les tuyaux de pompage (nature, montage, comportement dynamique barge-tuyau), le comportement du câble électrique sous-marin, la mise en place et la maintenance d'une ligne d'ancrage, la thermodynamique du cycle diesel (désaérateur). La CGE ne veut y participer que pour 5 MF maximum, et ne veut prendre d'engagement technique et financier ferme qu'après ces études complémentaires.

la CGE décide de proposer un partenariat avec son concurrent initial [65], ce qui donne naissance au consortium Ergocéan [66]. Celui-ci n'est cependant effectif qu'au cours de l'année 1982 après une longue période de pourparlers [67] , et les deux entreprises peinent à s'accorder sur un choix de filière, chacune restant campée sur sa position initiale.

En mars 1981, la phase II semble à nouveau prête à être lancée : un nouveau choix de filière a été fait, il reste à trouver les financements pour l'étude du site et l'étude des composantes problématiques de la filière cycle fermé/à terre. Piketty obtient de la DGRST un financement pour une mission à Tahiti visant à préciser les conditions physiques de l'île, ainsi que le montage financier possible avec le Territoire de Polynésie et l'entreprise EdT [68]. Le choix du site est régi par des considérations bathymétriques [69], morphologiques [70], thermiques [71], infrastructurelles [72], géographiques [73], écologiques [74], touristiques et d'aménagement [75]. Le site retenu est le littoral de la capitale Papeete, principal lieu de consommation d'électricité de Tahiti (et de la Polynésie). EdT, intéressée par l'installation qui est toujours susceptible de concourir à l'approvisionnement électrique de son réseau, est d'accord pour participer au financement de la centrale à hauteur de 10%, et pour en assurer la conduite. La poursuite du dossier énergie thermique des mers est pour elle une urgence car elle doit prendre des décisions rapides pour faire face aux problèmes de demande et d'augmentation des prix : elle doit ainsi se prononcer sur un nouvel emplacement pour les centrales diesel, ainsi que sur la politique de microhydraulique qui est « en quelque sorte concurrente de l'énergie thermique des mers » [76]. Le Territoire, également intéressé par cette installation qui contribuerait à l'approvisionnement électrique de la Polynésie, mais aussi par le prestige que lui conférerait la possession d'une instal-

65. AN2000 0404/6, p.d., CGE, « Nouvelles positions du groupement relatives aux questions posées par la lettre du CNEXO du 19/09/1980 », 12/01/1981.

66. Il réunit,
- pour la CGE : Alsthom-Atlantique, Ateliers et chantiers de Bretagne, Compagnie générale pour les développements opérationnel des richesses sous-marines, Société générale d'entreprises pour les travaux publics et industriels ;
- pour Empain-Schneider : Creusot-Loire, Jeumont-Schneider, SGTE, Spie-Batignolles.

67. En décembre 1981, Jean-Claude Pujol, directeur délégué à la Flotte et à la technologie, écrit ainsi au directeur d'Empain-Schneider pour lui demander, constatant « que les négociations ne semblent pas avoir progressé et qu'un temps précieux a ainsi été perdu », d'accélérer la mise en place de la collaboration Empain-Schneider/CGE.
AN2000 0404/6, p.d., Lettre de Pujol au directeur de la CGTE, 18/12/1981.

68. AN2000 0404/6, p.d., CNEXO, « Compte-rendu de mission énergie thermique des mers effectuée du 9 au 13 mars 1981 à Tahiti », 16/03/1981.

69. Il faut 1000 m de profondeur.

70. Les canyons facilitent la pose de la conduite d'eau froide.

71. Une différence de température minimale de 23°C.

72. Remblaiement sous-marin bon marché, accès routier/maritime existant ou bon marché.

73. Proximité du lieu de consommation.

74. Il faut minimiser impact rejets thermiques.

75. Protection des sites privilégiés.

76. AN2000 0404/6, p.d., CNEXO, « Compte-rendu de mission énergie thermique des mers effectuée du 9 au 13 mars 1981 à Tahiti », 16/03/1981.

lation énergétique innovante et mondialement valorisée, est prêt à accorder des facilités de financement de la centrale par le biais d'aides indirectes [77], et accepte de participer à l'étude de sites à hauteur de 1.2 MF.

En avril 1981, à l'initiative de Piketty qui considère les conditions remplies pour ce lancement, a lieu une réunion entre la DGRST, la Mission interministérielle de la mer, le CNEXO, le ministère chargé des DOM-TOM et le ministère de l'Industrie [78]. Ses participants se rangent à l'avis de Piketty et se prononcent en faveur de la poursuite du programme.

Mais les lenteurs de lancement de la phase II ne s'accorderont pas avec l'« urgence » ressentie par EdT. C'est, cette fois, le changement de gouvernement intervenant en mai 1981 qui vient retarder la poursuite du programme. En effet, l'accord officiel des ministères concernés est nécessaire pour obtenir les financements de l'étude détaillée du site et des recherches sur la filière de centrale maréthermique choisie. Ainsi, s'annoncent rapidement favorables à la poursuite du dossier le secrétariat aux DOM-TOM, le ministère Lamare et le ministère de la Recherche, mais ces deux derniers retardent l'allocation du budget de la phase II à novembre 1981, s'annonçant désireux de « préciser le montant et les conditions du financement nécessaire en 1982 » [79]. Le budget alloué pour 1982 est plus faible que la somme demandée par le CNEXO (5 MF au lieu de 7 MF), et son versement sera différé : le premier, d'un montant de 3 MF et qui concerne les études de site par le CNEXO, n'intervient qu'en janvier 1982, et le second de 2 MF à destination d' n'est pas encore effectué fin juillet 1982 [80]. Cette attitude traduit une certaine frilosité, ou en tout cas une incertitude envers le dossier énergie thermique des mers. Le CNEXO s'alarme à plusieurs reprises de ces lenteurs : en septembre 1981, Marchand pointe du doigt le manque d'appui des ministères concernés, soulignant le retard de deux ans dans le commencement des travaux, alors que les pays concurrents avancent dans leurs expérimentations [81], et que les industriels français ont une attitude « volontariste » vis-à-vis du projet de Tahiti. Un rapport sur l'énergie thermique des mers donné lors d'une réunion pour la Mission interministérielle de la mer en avril 1982 souligne un « développement au point mort

77. Exonération des droits d'entrée des matériels métropolitains, taux d'imposition avantageux sur les bénéfices d'exploitation, mise à disposition d'un terrain remblayé (ce qui induit une économie de 10 à 15M F), indexation du prix de l'énergie thermique des mers sur le prix de vente EdT, allègement fiscal de 50% sur les bénéfices industriels dans le cadre de l'aide aux investissements dans les DOM-TOM.

78. AN2000 0404/6, p.d., Jean-Claude Pujol (Directeur délégué à la Technologie et aux Relations industrielles), « Compte-rendu de la réunion « énergie thermique des mers » », 03/04/1981.

79. AN2000 0404/6, p.d., Roger Lesgards, Directeur adjoint du cabinet du ministère de la Recherche et de la Technologie, Lettre au Haut commissaire pour la Polynésie, 29/09/1981.

80. AN2000 0404/6, p.d., Lettre d'Yves Sillard (PDG du CNEXO) au directeur de la Recherche et de la Technologie, 13/04/1982. Réponse de Maurice Allègre, directeur du Développement et de la Technologie, 29/07/1982.

81. deux centrales, une à terre et l'autre en mer, construites aux USA, station sur le point d'être mise en service au Japon.
AN2000 0404/6, p.d., Philippe Marchand, « Énergie thermique des mers. Note d'actualité » 16/09/1981.

depuis 1980 par absence de conclusion de l'administration » et signale la « nécessité d'une continuité dans la politique » pour un dossier repris pour la troisième fois en cinquante ans [82]. En avril 1982, Yves Sillard, le nouveau PDG du CNEXO, sollicite le ministre de la Recherche et de la Technologie afin d'obtenir les 2 MF dus à Ergocéan, ce à quoi le directeur du Développement et de la Technologie répond par la demande d'un « plan d'action précis en matière de développement de l'énergie thermique des mers avec les différentes options techniques à lever et les étapes à franchir depuis la phase d'études jusqu'à la mise en service éventuelle des centrales de puissance » [83] — ce qui, au vu du nombre de rapports et de discussions dans le cadre de la Mission interministérielle de la mer, paraît bien redondant.

Ces incertitudes sur le programme énergie thermique des mers, et plus généralement sur le programme Énergies marines, sont liées, non seulement aux préférences divergentes de la CGE et d'Empain-Schneider, mais aussi aux changements dans les acteurs à la tête du ministère, et, enfin à la mise en place par le nouveau gouvernement de la politique de maîtrise de l'énergie. En effet, le gouvernement, dès sa mise en place, souhaite justifier les prises de position anti-nucléaire/pro-renouvelables du Parti socialiste lors de sa campagne électorale, en préparant une Loi de programmation et de recherche qui mènera à la création de l'AFME en 1982. Les énergies marines, qui étaient jusqu'alors restées à l'écart des recherches des différents comités et Agences d'objectifs décrits en 10, se retrouvent, en tant qu'énergies nouvelles, comprises dans cette nouvelle politique. Elles se retrouvent donc intégrées, à la fois dans la politique de mise en valeur des ressources marines (la mission interministérielle de la mer), et dans la politique des énergies nouvelles. C'est la « mission Chartier » qui est chargée de définir les orientations de la politique de recherche en termes d'« utilisation rationnelle de l'énergie et de diversification énergétique » : Philippe Chartier, spécialiste de la biomasse au COMES, et Haroun Tazieff, ingénieur des Mines et partisan de la géothermie, ont pour tâche de produire un rapport répondant à cet objectif (Pehlivanian, 2014, p. 321-323). Ils rendent un premier rapport en novembre 1981 — c'est, donc, probablement l'attente de ce rapport qui explique le délai dans le feu vert du ministère de l'Industrie pour la phase II — puis en mai 1982, moment de la création de l'AFME. Les acteurs des énergies marines sont sollicités pour participer à l'élaboration de ce rapport, et déterminer la place de leurs recherches dans la politique des énergies nouvelles. Or, dans ce cadre, le choix de filière est à nouveau remis en question, et c'est une filière à terre, mais à cycle ouvert, et de puissance moindre (quelques mégawatts) qui fait désormais la préférence des acteurs de la Mission Chartier. Lorsqu'en décembre 1981, le directeur délégué à la Flotte et à la Technologie l'annonce au groupe

82. AN2000 0404/6, p.d., Note « L'Énergie thermique des mers » donnée lors d'une réunion au ministère Lamare le 07/04/1982.

83. AN2000 0404/6, p.d., Lettre d'Yves Sillard (PDG du CNEXO) au directeur de la Recherche et de la Technologie, 13/04/1982. Réponse de Maurice Allègre, directeur du Développement et de la Technologie, 29/07/1982.

Empain-Schneider [84], celui-ci ne manque pas d'exprimer son mécontentement de ce revirement dans une décision qui avait été actée et qui ne correspond pas à sa préférence technologique [85].

Dans le cadre de la Mission Chartier, une réunion « énergies marines » a lieu en mai 1982 où sont présents des représentants de deux entreprises d'Ergocéan, du ministère Lamare, de la Mission interministérielle de la mer, et des acteurs de l'énergie houlomotrice (cf 11.3). À l'issue de cette dernière, il est décidé de privilégier, dans le programme énergie thermique des mers, les usines à terre, mais d'étudier les cycles ouvert et fermé [86] — conséquence, probablement, des protestations d'Empain-Schneider. En juin 1982, alors que la subvention pour les travaux de R&D dédiée aux deux entreprises pour 1982 n'a toujours pas été versée à cause de l'incertitude du programme, c'est au tour du ministre Lamare de revenir sur le nouveau choix de cycle. Il souhaiterait ne voir étudier que le cycle fermé, au sol ou en mer, et ne pas considérer *a priori* les possibilités de sous-produits, et propose des solutions aux problèmes invoqués pour le cycle fermé [87]. Suite à quoi la CGE exprime son mécontentement [88]. Il est suivi de Lamare, passé de la DGRST au ministère de la Recherche et de l'Industrie, qui est, quant à lui, opposé au programme parallèle cycle ouvert-cycle fermé du CNEXO, dont il trouve la stratégie « coûteuse et très contestable » [89] .

Dernier revirement (quatrième en un an) : le CNEXO propose, en septembre 1982, un programme de construction d'un prototype à terre étudiant en parallèle les deux cycles, mais considérant le cycle ouvert comme le plus prometteur, et le cycle fermé comme « cycle de secours » [90] . Il doit aboutir à un avant-projet détaillé en 1984. Le montant de

84. Pujol dit ainsi à Lacoste que « dans le cadre de la préparation de la future loi, des rapports ont été préparés où figure en bonne place la réalisation d'une centrale prototype à terre, de faible puissance ».

85. AN2000 0404/6, p.d., Lettre de Henri Lacoste (PDG de la SGTE) à Pujol, 29/01/1982.

86. Deux options sont retenues pour la poursuite du programme énergie thermique des mers : une hypothèse haute, avec un budget de 60 MF pour deux ans d'études portant sur les quatre filières possibles, puis la mise en service d'un prototype à terre de la filière sélectionnée en 1986 (300-600 MF), des essais sur prises d'eau froide et d'eau chaude (50 MF), enfin, la réalisation d'un prototype en mer en 1990 (500 MF). L'hypothèse basse ne retient que l'option à terre : elle envisage des études sur les deux cycles pendant un an ainsi que des tests sur la prise d'eau froide à terre et un programme complémentaire sur le cycle retenu (40 MF), la réalisation d'un prototype à terre mis en service en 1986 (300 MF), et l'amélioration du prototype (30 MF).
AN2000 0404/6, p.d., « Conclusions consécutives à la réunion du sous-groupe Énergie des mers du 10 mai 1982 », 11/05/1982.

87. AN2000 0404/6, p.d., Ministre Lamare, « Note à l'attention de Monsieur de Lamare », 24/06/1982.

88. Elle accuse en particulier le groupe Péchiney d'avoir tenté d'influencer le choix du ministre de la Recherche en mettant en avant les intérêts du cycle fermé, qui peut utiliser plus d'aluminium que le cycle ouvert. En tout cas, il est possible que le ministre Lamare ait été influencé par l'argumentaire de Péchiney.
AN2000 0404/6, p.d., C Vargel (Aluminium Pechiney), Lettre au chef du département Espace, environnement, océan du ministère de la Recherche, 25/05/1982 ; Jacques Chaboseau (Alsthom Atlantique), Lettre à Kervern, DG d'Aluminium Pechiney, 01/09/1982.

89. AN2000 0404/6, p.d., J-M Lamare, « Note à M Allègre », 26/07/1982.

90. Le ministre Lamare réagit en soulignant à Lamare la non conformité du programme aux orientations

ces études est estimé à 72 MF [91]. Le CNEXO demande un budget de 49 MF sur deux ans pour financer ce programme. Yves Sillard souligne à nouveau l'urgence de le mener à bien, et de donner aux industriels les fonds nécessaires dans l'immédiat aux expérimentations sur le cycle ouvert, le cycle fermé et le tuyau [92]. En octobre 1983, Lamare demande une nouvelle expertise à Claude Bienvenu (EDF) sur le dossier, qui ne sera rendue qu'en janvier 1983, et qui sera à nouveau défavorable : Bienvenu invoque les mêmes arguments d'incertitudes sur le tuyau d'eau froide, sur le rendement du cycle sans doute surestimé, sur les coûts sûrement sous-estimés ; il y ajoute un marché faible et insuffisamment cerné, un retard vis-à-vis des USA. Conforme à l'avis de l'expertise donnée presque trois ans plus tôt, il préconise un programme imminent de « construction d'une usine sans rentabilité, apportant rapidement une notoriété à l'industrie française », à terre et à cycle fermé (le plus « classique »), avec une puissance minimale de 3 MWe, pour 400 à 500 MF. Il critique en outre le choix d'organisation industrielle du CNEXO, et considère que le consortium amène des lenteurs, alors qu'une mise à la concurrence, avec livraison « produit en mains » amènerait plus de dynamisme à l'opération. Selon lui, un délai d'un an aux industriels pour préciser leurs offres doit suffire à « élaborer la vitrine espérée et à rattraper le retard sur les américains » [93] . Le CNEXO et Ergocéan revoient leur programme en fonction de ces remarques : le cycle fermé est considéré avec davantage d'attention dans le contrat-cadre qu'ils élaborent en mars 1983 [94]. Ainsi, il est envisagé de construire une usine à terre à cycle fermé dans les 24 mois suivant la phase II, c'est-à-dire d'ici février 1987.

**Abandon progressif du projet (1982-1986)** Cependant, dès la fin de l'année 1982, le retard pris, non vis-à-vis des Américains ou des Japonais, mais des besoins de l'usager cible du premier prototype, est déjà presque fatal au projet de prototype à Papeete. Entre temps, l'entreprise EdT a en effet dû faire des choix pour approvisionner son réseau électrique. En outre, le projet tel qu'il apparaît a été modifié par rapport à ce qui avait été annoncé en 1980, notamment en termes de puissance. En octobre 1982, voici ce qu'un de des représentants d'EdT écrit ainsi au ministre Lamare :

> « Il y a environ dix huit mois, Thiennot et Pujol étaient passés pour étudier l'implantation de leur usine ETM [énergie thermique des mers] en Polynésie.

exprimées antérieurement : finalement, pour lui, une étude parfaitement symétrique doit être menée (pourtant, il préconisait, en juin, l'étude unique du cycle fermé).
AN2000 0404/6, p.d., Jacques Lys, « Note pour Monsieur Lamare », 20/10/1982.

91. 24 MF cycle ouvert, 5 MF cycle fermé, 26 MF tuyau, avant-projet détaillé 5 MF, études de site 7 MF, boucle COB (étude des biosalissures) 1,5 MF, autres études 3 MF

92. AN2000 0404/6, p.d., Yves Sillard, Lettre au directeur du Développement industriel et technologique et de l'innovation du ministère de l'Industrie, 21/09/1982.

93. AN2000 0404/6, p.d., EDF, « Dossier ETM, rapport d'expertise », 27/01/1983.

94. AN2000 0404/6, p.d., CNEXO, Ergocéan, « Étude de définition et de conception de l'avant-projet du pilote de démonstration « énergie thermique des mers », Annexe n°1 au contrat-cadre n°82/2757/YB », 29/03/1983.

> Le futur « bébé » pesait alors 12 à 15 MW et seule, une implantation sur Tahiti était envisageable. Ce projet ayant été mis en veilleuse, nous avons accéléré le programme d'équipement en hydro-électricité dont le potentiel est important sur l'île.
> Maintenant, le projet ressort à une échelle bien réduite et, d'après ce que j'ai compris, avec des buts moins ambitieux en ce qui concerne la compétitivité de l'énergie produite. Techniquement, son implantation sur l'île de Tahiti est toujours envisageable et tout appoint de fourniture d'énergie sur notre réseau sera bon à prendre. Nous sommes prêts à collaborer à un tel projet, par exemple, en prenant en charge l'exploitation, si le projet débouche sur une usine exploitable de manière économiquement raisonnable.
> Mais à l'occasion de ce changement d'échelle, on peut se demander si un autre site ne serait pas plus judicieux. Je pense, en particulier, à l'île de Moorea à 12 nautiques de Tahiti dont on commence seulement l'électrification, qui devrait connaître un développement touristique rapide avec des besoins de l'ordre de 3 à 5 MW dans environ six ans. Cette île ne dispose pas d'hydro-électricité. Il est envisagé de passer un câble sous-marin pour l'alimenter depuis Tahiti (profondeur de la mer : 2 000 m !). Un site particulièrement intéressant existe, qui ne nécessiterait pas de travaux de remblaiement comme à Papeete...
> J'ai lancé l'idée sans beaucoup de succès auprès de ses promoteurs... Leur problème est que l'étude des fonds a déjà été entreprise sur le site de Tahiti. » [95].

Ainsi, la construction d'usines hydrauliques rend moins urgent le recours à d'autres sources d'énergie, et la puissance envisagée pour le projet ne correspond plus aux attentes d'EdT, qui préfère changer de site au projet. Cependant, le CNEXO, qui a déjà commencé des études de site (pour lesquelles les subventions promises ont été versées), s'y oppose, pour ne pas « perdre » le travail déjà effectué.

Par ailleurs, le projet n'obtient pas les soutiens escomptés par ses porteurs. Ainsi, le ministre Lamare accepte de le financer au titre du Fonds d'Intervention et d'Action maritimes, mais conditionne ce soutien à la participation d'EDF, pour sa « capacité d'expertise » dans la mise au point du projet, et « ultérieurement, son association à l'exploitation et à la vente de ces équipements » [96]. Mais EDF n'est pas intéressée par les usines marémothermiques [97]. Jean Syrota, de la DGEMP, connu pour n'être pas un fervent partisan des

95. AN2000 0404/6, p.d., Lettre d'EdT à Jacques Lys, ministre Lamare, 27/10/1982.

96. AN2000 0404/6, p.d., Jacques Lys (Mission interministérielle de la mer), "Note à l'attention de M Lamare", 13/04/1983.

97. En 1980, lors d'une réunion officieuse entre la Direction des Affaires étrangères et de la Coopération (DAFECO), chargée « à l'extérieur du territoire de la formation et de l'assistance ainsi que de la promotion des technologies EDF », celle-ci souligne « le peu d'intérêt d'EDF pour l'énergie thermique des mers et les houlomotrices ».
citeANf, Compte-rendu de la réunion DAFECO-CNEXO, 31/01/1980.

énergies nouvelles, n'est quant à lui pas favorable au « développement de systèmes nouveaux qui s'avèrent plus onéreux que les moyens classiques effectivement envisageables » pour la France, même si l'énergie thermique des mers est effectivement moins onéreuse que d'autres sources d'énergie pour lesquelles « des travaux coûteux ont été inconsidérément consacrés dans le passé » (il fait probablement là référence à l'énergie solaire [98]). Il considère en outre que le développement de petites centrales maréthermiques en concurrence avec le Japon et les États-Unis doit être regardé comme une « opération industrielles normale », et ne peut être considéré comme un objectif de la politique énergétique de la DGEMP. Il rappelle d'ailleurs que ses priorités sont la maîtrise de l'énergie, non la production ! Et que ces centrales, si elles sont trop chères pour la France, risquent de l'être encore plus pour des « pays en voie de développement » [99].

En 1984, le département Énergie du ministère de l'Industrie réclame une baisse drastique du programme énergie thermique des mers : « il sera difficile, sinon impossible, de trouver le financement nécessaire auprès des industriels, des fonds publics et de la Communauté » (européenne) pour la centrale-pilote. Il souhaite limiter le programme énergie thermique des mers à « la reconnaissance du site de Tahiti, aux études techniques de recherche et développement permettant de mieux définir le projet et de préciser les coûts et les comparaisons avec les moyens conventionnels de production d'électricité », et aux « études d'accompagnement permettant d'évaluer les chances de succès d'une telle filière française à l'exportation, d'estimer le marché et de préparer le passage aux centrales industrielles ». En somme, le projet de centrale maréthermique pilote à Tahiti est abandonné.

Le CNEXO poursuit cependant l'avant-projet d'une centrale maréthermique de 5 MW, toujours jugé intéressant d'un point de vue économique : en 1985, un rapport estime qu'un tel prototype « aurait fourni environ 15% de l'énergie nécessaire à Tahiti en 1990 à un prix de revient de 1.8 F [...] le kWh », alors que le « coût du kWh Diesel début 1985 sur le territoire dépassait déjà 1 F » (Gauthier, 2005). Un rapport final d'avant projet détaillé est produit en 1987, mais ce sera là l'aboutissement final de presque dix ans de travaux du CNEXO et de ses partenaires universitaires et industriels. La phase II aura au total coûté 50 MF répartis sur cinq ans (1982-1987)(Gauthier, 2005). Outre beaucoup de « papier » (177 rapports !) [100], des travaux expérimentaux ont été effectuées pour les deux cycles, ainsi que l'étude détaillée des abords de Papeete. Cette dernière a été réalisée entre 1982 et 1985 sous la direction du Centre océanologique du Pacifique (COP) du CNEXO, avec

98. Selon Chartier, (p.d.), Syrota, promoteur des économies d'énergie, « faisait tout-à-fait partie du style d'acteurs qui considérait que tout ce qui était solaire, c'était de la bagatelle, une fantaisie du bout de couloir pour quelques écolos attardés ».

99. AN2000 0404/6, p.d., Jean Syrota, Note sur l'énergie thermique des mers à l'attention de Lamare (ministère de l'Industrie et de la Recherche).

100. Marchand, p.d., Entretien réalisé le 26 février 2016 au domicile de Philippe Marchand.

la participation financière du Territoire de Polynésie [101], et la participation technique du Service hydrologique de la Marine (étude bathymétrique), du Muséum d'histoire naturelle, du CEA et de l'ORSTOM (étude physico-chimique et biologique de l'eau) [102]. Quant aux expérimentations sur les cycles, elles comportent l'analyse du circuit fermé en présence de biosalissures par le COB [103], des tests sur le circuit ouvert par la Sogreah à Grenoble [104], de la modélisation et des essais sur les conduites d'eau froide par SPIE Batignolles et Doris, deux sociétés spécialisées dans le pétrole *offshore*, et le COB pour certains essais en bassin [105].

L'avant projet final est terminé en 1987, alors que se précise le contre-choc pétrolier, qui balaye définitivement tout espoir de voir un jour la réalisation de l'usine de Tahiti. Certains responsables du programme Énergies marines tentent de poursuivre une activité énergie thermique des mers sur la production d'eau douce à partir de l'eau de mer afin de « valoriser les connaissances acquises par l'équipe ETM de l'Ifremer » (Gauthier, 2005) [106]. En effet, une usine ne produisant que de l'eau douce est moins coûteuse qu'une usine produisant de l'électricité [107]. Mais cette activité est abandonnée à la fin des années 1980.

### 11.2.2 Une difficile convergence des intérêts. Relativiser les effets du contre-choc pétrolier

La chronologie du programme énergie thermique des mers esquissée ci-dessus suggère que le contre-choc pétrolier n'est finalement venu qu'achever un mouvement allant vers l'abandon du projet d'usine à Tahiti et, plus globalement, du programme entier. Une lecture possible est que les désaccords entre tous les acteurs sur la forme et les modalités de mise en œuvre du projet ont tellement retardé sa formulation précise que celui-ci,

101. AN2000 0404/6, p.d., Séminaire sur l'énergie thermique des mers organisé par le COB, 27-28/09/1983.
102. AN2000 0404/6, p.d., Séminaire sur l'énergie thermique des mers organisé par le COB, Table ronde, 27-28/09/1983.
103. La corrosion, l'encrassement et les propriétés thermiques d'échangeurs de plusieurs types avec l'eau de mer de la rade de Brest (Gauthier, 2005).
104. Une boucle thermodynamique d'une puissance de 400 KW a ainsi été expérimentée.
105. Marchand, p.d., Entretien réalisé le 26 février 2016 au domicile de Philippe Marchand.
106. Selon Philippe Marchand, « [u]ne mini-équipe composée de 2-3 personnes a continué à entretenir un peu la flamme pendant 2-3 ans, en se reconvertissant sur l'étude du dessalement de l'eau de mer par l'utilisation de l'énergie thermique des mers » : une étude de faisabilité sur le dessalement de l'eau de mer a été effectuée pour l'île de Bora-Bora. De même, des contacts ont été pris avec le gouvernement du Cap Vert, pour la mise en place d'une unité de dessalement. Le ministre du Développement de ce pays était intéressé par cette technologie, a demandé des subventions à l'ONU, mais n'en a pas obtenus
Marchand, p.d., Entretien réalisé le 26 février 2016 au domicile de Philippe Marchand.
107. Notamment parce qu'elle peut utiliser une différence de température plus faible, et ne nécessite donc pas de pomper de l'eau à une profondeur aussi grande qu'une usine qui produit de l'électricité.
Marchand, p.d., Entretien réalisé le 26 février 2016 au domicile de Philippe Marchand.

proposé dans ses grandes lignes dans une situation favorable, s'est retrouvé obsolète, et ce avant que le prix international du pétrole lui soit fatal.

Le projet de prototype à Papeete initié en 1978 incarnait la convergence des intérêts des différents acteurs. Au départ, ces motivations étaient les suivantes :

— pour le CNEXO, moyen de s'affirmer comme acteur de « grands projets » technologiques pour l'exploitation de la mer, et de s'inscrire dans les problématiques économiques du pays (ici, la crise énergétique) ;
— pour la Mission interministérielle de la mer, mise en œuvre par l'industrie française d'une technologie maritime concurrencée internationalement, inscrite dans les problématiques économiques du pays, et permettant l'exploitation de ressources océaniques : énergie, eau de mer (eau et sel), transformation de minerais, aquaculture... ;
— pour la DGRST et l'ANVAR, encouragement à la mise en œuvre d'une technologie objet d'une vive concurrence internationale, utilisation d'un TOM comme « vitrine » ;
— pour les industriels, prise de part de marché dans une filière énergétique fortement concurrentielle et présentant des familiarités avec leurs domaines d'expertise ;
— pour la Polynésie, moyen d'électrifier le territoire, et aspect valorisant d'être en tête de file d'une technologie innovante ;
— pour EdT, approvisionnement en électricité de son réseau grâce à un procédé moins coûteux que les centrales thermiques et hydrauliques.

Cette convergence initiale ne suffit cependant pas. Successivement, des désaccords déplacent les points de convergence de ces acteurs jusqu'à ce qu'ils soient multiples, et leurs intérêts inconciliables. L'apparition de nouveaux acteurs provoque en outre un manque de clarté dans la place de l'énergie thermique des mers parmi les programmes de recherche français. S'y ajoute enfin le manque de soutien, tout au long du projet, de certains acteurs classiques de la politique énergétique (EDF, DGEMP), couplé à leur statut d'expert et à l'importance qu'y accordent certains protagonistes (DGRST, ANVAR, ministre Lamare). La fastidieuse définition du projet (choix de filière à mettre en œuvre, ainsi que modalités de réalisation industrielle), en est le résultat. La centrale doit-elle produire de l'eau douce, de l'eau chaude, voire, pour les tous derniers projets portés par l'Ifremer à la fin des années 1980, de l'électricité ? Doit-elle être « universelle », quitte à coûter plus cher mais à assurer un marché plus important ? Faut-il mettre les entreprises en concurrence ? L'énergie thermique des mers relève-t-elle de la politique des énergies nouvelles (rôle de l'AFME) ? Relève-t-elle d'une politique énergétique (EDF, DGEMP) ? On voit ainsi tour à tour une centrale flottante qui produit de l'eau douce et de l'électricité à Papeete, une centrale à terre ne produisant que de l'électricité, une centrale flottante ou à terre pro-

duisant de l'électricité et peut-être de l'eau douce, pour les uns à Papeete et pour les autres à Moorea. Si on considère que les derniers projets portés par le CNEXO sont dans la continuité de celui de Tahiti, on peut encore ajouter ces centrales productrices d'eau douce, à Bora-Bora et au Cap Vert, à la liste des projets successifs.

Le CNEXO souhaite en premier lieu mettre au point la filière à la fois la plus universelle, la plus « innovante » et la plus ouverte en termes de débouchés industriels : les centrales flottantes à cycle ouvert. La filière flottante permet théoriquement s'implanter n'importe-où dans la mer tropicale, et est novatrice en ce que les usines seraient les premières centrales électriques *offshore* ; le cycle ouvert permet de produire de l'eau douce et du sel comme sous-produits, et est novateur pour la taille de la turbine envisagée ainsi que pour le couplage entre les rejets thermiques d'un cycle thermodynamique et un procédé de dessalement de l'eau de mer. Le premier désaccord vis-à-vis de ce choix vient des experts sollicités par la DGRST et l'ANVAR, qui se rangeaient *a priori* du côté du CNEXO. Il s'agit d'EDF, de Total et de l'ONERA, dont les deux premiers, acteurs dominants de l'énergie en France, préconisent la solution la moins coûteuse, la plus rapide à mettre en place et selon eux la plus sûre, c'est-à-dire la plus proche de ce qu'ils connaissent, à savoir les centrales à terre à cycle fermé. L'expertise de ces acteurs infléchit deux fois la formulation du programme énergie thermique des mers. EDF refuse en outre de participer au projet, ce à quoi le ministre de la Mer accorde une grande importance. Le désintérêt d'EDF pour l'énergie thermique des mers est donc défavorable au projet dès lors que l'entreprise non seulement est consultée en tant qu'experte, mais est également sollicitée par certains acteurs (ministre de la Mer) comme un participant *sine qua non* du projet. De la même manière, la DGEMP, sollicitée pour soutenir le projet, se montre également réticente à une participation au programme Énergie thermique des mers : elle juge que l'opération relève d'une politique de recherche, non d'une politique énergétique. À propos de cette dernière, Jean Syrota, à la tête de la DGEMP, est défavorable aux énergies nouvelles en général.

Le choix par le CNEXO, la DRGST et la Mission interministérielle de la mer de faire travailler les deux groupements en collaboration est aussi source de lenteurs : les deux groupements d'entreprises souhaitent que le projet mette en œuvre les filières dans lesquelles leurs filiales ont le plus de compétences. En effet, à part les avantages techniques invoqués pour chacune des filières, les savoir-faire respectifs des entreprises composant les deux groupements sont le motif principal de leurs choix différents. Pour ce qui concerne la CGE, elle regroupe des entreprises « historiques » de l'énergie thermique des mers, qui ont participé avec Georges Claude puis avec L'énergie des mers aux projets français. Ceux-ci étudiaient le cycle ouvert, avec l'ambition de produire de l'eau douce. Ainsi, on retrouve, comme dans les années 1930 puis les années 1940-1950, Rateau (qui travaille depuis les années 1930 sur l'extraction des gaz dissous) et Neyrpic. En outre, Alsthom possède une

expérience du dessalement de l'eau de mer dans des condenseurs à contact [108]. SPIE Batignolles et Doris disposent d'une expertise dans le domaine du pétrole *offshore*. Un autre paramètre en faveur des centrales à cycle ouvert pour la CGE pourrait être la volonté de se démarquer de la solution la plus étudiée à l'international, celle du cycle fermé, alors que, dans sa concurrence avec le même groupe Empain-Schneider pour le choix de la filière nucléaire française, la CGE apparaît alors comme « perdant » (Bouvier, 2009). Pour ce qui est d'Empain-Schneider, c'est tout l'inverse : les sociétés rassemblées au sein de ce groupe n'ont pas de compétences spécifiques sur le dessalement de l'eau dans les condenseurs à mélange, ni sur le pétrole *offshore*. Elles sont en revanche familières des centrales à terre mais aussi du circuit fermé avec les centrales thermiques « classiques » (fossiles ou nucléaires [109]) qui motive ce choix.

Du point de vue du modèle de recherche industrielle, le choix du consortium et non de la concurrence est justement l'un des points de désaccord d'EDF face au programme énergie thermique des mers porté par le CNEXO, qui a entraîné des lenteurs dans la définition de ce programme. Le directeur de la Recherche de l'AFME, Philippe Chartier, le juge *a posteriori* également inadapté (et désuet), valorisant plutôt le modèle des agences d'objectifs sans laboratoires propres tel que celui de l'AFME [110]. On peut supposer qu'au moment du programme énergie thermique des mers, ce point de vue du responsable de la Recherche à l'AFME a pu jouer en sa défaveur.

### 11.2.3 L'omniprésence des acteurs « classiques » du secteur de l'énergie

On a vu qu'EDF et la DGEMP avaient été des acteurs (plutôt entravants) du programme énergie thermique des mers. On peut également souligner la présence quasi exclusive des acteurs « classiques » de l'énergie et de leur imaginaire technicien parmi les acteurs privés de ce programme : dans le groupement Empain-Schneider, Creusot-Loire, Jeumont-Schneider (électrotechnique), STGE, Spie-Batignolles (travaux publics) ; dans le groupement CGE, Alsthom Atlantique, Rateau, Neyrtec, Sogelerg, Câbles de Lyon (élec-

108. Le groupement CGE évoque ainsi : les « tubes en titane utilisés dans les grosses unités de condensation des centrales thermiques en bord de mer (Delas-Weir - EDF) », les « tubes en cupro-nickel utilisés dans les condenseurs des usines de dessalement » et les « tubes en aluminium utilisés et expérimentés en coopération avec Pechiney pendant plusieurs années dans les stations d'essais de dessalement aux Salins-de-Giraud ».
AN 2008 0658/58, p.d., Sogreah, Rapport final d'étude de faisabilité d'une centrale ETM pour le CNEXO au nom du Groupement d'entreprises CGE, 31/01/1980.

109. Ces centrales possèdent en effet toutes un circuit « secondaire ». Notons en outre la présence d'ammoniac dans le circuit secondaire des centrales PWR de Westinghouse choisies pour le programme français, et dont Empain-Schneider avait la licence.

110. Chartier, p.d., Entretien réalisé le 16 juin 2016 au bureau du Syndicat des énergies renouvelables (Paris)

trotechnique), ACB, ETPM (travaux publics), Sea Tank (pétrole). Quelle que soit la filière choisie, la forme donnée à la centrale de Tahiti en est caractéristique :

— il s'agit d'une centrale électrique (avec ou sans sous-produits),
— les puissances envisagées sont importantes (même pour les « petites » centrales : de l'ordre du mégawatt),
— dans sa composition, elle est composée d'éléments maîtrisés par les entreprises françaises du secteur de l'énergie : chaudière (évaporateur), groupe turbo-alternateur, circuit de refroidissement, échangeurs de chaleur, plates-forme *offshore*, unités de dessalement, etc.

Cette forme de convertisseur est liée à la manière dont les ingénieurs envisagent de convertir la chaleur marine depuis Georges Claude : un ensemble de composants déjà connus dans l'industrie de l'énergie, en particulier électrotechnique (presque tous les éléments du cycle) mais aussi pétrolière (connaissance du comportement des systèmes technologiques et mer) ; et, également (ce qui est lié), à la nature de l'énergie thermique des mers, qui est propice à une telle utilisation, comme le font remarquer ceux qui prônent son utilisation depuis l'entre-deux-guerres. En effet, cette ressource est globalement constante ; il s'agit d'une différence de température « à portée » sous une forme possiblement transformable (deux volumes d'eau) en fluide moteur (la vapeur) ; elle est suffisamment importante sur un volume suffisamment faible pour ne pas nécessiter des surfaces importantes (caractère concentré). C'est sa répartition géographique (toute la zone intertropicale) qui rend envisageable un marché international avantageux pour les industriels.

Un élément remarquable est que les deux groupements mis en concurrence sont similaires à ceux du programme électronucléaire français des années 1970. En effet, après le choix par le gouvernement français, en 1969, de l'abandon de la filière Uranium naturel graphite-gaz (UNGG) mise au point par le CEA, EDF a choisi de mettre en concurrence un groupement porté par la CGE et un groupement porté par Creusot-Loire, qui détenaient chacun la licence pour une filière de deux grandes entreprises américaines (Bouvier, 2009). Ces entreprises sont sensiblement identiques à celles des groupements concurrents pour l'énergie thermique des mers [111]. Cette nouvelle concurrence des deux groupements prolonge donc la concurrence qui jouait dans le programme électronucléaire, de la même manière que certaines entreprises américaines du programme électronucléaire états-unien, dont les deux groupements possédaient la licence (General electrics et Westinghouse), s'impliquaient dans la mise en œuvre de centrales maréthermiques. On peut en déduire l'influence du programme américain, et signaler le fait que l'énergie thermique des mers est la seule des énergies nouvelles pour laquelle des groupements aussi importants du

111. Bouvier, (2009) a également montré que, malgré l'apparente « défaite » de la CGE dans cette « guerre » des filières en 1975, les deux groupements ont finalement tous deux trouvé une place dans la construction des centrales nucléaires françaises.

secteur de l'énergie se sont investis.

## 11.3 L'énergie des vagues et le LHN. Un parent pauvre de l'énergie thermique des mers pour les pays pauvres (1978-1990)

### 11.3.1 De multiples expériences sur des convertisseurs variés (CNEXO, LHN, UIE) (1978-1982)

À la fin de l'année 1978, alors que se décide un programme Énergie thermique des mers à la direction générale du CNEXO, les responsables du Centre prennent aussi en considération l'énergie des vagues. Cet intérêt soudain est, à nouveau, lié à l'activité internationale sur les technologies houlomotrices soutenue par certaines institutions publiques chargées de recherche ou d'énergie, tout particulièrement au Royaume-Uni et au Japon (et non pas, comme pour l'énergie thermique des mers, aux États-Unis). Une veille technologique suit ainsi les quatre projets anglais de construction de prototypes soutenus par le Department of energy [112], ou encore le projet Kaimei lancé par le Japan Marine science and technology center en 1976. Ce dernier est soutenu par l'Agence nationale de l'énergie à partir de 1978, et, dans ce cadre, deux campagnes d'essais sont organisées en 1979 autour de deux types de houlomoteurs [113]. Philippe Marchand, alors responsable des programmes de recherche du CNEXO, se rend aux premières conférences internationales dédiées au sujet, en 1978 et 1979 [114]. Ainsi, ce dernier décide-t-il d'ajouter l'énergie houlomotrice parmi les thèmes de recherches du CNEXO [115]. En 1979, le programme Énergies marines comprend ainsi l'énergie thermique des mers et l'énergie houlomotrice.

La première étude du CNEXO menée dans ce cadre est effectuée au début de l'an-

112. Parmi eux, le « canard » de Steven Salter, ingénieur considéré comme « pionnier » par Alain Clément, un des acteurs français étudiés dans ce chapitre. Ce type de houlomoteur aurait été le premier d'envergure à faire l'objet d'une large diffusion à l'international, comme en témoigne la publication d'un article de *Nature* à son sujet en 1974.
Clément, p.d., Entretiens réalisés les 21 octobre et 2 novembre 2015 au bureau d'Alain Clément (LHEEA).

113. Archives du CNEXO, p.d., Production d'énergie à partir de la houle, bilan provisoire après 2 ans de déroulement du programme, 03/1982.

114. Il s'agit du *First International Symposium on Wave Energy Utilization, Goteborg.*
Marchand, p.d., Entretien réalisé le 26 février 2016 au domicile de Philippe Marchand.
Clément, p.d., Entretiens réalisés les 21 octobre et 2 novembre 2015 au bureau d'Alain Clément (LHEEA).

115. Selon Philippe Marchand, cette activité internationale convainc Piketty de faire en sorte que le CNEXO ne reste pas « à la remorque » sur l'énergie houlomotrice.
Marchand, p.d., Entretien réalisé le 26 février 2016 au domicile de Philippe Marchand.

née 1979 par deux chercheurs du Centre océanologique de Bretagne, Michel Gauthier et Jacques Martinais, qui doivent déterminer les orientations d'un éventuel programme de recherches français sur l'énergie houlomotrice [116]. Les conclusions de ces chercheurs sont les suivantes :

- cette technologie n'est pas intéressante pour la France métropolitaine, en raison du programme nucléaire ;
- elle est en revanche avantageuse pour des besoins très spécifiques comme la signalisation maritime ou l'alimentation de « communautés isolées ne disposant essentiellement que du diesel-électrique pour couvrir leur besoin en électricité » et disposant d'une ressource intéressante ; c'est-à-dire, à nouveau, certaines îles intertropicales, où les vents sont réguliers et le marnage faible, dont font partie les DOM-TOM qui pourraient servir de « vitrine » ;
- la mise au point de moyens de mesure de la ressource en houle est nécessaire pour l'étude précise d'une implantation ;
- trois grands types de technologies sont envisageables : comme pour l'énergie thermique des mers, les dispositifs en mer et les dispositifs à terre, dont ces derniers présentent la plus grande « maturité technologique », mais aussi les dispositifs immergés ;
- des recherches expérimentales et théoriques doivent être dores et déjà lancées avec un « partenaire disposant de moyens d'essais sur houle et d'une équipe spécialisée dans ce type d'essais en modèles réduits ». [117]

La deuxième moitié de l'année 1979, le CNEXO met en place un programme suivant ces recommandations, à savoir la mise au point de moyens de mesure de la ressource, des expérimentations sur des houlomotrices, et des études de faisabilité pour les DOM-TOM. Sur ces territoires, sont envisagées : la production d'électricité et/ou d'eau douce et/ou le pompage de l'eau. La signalisation maritime est laissée de côté car le marché est jugé trop faible [118].

Du point de vue de la mesure de la ressource, le CNEXO envisage de jauger les caractéristiques de la houle dans les DOM-TOM, grâce à la mise au point d'une nouvelle méthode de jaugeage par des bouées enregistreuses couplées avec des satellites (système dit « Argos »). En effet, des enregistrements de la houle ont été effectués par le service des

116. Archives du CNEXO, p.d., Production d'énergie à partir de la houle, bilan provisoire après 2 ans de déroulement du programme, 03/1982.

117. Archives du CNEXO, p.d., Production d'énergie à partir de la houle, bilan provisoire après 2 ans de déroulement du programme, 03/1982.

118. Ainsi, selon Michel Gauthier, en 1981, « le marché potentiel pour ce type de houlomotrice est fort limité ; les bouées Masuda existent et coûtent relativement peu cher » ; il ne « recommand[e] pas ce créneau de développement sans l'aval d'un utilisateur potentiel important comme pour l'être le service des Phares et balises par exemple. Mais ce dernier semble miser plutôt sur des aérogénérateurs. »
AN 2008 0658/60, p.d., Michel Gauthier, Gilbert Damy, « Production d'énergie à partir de la houle », 1981.

Phares et balises pour les ouvrages en mer (signalisation, ouvrages portuaires et navires) et par le Laboratoire national d'hydraulique d'EDF (semble-t-il en premier lieu en vue de l'aménagement de l'usine marémotrice de la Rance [119]) depuis les années 1950 en différents points du littoral français. Mais ces mesures ont été effectuées en France métropolitaine et, d'après Michel Gauthier et Gilbert Damy, elles sont difficilement transposables aux DOM-TOM pour des raisons « logistiques » [120] que permet d'éviter le couplage de bouées à des satellites. Elles ne concernent que des points très proches du rivage, alors que la houle montre des caractéristiques très différentes au large, où il est également envisagé d'installer des houlomoteurs [121]. Enfin, ces mesures ont essentiellement rendu compte des hauteurs de houle, alors que l'utilisation de l'énergie de la houle nécessite une connaissance plus fine du phénomène (« spectre directionnel » notamment) [122]. C'est pourquoi les responsables du programme houle décident d'expérimenter des bouées houlographes dans l'océan atlantique avant de les implanter dans les DOM-TOM. Dix bouées « Spear » (« SPectre de l'État de mer Argos ») couplées à des satellites sont donc expérimentées par le Centre océanologique de Bretagne au large, dans l'Océan atlantique, d'octobre 1980 à décembre 1981 [123].

Par ailleurs, deux programmes de mise au point théorique et expérimentale de houlomoteurs sont effectués sous l'égide du CNEXO : l'un, mené par l'Union industrielle et d'entreprises, filiale de la Compagnie française des pétroles (CFP) spécialisée dans le montage de plateformes *offshore* ; l'autre, par le Laboratoire d'hydrodynamique navale (LHN) de l'École nationale supérieure de marine (ENSM) de Nantes, qui travaille en outre sur

119. Les données fournies par EDF concernent des mesures par un appareils mis au point par J. Valembois, ingénieur au Laboratoire national d'hydraulique, qui mentionne comme premier lieu de mesures l'estuaire de la Rance (J. Valembois, 1949). Cet ingénieur a également travaillé sur la modélisation du phénomène de marées.
Les mesures d'EDF ont été effectuées entre 1953 et 1982 à l'aide de 46 de ces « houlographes ».
AN 2008 0658/60, p.d., EDF, Direction des études et recherches, « Analyse statistique de mesures de houle en différents sites du littoral français », 1981.

120. Selon un rapport du CNEXO de 1982, « les sites correspondant au créneau d'application défini [...] n'offrent en général qu'un faible soutien logistique ».
Archives du CNEXO, p.d., Production d'énergie à partir de la houle, bilan provisoire après 2 ans de déroulement du programme, 03/1982.

121. Ainsi, le système Argos « permettra d'étudier des sites situés dans la zone des alizés où la houle est longue et presque constante et qui sont donc *a priori* privilégiées vis-à-vis de cette source d'énergie ».
AN 2008 0658/60, p.d., COB, Gilbert Damy et Michel Gauthier, « production d'énergie à partir de la houle », 1981.

122. AN 2008 0658/60, p.d., COB, Gilbert Damy et Michel Gauthier, « production d'énergie à partir de la houle », 1981.
Archives du CNEXO, p.d., Production d'énergie à partir de la houle, bilan provisoire après 2 ans de déroulement du programme, 03/1982.

123. AN 2008 0658/61, p.d., Michel Ollitrault, « Évaluation de la ressource énergétique des vagues sur la façade atlantique française », 20/04/1982.
À noter que, comme cela avait été le cas pour certaines stations de jaugeage de l'énergie éolienne, notamment en Outre-mer, dans les années 1940-1950, un problème de personnel est relevé par le responsable des équipes chargées d'installer et de surveiller le bon fonctionnement des bouées.
AN 2008 0658/61, p.d., Jean-Michel de Coudeville, Lettre à Philippe Marchand, 13/10/1980.

la mise au point d'outils de modélisation informatique. Ils doivent permettre d'identifier les types de convertisseurs les plus intéressants pour l'usage envisagé. Ils bénéficient également des travaux d'hydrodynamique effectués dans les bassins d'essais de laboratoires nationaux (en particulier : EDF et Sogreah) depuis les décennies d'après-guerre [124] afin d'évaluer l'influence de la houle sur les objets solides en milieu maritime : ouvrages portuaires, navires, mais aussi plate-formes pétrolières, et installations marémotrices [125].

À la fin des années 1970, aucun type de houlomoteurs n'est communément privilégié par rapport à un autre dans le monde : on constate une remarquable indécision de la part des acteurs de ces programmes, malgré les quelques expérimentations qui ont été effectuées sur différentes machines depuis les années 1910 (pour les acteurs français : Bouchaud-Praceiq dans les années 1910 : cf 3.2 ; Coyne, Richard, Fusenot, Grasset dans les années 1920-1930 : cf 6.4 ; SMEHV et Laboratoire national d'hydraulique dans les années 1940 : cf 9.2.2.4). Aussi, est-il amusant de constater la similitude de la situation dans laquelle se trouvent les chercheurs du CNEXO en 1979 avec celle des experts de la Commission de la houille bleue dans l'entre-deux-guerres, face au choix des meilleurs procédés d'exploitation de la houle : constat d'un nombre incalculable de brevets dans le monde (plusieurs centaines comptabilisés dans les années 1920 par les acteurs de la houille bleue ; plus de mille selon le CNEXO sur cinquante ans en 1981 [126]), difficulté à les classifier à cause des multiples formes que leurs donnent les inventeurs (localisation de l'installation : à terre, sur/dans l'eau ; nature du fluide moteur : eau, air, huile, etc [127]). Cependant, les chercheurs du CNEXO choisissent d'orienter les recherches françaises selon trois directions regroupant les procédés les plus expérimentés dans le monde, selon la classification suivante :

— « les dispositifs à colonne d'eau oscillante ;

124. En 1956, selon H. Gridel, ingénieur-chercheur et directeur adjoint du Laboratoire national d'hydraulique de Chatou (EDF), la modélisation du phénomène de la houle en bassins dans les laboratoires français date d'environ vingt-cinq ans (donc, des années 1930) mais elle n'est devenue « systématique » que « depuis quelques années » (Gridel, 1956).

125. En 1956, aux Journées nationales d'hydraulique organisées par la Société hydrotechnique de France, une des huit sections concerne ainsi les essais sur modèles de l'énergie mécanique de la houle. Neuf communications sont effectuées à ce sujet, selon trois thématiques : mesure de la houle et considération sur les similitudes dans la modélisation ; effet de la houle sur les ouvrages ; influence de la houle sur le fonctionnement des turbo-générateurs d'usines marémotrices ; action de la houle sur les rivages en plages de sable. Ces communications émanent majoritairement d'ingénieurs et/ou chercheurs des laboratoires d'hydraulique de la Sogreah (Grenoble) et d'EDF (Chatou) (Les intervenants de cette section sont : H. Gridel : EDF (DER, Laboratoire d'hydraulique de Chatou) ; Clovis Marcou et L. Santon : Laboratoire d'hydraulique de l'ENS de Grenoble ; J. Kravtchenko ; Jean Valembois : EDF (Laboratoire d'hydraulique de Chatou) ; G. Schaer : ; B. Le Méhauté : Sogreah (Laboratoire dauphinois d'hydraulique) ; R. Robert, J.-P. Duport et B. Favez : Sogreah (Laboratoire dauphinois d'hydraulique) ; J. Pirhes Castanho ; R. Pelnard-Condidère) Gridel, 1956.

126. AN 2008 0658/60, p.d., COB, Gilbert Damy et Michel Gauthier, « Production d'énergie à partir de la houle », 1981.

127. Types de classifications identifiés par Gilbert Damy et Michel Gauthier.
AN 2008 0658/60, p.d., COB, Gilbert Damy et Michel Gauthier, « production d'énergie à partir de la houle », 1981.

— les « redresseurs » qui transforment les vagues en un écoulement d'eau unidirectionnel ;
— les dispositifs mécaniques. » [128]

Les dispositifs à colonne d'eau oscillante sont constitués d'une ou plusieurs cavités ouvertes sur la mer à leur extrémité inférieure : sous l'effet de la houle, « l'eau à l'intérieur de la cavité se met à osciller selon sa période propre » et fonctionne comme un piston. Ce mouvement de piston peut être directement utilisé pour actionner une turbine hydraulique, il peut aussi comprimer de l'air qui actionne une turbine à air, il peut enfin élever de l'eau utilisée ensuite dans une turbine hydraulique.
Les dispositifs redresseurs « transform[e]nt le mouvement alternatif des vagues en un écoulement unidirectionnel », grâce à des structures faisant converger ce mouvement, tels que des tunnels convergents (cas des « dièdres à houle » de Fusenot et de la SOMEMA ; bélier du Minou) ou des plans inclinés sur lesquels déferlent les vagues ; ces structures « permett[e]nt le transfert de masses d'eau dans des bassins d'accumulation surélevés par rapport au niveau moyen de la mer », l'eau étant ensuite turbinée.
Les dispositifs mécaniques se composent de parties mobiles actionnées par les vagues par rapport à un point fixe : flotteur jouant le rôle de piston d'une pompe (ondo-pompe de Jules Richard), radeaux, batteurs, etc ; l'énergie récupérée pouvant servir à élever de l'eau dans un réservoir ou encore à produire directement de l'électricité [129] .

Les études de l'ENSM sont effectués entre fin 1979 et début 1982. Cinq dispositifs sont expérimentés sur maquettes dans des bassins : deux variantes d'un système hydropneumatique classifiés par le CNEXO parmi les types à « colonne d'eau oscillante », les plus étudiés dans le monde ; trois dispositifs « redresseurs » utilisant le déferlement des vagues sur un plan incliné . Pour le premier type de procédé, le principe est le même que celui du prototype de station flottante du programme japonais Kaimei, dont l'Union industrielle et d'entreprises propose des perfectionnements (ces nouvelles versions sont appelées « Whep ») [130]. Il est le suivant : des cavités cylindriques flottantes aspirent, à chaque oscillation de l'eau due à la houle, l'air atmosphérique, qui est envoyé à travers des clapets dans des turbines. Dans le système Whep, un réservoir d'air tampon est placé entre les cylindres et les turbines. Deux dispositions sont expérimentées : une « batterie » de huit cylindres placés à l'extérieur d'une plate-forme flottante, et une autre de trois cylindres selon les mêmes dispositions (Figures 11.3 et 11.4 [131]).

128. AN 2008 0658/60, p.d., COB, Gilbert Damy et Michel Gauthier, « production d'énergie à partir de la houle », 1981.
129. AN 2008 0658/60, p.d., COB, Gilbert Damy et Michel Gauthier, « Production d'énergie à partir de la houle », 1981.
130. AN 2008 0658/59, p.d., Union industrielle et d'entreprises, « Estimation de différents systèmes de houlomoteurs. Rapport de fin de contrat », vers 1982.
131. AN 2008 0658/59, p.d., Union industrielle et d'entreprises, « Estimation de différents systèmes de houlomoteurs. Rapport de fin de contrat », vers 1982.

Pour le deuxième type de procédés, il s'agit à chaque fois de faire déferler des vagues sur un plan incliné : la première disposition actionne directement une turbine grâce à l'eau déferlante ; la seconde accumule l'eau dans un réservoir avant de la turbiner ; la troisième est identique, mais sur support flottant.

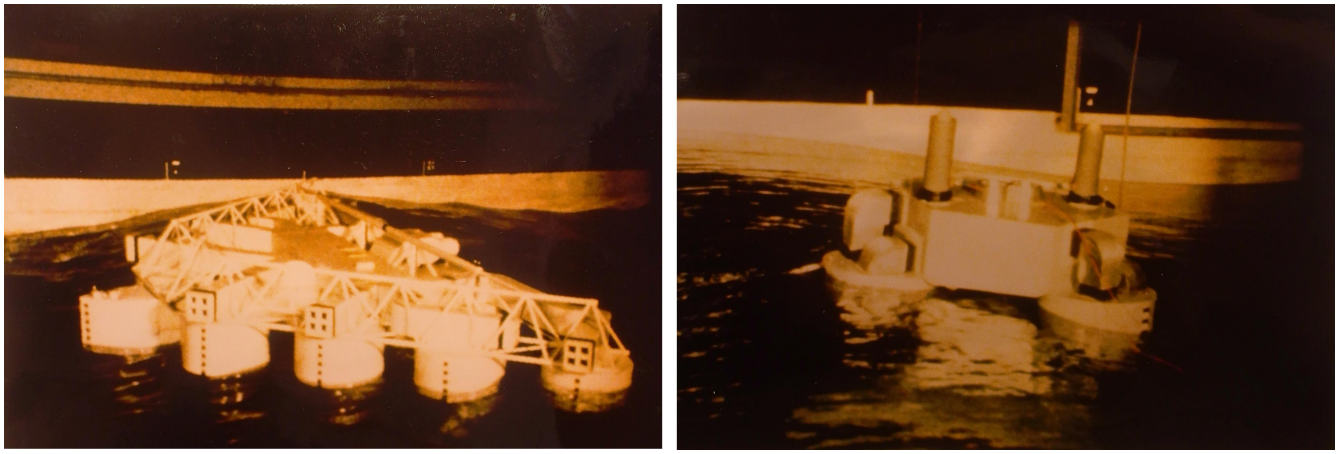


FIGURE 11.3 – Maquettes de plate-formes houlomotrices Whep expérimentées par l'Union industrielle et d'entreprises avec l'aide du CNEXO (modèle à huit cylindres et modèle à trois cylindres) (1980-1982)

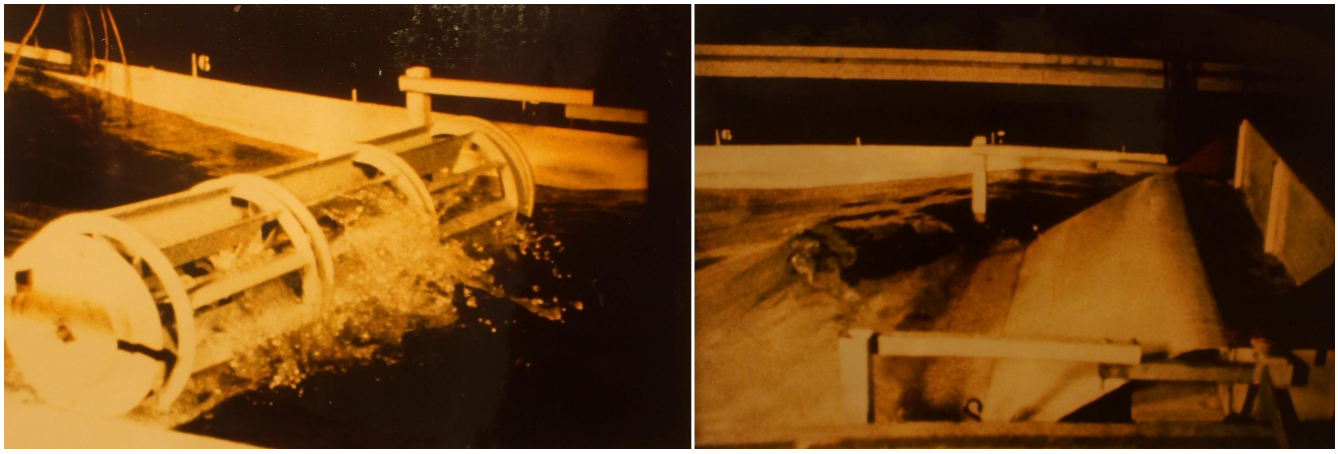


FIGURE 11.4 – Maquettes de systèmes à déferlement expérimentés par l'Union industrielle et d'entreprises avec l'aide du CNEXO (modèle à roues à aubes et modèle à bassin accumulateur) (1980-1982)

L'Union industrielle et d'entreprises construit à sa charge les maquettes, et les trois séries d'essais sont financés par le CNEXO. La première série d'essais, pour laquelle le CNEXO obtient un financement de la Direction de l'Innovation et de la technologie (ministère de l'Industrie), est effectuée par des ingénieurs de la Marine au Bassin des carènes du Service technique des constructions navales. L'ENSM en conclut que le procédé le plus intéressant est le système à déferlement sur support flottant. La deuxième et la troisième série d'essais sont donc effectuées uniquement sur ce type de système, au LHN. En mars 1982, les derniers essais sur une structure flottante, munie d'un réservoir central, sont

encore en cours de dépouillement [132]. Comme le reste des études en collaboration entre le CNEXO et le LHN, ces travaux ne connaissent pas de suites.

À partir de 1980, le CNEXO signe plusieurs contrats avec le LHN, qui détient non seulement des savoir-faire et moyens théoriques et expérimentaux, mais s'est aussi spécialisé dans la modélisation informatique des objets flottants soumis à la houle (historiquement, des navires). Les chercheurs du LHN disposent ainsi d'un bassin d'expérimentation capable de simuler la houle et de prendre des mesures sur les objets flottants, comme un petit nombre d'autres laboratoires français [133], mais ils ont également développé, sous l'impulsion de Pierre Guével, des logiciels permettant de prévoir les mouvements d'un navire soumis à l'action des vagues [134]. Ainsi, le CNEXO charge le LHN du « développement (ou plus exactement [de] l'adaptation) et [du] rodage de modèles numériques permettant de prévoir les performances sur houle régulière de houlomotrices utilisant des corps flottants ou submergés », par allers-retours entre modélisation et expérimentation [135]. Par ailleurs, le LHN est chargé d'expérimenter un « houlomoteur immergé linéaire » [136] en bassin de houle, et conclut à la difficulté de construire ce type de machines qui « ferait probablement appel à des mécaniques lourdes et complexes » [137].

Des expériences sur les systèmes à déferlement sont également effectuées, dans le cadre d'un doctorat en cotutelle avec l'Université d'Athènes [138]. Cette thèse contient une étude de faisabilité de centrale houlomotrice en Nouvelle-Calédonie. Entre 1980 et 1983, Michaël Spiridakis, diplômé en génie portuaire, effectue, avec son co-encadrant Alain Clément, une étude technico-économique de deux procédés du type « déferlant » : les « rampes

132. Archives du CNEXO, p.d., Production d'énergie à partir de la houle, bilan provisoire après 2 ans de déroulement du programme, 03/1982.

133. Le COB du CNEXO (Plouzané) et le Service technique des constructions navales (Paris), mais aussi, probablement, le Laboratoire d'hydraulique de France (Grenoble), le Laboratoire national d'hydraulique (EDF, Chatou), la Sogreah (Grenoble), qui sont mentionnés dans une synthèse de 1992 sur les moyens d'essais français en hydrodynamique (Couchouron, 1992) et devaient déjà posséder ces intallations dans les années 1980.

134. Alain Clément effectue ainsi sa thèse sous la direction de Pierre Guével entre 1976 et 1979 sur la mise au point d'un tel logiciel, puis est recruté comme ingénieur de recherche au LHN.
Clément, p.d., Entretiens réalisés les 21 octobre et 2 novembre 2015 au bureau d'Alain Clément (LHEEA).

135. Le coût de cette étude est de 109 000 F.
Archives du CNEXO, p.d., Production d'énergie à partir de la houle, bilan provisoire après 2 ans de déroulement du programme, 03/1982.

136. Il s'agit d'un « catamaran propulsé par une aile immergée »

137. Le coût de cette expérience est de 50 000 F.
Archives du CNEXO, p.d., Production d'énergie à partir de la houle, bilan provisoire après 2 ans de déroulement du programme, 03/1982.

138. Selon Alain Clément, c'est l'Université d'Athènes qui finance ce doctorat. Le CNEXO a aussi probablement contribué au financement de cette thèse : un contrat entre le LHN et le CNEXO d'un coût de 250 000 F pour l'année 1982, et prenant en compte des expérimentations sur des systèmes à déferlement tels que celles qu'a effectuées Spiridakis, est mentionné dans un rapport du CNEXO.
Archives du CNEXO, p.d., Production d'énergie à partir de la houle, bilan provisoire après 2 ans de déroulement du programme, 03/1982.

de déferlement » fixes et les « trièdres à houle » (SPIRIDAKIS, 1983). Les premiers sont basés sur le même principe que le système expérimenté pour l'ENSM, avec réservoir, et le second est identique au premier, avec l'ajout de « dièdres à houle » à l'entrée de la rampe de déferlement. Ces dispositifs font converger et amplifient le mouvement des vagues incidentes, sur le même principe que les procédés Fusenot dans l'entre-deux-guerres puis SOMEMA dans les années 1940.

Spiridakis expérimente des maquettes de ces deux systèmes, et applique les résultats (rendement, dimensionnement, coût) à deux avant-projets de « mini-centrales » : d'abord, à Tahiti, en même temps que la (lente) élaboration du projet de centrale maréthermique par le CNEXO et [139]. Finalement, probablement à cause du choix du CNEXO de privilégier l'énergie thermique des mers pour Tahiti, mais probablement aussi du programme photovoltaïque déjà en cours en Polynésie, c'est à l'île de Maré, en Nouvelle-Calédonie, que Spiridakis applique l'étude de faisabilité concluant sa thèse. Selon Alain Clément, « c'est typiquement un territoire où l'énergie des vagues est naturellement l'énergie renouvelable qu'il faudrait utiliser », pour les mêmes raisons couramment invoquées pour justifier de l'intérêt des énergies nouvelles « décentralisées » dans les DOM-TOM et en particulier dans les petites îles : coût du pétrole, absence (et pas de possibilité) de grand réseau électrique, ressource intéressante. Alain Clément souligne également la situation politique de la Nouvelle-Calédonie, en insurrection contre le gouvernement français précisément au moment de la formulation du projet, et il est difficile de ne pas faire le parallèle entre l'action du CEA pour le photovoltaïque en Polynésie et ce choix de la Nouvelle-Calédonie. Spiridakis utilise les données récoltées par le chercheur du CNEXO de Brest Gilbert Damy, qui se rend sur le site pour une mission de reconnaissance en 1983. Cette étude conclut à l'intérêt et à la faisabilité d'une centrale de type « trièdre à houle » d'une puissance de 750 à 1 000 kilowatts pour la production d'électricité : « le prix de revient du kWh obtenu en considérant toujours les valeurs les plus pessimistes des différents paramètres (rendements, taux d'actualisation, etc) reste très compétitif par rapport à d'autres types de production de l'électricité en site isolé » (SPIRIDAKIS, 1983).

À l'issue de ces études, les ingénieurs du CNEXO n'adoptent pas une position tranchée sur les meilleurs types de houlomoteurs, même s'ils se prononcent sur le caractère rapidement pratique et opérationnel des machines à déferlement. Piketty et Marchand décident même le lancement d'un « concours houle » en janvier 1981, afin d'expérimenter en bassin de carène un dispositif qui« se dégage par rapport aux autres » et puisse franchir rapidement le stade de l'étude de faisabilité [140]. Le gagnant du concours est « L & H », qui obtient ainsi des financements pour des essais en bassin de houle. Par ailleurs, la

139. Il rédige à ce sujet un « rapport de stage » que je n'ai pas eu entre les mains : probablement a-t-il pu bénéficier d'une campagne de prospection du site pour le projet énergie thermique des mers.
140. MARCHAND, p.d., Entretien réalisé le 26 février 2016 au domicile de Philippe Marchand.

possibilité de produire directement de l'eau douce par osmose inverse est étudiée.

Quoi qu'il en soit, il n'y a pas de traces de travaux sur l'énergie de la houle postérieurs à 1983 au CNEXO, et il semble que la thèse de Spiridakis soit le point final du programme houle. Cet arrêt des études sur la houle coïncide avec un désintérêt mondial pour le sujet, et, pour le cas de la France, avec la baisse drastique du programme Énergies marines. Alain Clément évoque aussi le départ en 1982 dans le secteur privé de Pierre Guével, qui avait impulsé les études sur la houle au LHN. Ce départ a pu contribuer à l'arrêt du programme houle [141]. Celui-ci précède donc le contre-choc pétrolier.

### 11.3.2 Le parent pauvre de l'énergie thermique des mers

Dès le départ, et ce sera le cas jusqu'à l'abandon de cette ligne de recherche, les convertisseurs houlomoteurs sont considérées par les acteurs à la tête du CNEXO comme des technologies secondaires, et ne présentant pas des possibilités technico-économiques sérieuses. Il semble bien que ce soit la seule activité des institutions étrangères, et la nécessité ressentie d'un positionnement français sur cette thématique, qui aient motivé Marchand et Piketty à l'inscrire dans les programmes du Centre. En témoigne, *a posteriori*, la manière dont Marchand parle de cette technologie aujourd'hui : selon cet acteur, la houle est, de façon inhérente, une ressource moins intéressante que l'énergie thermique des mers : intermittente, dispersée, et, de plus, au stade de l'étude de faisabilité depuis les années 1970. Comme beaucoup, Marchand souligne qu'il faut, paradoxalement, réussir à obtenir un système robuste par gros temps et capable de transformer une puissance éparse. Il présente volontiers le concours CNEXO-ANVAR comme un amusement et les convertisseurs présentés comme des « gadgets » [142].

Ainsi, l'énergie thermique des mers, projet phare de recherche technologique au CNEXO, prend toute la place au sein du programme Énergies marines. En témoignent le nombre et le type d'acteurs de chacun des projets (quelques entreprises et équipes universitaires contre deux consortiums d'acteurs dominants de l'énergie associés à plusieurs universités), les moyens techniques (d'un côté, quelques maquettes expérimentées en bassins, de l'autre, éléments entiers d'une usine de taille importante), financiers [143], institutionnels

141. Clément, p.d., Entretiens réalisés les 21 octobre et 2 novembre 2015 au bureau d'Alain Clément (LHEEA).

142. Marchand, p.d., Entretien réalisé le 26 février 2016 au domicile de Philippe Marchand.
Clément, p.d., Entretiens réalisés les 21 octobre et 2 novembre 2015 au bureau d'Alain Clément (LHEEA).

143. Le programme houle a mobilisé environ 650 000 F pour les études en lien avec le LHN. Comme c'est le cas de la majorité des études du CNEXO sur la houle (exceptées certaines études faites au COB notamment), cet ordre de grandeur doit être celui du budget total du programme houle. La phase II du programme énergie thermique des mers a coûté 3 989 000 F au CNEXO et 2 659 226 F aux industriels.
Archives du CNEXO, p.d., Production d'énergie à partir de la houle, bilan provisoire après 2 ans de

(mise en concurrence et financement de deux consortiums de gros industriels de l'énergie VS concours) mis en place, sérieux accordé aux études. Le nombre de rapports rendus pour l'un et pour l'autre des sujets est aussi caractéristique de ce déséquilibre : plus de deux cents pour l'énergie thermique des mers, tout au plus une dizaine pour la houle (avec, tout de même, une thèse, mais financée en grande partie par l'Université d'Athènes d'après Alain Clément).

Cette hiérarchie entre les deux sources d'énergie doit beaucoup à l'imaginaire technicien des ingénieurs et scientifiques des années 1970-1980, qui, appliqué à l'énergie de la houle, se raccroche difficilement au système énergétique en place. Celui-ci est dominé par l'image de la centrale électrique, et plus précisément au sein de cette centrale, de la turbine actionnée par l'eau ou la vapeur. Pour les vagues, le passage par ce type de convertisseur est moins évident que pour l'énergie thermique des mers (chaleur portée par de l'eau, transformable en vapeur sous basse pression) ou les marées (grandes masses d'eau en mouvement régulier et prévisible, capturables en grandes quantités dans des barrages). Ainsi, la nature de ce phénomène, mais aussi l'absence historique de son usage en tant que source d'énergie (sauf exceptions) [144] explique le très grand nombre de procédés envisagés encore au tournant des années 1980. Comme le font remarquer les techniciens qui cherchent à les exploiter depuis des décennies, les vagues (ou la houle) présentent une énergie sous forme très variable et diffuse, à la manière du vent. Une comparaison « physique » entre les densités énergétiques de quatre énergies nouvelles (vent, houle, courants et micro-hydraulique) est effectuée par Gilbert Damy et Michel Gauthier, et justifie l'intérêt du CNEXO pour cette source d'énergie par la plus grande densité de la houle par rapport au vent (Figure 11.5). Mais la houle n'a jamais été exploitée comme l'a été le vent *via* toutes les formes d'aéromoteurs qu'ont connus les différentes civilisations, et des décennies de recherches ponctuelles n'ont rien changé à cet état de fait.

Dans la variété des houlomoteurs proposés, on retrouve ainsi l'imaginaire des inventeurs qui cherchent à exploiter les énergies renouvelables depuis la fin du XIX^e^ siècle. Tous les moyens, et toutes les combinaisons, sont encore bons pour concentrer, stocker, transporter à distance, l'énergie contenue dans le mouvement de la houle : dièdres à houle, canaux convergents, bassins d'accumulation, réservoirs d'air comprimé, batteries électriques, production sur place de la matière finale (eau douce), etc. Si l'électricité est un vecteur privilégié, il n'est pas exclusif — et, à nouveau, l'espace « vierge » de réseau électrique qui existe encore dans certains DOM-TOM et pays du Sud sont de bon terrains pour

déroulement du programme, 03/1982.
AN2000 0404/6, p.d., G. Martinot,« Note à l'attention de Monsieur Farge », 16/02/1984.
144. À ma connaissance, la pompe de Jules Richard au Musée océanographique de Monaco a effectivement fonctionné pendant plusieurs années de la décennie 1930 pour l'alimentation d'un aquarium.
146. AN 2008 0658/60, p.d., COB, Gilbert Damy et Michel Gauthier, « Production d'énergie à partir de la houle », 1981.

| | Densité de puissance kW/M$^2$ |
|---|---|
| Eolienne | |
| vent de 10 N | 0,046 |
| 20 N | 0,37 |
| 30 N | 1,27 |
| 40 N | 2,96 |
| Houlomotrice Mer levée par | |
| vent de 10 N | 0,08 |
| 20 N | 0,65 |
| 30 N | 2,2 |
| 40 N | 5,2 |
| Hydraulienne courant 5 N | 4,6 |
| Microcentrale 2m de chute | 125 |

FIGURE 11.5 – Comparaison de la densité énergétique du vent, de la houle, des courants et de la micro-hydraulique (en kW/m$^2$) [146]

l'implantation de ces machines. En comparaison, pour l'énergie thermique des mers, il n'est pas envisagé de l'exploiter autrement que par un groupe turbo-alternateur à vapeur, similaire à celui des centrales thermiques « classiques », et selon le principe proposé par Georges Claude dans les années 1920 — « énergie thermique des mers » renvoie d'ailleurs tout autant au procédé d'exploitation qu'à la chaleur contenue dans les océans.

## 11.4 Synthèse Chapitre 11

Dans son ensemble, le programme Énergies marines a été impulsé par des recherches à l'étranger et la volonté d'institutions françaises (CNEXO, industriels) de participer à cette compétition internationale et de prendre une place dans un marché dans les pays du Sud. La métropole n'est pas la cible de ce programme : l'électricité nucléaire occupe déjà le terrain. Ceci explique que l'énergie marémotrice n'ait pas été étudiée dans le cadre de ce programme, malgré quelques études ponctuelles sur l'impact environnemental (jugé rédhibitoire) des centrales marémotrices de grande puissance, et une étude économico-sociologique sur les « micro-centrales marémotrices » destinées à l'export, qui n'a donné aucune suite.

L'objectif énergétique est secondaire pour les porteurs de ces projets. Mis à part EdT et le Territoire de Polynésie pour ce qui concerne l'énergie thermique des mers, acteurs non moteurs de ces projets, aucun de ces acteurs n'a pour motivation première l'approvisionnement en énergie. Les îles du Pacifique, où les ressources (en énergie thermique des mers ou en houle) sont intéressantes, sont une bonne opportunité pour le développement industriel désiré : les Territoires cherchent à approvisionner ces îles en énergie, électrique quand cela est possible. La configuration (géographique et démographique) de ces îles est souvent plus propice aux productions « décentralisées », ce qui en fait aussi un terrain d'applications favorable à de petites centrales, plus faciles à construire que des centrales puissantes en raison de leur caractère novateur.

Le programme Énergies marines s'ajoute au programme « énergies nouvelles » lancé, au même moment, par le CEA et le ministère de l'Industrie en Polynésie. Il semble que ces deux programmes soient restés parallèles. Le choix du développement de l'énergie photovoltaïque décrit par Akrich, (1988) a probablement eu une influence sur les débouchés possibles des centrales houlomotrices : elles en sont un concurrent « direct », en tant que moyens « décentralisés » de produire de l'énergie, d'où le déplacement de l'étude de cas de Spiridakis de Tahiti à la Nouvelle-Calédonie. Pour les centrales maréthermiques, l'influence du programme « énergies nouvelles » est moins évidente.

En tout cas, aucun des deux convertisseurs ne s'est implanté dans ces territoires. La difficulté à faire converger l'intérêt des différents acteurs et le manque de soutien d'EDF ont joué autant voire davantage pour le cas de l'énergie thermique des mers que le contre-choc pétrolier. Pour les houlomotrices, même le stade d'avant-projet n'a pas été atteint, et il ressort que les responsables des programmes du CNEXO n'ont jamais vraiment considéré que cela puisse être un jour le cas. C'est comme s'ils avaient étudié cette source d'énergie « pour la forme », car le CNEXO ne pouvait pas ne pas participer à la dynamique internationale sur cette thématique.

La comparaison de ces deux sources d'énergie au sein du programme Énergies marines est l'occasion de montrer l'inertie du système énergétique et son influence sur la mise en place de nouveaux convertisseurs et l'utilisation de nouvelles sources d'énergie. On constate ainsi de grandes différences de moyens pour l'exploitation des deux sources d'énergie : financiers, industriels, techniques, liés aux acteurs des projets, à leurs savoir-faire, à leur imaginaire, et à la nature des sources d'énergie. Pour l'énergie thermique des mers, on constate la présence de grandes entreprises de l'énergie, configurées de la même manière (dans des consortiums concurrents) que pour le programme nucléaire. Les raisons en sont historiques (pour beaucoup, ces entreprises ont déjà travaillé sur le sujet auparavant), physiques et techniques (il est facilement envisageable d'exploiter cette source d'énergie de la même manière que les sources classiques d'énergie dans des centrales ther-

miques). Ainsi, dans un sens, ces entreprises sont plus naturellement enclines à rechercher des moyens d'exploiter une source d'énergie qu'on peut exploiter de la même manière que les autres. Dans l'autre, ils n'envisagent de l'exploiter que de cette manière, et celle-ci est restée presque inchangée depuis les années 1920. Pour l'énergie houlomotrice, très différente des sources classiques d'énergie et encore jamais exploitée pour une production quelconque, ces entreprises sont quasi-absentes (excepté une poignée d'entreprises pétrolières), et les inventeurs laissent encore libre cours à leur imagination pour l'asservir. Ceci explique la multiplicité des dispositions envisagées et l'indécision vis-à-vis de la meilleure d'entre elles. L'imaginaire technicien du système thermo-industriel est cependant toujours présent : cette ressource, préalablement jaugée avec la seule unité de mesure utilisée pour l'ensemble de l'énergie, doit être emmagasinée, régularisée, transportée.

# Conclusion Partie 4

**Acteurs. L'intrusion des militants** L'affirmation d'un mouvement d'opposition à la société industrielle, et le choc pétrolier, amènent de nouveau types d'acteurs et un regain d'intérêt pour les énergies nouvelles dans les années 1970-1980 : les militants anti-nucléaires qui politisent les énergies nouvelles en en faisant un élément essentiel de société alternative, et les institutions spécifiquement dédiées aux énergies nouvelles, qui les dépolitisent en retour, en en faisant, à l'image de l'environnement, un objet consensuel.

À ce titre, c'est un panel large de sources d'énergie et de convertisseurs qui font l'objet de recherches au sein de ces nouvelles institutions : les énergies solaire (en premier lieu), éolienne, géothermique, de la biomasse, maréthermique, micro-hydraulique, houlomotrice, pour des machines allant des convertisseurs directs et de petites puissances (type chauffe-eau solaire ou éolienne de pompage) aux centrales électriques de grande puissance. Alors que, pendant la période précédente, les recherches sur ces sources d'énergie étaient menées par des institutions diverses et ne traitant pas forcément exclusivement d'énergie (EDF : marées et vent (centrales électriques) ; Société L'énergie des mers : énergie thermique des mers ; laboratoires CNRS et université : fours solaires ; etc), les énergies nouvelles sont donc progressivement regroupées au sein d'institutions spécifiques, allant des premiers Comités techniques à la seule AFME, qui regroupe toutes les énergies nouvelles sauf les énergies marines, prérogative du CNEXO.

En tous cas, l'intérêt international pour les énergies nouvelles et le premier choc pétrolier, mènent à l'implication d'acteurs du même type que lors des périodes précédentes, qui répondent aux velléités d'approvisionnement national, mais aussi de prestige et de commerce internationaux. Certains acteurs déjà présents tentent ainsi d'affirmer leur place dans ce mouvement d'effervescence (CNRS, CEA, Sofretes...), d'autres reviennent à la charge alors qu'ils avaient abandonné le sujet (industriels de l'électricité : Neyrpic, Alsthom, Rateau, etc.), d'autre enfin s'impliquent dans ces recherches pour la première fois (pétroliers : Total, Shell (géothermie), Sea Tank (énergie thermique des mers *offshore*)). Le cas d'EDF est particulier : pour des raisons d'image, les dirigeants de l'entreprise publique décident de la faire participer (de manière contre-productive selon certains auteurs) à quelques recherches sur l'énergie solaire et, en très moindre mesure, éolienne (aérogé-

nérateur d'Ouessant), et pour des raisons d'approvisionnement en énergie des territories d'Outre-mer, à la construction d'une centrale géothermique à Bouillante. Mais l'entreprise empêche, directement ou indirectement, le développement de centrales électriques puissantes pour le réseau français.

Enfin, la politique nationale de « décentralisation », répondant à une demande sociale, entraîne la création des AFME régionales. Si celles-ci mènent une politique d'équipement en énergies nouvelles en partenariat avec les Régions, leur cadre d'action (entreprises mobilisées, types de convertisseurs) reste strictement défini au niveau national, ce qui relativise l'aspect décentralisé de l'action de l'AFME.

Au cours des années 1980, le contre-choc pétrolier, la formidable ascension de la production nucléaire, la neutralisation des militants anti-nucléaire et un gouvernement défavorable à la maîtrise de l'énergie ont pour effet de stopper les politiques publiques en faveur des énergies nouvelles, qui se retrouvent cantonnées à quelques recherches en faveur de petits convertisseurs destinés à l'export. L'affaiblissement de l'AFME et la limitation de son activité énergies nouvelles à de la recherche pour l'export en sont caractéristiques. Les industriels se désinvestissent à nouveau après l'abandon de plusieurs grands projets : centrale solaire Themis, centrale maréthermique de Tahiti, éolienne d'Ouessant. Seuls restent en activité ceux qui ont une activité exportatrice, tels qu'Aerowatt et Photowatt.

**Réalisations. La France verte, jaune et orange** À nouveau, en fonction des enjeux, ce ne sont pas les mêmes sources d'énergie ni les mêmes types de convertisseurs qui sont étudiés, et les réalisations sont, comme lors des décennies précédentes, de deux types, celles qui concernent des applications métropolitaines, et celles qui concernent l'étranger, notamment les pays « en voie de développement ».

Les enjeux de politique énergétique métropolitaine et de gouvernement de la critique s'entremêlent. Les mouvements militants sont en effet moteurs de la création de ces nouvelles institutions nationales, tout comme le premier choc pétrolier. Les militants promeuvent l'utilisation locale de petits convertisseurs et une gestion décentralisée (cf troisième partie de cette conclusion) ; les usages de la chaleur dans les secteurs résidentiels et tertiaires, postes importants de consommation nationale, sont possibles avec ces convertisseurs. Ces facteurs, ainsi que le programme nucléaire mené par EDF qui exclut toute autre solution pour l'approvisionnement électrique national, ont pour effet d'inverser la politique métropolitaine des énergies nouvelles des années 1970-1980 par rapport aux décennies précédentes : alors qu'il n'était question que d'approvisionner le réseau électrique métropolitain par de grandes centrales (marémotrices, éolienne), ces deux types de convertisseurs sont exclus des possibilités d'équipement pour la France, et seules les installations de petites et moyennes puissances, convertissant directement de la chaleur (solaire, géo-

thermique, issue de la biomasse), essentiellement pour des usages résidentiels et tertiaires, connaissent des applications. Ces énergies nouvelles sont mesurées et la cartographie des énergies nouvelles de la France change de couleur : de bleue et azur [147] elle devient orange, verte et jaune.

Les actions menées dans ce sens ont été les suivantes [148] : communication, incitations financières et recherches sur l'amélioration des matériels. Ces mesures ont mené à l'équipement de dizaines de milliers d'installations solaires thermiques et géothermiques, essentiellement dans les secteurs résidentiel et tertiaire, dont les productions sont prises en comptes dans les bilans énergétiques officiels. On peut noter le caractère marginal de la quantité d'énergie produite, même au sein des usages considérés, par ces convertisseurs. Pour la majorité d'entre eux, il semble qu'ils ne connaissent pas de pérennité, et que la majorité des installations avariées soient progressivement remplacées. Pour la biomasse, une augmentation des équipements en chaudières utilisant le bois et les différents résidus combustibles est observée, sans qu'il soit possible de dire dans quelle mesure les nouvelles institutions ont pesé dans ce sens. En ce qui concerne la micro-hydraulique, quelques installations sont effectuées mais des difficultés juridiques, des oppositions locales puis le succès du programme nucléaire en ont empêché un emploi conséquent. La mise au point d'éoliennes est restée au stade de recherches : l'aérogénérateur de moyenne puissance testé à Ouessant est endommagé et les recherches sur l'éolien abandonnées par EDF en 1980 de même que, probablement, les recherches à l'ONERA et au CSTB sur la ressource éolienne et l'amélioration des appareils, dans les années 1980. Si le service des Phares et balises continue d'acheter des éoliennes à Aérowatt, il semble que ce soit, en métropole, la seule utilisation continue des convertisseurs mis en place à cette période.

Pour ce qui concerne l'activité exportatrice (et l'utilisation des DOM-TOM comme vitrine), les projets de centrales solaires (qui mènent à la mise en place d'un prototype à Targassonne et d'une centrale à Vignola) et maréthermique (qui s'arrête à la définition d'un avant-projet à Tahiti) sont abandonnés dans les années 1980 pour des raisons qui tiennent en partie à la conjoncture économique mondiale. Sont aussi en cause des lenteurs et des réticences dans la mise en place des projets, qui résultent d'incertitudes de la part de certains protagonistes sur l'intérêt et/ou la forme des projets. Seule, la centrale géothermique de Bouillante est toujours en activité. Pour les convertisseurs de petites puissances, produisant ou non de l'électricité, à partir des énergies solaire, éolienne et de la biomasse, pour les pays du Sud, ils ont connu un large développement pendant la

147. Azur était le qualificatif de houille donné au vent pendant l'entre-deux-guerres. Je ne lui ai pas trouvé de couleur pendant les années (1940-1970) !

148. Comme je n'ai pris en compte les mouvements militants que comme moteurs de la création des ces nouvelles institutions nationales, je n'ai pas étudié ce qu'ils ont mis en place en dehors de ces institutions. Il y a certainement eu, à leur initiative, des installations solaires et éoliennes, et peut-être microhydrauliques qui n'entrent pas dans le cadre de cette thèse.

période. Je n'ai pas d'éléments sur leur pérennité. Toujours est-t-il que certains d'entre eux (éoliennes, panneaux photovoltaïques) sont les seuls à être toujours commercialisés après les contre chocs pétroliers. Quant à l'énergie de la houle, elle est restée dans les laboratoires de recherche en hydraulique, et n'a pas été prise au sérieux par les responsables du programme énergies marine eux-mêmes.

**Imaginaire et système techniques. *Small is beautiful*. Mais les énergéticiens et leurs gros réseau sont déjà là** L'imaginaire technicien, et plus particulièrement la hiérarchie des couples machine-énergie, est modifiée par la pensée des militants écologistes. Ceux-ci valorisent en effet les convertisseurs simples, de petite puissance, et l'utilisation locale de l'énergie (au sens de proximité entre source primaire et utilisation finale). Aussi, les énergies nouvelles sont-elles valorisées pour leurs qualités propres, car, outre l'aspect écologique qui est associé à leur utilisation, leurs caractéristiques physiques poussent à une conversion de ce type, elle-même nécessaire au contre-projet politique porté par ces acteurs. Les politiques publiques des énergies nouvelles en Métropole intègrent cette nouvelle valeur en favorisant la mise en place des convertisseurs géothermique, solaire et de biomasse, de petites et moyennes puissances.

Cependant, l'histoire des énergies nouvelles dans les années 1970-1980 permet de montrer l'inertie du système énergétique au sens large, qui tient autant à l'infrastructure de production et de transport déjà en place qu'aux acteurs associés, avec leur histoire et leur imaginaire. L'exemple du programme Énergies marines du CNEXO en est une belle illustration : considérant deux types de sources d'énergie, pour lesquels aucun convertisseur (réel) n'existe encore, les acteurs de ce programme sont unanimes sur un type de convertisseur pour l'une des sources d'énergie (énergie thermique des mers), et en imaginent de très différents pour l'autre (houle). D'importants moyens sont mis pour l'un, de bien plus faibles pour l'autre. Cela tient à la nature des sources d'énergie considérées et aux acteurs mobilisés : ainsi, l'énergie thermique des mers, déjà étudiée par certains industriels puissants lors des décennies précédentes, se prête à une utilisation de type centrale thermique, technique que maîtrisent ces acteurs. Ceux-ci sont sollicités pour la mise en place du programme, car ils disposent d'importantes capacités techniques et financières. De l'autre côté, la houle échappe plus facilement à l'imaginaire de l'ingénieur, qui souhaite capturer de grandes quantités d'énergie pour pouvoir en disposer à volonté. Aucune grande entreprise (française) n'a formulé de projet conséquent pour exploiter cette ressource. Les promoteurs de cette source d'énergie ont du mal à la raccrocher au système énergétique en place — et imaginent plus volontiers, de ce fait, une utilisation dans des pays exotiques.

# Conclusion générale

Cette thèse a étudié des projets de convertisseurs innovants exploitant les énergies renouvelables par le prisme du couple acteurs/convertisseurs. Cette approche permet d'examiner leur articulation avec le système technique dans ses dimensions matérielles (infrastructures et caractéristiques géographiques), politiques (acteurs, organisation), économiques (coût de l'énergie), sociales (utilisation de l'énergie finale, présence et type d'acteurs sur le lieu d'implantation du convertisseur). Pour chaque projet, un ensemble d'acteurs conçoit ou promeut l'utilisation d'un convertisseur, qu'il envisage d'intégrer dans un système technique existant ou à créer, énergétique ou non, et sous-système du système technique. L'ensemble d'acteurs agit selon ses intérêts et ses valeurs, et possède des connaissances scientifiques et techniques, elles-mêmes liées au système technique. La forme que les acteurs du projet donnent au convertisseur cristallise cette relation qu'ils nouent avec le système technique et révèle leur imaginaire technicien. La périodisation que j'ai proposée résulte de l'analyse de la transformation du couple acteurs/convertisseurs au cours de la période (1880-1990) en France.

Dans cette conclusion, je donne d'abord une lecture globale de l'histoire des énergies renouvelables en France sur la période (1880-1990) par le prisme acteurs/convertisseurs innovants et mets en évidence l'apport de cette lecture en histoire de l'énergie. Je présente ensuite deux autres approches qui permettent d'affiner cette lecture globale. J'expose d'abord une lecture selon la même méthode que pour cette approche globale mais l'applique à chacune des énergies renouvelables. Elle montre que cette périodisation est elle-même la synthèse d'une superposition de périodisations, un « tuilage ». Elle met aussi en évidence que le système énergétique n'exerce pas la même influence sur les projets en fonction des sources d'énergie et met en évidence l'importance de leur matérialité, mais aussi de celle des territoires en tant que réalité géographique (au sens large d'ensemble social, politique, environnemental, matériel) et que construction sociale. Je propose ensuite une classification des couples acteurs/convertisseurs en trois catégories, selon leur degré de permanence historique. Elle donne des éléments de compréhension à l'impression de récurrences et de résurgences que peut laisser à voir l'histoire des énergies renouvelables, et m'amène à des remarques et des interrogations épistémologiques sur l'identité des objets techniques dont on fait l'histoire, et sur l'utilisation de la mémoire dans les projets techniques.

# Une lecture globale

Quatre grandes périodes ont été identifiées. La Table 11.6 en résume les éléments caractéristiques : acteurs/institutions, sources d'énergie étudiées, spécificités associées, convertisseurs innovants imaginés. J'ai ajouté au couple acteurs/convertisseurs les sources d'énergie dont les acteurs imaginent l'utilisation et les caractéristiques qu'ils leur associent. Ces caractéristiques révèlent la valeur que les acteurs accordent aux énergies renouvelables en fonction des périodes et sont un élément de leur imaginaire technicien.

Le nombre de projets croît globalement, au rythme d'une soif d'énergie de plus en plus grande. Les contextes énergétiques et coloniaux, dans leurs dimensions techniques, économiques et politiques, sont déterminants pour chaque rupture. Ainsi, la périodisation suit les grandes scansions de l'histoire de l'énergie et de l'histoire coloniale françaises : les années 1880 sont des années d'expansion coloniale et de construction du système électrique ; l'entre-deux-guerres voit la mise en place d'une politique nationale de l'énergie hydraulique et d'une politique de mise en valeur des colonies ; les années (1940-1970) sont des décennies de prise en main de tout le secteur de l'énergie par l'État et de décolonisations ; les années (1970-1990) sont celles du choc et du contre-choc pétrolier, ainsi que de contestations politiques contre le système énergétique. Ceci mène aux deux résultats historiographiques suivants : le premier est une grande inertie exercée par le système énergétique thermo-industriel sur les projets de convertisseurs innovants exploitant les énergies renouvelables. Le second est l'importance des territoires dans ces projets, en tant que réalité géographique et qu'espace appréhendé par un ensemble d'acteurs.

Au premier résultat, un premier élément d'analyse est que l'histoire racontée dans cette thèse est celle de tentatives pour asservir les énergies renouvelables et les assimiler aux énergies de la civilisation thermo-industrielle. En ce sens, les énergies renouvelables sont restées marginales, et la majorité des ces projets de convertisseurs innovants n'a pas abouti, car, pour beaucoup d'entre eux, la nature des énergies renouvelables les a défavorisés par rapport aux convertisseurs concurrents du système énergétique classique, par essence adaptés au système technique de la civilisation thermo-industrielle. Le second constat met en évidence que les conditions géographiques déterminent les ressources exploitables, la possibilité technique de leur conversion et les débouchés envisageables de

| Acteurs/ Institutions | Sources d'énergie étudiées | Caractéristiques associées | Convertisseurs innovants imaginés |
|---|---|---|---|
| 1880-1918 : Les forces naturelles, sources de nouvelles conquêtes par les inventeurs pour la nation | | | |
| **Des initiatives éparses d'inventeurs**<br>Cercles scientifiques et industriels<br>Inventeurs<br>Constructeurs de moulins à vent | **Forces naturelles :**<br>Vent<br>Marées<br>Soleil<br>Vagues<br>Gradients de temp. | Abondantes<br>Gratuites<br>Illimitées<br>Dispersée<br>Intermittentes | Aéromoteurs divers : « américains », éoliennes, panémones...<br>Centrales marémotrices<br>Moteurs solaires<br>Machines houlomotrices |
| 1919-1939 : « Arc-en-ciel des houilles » et politique énergétique nationale | | | |
| **Institutions publiques nationales**<br>Min. des Travaux public,des Colonies, gouvernements généraux Af. du Nord ; ONRSI<br>**Entreprises**<br>Grandes entreprises électrotechnique, industriels divers<br>Nouvelles petites entreprises, constructeurs (moulins à vent)<br>**Inventeurs**<br>**Laboratoires publics, centres de recherches…** | **Forces naturelles :**<br>Marées<br>Vagues<br>Vent<br>ETM<br>Soleil<br>Géothermie | Abondantes<br>Gratuites<br>Illimitées<br>Dispersées<br>Intermittentes<br>Nationales | Centrales marémotrices<br>Centrales maréthermiques<br>Aéromoteurs, aérogénérateurs<br>Chauffe-eau, distillateurs, moteurs, centrales solaires |
| 1940-1970 : Les énergies naturelles pour la modernisation et le rayonnement de la France | | | |
| **Institutions publiques nationales**<br>Min. des Col/d'Outre-mer, de l'Ind., Serv. des Phares & balises ;Territoires Af du Nord<br>CNRS, Instituts et laboratoires<br>**Entreprises**<br>EDF, Grandes entreprises électrotechnique, Soc. d'économie mixte, Constr. aéromoteurs<br>**Institutions internationales**<br>UNESCO, OECE, COMPLES | **Énergies naturelles :**<br>Marées<br>Vent<br>Soleil<br>ETM<br>Vagues<br>Géothermie | Abondantes<br>Gratuites<br>Illimitées<br>Dispersées<br>Intermittentes<br>Nationales | Centrales marémotrices<br>Centrales maréthermiques<br>Centrales géothermiques<br>Aérogénérateurs petits, moyens, grands<br>Centrales thermo-solaires<br>Chauffe-eau, distillateurs, pompes, maisons solaires |
| 1970-1990 : Les « énergies nouvelles » face à la crise économique et culturelle | | | |
| **Nouvelles institutions publiques dédiées aux « énergies nouvelles »**<br>Délégation aux énergies nouvelles, COMES, Comité géothermie puis AFME<br>**« Société civile »**<br>Associations écologistes, syndicats<br>**Institutions publiques nationales**<br>Ministères Environnement, Coopération, Industrie, DOM-TOM<br>DGRST<br>**Instituts de recherche spécialisés :** BRGM, CNEXO, CEA, INRA, CNRS, CNES<br>**Entreprises/industriels**<br>Nouvelles entreprises : solaire, géothermie ; Pétroliers, nucléaire, électrotechnique<br>**Institutions internationales**<br>Union européenne | **Énergies nouvelles :**<br>Soleil<br>Géothermie<br>Biomasse<br>ETM<br>Vagues<br>Vent<br>Marées | Abondantes<br>Gratuites<br>Illimitées<br>Dispersées<br>Intermittentes<br>Nationales<br>Décentralisées<br>Propres | Centrales solaires thermodynamiques, photovoltaïques<br>Chauffe-eau, pompes, distillateurs solaires<br>Centrales éoliennes<br>Centrales géothermiques<br>Chauffage géothermique<br>Centrales maréthermiques<br>Centrales houlomotrices<br>Micro-centrales hydrauliques et marémotrices<br>Panneauxphotovoltaïques<br>Petites éoliennes électriques<br>Machines houlo-motrices |

FIGURE 11.6 – Analyse de la période selon quatre caractéristiques : acteurs/institutions, sources d'énergie étudiées, spécificités associées et convertisseurs innovants imaginés)

l'énergie utile, autant en tant que réalité matérielle qu'en tant que construction sociale.

Afin d'affiner cette lecture globale, qui lisse nécessairement la particularité de chaque projet et simplifie l'ensemble des déterminants qui l'entourent, je propose maintenant de revenir sur l'analyse du couple acteurs/convertisseurs, appliquée non pas à l'ensemble des énergies renouvelables, mais à chacune d'entre elles. Cette lecture par source d'énergie permet d'examiner plus finement l'évolution du couple acteurs/convertisseurs que dans le tableau de la Figure 11.6. Elle présente un double intérêt. Premièrement, elle permet d'abord de relativiser la périodisation globale proposée dans cette première partie de conclusion, et montre que le découpage chronologique de cette thèse est un « tuilage », une superposition de périodisations qui trouvent des croisements. L'idée de tuilage revient à Paul Naegel, qui souligne ainsi que les ruptures chronologiques ne sont jamais nettes en histoire. Elles relèvent de constructions à partir des multiples périodisations que l'historien peut associer à un objet en fonction des éclairages qu'il lui donne. Deuxièmement,

cette lecture permet de montrer la plus ou moins grande inertie exercée par le système énergétique en fonction des sources d'énergie.

# Une lecture par sources d'énergie. Tuilages et inertie du système énergétique

s cas étudiés dans cette thèse, il résulte que le type d'acteurs impliqués et la forme des convertisseurs dépendent des quatre facteurs suivants : nature et répartition de la source d'énergie, situation du système énergétique (infrastructures matérielles, économie des ressources et acteurs : organisation, connaissances, intérêts et expérience, individuelle ou collective), populations en présence au niveau des territoires d'implantation. Pour chacune des énergies renouvelables (marées, vagues/houle, vent, soleil, énergie thermique des mers, géothermie, biomasse), l'examen des quatre éléments suivants : types d'acteurs et de convertisseurs, territoires d'implantation et réalisations, met en évidence deux séries d'éléments frappantes.

Premièrement, cet ensemble suit des évolutions différentes en fonction des sources d'énergie, et les scansions globales identifiées dans cette thèse ne se traduisent pas de la même façon pour chacune d'entre elle. Elles dessinent un tuilage de périodisations. Deuxièmement, le nombre et le type d'acteurs, de convertisseurs et de réalisations est très différent en fonction des sources d'énergie. Cela met en lumière l'influence variable du système énergétique en fonction des sources d'énergie sur les projets de convertisseurs innovants. De manière globale, trois grands cas de figure apparaissent :

— Le premier concerne l'énergie thermique des mers et les marées. Ces sources d'énergie s'inscrivent dans le système énergétique. Le nombre d'acteurs et de types de convertisseurs reste réduit, et le type d'acteurs et de convertisseurs reste semblable. Ce sont aussi les sources d'énergie pour lesquelles il y a eu le moins de réalisations.
— Le deuxième cas de figure concerne la géothermie et la biomasse qui, avec un nombre réduit d'acteurs et de types de convertisseurs, ont vu, pour des raisons différentes, de nombreuses installations opérationnelles dans les années 1970-1980.
— Le troisième cas de figure est inverse au premier et concerne le soleil, le vent et les vagues. Les convertisseurs de ces sources d'énergie peinent à s'inscrire dans

le système énergétique. Ils ont connu une grande variété d'acteurs, de types de convertisseurs et des réalisations plus nombreuses.

Dans la suite de cette conclusion, les trois grands types d'ensembles acteurs/convertisseurs sont présentés successivement. Pour chacune des sources d'énergie, les écarts par rapport à la périodisation globale sont explicités, ainsi que l'articulation des projets avec le système énergétique.

Les tables 11.7, 11.9, 11.10, 11.11 et 11.8 synthétisent, pour chaque type de source d'énergie, les types d'acteurs et de convertisseurs, territoires d'implantation ainsi que des réalisations. Elles précisent ainsi :

— le type d'acteurs,
— le type de convertisseurs (à tous les stades de l'innovation), c'est-à-dire les éléments significatifs de la chaîne de conversion : premier sous-convertisseur de la chaîne de conversion, conversion directe/indirecte, type de conversion indirecte le cas échéant,
— le type d'usage et de territoire d'application, deux éléments très liés. Ils mettent en évidence l'importance du contexte géographique des projets, et donnent des éléments d'explication sur la forme des convertisseurs et sur leur variété,
— enfin, les réalisations : lorsqu'une machine a été construite et opérationnelle. Sont alors alors indiqués sa puissance, le nombre de modèles en usage et la durée d'utilisation. Cette information montre l'ancrage des projets dans la réalité sociale et matérielle de chaque période. Elle met en lumière les décalages entre les discours et les pratiques, ainsi que certains facteurs déterminant l'existence de ces projets et l'aboutissement ou au contraire l'arrêt du processus d'innovation.

## Marées et énergie thermique des mers. Des convertisseurs inscrits dans le système énergétique. Peu de réalisations

Pour les marées et l'énergie thermique des mers, les types d'acteurs, de convertisseurs et d'usages imaginés présentent une certaine permanence. À chaque période, l'inscription de ces sources d'énergie dans le système énergétique se renforce.

Pour ces deux sources d'énergie, des acteurs du système électrique s'impliquent dans des projets à partir de l'entre-deux-guerres et sont présents directement ou indirectement jusqu'aux années 1980. Ils pensent les convertisseurs marémoteurs comme des centrales hydrauliques avec bassin accumulateur produisant de l'électricité pour le réseau, et les convertisseurs maréthermiques comme des centrales thermiques fonctionnant selon

| Marées | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Période | [1880-1918] | [1919-1939] | [1940-1960’] | [1970-1990] |
| Acteurs | Inventeurs<br>Cercles scientifiques & industriels | Inventeurs, cercles scientif. et ind.<br>Min. Travaux publics (C. Houille bleue)<br>Entreprises (nouvelles)<br>Entreprises élec | Min Ind<br>COEE– EDF<br>Entreprises élec | CNEXO |
| Type convertisseur | Centrale hydro : bassin + turbine hydro + élec réseau<br>Ou<br>Convertisseur divers + air compr.<br>Ou<br>Convertisseurs divers + ut° directe | Centrale hydro :<br>Bassin + turbine<br>+<br>Élec (réseau) | | Micro-centrale hydro :<br>Bassin + turbine<br>+ élec « décentralisée » |
| Usage | Indus. (élec/force mot.) | Tous usages élec | | |
| Territoire | Zones littorales France | Nord-Ouest France | | DOM-TOM/Pays Sud |
| Réalisations | | | Usine marémotrice Rance<br>(240 MW, St-Malo, 1966 – ajd’h) | |

| Énergie thermique des mers | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Période | [1880-1918] | [1919-1939] | [1940-1960’] | [1970-1990] |
| Acteurs | | Inventeurs (G. Claude), Cercles scientifiques et ind.<br>Industriels énergie | Min Colonies puis Outre-mer<br>ORSC, CNRS. Univ Dakar<br>Industriels énergie, EDF | DGRST, CNEXO<br>Industriels énergie<br>Nouvelles entreprises |
| Type | | Centrale thermique : conversion thermodynamique (cycle basse pression)<br>+ Prod. élec + ut° directe ou injection réseau<br>Avec/sans eau douce | | |
| Usage | | Tous usages élec, eau douce, eau froide | | |
| Territoire | | DOM-TOM/Pays Sud | | |
| Réalisations | | | | |

FIGURE 11.7 – Marées et énergie thermique des mers. Types d’acteurs et de convertisseurs, territoires d’implantation et réalisations (1880-1990)

un cycle thermodynamique à basse pression, avec production d’électricité et d’éventuels sous-produits (eau douce, eau froide). Cela est dû à la nature de ces sources, auxquelles s’applique plus facilement l’imaginaire technicien de la société thermo-industrielle. L’une se présente sous forme de force mécanique et est portée par de grandes masses d’eau, régulières, facilement accumulables ; l’autre est constante et se présente sous forme de chaleur également portée par de grandes masses d’eau, facilement vaporisables dans une chaudière. Ces deux sources d’énergie présentent en outre une répartition géographique en harmonie avec les intérêts de ces acteurs et les infrastructures présentes sur les territoires d’implantation (alimentation du réseau national pour les marées, mise en valeur de ressources coloniales/vaste marché international pour l’énergie thermique des mers). Les porteurs de projets d’usines marémotrices souhaitent ainsi les inclure au réseau électrique, par complémentarité avec d’autres centrales électriques auxquelles ils les assimilent. Les porteurs de projets d’usines maréthermiques imaginent l’implantation dans une vaste zone intertropicales de centrales, où soit elles créent de toutes pièces un un complexe techno-industriel, soit elles s’incluent dans un réseau électrique et un système technique déjà existants.

En tant que convertisseurs homogènes aux centrales électriques classiques, ces centrales sont des objets pensés et étudiés par des acteurs puissants (techniquement, financièrement et politiquement) proches du secteur de l'énergie, qui seuls peuvent porter de tels projets. Pour les mêmes raisons, ils sont vulnérables à la concurrence des autres convertisseurs du système électrique. Ainsi, les convertisseurs marémoteurs et maréthermiques sont-ils ceux qui ont donné le moins de réalisations. Une centrale marémotrice a été construite et mise en service en cent ans d'inventions et cinquante ans d'expérimentations : l'usine de la Rance, seul convertisseur de cette thèse encore en usage, fournit toujours chaque jour aux consommateurs français son contingent de kilowattheures. En soixante ans d'inventions et d'expérimentations pour l'énergie thermique des mers, aucune usine maréthermique n'a été construite. L'histoire des projets de centrales marémotrices et maréthermiques suit de près l'histoire des énergies classiques. Chacune des grandes ruptures de l'histoire des énergies classiques engendre l'apparition et la disparition des projets. Une conjoncture économique favorisant des sources d'énergie plus conformes au système énergétique thermo-industriel, a systématiquement raison de ces projets de centrales maréthermiques et marémotrices. Comme ressortis des tiroirs et dépoussiérés, ceux-ci resurgissent à chaque fois avec une figure similaire (des industriels du secteurs de l'énergie portent des projets de centrales puissantes avec l'appui de l'État).

Deux éléments distinguent significativement les marées et l'énergie thermique des mers et leurs couples acteurs/convertisseurs. D'abord, le paramètre historique, ou plus précisément l'expérience (collective et mémorielle) de leur exploitation. Comme l'énergie des rivières et cours d'eau, comme le vent, les marées ont déjà été utilisées *via* des roues hydrauliques et des bassins accumulateurs. Ceci explique que, alors que les usines maréthermiques sont inventées par Claude et Boucherot dans l'entre-deux-guerres, les usines marémotrice apparaissent dès les années 1880 dans les discours des inventeurs. Elles prennent alors déjà la forme de centrales avec bassins accumulateurs pour la production d'électricité reliée à un réseau, même si, plus rares, certains inventeurs proposent d'autres formes de convertisseurs.

Ensuite, leurs ancrages territoriaux sont très différents et suivent des évolutions distinctes. Jusqu'aux années 1970, le territoire d'application des usines marémotrices est le littoral métropolitain, mais sur une zone de plus en plus restreinte au fur et à mesure de la construction du réseau électrique : de tout le littoral avant la première guerre mondiale, au Nord-Ouest pour la période 1919-1966, jusqu'à disparaître totalement du territoire métropolitain et être exclues du territoire français. Dans les années 1970, EDF se désintéresse des marées, et le CNEXO parle encore de convertisseurs de marées, mais il s'agit de micro-centrales marémotrices, et elles sont destinées à des pays étrangers. En termes politiques, cela traduit la construction d'une organisation nationale du secteur électrique et une monopolisation de la ressource par un ensemble restreint d'acteurs, les marées étant

reconnues comme ressources énergétiques et propriété de l'État en 1919.
Pour l'énergie thermique des mers, le territoire d'application est vaste et indéterminé (la zone intertropicale), de même que les usages et débouchés (glace pour le commerce international ou la consommation domestique, eau douce pour l'industrie/l'agriculture/la consommation domestique, eau froide pour la climatisation, etc.), même si la production de grandes puissances électriques en fait toujours partie. Ce déracinement des usines maréthermiques leur donne un aspect utopique, au sens premier du terme, de centrales sans lieu. En termes politiques, les projets d'usines maréthermiques sont très largement impactés par l'histoire coloniale, qui s'ajoute, pour ces convertisseurs, à l'histoire des sources d'énergie classiques. Les enjeux de l'énergie thermique des mers passent ainsi de la mise en valeur des colonies et de la perspective d'un marché international (entre-deux-guerres) à la seule perspective du marché international (années 1970-1980) : les territoires (géographiques au sens strict) restent les mêmes, mais ils sont politiquement différents.

## Géothermie et biomasse. Des convertisseurs inscrits dans le système énergétique. De nombreuses réalisations

Les cas de la géothermie et de la biomasse se rapprochent du cas de l'énergie thermique des mers et des marées. En effet, elles sont prises en main par un nombre restreint d'acteurs, appartenant au secteur de l'énergie, et les convertisseurs en projet sont de types bien définis. Elles répondent toutes deux à un enjeu énergétique, en termes économiques et politiques. Mais elles arrivent plus tardivement dans l'histoire ici racontée (période (1950-1990) pour la géothermie, période (1970-1990) pour la biomasse), et elles donnent rapidement lieu à l'installation de multiples convertisseurs.

La géothermie a donné lieu à des projets de convertisseurs de deux grands types très précis : les centrales géothermiques, sur le modèle des centrales thermiques ; et le chauffage résidentiel et tertiaire, sous forme de chaudières collectives. Elles prennent comme source primaire de l'eau chaude ou de la vapeur du sous-sol. La géothermie délivre en effet une puissance constante et se présente sous forme de chaleur, parfois portée par de l'eau. Ces qualités la rapprochent des sources d'énergie du système thermo-industriel. L'utilisation de la géothermie est évoquée dans certaines revues scientifiques et techniques françaises depuis la fin du XIX$^{e}$ siècle, mais il s'agit de projets étrangers jusqu'aux années 1950. Georges Claude, dépossédé de son projet de centrale maréthermique que porte désormais la société L'énergie des mers, propose alors la construction d'une centrale selon le même principe. La filiation entre cette centrale géothermique et les centrales maréthermiques, et plus globalement les centrales thermiques, est alors évidente. Mais ce projet reste théorique. Dans les années 1970, des acteurs du secteur énergétique mettent en ser-

| Géothermie | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Période | [1880-1918] | [1919-1939] | [1940-1960'] | [1970-1990] |
| Acteurs | | | G. Claude | Min Ind, BRGM, AEE, DEN, AFME Ind. én, EDF, nvelles entrep. |
| Type | | | Centrale thermique : conversion thermodynamique + élec (réseau) | Ut° directe (doublets ) Ou Centrale therm. + réseau élec |
| Usage | | | Tous usages élec | Chauffage résidentiel/tertiaire Tous usages élec |
| Territoire | | | France métrop. | France métrop. : chauffage DOM-TOM : centrales |
| Réalisations | | | | France : 10000<<20000 logts Guadeloupe : une centrale |

| Biomasse (bois) | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Période | [1880-1918] | [1919-1939] | [1940-1960'] | [1970-1990] |
| Acteurs | | | | Min Ind , Recherche, Équipement AEE, DEN, AFME ;INRA Constructeurs chaudières |
| Type | | | | Utilisation directe (chaudières) |
| Usage | | | | Chauffage résidentiel/tertiaire |
| Territoire | | | | France métropolitaine |
| Réalisations | | | | France : 10000<<20000 logts |

FIGURE 11.8 – Géothermie. Types d'acteurs et de convertisseurs, territoires d'implantation et réalisations (1880-1990)

vice les premiers convertisseurs opérationnels : conformément au schéma adopté par les acteurs de la politique des énergies nouvelles, une centrale est construite non en métropole, mais dans les DOM-TOM (à Bouillante), par des acteurs du secteur électrique, dont EDF ; et des chaudières collectives alimentent des bâtiments résidentiels et tertiaires, sans passage par l'électricité, en métropole. Le ministère de l'Industrie, le BRGM, des entreprises pétrolières et de chauffage décident et organisent la mise en place des installations. Elles représentent un apport énergétique mais non électrique en métropole, et un moyen d'augmenter le bilan national en énergies nouvelles dans une période de contestations anti-nucléaire. La géothermie rentre dans le code minier et devient une ressource énergétique du domaine de l'État, ce qui n'était alors que le cas des marées.

Le cas de la biomasse est très particulier. Dans les années 1970-1980, son utilisation constitue en effet une innovation toute relative, mais proclamée par les acteurs des énergies nouvelles, ce qui m'a amenée à traiter ce sujet. La biomasse est alors rangée parmi les « énergies solaires » et « renouvelables », et l'AFME organise la rationalisation de la ressource et l'amélioration des chaudières. Par l'effet du choc pétrolier, et probablement en partie par l'action de l'AFME, le nombre de ménages équipés en chaudières à bois

connaît une augmentation sur l'ensemble de la période. La biomasse constitue ainsi à la fois un enjeu économique et politique pour les acteurs du secteur énergétique. C'est un moyen pour l'AFME d'afficher l'efficacité de son action, et pour EDF et ses partenaires industriels d'atténuer les oppositions au programme nucléaire.

## Houle, vent et soleil. Une variété d'acteurs, de convertisseurs, d'usages et de territoires. De nombreuses réalisations

Pour la houle, le vent et le soleil, un siècle de discours, d'inventions et de réalisations montre une grande diversité dans les convertisseurs, les acteurs, les usages et les territoires (cf Tables 11.9, 11.10, 11.11). L'imaginaire technicien peine à les raccrocher au système énergétique.

| **Houle/vagues** | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Période | [1880-1918] | [1919-1939] | [1940-1960'] | [1970-1990] |
| Acteurs | Inventeurs<br>Cercles scientifiques & industriels | Inventeurs, cercles scientif. et ind.<br>Min. T. publics (C. Houille bleue)<br>Entrep. (nouvelles);Labo (Monaco) | Entreprise : SMEHV<br>Laboratoire : Sogreah | CNEXO, LHN |
| Type convertisseur | Houlomoteurs variés<br>+<br>Élec (accus/réseau)<br>ou<br>Air compr.<br>ou<br>Ut° directe | | Centrale hydro :<br>Houlomoteurs variés<br>+<br>Élec (réseau) | Centrale hydro :<br>Houlomoteurs variés<br>+<br>Élec (réseau)<br>Ou<br>Ut° directe force mot. |
| Usage | Indus. (élec/force mot.)<br>Domestique (lumière, force mot.) | | Tous usages élec | Tous usages élec<br>Pompage |
| Territoire | Zones littorales France | | Maroc | DOM-TOM/Pays Sud |
| Réalisations | Houlomoteur Bouchaud-Praceiq<br>( ?? kW, Embouchure Gironde, ca. 1910-1921) | Ondo-pompe Cattaneo (1<<10 kW, Monaco, 1930-ca. 1940) | | |

FIGURE 11.9 – Vagues/houle. Types d'acteurs et de convertisseurs, territoires d'implantation et réalisations (1880-1990)

Contrairement au cas des marées et de l'énergie thermique des mers, l'imaginaire tech-

| Vent | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Période | [1880-1918] | [1919-1939] | [1940-1960'] | [1970-1990] |
| Acteurs | Inventeurs<br>Cercles scientifiques et industriels<br>Constructeurs aéromoteurs | Inventeurs, Cercles scientifiques et ind.<br>Constructeurs aéromoteurs<br>ONRSI<br>Industriels énergie : CEM<br>Labos publics : Eiffel, Saint-Cyr | Min Ind, min Col. puis Outre-mer<br>COEE-- EDF<br>EGA, EEM<br>Services colon° et hydro (Algérie)<br>Entreprises élec<br>ORSC<br>ONG | DEN, COMES, AFME<br>Industriels énergie<br>Nouvelles entreprises<br>EDF<br>Labos publics : CSTB, ONERA |
| Type | Aéromoteur divers (américains, panémones, éoliennes, turbines...)<br>+<br>Élec :<br>Accus/Réseau<br><br>ou<br>Air compr.imé<br><br>ou<br>Ut° directe | Aéromoteurs divers (aérodynamique* ou non)<br>+<br>Élec :<br>Réseau/accu<br><br>ou<br>Ut° directe<br><br>* Conçu à partir de théories de l'aérodynamique | | Aéromoteur aérodynamique<br>(« éolienne »)<br>+<br>Prod élec « décentralisée » |
| Usage | Industriel (électricité/force motrice)<br>Domestique (électricité, force motrice)<br>Agricole (pompage, force motrice)<br>Navigation maritime (Propulsion, lumière : phares et balises) | | | Tous usages élec |
| Territoire | France, colonies | France : réseau électrique<br><br>Campagnes françaises, colonies : élec accumulateurs/pompage | France : réseau élec/phares et balises<br>DOM-TOM : électricité réseau/accumulateurs/pompage | Phares et balises/DOM-TOM/îles/pays du Sud |
| Réalisations (France & colonies) | Milliers d'aéromoteurs pour le pompage (0.1<<10kW, campagnes françaises + colonies)<br><br>Moulin à vent élec. duc de Feltre (1<<10 kW, Phare de la Hève, 1889) | Aéromoteurs pompage & élec (0.1<<10 kW, campagnes françaises + colonies)<br><br>Bateaux éoliens<br>- Joëssel (X 1), 1<<10 kW, Nantes, 1922,<br>- Constantin (X 1), 1<<10,kW, Saint-Cloud, 1923<br><br>Aérogénérateurs :<br>- Constantin (X 1), ~10 kW, Corbières, 1926<br>- Darrieus-CEM (X 3), 2<<15 kW, Le Bourget, 1927-1930 | ~70 pompes éol. (~10 kW, Hts-plateaux oranais, 1952-19 ??)<br><br>Centaine d'aérogénérateurs B.E.S.T. (1<<10 kW , phares et balises, 1946 - ajd'h)<br><br>Aérogénérateurs réseau :<br>- EDF/Neyrpic :150 kW, 1962-66 ; 1 MW, 1963-64, St-Rémy-des-Landes)<br>- EDF/B.E.S.T (630 kW, 1958-63, Nogent-le-Roi),<br>- EGA/Enfield-Andreau (100 kW, Algérie, 1957)<br>- EEM/Lykkegaard (13 kW, Maroc, 1949-52) | Aérogénérateurs (phares et balises, - ajd'h)<br><br>Aérogénérateur EDF (100 kW, 1980, Ouessant) |

FIGURE 11.10 – Vent. Types d'acteurs et de convertisseurs, territoires d'implantation et réalisations (1880-1990)

nique des porteurs de projet ne se fixe pas, ce qui est à nouveau lié à la nature de ces sources d'énergie. Elles présentent moins de qualités « thermo-indutrielles » que les marées et l'énergie thermiques des mers, sont plus difficiles à capturer dans des convertisseurs délivrant une énergie sous forme constante, de grande puissance et capables de délocaliser l'énergie. De ce fait, les acteurs du secteur énergétique sont moins intéressés par ces sources d'énergie. Un nombre bien plus élevé de machines ont été construites et mises en service. La majorité d'entre elles sont d'une faible puissance relative (de quelques watts à quelques dizaines de kilowatts), ce qui explique que des acteurs ne disposant pas des moyens puissants d'industriels de l'État aient pu mettre en œuvre ces projets.

L'évolution des projets est très différente pour chacune de ces énergies renouvelables. À nouveau, cela est dû à leur nature, leur répartition géographique et aux diverses situations politiques, techniques et sociales des territoires où des acteurs envisagent leur utilisation.

Les convertisseurs de houle et de vagues sont le seul exemple pour lequel des réalisations, peu nombreuses, ont eu lieu avant la seconde guerre mondiale, puis plus aucune. Le type d'acteurs est moins varié que pour les autres sources d'énergie de cette catégorie

| Soleil | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Période | [1880-1918] | [1919-1939] | [1940-1960'] | [1970-1990] |
| Acteurs | Inventeurs<br>Cercles scientifiques et industriels | Inventeurs, Cercles scientifiques et ind.<br>ONRSI, gvt général Tunisie<br>Labos publics : Labo physique du Globe, ONRSI (Bellevue)<br>Labo privé : Monaco | Min Colonies puis Outre-mer<br>EGA<br>Service de la Colonisation et de l'hydraulique (Algérie)<br>Labos publics : univ. Alger, Dakar, Marseille ; labo Chimie du solide<br>ENS ; CNRS<br>ONG | Min Ind, min Recherche, min Coopération<br>DGRST, CNRS, Universités, CNEXO, CNES<br>AEE, DEN, COMES, AFME<br>Industriels énergie<br>Nouvelles entreprises<br>Militants |
| Type | Convertisseurs divers (châssis, miroirs, surfaces chauffantes...)<br>+<br>Utilisation directe<br>Ou<br>Conversion thermodynamique (moteur) | Convertisseurs divers<br>+<br>Utilisation directe<br>Ou<br>Convers° thermodyn. (moteur)<br>Ou<br>Prod électricité (centrale hydro : « houille d'or ») | Convertisseurs divers<br>+<br>Utilisation directe<br>Ou<br>Conversion thermodynamique sans ou avec élec (batterie/centrale)<br>Ou<br>Conversion photo-électrique (batterie/centrale) | |
| Usage | Agricole/militaire/industriel : pompage, distillation, transport, actionnement machines | Industriel (électricité)<br><br>Domestique/agricole/militaire (pompage, distillation) | Agricole/domestique : pompage, distillation<br>Scientifique/industriel : fusion métaux<br>Tous usages électricité | Chauffage résidentiel/tertiaire<br><br>Ou<br><br>Tous usages électricité |
| Territoire | Afrique. Du Nord (colonies + Sahara) | | DOM-TOM/ Pays en « développement »<br>Espace | France (chauffage)<br>DOM-TOM, Pays du Sud (tous usages) Espace |
| Réalisations | Pompe solaire Tellier (~1 kW, Meudon, 1890) | ~ 10 batteries distillateurs solaire ONRSI (Tunisie/Indochine, 1928-1934)<br><br>~ 30 distillateurs/chauffe-eau solaires Pasteur (Algérie, 1930-194?) | ~100 distillateurs solaires (SCH, Hauts-Plateaux oranais)<br><br>Pompes solaires univ Dakar/Sofretes (1<<10 kW, Dakar, Niger, 1969-198 ?)<br><br>Maisons solaires ( Mont-Louis)<br><br>Fours solaires<br>- Univ. Alger/EGA (50 kW, Bouzaréah, 1954 - ?)<br>- CNRS (75 kW, Mont-Louis, 1954-1986)<br>- CNRS (1000 kW, Odeillo, 1966-a jd'h)<br><br>Photop. espace, balises (1<<10W) | Chauffage solaire : habitations, piscines (France, Polynésie)<br><br>Pompes solaires Sofretes/CEA (1<<10 kW, Afrique)<br><br>Centrales solaires :<br>CNRS (Targassone, 600 kW), Renault-CEA (Corse, 100 kW)<br><br>Photopiles espace, balises, télécomm. (10W <<1 kW)<br><br>2500 maisons photovoltaïques CEA (Polynésie, ~1 kW)<br>Centrales photovoltaïques (UE, Corse : 35kW ; U-E, Gard, 50kW ; Guyane, 35 kW) |

FIGURE 11.11 – Soleil. Types d'acteurs et de convertisseurs, territoires d'implantation et réalisations (1880-1990)

ainsi que les usages envisagés, mais les projets ont été nombreux. L'énergie houlomotrice est portée par des masses d'eau en mouvement, ce qui induit une familiarité avec l'usage habituel de l'énergie hydraulique. En revanche, elle est moins familière que l'énergie des marées, historiquement exploitée, mais aussi plus variable, dispersée, et imprévisible. Pendant un siècle, des acteurs imaginent une grande variété de convertisseurs mécaniques primaires (« houlomoteurs » dans le tableau de la Figure 11.7), mais comme pour les marées, ils envisagent progressivement, à partir de l'entre-deux-guerre, un passage exclusif par l'électricité. Ils prennent en considération la répartition géographique de la houle qui en fait une énergie hydraulique complémentaire des marées et de la houille blanche pour alimenter un réseau électrique en construction. Les acteurs du secteur électrique métropolitain défavorisent d'abord (entre-deux-guerres) puis excluent (après-guerre) cette source d'énergie au profit de l'énergie des marées, puis de l'énergie nucléaire, en raison de sa moindre qualité thermo-industrielle. Dans les territoires d'Afrique du Nord (Algérie, Maroc), avant les décolonisations (années 1920-1950), des inventeurs et entrepreneurs portent des projets en raison de la faiblesse des marées et de la construction du réseau électrique. Les décolonisations passées, les projets se tarissent, avant que le sujet ne soit pris en main

par le CNEXO et le Laboratoire national d'hydraulique. Ils visent d'autres territoires : les DOM-TOM et les pays en voie de développement, car EDF exclut toute production électrique autre que nucléaire sur le territoire français. Dans le programme national pour les énergies marines des années 1978-1987, la houle figure comme parent pauvre, non plus des marées mais de l'énergie thermique des mers, dont le CNEXO et ses partenaires industriels valorisent la plus facile conversion dans des centrales puissantes. Les projets de convertisseurs houlomoteurs sont donc, comme les usines marémotrices, très fortement impactés par la construction du réseau électrique, mais elles sont en plus « dans l'ombre » de ces dernières. Ceci les défavorise en termes de soutien d'acteurs puissants, mais leur laisse plus de place pour des expérimentations, sur des convertisseurs de formes variées. En outre, les territoires d'application des projets houlomoteurs, qui comprennent l'Afrique du Nord, puis la Polynésie, donnent à l'histoire coloniale une grande importance dans ces projets. Le houlomoteur Bouchaud-Praceiq (années 1910-1920) et l'ondo-pompe de J. Richard (1930-*ca* 1940), constituent des singularités historiques : seuls houlomoteurs issus des projets français en un siècle, ils ne produisent pas d'électricité, et, pour l'ondo-pompe de Richard, elle est implantée à Monaco et sert à un usage très spécifique : l'alimentation d'un aquarium du Musée océanographique.

En termes de réalisations, le mouvement est inverse pour l'énergie solaire par rapport à l'énergie houlomotrice : le nombre de convertisseurs mis en service augmente au fur et à mesure des périodes. Les convertisseurs sont très variés, mais aussi les usages et les territoires d'implantation, et ils sont globalement moins directement impactés par la construction du réseau électrique métropolitain. En effet, les territoires de destination ne situent pas, sauf dans les années 1970-1980, en métropole. Les acteurs se multiplient et les enjeux s'accumulent. Ceux-ci sont avant tout coloniaux (militaires, économiques : agricoles, industriels) dans les années 1880-1960, et d'« aide au développement » et de compétition (technologique et économique) internationale dans les années 1950-1980. Dans les années 1970-1980, ils sont politiques (contestations contre le système énergétique et gouvernement de la critique) et énergétiques (choc pétrolier). Aussi l'enjeu énergétique apparaît-il fréquemment mais il n'est pas toujours le plus important, et les acteurs du secteur de l'énergie (industriels, ministères en charge de l'énergie) sont relativement absents jusqu'aux années 1970-1980. L'histoire coloniale s'avère en revanche un élément déterminant dans cette histoire. La variété dans les convertisseurs solaires, leurs usages et les territoires d'application s'explique autant par la nature (variable et dispersée) de l'énergie solaire, que par sa répartition géographique très étendue et particulièrement abondante dans certains territoires coloniaux. À cela s'ajoute l'extrême rareté des expériences dans les années 1880 : il n'y a pas d'idée préconçue de convertisseur. Avant les expériences de Mouchot, le soleil n'avait jamais en effet été utilisé dans des convertisseurs primaires tels que je les ai définis en introduction. Le nombre de réalisations s'explique par la variété des

projets, qui s'inscrivent dans des contextes autres que l'histoire de l'énergie, et, sauf exceptions notables (fours, centrales solaires et panneaux photovoltaïques) par la petite taille et la simplicité de beaucoup de ces convertisseurs, qui nécessitent des moyens financiers moins conséquents que les centrales électriques de tous types.

Enfin, l'énergie éolienne est celle qui a donné lieu au plus nombreuses installations. Elle présente, comme les marées et encore davantage, la spécificité d'avoir été, avant les années 1880, très largement utilisée dans des moulins. Aussi, comme pour les marées, le convertisseur primaire est presque toujours une roue, mais ces roues ont des formes très diverses. Comme le rayonnement solaire, le vent est impossible à stocker, très variable mais omniprésent. Aussi les usages, les acteurs, les territoires, sont-il également très variés. À partir de l'entre-deux-guerres, de plus en plus d'ingénieurs conçoivent ces roues selon les théories aérodynamiques, et cherchent à produire de l'électricité. Au fur et à mesure de la construction du réseau électrique par des acteurs de plus en plus organisés, les éoliennes de pompage des campagnes métropolitaines, ainsi que les petits aérogénérateurs, sont reléguées dans des lieux de plus en plus restreints et pour des usages de plus en plus spécifiques. Dans les années 1940-1960, EDF n'envisage que la construction d'aérogénérateurs de grande puissance pour le réseau électrique français. Les constructeurs d'aéromoteurs se redéploient dans les colonies puis les pays sous-développés, où le réseau électrique est moins présent, et où ces acteurs perçoivent que les populations peuvent s'accommoder d'usages qui ne correspondent pas au standard de modernité des Français. À partir des années 1960, il y a un tarissement global des réalisations : comme les convertisseurs houlomoteurs et marémoteurs, les aérogénérateurs sont exclus du territoire métropolitain par EDF. Sur tout le siècle, aucun grand aérogénérateur n'est durablement mis en service. Au final, il y a eu beaucoup plus d'éoliennes de pompage ou de petits aérogénérateurs à usages spécifiques (phares et balises, radio, automobiles).

Cette lecture par sources d'énergie met en lumière l'importance de leur dimension matérielle (nature et répartition géographique) ainsi que l'influence croissante de systèmes énergétiques de plus en plus étendus, interconnectés, organisés et centralisés sur l'évolution des couples acteurs/convertisseurs. Cette influence s'exerce dans les dimensions idéelles (imaginaire technicien), matérielles (infrastructures) et politiques (acteurs) des systèmes. Les différentes sources d'énergie se raccrochent plus ou moins à l'imaginaire du convertisseur puissant, constant et qui peut délocaliser l'énergie capturée. Les territoires sont déterminants pour les conditions matérielles et organisationnelles, les intérêts politiques des acteurs et les débouchés envisageables de l'énergie utile. Aussi, pour les sources d'énergie que sont la houle, le vent et le soleil, moins conformes aux valeurs de la civilisation thermo-industrielle, mais aussi plus répandus que l'énergie thermique des mers, les marées ou la géothermie, les situations sont extrêmement variées, à tel point que, pour chacune de ces sources d'énergie, l'appréhension globale de tous les couples

acteurs/convertisseurs montre une grande complexité.

Les représentations du territoire métropolitain que donnent à voir certaines cartes sont emblématiques des tendances françaises en termes d'énergies renouvelables, au gré des choix des acteurs de l'aménagement et de l'approvisionnement énergétiques et de la place qu'ils assignent ou laissent aux énergies renouvelables. La France, tel un caméléon, se voit attribuer, de période en période, des couleurs différentes : de noire (charbon), blanche (chutes d'eau) et bleue (marées et houle) dans l'entre-deux-guerres (Grasset, cf Figure 4.3), elle devient potentiellement noire, blanche, bleue et transparente (énergie éolienne) des années 1940 à 1960 (EDF, , cf Figure 9.4), puis elle change totalement de peau et devient verte (biomasse), orange (géothermie) et jaune (soleil) (DATAR, cf 10.10). Ces cartes de ressources énergétiques sont emblématiques d'une mise en ressource des phénomènes naturels. Elles montrent une construction de l'espace qui se veut performative, dans la mesure où elles incitent à exploiter les ressources ainsi identifiées.

Afin d'enrichir l'appréhension historique de l'histoire des énergies renouvelable en France au XX$^{e}$ siècle, je propose maintenant un nouveau type de regroupement des couples acteurs/convertisseurs, non pas selon les sources d'énergie qu'ils mettent en jeu, mais selon leur degré de permanence historique.

# Une lecture par types de temporalité historique

La diversité des cas rencontrés dans l'histoire des énergies renouvelables sur la période (1880-1990) peut être appréhendée à travers leur inscription temporelle. Les études de cas de cette thèse montrent en effet différentes figures de continuité et de rupture, puisque j'ai essentiellement étudié des projets techniques qui n'ont pas abouti à des réalisations opérationnelles, encore moins à des diffusions. J'ai cependant postulé que leur existence, idéelle ou matérielle, est significative de certaines tendances historiques, que les convertisseurs aient été construits, utilisés, multipliés, ou non. Cette histoire de projets techniques échoués, de convertisseurs abandonnés, d'apparitions de projets successifs, laisse voir des disparitions et apparitions de convertisseurs qu'il est tentant d'identifier comme des récurrences. Je questionne ici cette reconnaissance d'un même objet, qui peut être proclamée par les acteurs, ou identifiée par l'historien.

Je commencerai par proposer un modèle d'histoire des techniques qui distingue trois niveaux de continuité entre deux convertisseurs séparés dans le temps, et appliquerai ce modèle à plusieurs cas relatés dans cette thèse. Je conclurai par quelques constats sur la construction et l'utilisation de la mémoire dans la mise en place de projets techniques.

## Trois types de temporalité : retours cycliques, résurgences en spirale, singularités ponctuelles

Je propose ainsi de distinguer ou au contraire d'assimiler des convertisseurs séparés dans le temps selon trois types de temporalité historique, qui prennent en compte l'évolution, non d'un convertisseur, mais du couple acteur/convertisseur, associé à un type d'usages (ou de territoire ce qui est très lié), sur une période donnée. La prise en compte de ces trois paramètres permet d'étudier les convertisseurs en contextes, en considérant qu'un objet technique s'inscrit forcément dans une réalité technique, politique, sociale et

environnementale. Définissons successivement ces trois façons d'envisager le lien présent-passé et le processus historique :

— (1) Certains cas présents paraissent directement importés du passé parce que tous les éléments sont conservés : les convertisseurs, les types d'acteurs et les usages. Des projets anciens sont ainsi convoqués, légèrement dépoussiérés et présentés selon les modes en cours. J'appellerai cette relation directe entre présent et passé un retour cyclique car le cas nouveau semble réapparaître au même endroit que le cas ancien après une certaine période de temps.
— (2) D'autres cas présents sont perçus comme issus du passé à travers un seul élément inchangé, que ce soit les convertisseurs, le types d'acteurs ou les usages. Un rapprochement est donc construit à partir d'un seul élément commun aux cas passé et présent, les différences entre les deux autres étant tues ou considérées comme non pertinentes. Je propose de nommer cette relation une résurgence en spirale, car le retour est envisagé avec un mélange de commun (un des trois éléments du système) et de décalé (pour les deux autres éléments).
— (3) Enfin, les derniers cas ne semblent pas présenter de relation entre présent et passé. Une configuration unique associe un convertisseur, un type d'acteurs et des usages durant une période donnée sans se répéter par la suite, même de manière déformée. Contrairement aux deux autres types de temporalité, ce troisième cas n'occupe aucune place dans la mémoire collective sur les énergies renouvelables. Je désignerai ces cas comme des singularités ponctuelles.

Ce modèle découle des études de cas faites dans cette thèse. Son application à certains cas significatifs ajoute des éléments sur l'histoire des énergies renouvelables au découpage par sources d'énergie, et me permet d'arriver à des questionnements sur l'usage de la mémoire.

Je tiens à faire trois remarques sur cette typologie avant de poursuivre. Premièrement, par les expressions utilisées pour définir les façons de penser la relation présent-passé, la typologie spatialise le rapport au temps à travers des cercles, des spirales et des points pour penser respectivement un retour inchangé, une modification partielle, une nouveauté irréductible. Ceci ne doit pas étonner car la spatialisation du temps fait partie de représentations largement partagées au sein des civilisations occidentales contemporaines. Deuxièmement, la répartition des cas au sein des façons de penser n'est pas immuable. Le regard des acteurs et des historiens peut faire passer un cas donné d'une catégorie à la suivante. Ainsi, une singularité ponctuelle peut finalement devenir une résurgence en spirale si certains acteurs, ingénieurs ou historiens, décident de relier à une situation antérieure, pour les premiers, parce qu'ils énoncent une similitude sur des bases techniques ou bibliographiques, ou pour les seconds, parce qu'ils énoncent une similitude à partir de

documents d'archives ou de publications anciennes. Troisièmement, les catégories n°2 et 3 traduisent, pour les acteurs, l'innovation radicale (n°3) ou partielle (n°2). La catégorie n°1 constitue alors un cas de négation du processus historique. Elle peut être rapprochée de l'expression d'« éternelle émergence » forgée par Frédéric Fréry, (2014) pour caractériser la dynamique des voitures électriques des années 1880 à aujourd'hui. Une analyse historienne montrerait que l'histoire de la voiture électrique rentre plutôt dans la catégorie n°2 de résurgence en spirale car certains éléments du « système voiture électrique » demeurent d'une période d'émergence à une autre mais nombreux sont ceux qui changent dans le même temps.

Testons maintenant ce modèle sur des cas d'histoire des énergies renouvelables au XX$^{e}$ siècle.

*Des retours cycliques*

Les usines marémotrices (sur la période (1880-1970)) et maréthermiques (sur la période (1930-1990)) rentrent typiquement dans cette catégorie. Ainsi, de façon récurrente, les ingénieurs des grands corps de l'État responsables des aménagements hydrauliques (Ponts et chaussées), accompagnés, à partir des années 1920, des acteurs du secteur électrique, s'impliquent dans des projets d'usines marémotrices, de même forme (bassin + turbines hydrauliques), pour alimenter le réseau électrique métropolitain. Decœur, ingénieur des Ponts et chaussées, propose l'aménagement de l'estuaire de la Seine en 1890, projet resté en suspens. Dans les années 1920, industriels et ingénieurs de l'État portent ou encouragent des projets similaires, les abandonnent dans les années 1930, les ressortent (adaptées à la nouvelle situation : réseau interconnecté et prévisions d'augmentation de la consommation) dans les années 1940, et les abandonnent dans les années 1960, au gré d'une concurrence plus ou moins favorable des autres sources d'énergie. À partir des années 1970, l'usine marémotrice de la Rance apparaît comme le fruit mais aussi comme le vestige d'une longue période de projets cycliques. Les projets d'usines maréthermiques (cycle thermodynamique + turbines basse pression) suivent un mouvement similaire, sur une période plus longue (il y a un resurgissent dans les années 1970). Tout le long, des acteurs du secteur de l'électricité s'y impliquent, même si les configurations sont variables (avec G. Claude (1925-1935), avec le secrétariat d'État aux colonies puis le ministère de la France d'Outre-mer (1940-1952), puis le CNEXO (1975-1987).

Ces deux cas de retours cycliques montrent à quel point les énergies marémotrices et maréthermiques ont été accaparées par des acteurs du système énergétique en raison de la nature et de la répartition géographique des marées et de l'énergie thermique des mers. L'imaginaire technicien est très orienté, très influencé par le système énergétique, et les acteurs de ce système veulent enrôler de nouvelles sources d'énergie dans leurs réseaux.

Les projets de distillateurs solaires, portés par des acteurs des territoires coloniaux pour les zones désertiques sont un autre exemple de retour cyclique. Ils sont soutenus par le gouvernement général de Tunisie dans les années (1920-1940) (projets de l'ONRSI : cf 5.4), puis par le gouvernement général d'Algérie dans les années 1950 (cf 9.2.3), même si l'organisation des projets est différente. Ils mènent à l'installation de convertisseurs semblables (des châssis distillateurs) dans le Sahara, pour alimenter en eau douce les populations et encourager la production agricole. Une ambition coloniale similaire, l'abondance du soleil et l'absence d'autres sources d'énergie, la rareté des infrastructures matérielles, orientent ces acteurs vers des solutions techniques analogues.

*Des résurgences en spirale*

Ce sont des cas de convertisseurs similaires proposés par des acteurs différents pour un même usage, ou d'acteurs qui adaptent un convertisseur à un nouvel usage, territoire ou public.

Les pompes solaires destinées au désert africain constituent un cas de résurgence en spirale. Toutes ces pompes sont conçues selon le même principe du moteur thermodynamique. Elles ont une longue histoire, depuis la pompe que Tellier installe sur le toit de son poulailler dans les années 1890, et imagine multiplier dans le Sahara pour le conquérir « pacifiquement » (cf 3.4), jusqu'aux pompes SEKRA que la Sofretes installe dans certains pays africains à partir de la fin des années 1960 (cf 8.2.2). Entre temps, elles sont réapparues dans les projets du secrétariat d'État aux colonies du gouvernement de Vichy, sous une forme légèrement différente : le moteur solaire thermodynamique Barbey doit produire non seulement de la force motrice pour le pompage, mais aussi de l'électricité et de la glace (cf 9.2.3). Le Secrétariat range définitivement ce projet dans ses tiroirs suite à des différends avec Barbey.

Les petits aérogénérateurs ont été souvent proposés par des acteurs différents pour alimenter des phares ou des îles, territoires éloignés des réseaux d'approvisionnement en énergie. Si l'on se focalise sur l'alimentation des phares, on peut rapprocher le moulin à vent électrique du duc de Feltre (années 1890) et les aérogénérateurs du service des Phares et balises (années 1950-1980) : malgré les différences techniques notables entre ces deux installations (taille des pales, du pylône, des accumulateurs ; forme de la roue motrice), l'idée est bien toujours d'éclairer les bateaux grâce à une source d'énergie présente localement. Même si leur organisation est différente, le service des Phares et balises fait partie des acteurs dans les deux cas [149].

149. Cette continuité est renforcée par le fait que, lorsqu'il entreprend d'alimenter les phares par l'énergie éolienne, Pétry a connaissance des travaux de son prédécesseur de la fin du XIX^e^ siècle sur le moulin à vent du duc de Feltre. Dans ses documents du Comité technique de l'énergie des vents, il possède ainsi la correspondance de cet acteur.

L'histoire des aérogénérateurs et des houlomoteurs sur le territoire métropolitain présente également ce type de résurgences en spirale. Des années 1920 aux années 1960, les uns après les autres, des inventeurs, industriels, constructeurs d'aéromoteurs, proposent et construisent des modèles différents d'aérogénérateurs pour l'alimentation du réseau électrique. Cette dynamique s'arrête dans les années 1960. On peut dire la même chose des projets de houlomoteurs dans l'entre-deux-guerres, portés par des inventeurs-entrepreneurs qui souhaitent alimenter le réseau électrique (France et Afrique du Nord). La situation du territoire français (construction du réseau électrique et manque de charbon) laisse alors une place, bien que très restreinte, à cette forme d'énergie hydraulique. Les projets s'arrêtent dans les années 1940, où les houlomoteurs n'ont plus de place sur le territoire français. Lorsque des projets sont à nouveau portés par le CNEXO à la fin des années 1970, des houlomoteurs similaires doivent produire de l'électricité dans les DOM-TOM.

Un exemple du deuxième type est l'entreprise Henry, constructeurs d'aéromoteurs en France, qui plie bagages pour l'Algérie dans les années 1950 (cf 9.2.2.2). Il construit toujours des pompes éoliennes mais est contraint de les adapter pour de nouvelles conditions climatiques et une population différente. Ainsi, l'histoire, continue, des pompes éoliennes sur le territoire français sur la période (1880-1950) se termine, mais elle trouve un dernier rebond en Algérie.

Ces résurgences en spirale montrent deux cas opposés en termes d'évolution territoriale, mais soulignent chacun l'influence des infrastructures matérielles et des usages possibles au sein de ces territoires. Les premiers cas (aérogénérateurs et pompes solaires) montrent des territoires qui ne changent pas beaucoup d'un point de vue technique et/ou social (phares, populations des régions désertiques), et qui laissent la place libre à des convertisseurs autres que les convertisseurs classiques du système thermo-industriel. Dans les deux autres cas, l'expansion du système électrique en métropole chasse les aéromoteurs/houlomoteurs du territoire français, et les acteurs s'implantent dans des zones où le système énergétique leur laisse encore une place.

*Des singularité ponctuelles*

Ces projets sont ceux qu'il est difficile d'assimiler à des projets d'autres périodes, car il présentent trop de singularités techniques, sociales, politiques. Ils sont en fait très ancrés dans un contexte historique et territorial d'où on ne peut les déplacer.

Les navires éoliens des années (1910-1925) font partie de cette catégorie (cf 5.3, 5.4). C'est ainsi que deux historiens l'ont qualifiée de « bizarrerie » de l'histoire des techniques (Guthleben, 2011, Rogier, 2000b). Ces projets sont portés, en parallèle, par deux ingénieurs-inventeurs, soucieux de la substitution des voiles aux moteurs à vapeur dans la

marine française, et connaisseurs de la science aérodynamique. Les dispositions techniques sont inédites : un bateau muni d'un aéromoteur pour la propulsion. Le fait qu'il y ait deux projets parallèles en France, mais aussi dans d'autres pays, et qu'on n'en retrouve pas de semblable, montre à quel point ces projets sont inscrits dans une période de l'histoire.

Cette classification par types de temporalité rapproche des machines éloignées dans le temps (pompes solaires, aérogénérateurs pour les phares). Elle nuance au contraire l'image de récurrences que peuvent donner à voir certains projets. Pour certaines sources d'énergie, elle renforce le classement des couples acteurs/convertisseurs par source d'énergie présenté dans cette conclusion (usines maréthermiques et marémotrices), ce qui est une autre manière de montrer l'inertie du système technique thermo-industriel. Pour d'autres, elle éloigne au contraire les convertisseurs, et le regroupement par sources d'énergie est complètement éclaté. Le four solaire géant d'Odeillo n'a pas plus à voir avec la pompe solaire de Tellier ou de Mouchot qu'avec la pompe solaire de l'Université de Dakar qui lui est contemporaine.

Ces éléments m'amènent maintenant à une réflexion sur la mémoire et ses usages.

## Une réflexion sur la mémoire et ses usages

Dans l'histoire des énergies renouvelables, ces trois catégories permettent d'éclairer certains mécanismes de résurgences, mais aussi certains discours sur les continuités et les ruptures émanant d'acteurs et parfois d'historiens. Certains mettent en évidence des filiations entre un nouveau convertisseur et un convertisseur du passé, qui sont pourtant à nuancer. D'autres au contraire mettent en évidence des ruptures, là où il y a résurgence, ou omettent une résurgence. D'autres enfin empêchent une résurgence en disqualifiant un convertisseur du passé. Quelques exemples issus de cette thèse montrent des mécanismes de construction de la mémoire et d'organisation de l'oubli, qui opèrent de manière souvent inconsciente, mais aussi parfois consciente, dans un but économique ou politique.

*Promouvoir un convertisseur par les continuités ou par les ruptures*

La mise en avant d'une continuité et/ou d'une rupture, réelles ou construites, entre un convertisseur présent et un convertisseur du passé, peut servir aux protagonistes du projet à justifier son intérêt, lui donner du crédit ou le légitimer. Les discours de continuité mobilisent les valeurs de pérennité, de tradition, de nationalisme, font appel à des figures d'autorité. L'association de la rupture à une continuité permet de montrer la modernité d'un convertisseur, et le progrès accompli depuis le convertisseur qui le précède historiquement.

La valeur nationaliste et les figures d'autorité sont très présentes dans les discours sur l'histoire de l'énergie thermique des mers et de l'énergie solaire en France. Ces figures ancrent les projets successifs dans une lignée nationale, et laissent à voir un processus continu dont les acteurs des projets portent l'aboutissement. Ils se montrent porteurs d'un progrès, réussissant là où leurs éminents prédécesseurs avaient échoué. Dans l'entre-deux-guerres, G. Claude en premier lieu se revendique de d'Arsonval, pour s'inscrire dans la lignée des grands inventeurs français et, probablement, obtenir l'appui de cet ingénieur et scientifique reconnu, bien intégré dans le milieu académique. Pourtant, le convertisseur de G. Claude ne s'affilie pas plus au convertisseur très vaguement décrit à la fin du XIX$^{e}$ siècle par d'Arsonval, qui cherche avant tout à défendre l'électricité comme le meilleur vecteur énergétique (cf 2.1), que les convertisseurs décrits par certains contemporains de Claude, dont certains revendiquent d'ailleurs une priorité sur ce procédé (cf 5.3). S'il s'agit d'une résurgence, elle décrit plutôt une spirale qu'une ligne car le convertisseur de d'Arsonval ne s'inscrit pas dans un territoire, et que la proposition de d'Arsonval n'est pas un projet au sens où il n'a fait qu'émettre une idée dans un autre but, celui de valoriser la technique électrique. Après G. Claude, les acteurs des deux autres grands projets français de stations maréthermiques (secrétariat d'État aux colonies puis L'énergie des mers (1940-1956) et CNEXO (1978-1987)), qui constituent en effet des retours cycliques du projet de G. Claude, se réfèrent à G. Claude et à d'Arsonval, quoique de manière différentes. Le projet de L'énergie des mers est initialement porté par Claude mais celui-ci, allié probablement gênant, est mis de côté, physiquement (par son emprisonnement) mais aussi dans les discours. Dans les années 1970-1980, le CNEXO et ses partenaires industriels mettent quant à eux très largement à contribution la figure de d'Arsonval et Claude, dans leurs argumentaires pour obtenir des financements de la part des instances publiques concernées. Inclus dans une compétition technologique internationale que ces acteurs eux-mêmes nomment « guerre », ils donnent de la force à ce projet par son aspect national. De la même manière, la figure de Mouchot et de son moteur solaire, dans les années 1860-1870 est systématiquement présente dans les historiques des acteurs français de l'énergie solaire.

*Marginaliser par filiations, omissions, muséification*

Le recours à la mémoire et à l'assimilation peut contribuer à empêcher certaines filières de se développer, à précipiter l'abandon de certains convertisseurs, mais aussi à masquer des échecs passés ou à gommer une action inhibitrice.

La mise en valeur d'un progrès dans une série de convertisseurs apparentés passe par la disqualification d'autres convertisseurs à supplanter. Elle s'appuie sur la pérennité d'un usage, mais la nécessité d'un changement. C'est le leitmotiv de l'archaïsme opposé à celui de modernité. Il est récurrent dans les discours sur les convertisseurs marémoteurs et

éoliens. Dès la fin du XIX^e^, des chantres du progrès technique disqualifient les moulins hollandais au profit des moulins à vent américains alors dits « modernes ». L'un ne représente pourtant pas une résurgence de l'autre, puisqu'ils s'inscrivent dans des contextes très différents, ne sont pas destinés aux mêmes usages. À partir de l'entre-deux-guerres, c'est au tour des moulins américains et autres éoliennes de pompage d'être reléguées au passé, au profit des aérogénérateurs conçus selon les nouvelles connaissances en aérodynamique. Dans les années 1940, alors que ces aéromoteurs tendent à disparaître dans les campagnes, certains porteurs de projets d'éoliennes aérodynamiques omettent même l'existence de ces aéromoteurs, ou les décrivent comme des moulins à vent hollandais, en les déportant dans un passé lointain (cf 7.3).

Les projets de houlomoteurs systématiquement rejetés par la Commission de la houille bleue dans l'entre-deux-guerres sont un exemple d'inhibition du développement d'une filière par l'assimilation malhonnête d'un convertisseur à un autre convertisseur du passé jugé peu performant. Dans le même registre, dans les années 1970, lorsque des acteurs d'EDF, Bonnefille et Banal, mettent en évidence les travaux d'EDF sur l'énergie éolienne, il montrent à la fois un volontarisme passé pour cette source d'énergie appréciée des opposants au programme nucléaire, mais aussi l'aspect économiquement peu rentable des aérogénérateurs en France, qui justifie l'absence d'implication d'EDF sur ce sujet au moment présent. Ils inhibent la résurgence d'aérogénérateurs en France, en muséifiant en quelque sorte ces convertisseurs.

L'analyse rapide du site internet d'EDF actuel et de son « bref historique de l'histoire du vent » est une belle illustration de ces mécanismes d'omissions, d'oubli, de présentation de faux retours cycliques. L'évolution des convertisseurs éoliens commence en l'an mille, fait un bref passage par la fin du XIX^e^ siècle avec les moulins à vent américains, mentionne l'« arrivée des énergies fossiles » dans les années 1920 et une longue disparition des convertisseurs éoliens, puis une résurgence en 1957 avec l'éolienne de Nogent-le-Roi (d'EDF), et enfin un grand saut jusqu'aux éoliennes *offshore* actuelles. Les énergies fossiles sont rendues responsables d'une absence de convertisseurs éoliens entre 1920 et 2018, exceptée l'éolienne d'EDF, et le programme nucléaire est tout juste mentionné. L'éolienne d'Ouessant, qu'EDF installe et qui est détruite en 1980, n'est pas du tout évoquée, probablement car elle représente un échec pour l'entreprise. L'histoire termine par les éoliennes *offshore* (qu'EDF développe), qui sont l'aboutissement final de mille ans de résurgences et de progrès !

Ces exemples de résurgences relatées, d'omissions délibérées, de construction de figures d'inventeurs, expliquent, avec les oublis « naturels » (tout du moins non provoqués), que certaines figures d'inventeurs, certaines images de convertisseurs, existent dans la mémoire collective d'une période donnée, alors que la majorité des autres la désertent. Au

gré des valeurs d'une époque, des stratégies de communication d'acteurs en position de force, certains traits de ces images sont renforcés, atténués, modifiés. Alors que les figures de Mouchot, celles de Claude et de Trombe, sont aujourd'hui à l'esprit de tout Français s'intéressant à l'histoire des énergie renouvelables, les restes du bélier du Minou, toujours léchés par les vagues, se confondent désormais avec le paysage, malgré la renommée de son concepteur André Coyne. On sait très peu de choses sur l'éolienne qu'EDF a installée à Ouessant en 1980. Certains présentent le bateau éolien de Constantin comme une bizarrerie de l'histoire des techniques. Mais qui sait que la Drésinette a vogué sur l'Erdre au même moment que le Bois Rosé ? Cette mémoire collective constitue un élément d'inertie des systèmes techniques, en orientant l'imaginaire vers certaines solutions, et en verrouillant d'autres possibles. Un vaste programme s'ouvre encore pour tirer les ficelles de ces cas riches d'enseignements non seulement sur l'histoire des techniques en société mais encore sur la mise en place des politiques énergétiques actuelles.

# Archives écrites

AN 1977 0313/46. « Service des phares et balises. Commission de la houille bleue ». Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 1977 0605/5. « Ministère de l'Industrie. Service technique de l'énergie électrique et des grands barrages. Comité technique de l'énergie des mers ». Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 1977 0614/3 (1941). « Ministère de l'Industrie. Comité technique de l'énergie des mers ». Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 1977 0614/6. « Direction de l'électricité. Technique Vents et marées ». Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 1980 0213/133 (1955-1970). « Service des phares et balises. Énergie éolienne ». Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 1991 0305/1 (1941-1957). « Sous-direction de la sécurité de la navigation maritime. Recherche d'énergies de substitution, énergie éolienne ; enquête et expérimentation dans les DOM-TOM et en Afrique du Nord (1941-1957). » Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 1991 0305/2 (1941-1957). « Sous-direction de la sécurité de la navigation maritime. Recherche d'énergies de substitution, énergie éolienne ; enquête et expérimentation dans les DOM-TOM et en Afrique du Nord (1941-1957). » Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 1991 0305/3. « Sous-direction de la sécurité de la navigation maritime. Recherche d'énergies de substitution, énergie éolienne ; enquête et expérimentation dans les DOM-TOM et en Afrique du Nord (1941-1957). » Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 1991 0305/4. « Sous-direction de la sécurité de la navigation maritime. Énergie éolienne, Jaugeage, appareils, relevés ». Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 1991 0305/5. « Sous-direction de la sécurité de la navigation maritime. Energie des mers. » Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 1991 0305/6 (1929-1945). « Sous-direction de la sécurité de la navigation maritime. Energie des mers. » Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 1991 0305/7. « Sous-direction de la sécurité de la navigation maritime. Energie des mers. Comité consultatif des usines marémotrices ». Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 1994 0148/1. « Ministère de l'Industrie. Comité géothermie ». Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 2008 0658/56. « Ministère de l'Industrie. CNEXO. ETM. CGE ». Archives de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 2008 0658/57. « Ministère de l'Industrie. CNEXO. ETM. CGE ». Archives de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 2008 0658/58. « Ministère de l'Industrie. CNEXO. ETM. Empain-Schneider ». Archives de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 2008 0658/59. « Ministère de l'Industrie. CNEXO. ETM, houlomoteurs ». Archives de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 2008 0658/60. « Ministère de l'Industrie. CNEXO. Houlomoteurs, microcentrales marémotrices ». Archives de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 2008 0658/61. « Ministère de l'Industrie. CNEXO. Houlomoteurs, microcentrales marémotrices ». Archives de Pierrefitte-sur-Seine.

AN 80AJ/65. « Commissariat général au Plan de modernisation et d'équipement. Commission d'étude et de coordination des plans de modernisation et d'équipement des territoires d'Outre-mer ». Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine.

AN F14 20 832. « Service des phares et balises par la mission des archives au ministère des Transports. » Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine.

AN F14 20 902. « Service des phares et balises. Comité technique de l'énergie du vent 1945-1949 ». Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine.

AN F14 20832. Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine.

AN2000 0404/6. « Ministère de l'Industrie. CNEXO. Programme énergies marines. Énergie thermique des mers 1978-1982. » Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine.

ANOM 81F 2042. « Ministère d'État chargé des affaires algériennes : Service des affaires économiques et financières 1881-1963. Compagnie africaine de matériel éolien, dossier documentaire sur ses activités. » Archives nationales d'Outre-Mer (Aix-en-Provence).

ANOM 93COL17. « Ministère des colonies. Inspection générale des travaux publics. » Archives nationales d'Outre-Mer (Aix-en-Provence).

ANOM 93COL18. « Ministère des colonies. Inspection générale des travaux publics. » Archives nationales d'Outre-Mer (Aix-en-Provence).

Archives EDF, 852752. « EDF, Service des études et recherches. Dossiers de Gaston Remenieras (Pluie, soleil) ». Archives d'EDF (Blois).

Archives EDF, 852756. « EDF, Service des études et recherches. Dossiers de Gaston Remeniéras (Soleil, courants, pluie) ». Archives d'EDF (Blois).

Archives EDF, 852757. « EDF, Service des études et recherches, Dossiers de Gaston Remenieras ». Archives d'EDF (Blois).

Archives EDF, 852758. « EDF, Service des études et recherches, Dossiers de Gaston Remenieras (Soleil) ». Archives d'EDF (Blois).

Archives EDF, 852786. « EDF, Service des études et recherches. Essais aérogénérateurs, anémomètres ». Archives d'EDF (Blois).

Archives EDF, 890463. « EDF. Service des études et recherches ». Archives d'EDF (Blois).

Archives UNESCO. « Archives en ligne (UNESDOC) ».

# Archives orales

Bal, jean-Louis (2015). Bureau du Syndicat des énergies renouvelables (13-15 rue de la Baume, Paris) ; 11 décembre 2015.

Chartier, Philippe. Bureau du Syndicat des énergies renouvelables (13-15 rue de la Baume, Paris) ; 23 juin 2016.

Clément, Alain. Bureau d'Alain Clément, Laboratoire d'hydrodynamique, d'énergétique et d'environnement atmosphérique (LHEEA) (École centrale de Nantes, 1 rue de la Noë ) ; 21/10/2015 ; 02/11/2015.

Marchand, Philippe. Domicile de Philippe Marchand ; 26 février 2016.

# Émissions radiophoniques

Chaumel, Olivier et Séverine Cassar (2016). *Histoire de l'énergie (2/4). Nous avons bien turbiné 50 ans après, l'usine marémotrice de la Rance. Émission du 06/12/2016*. France Culture.

# Sites internet

Le Grand terrier. *Site internet de l'association le Grand terrier, dédiée au passé historique et à la mémoire de la commune d'Ergué Gabéric.*

# Sources primaires


AFEDES (1968). « Répertoire des spécialistes travaillant dans le domaine de l'énergie solaire ». In : *Cahiers de l'AFEDES* 1 (janvier 1968).

AFME (1984). *Rapport d'activité 1983*.

– (1985). *Recueil de données sur l'énergie 1984-1985*.

– (1988). *Programme de recherche et développement*. AFME.

AFME Pays de la Loire (1986). *La maîtrise de l'énergie dans les Pays de la Loire. Gisements, atouts, enjeux*. AFME, septembre 1986.

Ailleret, Pierre (1946). « L'énergie éolienne, sa valeur et la prospection des sites ». In : *Revue générale de l'électricité* (mars 1946).

– (1948). « La recherche des sites qui pourraient convenir à une utilisation de l'énergie du vent ». In : *La Météorologie* (avril 1948), p. 145–152.

– (1955). « Perspectives d'avenir en matière d'énergie ». In : *Le Génie civil* 3409 (novembre 1955), p. 437.

– (1957). « Problèmes énergétiques à long terme et rapidité d'évolution des techniques ». In : *Le Génie civil* 3442 (avril 1957). Discours d'Ailleret à la Société des ingénieurs civils (11/01/1957), p. 152–154.

Aimé, Emmanuel (1929). « L'atmosphère, source gratuite d'énergie inépuisable dans les régions chaudes et tempérées ». In : *L'aérophile* 37.1 (janvier 1929), p. 40.

Amet, Jean-François (1920a). « Utilisation des marées ». In : *Revue générale de l'électricité* VIII.14 (octobre 1920). Note présentée au Comité d'études et de recherches scientifiques pour l'aménagement et l'utilisation des forces hydrauliques, p. 445–455.

– (1920b). « Utilisation des marées ». In : *Revue générale de l'électricité* VIII.15 (octobre 1920), p. 445–455.

– (1920c). « Utilisation des marées ». In : *Revue générale de l'électricité* VIII.16 (octobre 1920), p. 531–542.

– (1920d). « Utilisation des marées ». In : *Revue générale de l'électricité* VIII.17 (octobre 1920), p. 565–579.

Andraud, Antoine (1839). *De l'air comprimé employé comme moteur, ou de la force motrice obtenue gratuitement et mise en réserve*. Chez Guillaumin.

Andreau, Jean-Édouard (1949). 282829. Mai 1949.

Apertet, J (1961). « De nouvelles sources d'énergie pour les pays insuffisamment développés ? » In : *Tiers-Monde* 2.5, p. 1–26.

Arrhenius, Svante (1922). *Conférences sur quelques problèmes actuels de la chimie physique et cosmique*. Gauthier-Villars.

Augé, Claude (1922). *Larousse universel en deux volumes*. Larousse.

Auroy, Francis (1957). « Évolution du projet de l'usine marémotrice de la Rance ». In : *Construction* 12 (décembre 1957).

Avargues, J et J Ripoll (1954). « Le problème de l'eau dans les Hauts-plateaux oranais pour l'alimentation des populations rurales et des troupeaux ». In : *Terre et eaux* (janvier 1954).

Baclé, M (1882). « Utilisation du mouvement de la mer, Projet de M Victor Gauchez ». In : *La Nature* (mai 1882), p. 363–364.

Barbey, Jacques (1940). « Procédé et dispositif pour l'utilisation de l'énergie thermique provenant des différences de température entre le jour et la nuit, notamment en climat désertique ». 865.725. Février 1940.

Baré, Jules (1921). « Idées générales et pratiques pour l'établissement d'un avant-projet de station marémotrice avec usine régulatrice ». In : *Annales des Ponts et chaussées*, p. 252–253.

Barjot, Henri (1928). « Une énergie naturelle utilisable ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*. Présentée par Léon Lecornu.

– (1932). « L'utilisation rationnelle de la chaleur solaire ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*. Note présentée par Léon Lecornu.

– (1933). « L'utilisation rationnelle de la chaleur solaire ». In : *La Nature* 2999 (mars 1933), p. 213–218.

Basiaux, Paul (1921). « Quelques considérations sur l'utilisation pratique de la force motrice du vent ». In : *Revue générale de l'électricité* 9.7 (février 1921), p. 214–216.

Basiaux-Defrance, Paul (1945). « L'énergie du vent dans l'Aude ». In : *La Nature* 3099 (novembre 1945), p. 321–323.

Beau, Charles (1957). « Utilisation de l'énergie thermique des mers. Observations sur les matériels utilisés. Conclusions générales ». In : *La Houille blanche* 5 (novembre 1957), p. 823–834.

Behrman, Daniel (1958). « Voyage autour du soleil ». In : *Le courrier de l'UNESCO* (septembre 1958).

Berland, Jean (1922). « Procédé pour L'utilisation de la chaleur solaire comme source d'énergie, par auto-vaporisation ». 556.333.

Berthelot, Charles (1894). « La science et l'industrie en l'an 2000 ». In : *Annales industrielles* (mars 1894), p. 467–470.

Bigourdan, Guillaume (1920). « Un moyen économique d'utiliser la force des marées ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 171 (juillet 1920), p. 211.

Bleunard, Albert (1888). *La Babylone électrique*. Maison Quantin.

Blin, Henri (1919). « Progrès dans l'utilisation des moteurs à vent ». In : *La Nature* 2352 (février 1919), p. 268–269.

Blondel, André (1917&). « Le programme de la RGE ». In : *Revue générale de l'électricité* 1.1 (juin 1917&), p. 1–2.

Boisnier, Georges (1921). « Utilisation de l'énergie des marées ». In : *Annales des Ponts et chaussées.* III. Mémoires et documents, p. 297–396.

Bonnefille, René (1976a). « Les réalisations d'Électricité de France concernant l'énergie éolienne ». In : *La houille blanche* 1, p. 45–66.

Bonnin, R (1906). « Action de la mer sur le rivage. Leur puissance ». In : *La Nature* 1735 (août 1906), p. 200–204.

Bourdeau, Louis (1884). *Les forces de l'industrie, progrès de la puissance humaineLes forces de l'industrie, progrès de la puissance humaine*. Félix Alcan.

Brazier, Charles-Émile et Charles Maurain (1927). « Dispositif simple et expériences relatifs à la distillation de l'eau par l'action de la chaleur solaire ». In : *Recherches et inventions* 154 (juin 1927), p. 210–215.

– (1934). « Essais d'un appareil pour la distillation de l'eau par l'action de la chaleur solaire ». In : *Recherches et inventions* (septembre 1934), p. 249–250.

Breton, Jules-Louis et Émile Borrel (1933). « Rapport su l'activité du l'Office national des recherches scientifiques et industrielles et des inventions présenté au Conseil national le 18 novembre 1933 ». In : *Recherches et inventions* 232 (janvier 1933), p. 1–25.

BRGM (1980). *Faisabilité technique et économique de la géothermie basse énergie en Europe*. Commission des Communautés européennes, septembre 1980.

BRGM et Délégation aux énergies nouvelles (1978). *La géothermie en France*. Délégation aux énergies nouvelles.

Brochet, Lucien (1948). « Le problème de l'eau dans les Hauts-plateaux oranais pour l'alimentation des populations rurales et des troupeaux ». In : *Terre et eaux* 4 (juillet 1948).

Bulletin de la SEIN (1893). In : *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (janvier 1893), p. 108.

– (1921). « Travaux de la Commission d'utilisation des combustibles ». In : *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (janvier 1921), p. 116–123.

Cattaneo, Francesco (1923). « Utilisation des marées pour la production de force motrice, pour le service et l'éclairage des ports ainsi que pour les manoeuvres d'ouvrages maritimes (fonctionnement des portes d'écluses etc) ». In : XIII$^{e}$ *Congrès internatio-*

*nal de navigation*. 2e section : navigation maritime. 3eme communication. Association internationale permanente des congrès de navigation. Londres.

Caufourier, Paul (1921). « L'emploi des eaux thermales comme source d'énergie ». In : *Le Génie civil* 78.2004 (janvier 1921), p. 37–39.

– (1923). « L'utilisation de la chaleur solaire par l'emploi d'appareils auto-évaporateurs ». In : *Le Génie civil* 2121 (avril 1923), p. 327–329.

Caustier, Eugène (1904). *Les entrailles de la terre*. Vuibert et Nony.

Cels, Jules (1919). « Le Comité d'électricité ». In : *La Houille blanche* 2 (mars 1919), p. 63–66.

Chabot, Bernard (1987). « Le photovoltaïque : choix technologiques, stratégies ». In : *Maîtrise de l'énergie et recherche : quel bilan ? Quelles perspectives ?* La Documentation française.

Chaisemartin, C., O. Balabanian et G Bouet (1987). « Microcentrales. Contribution à l'étude de l'impact sur l'environnement ». In : *Norois* 34.136, p. 501–510.

Champly, René (1933). *Les moteurs à vent. Théorie, construction, montage, utilisation au puisage de l'eau et à la production d'électricité*. Dunod.

Charles-Roux, A (1933). « La force motrice aux colonies ». In : *Revue internationale des produits coloniaux*, p. 213–218.

Chartier, Philippe (1987). « Le bilan du programme mobilisateur n°1 ». In : *Maîtrise de l'énergie et recherche : quel bilan ? Quel avenir ?* La Documentation française.

Chartier, Philippe et Haroun Tazieff (1982). *Maîtriser l'énergie. Rapport au ministre de la Recherche et de l'Industrie*. La Documentation française.

Chassériaud, R. (1911a). « La résistance de l'air et la locomotion ». In : *La Nature* 1993 (août 1911), p. 156–158.

– (1911b). « Peut-on vaincre la résistance de l'air ? » In : *La Nature* 1973 (mars 1911), p. 251–252.

Chateau, Bernard (1985). « Méthodes utilisées dans le cadre de la planification énergétique ». In : *Maîtrise de l'énergie et recherche : quel bilan ? Quel avenir*. La Documentation française.

Claude, Georges (1921). « Sur l'utilisation de l'énergie des marées ». In : *Revue générale de l'électricité* X.18 (novembre 1921), p. 631–632.

– (1927). « Sur l'utilisation de l'énergie thermique des mers ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 185 (novembre 1927).

– (1928a). « Sur la production de la force motrice par la vapeur évoluant entre deux masses d'eau ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 187 (octobre 1928), p. 556–557.

– (1928b). « Sur l'extraction de l'énergie des mers ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 186 (mai 1928).

– (1930a). « Sur l'utilisation de l'énergie thermique des mers ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* (novembre 1930), p. 746–750.
– (1930b). « Sur l'utilisation de l'énergie thermique des mers ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 191 (novembre 1930), p. 810–812.
– (1933). « Sur la réalisation prochaine d'une usine Claude-Boucherot sur bateau ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 197 (septembre 1933), p. 567–570.
– (1952). « Les anomalies de Péchelbronn ». In : *Le Génie civil* (juillet 1952), p. 252–253.
Claude, Georges et Paul Boucherot (1926). « Sur l'utilisation de l'énergie thermique des mers ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 183 (novembre 1926), p. 929–933.
– (1927). « Procédé pour la production de force motrice par l'utilisation des différences de température existant entre l'eau de surface et l'eau de fond des mers ». 628 620. Demandé le 13 mars1926, publié le 17 octobre 1927.
– (1928a). « Procédé et dispositif pour l'utilisation des couches froides des mers et eaux profondes comme source de froid, pour combattre la chaleur dans les pays chauds ». 636 153. Demandé le 11 octobre 1926, publié le 3 avril 1928.
– (1928b). « Sur l'utilisation de l'énergie thermique des mers ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 186 (juin 1928), p. 1491–1496.
– (1928c). « Turbine à vapeur pour très basses pressions ». 637 160. Demandé le 2 novembre 1926, publié le 4 avril 1928.
Colli, Jean-Claude (1979). *Les énergies nouvelles*. Fayard.
COMES (1981). *Rapport sur l'état des connaissances et des applications de l'énergie solaire*.
Comité biomasse-énergie (1980). *Étude et recommandations pour l'exploitation de l'énergie verte*. COMES, mai 1980.
Commissariat général au Plan (1989). *La France, l'Europe. X^e Plan 1989-1992*. La Documentation française.
– (1990). *Stratégies pour l'an 2000. Travaux des Commissions*. La Documentation française, septembre 1990.
Commissariat général au Plan. Commission de l'électricité (1946). *Plan de modernisation et d'équipement. Premier rapport de la Commission de l'électricité*. Novembre 1946.
Commissariat général au Plan. Commission de l'énergie (1953). *Deuxième plan de modernisation et d'équipement. Rapport de la Commission de l'énergie*. Novembre 1953.
– (1966). *Cinquième Plan Rapport général de la Commission de l'énergie*. La Documentation française.

Commissariat général au Plan. Commission de l'énergie (1975). *Septième Plan. Rapport de la commission de l'énergie sur les orientations de la politique énergétique.*

– (1976). *Septième Plan. Rapport de la commission de l'énergie sur les orientations de la politique énergétique. Complément.*

Commissariat général au Plan. Commission de modernisation et d'équipement des TOM (1954). *Deuxième Plan de modernisation et d'équipement. Rapport général de la Commission d'étude et de coordination des Plans de modernisation et d'équipement des Territoires d'Outre-mer*. Avril 1954.

Commissariat général au Plan. Commission énergie et matières premières (1980c). viii$^{e}$ *Plan. Rapport de la Commission énergie et matières premières. La relève du pétrole*. La Documentation française.

Commission d'études et de coordination des Plans de modernisation et d'Équipement de l'Algérie, de la Tunisie et du Maroc (1954). *Deuxième Plan de modernisation et d'équipement. Rapport général de la Commission*. Rapp. tech.

Conseil d'administration du Génie civil (1880). « A nos lecteurs ». In : *Le Génie civil* 1.1 (novembre 1880), p. 1.

Constantin, Louis (1923). « Sur l'utilisation de l'énergie du vent au moyen des bateaux à voiles et des bateaux à turbines aériennes ». In : *Recherches et inventions* 55 (avril 1923), p. 401–406.

– (1924a). « Accouplement direct de turbines aériennes et de génératrices électriques ». 578.714. Juillet 1924.

– (1924b). « Centrale électrique actionnée par turbines aériennes ». 577.532. Février 1924.

– (1924c). « Système d'accouplement de turbines et de génératrices électriques ». 577.094. Février 1924.

– (1924d). « Une source inépuisable d'énergie à bon marché : le vent ». In : *La Nature* 2620 (juin 1924), p. 395–400.

– (1928). « Le problème de la propulsion des navires par le vent ». In : *La Nature* 2776 (janvier 1928), p. 14–17.

Constantin, Louis et Gaston Daloz (1919). « Véhicule mû par le vent ». 548.307. Juin 1919.

– (1922). « Perfectionnements aux bateaux et autres véhicules à turbines aériennes ». 557.222. Octobre 1922.

Constantin, Louis, Gaston Daloz et Raymond Joëssel (1922). « Sur un bateau qui remonte le vent en se servant du vent lui-même comme puissance motrice ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 175 (octobre 1922).

Côte, Etienne-F. (1907). « Une nouvelle houille ». In : *La houille blanche* 65 (décembre 1907).

Couchouron, Jean-François (1992). *Moyens d'essais en hydrodynamique. Présentation des laboratoires, fiches descriptives des moyens d'essais*. IFREMER.

Coyne, André (1939a). « La captation de la houle ». In : *Revue générale de l'hydraulique* (mars 1939). Conférence faite devant la Société hydrotechnique de France le 4 juin 1926, p. 78–89.

CRAS (1885a). In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 101, p. 455–456.

– (1885b). In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 101, p. 977.

D, G (1883). « Utilisation des marées ». In : *La Nature* (mars 1883), p. 234.

Dallery, Francis (1955). *Sur la côte d'Opale : les rivages de la Somme, autrefois, aujourd'hui, demain*. Picard.

Daloz, Gaston (1921). « Bateau éolien ». In : *Recherches et inventions* (janvier 1921), p. 20–28.

Dantin, Charles (1921). « Projet d'utilisation des marées dans la baie de Rothéneuf ». In : *Le Génie civil* 2033 (juillet 1921), p. 102–106.

– (1930). « TTurbine hydrauliques et aériennes, système Thomas ». In : *Le Génie civil* 2465 (septembre 1930), p. 298–300.

Darrieus, Georges (1925). « Turbine having its rotating shaft transverse to the flow of the current ». 1 820 529.

– (1931a). « Essais de moulins à vent système Flettner à axe vertical pour la production d'énergie électrique ». In : *La Nature* 2869 (novembre 1931), p. 473–474.

– (1952). « Les progrès de l'industrie électrique ». In : *Le Génie civil* 3321 (mars 1952). Conférence à la Société des ingénieurs civils de France, p. 113–114.

D'Arsonval, Arsène (1881a). « Utilisation des forces naturelles. Avenir de l'électricité ». In : *Revue scientifique de la France et de l'étranger* (septembre 1881), p. 370–372.

– (1881b). « Utilisation des forces naturelles par l'électricité ». In : *Revue scientifique de la France et de l'étranger* (octobre 1881), p. 550–556.

DATAR (1980). *La France des énergies nouvelles*.

De Graffigny, Henri (1907). *Les moteurs électriques*. Librairie des publications populaires.

De la Goupillière, Haton (1889). *Cours de machines*. Dunod.

De l'Angle Beaumanoir, Raoul (1889). « Utilisation de la puissance du vent pour produire et emmagasiner de l'énergie électrique ». In : *Annales industrielles* (août 1889), p. 453–463.

De Launay, Louis (1918). « L'utilisation des forces naturelles ». In : *La Nature* 2340 (septembre 1918), p. 68–72.

De Montille, Henri (1929). *Les progrès à attendre du rayonnement solaire comme source d'énergie, étude comparative avec les formes d'énergie disponibles dont l'utilisation reste à peine organisée*. Impr. De Stevens frères.

De Nansouty, Max (1893). « Les moulins à vent et les turbines atmosphériques à l'Exposition de Chicago ». In : *Le Génie civil* (juillet 1893), p. 133–134.
– (1894a). *Actualités scientifiques*. C Reiwald.
– (1894b). « Les moulins à vent : leur emploi agricole : leurs perfectionnements : moulins à vent à roues multiples ». In : *Le Génie civil* (septembre 1894), p. 277–278.
– (1894c). « L'utilisation de la force du vent ». In : *Le Génie civil* (mars 1894), p. 273–274.
– (1894d). « L'utilisation de la force motrice des vagues ». In : *Le Génie civil* 24.604 (janvier 1894), p. 147.
– (1910). « Utilisation du flux et du reflux de la mer ; l'installation de M Bouchaud-Praceiq à l'embouchure de la Gironde ». In : *Le Temps* 17953 (août 1910).
De Ricou, Charley (1955a). « L'énergie éolienne dans les TOM ». In : *Industries et travaux d'Outre-mer* (mars 1955).
– (1955b). « L'utilisation de l'énergie éolienne en zone aride ». In : *Industries et travaux d'Outre-mer* (août 1955).
De Rouville, André Gervais (1957). « Énergie mécanique de la houle : utilisation ». In : *La houille blanche* 5 (novembre 1957), p. 784–806.
De T, C (1883). « Les moulins de marée ». In : *La Nature* (janvier 1883), p. 99–100.
De T, C. (1883). « Les moulins de marées ». In : *La Nature* (mars 1883), p. 227–228.
De Varigny, Henri (1932). « L'utilisation industrielle du soleil ». In : *La revue générale des sciences pures et appliquées* 43.19 (février 1932), p. 556–559.
De Waleffe, Maurice (1919). « Le problème du charbon ». In : *Le Temps* 19 (novembre 1919), p. 2.
Debré, R (1911). « Utilisation électrique du vent ». In : *La Nature* 1984 (juin 1911), p. 11–14.
Decoeur, P. (1890). « Mémoire « Sur un appareil hydraulique avec un nouveau modèle de turbine pour l'utilisation continue de la force des marées » présenté par Maurice Lévy ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* (mai 1890), p. 991–992.
Decoeur, Paul (1890). « Utilisation continue de la force des marées au moyen de digues prévues à l'embouchure de la Seine ». In : *Le Génie civil* (août 1890), p. 130–132.
Defour, André (1920). « Utilisation des marées pour la production d'une énergie gale pendant toute la durée de chaque marées ». 528.110. Septembre 1920.
– (1921). *L'avenir des pays modernes. Production de force motrice et de lumière, chauffage et traitement électrique des minerais par l'utilisation électromécanique des marées*. André Defour.
Delanghe, G. (1925a). « Les théories de l'aérodynamique moderne sur l'effet Magnus et les voiles tournantes Flettner ». In : *Le Génie civil* 2229 (mai 1925), p. 425–433.

– (1925b). « Les théories de l'aérodynamique moderne sur l'effet Magnus et les voiles tournantes Flettner ». In : *Le Génie civil* 2230 (mai 1925), p. 453–457.

Deparis, G (1947). « Générateur éolien d'énergie électrique à axe vertical ». In : *Le Génie civil* 3213 (septembre 1947), p. 355–356.

Deprez, Marcel (1883). « Sur les forces naturelles ». In : *Journal universel d'électricité* (février 1883), p. 146–147.

Dessol, A (1920). « Les ressources du monde en énergie ». In : *La Nature* 2427 (octobre 1920), p. 229–230.

Dessoliers, Hippolyte (1908). « Système de production des pluies à l'aide de revêtements formant aire de surchauffe solaire à la surface des eaux ». 386693A.

Devaux, Patrice (1987). « Les biocarburants ». In : *Maîtrise de l'énergie et recherche : quel bilan ? Quel avenir ?* La Documentation française.

Devaux, Pierre (1934). « Force motrice des vagues et de la houle. La nouvelle station d'essais d'hydrodynamique maritime du phare de Biarritz ». In : *La Nature* 2937 (septembre 1934), p. 260–266.

– (1949a). « L' « énergie thermique » des mers ». In : *La Nature* 3169 (mai 1949), p. 136–140.

– (1949b). « Nouvelles usines « marémotrices » ». In : *La Nature* 3168 (avril 1949), p. 111–115.

– (1949c). « Une nouvelle source d'énergie La chaleur planétaire ». In : *La Nature* 3170 (juin 1949), p. 180–182.

– (1949d). « Une nouvelle source d'énergie. La chaleur planétaire ». In : *La Nature* 3170 (juin 1949), p. 180–182.

– (1950). « Le tunnel du Simplon deviendra-t-il une « usine géothermique » ? » In : *La Nature* 3177 (janvier 1950), p. 23–26.

Dhaille, R (1957). « Technique et rentabilité des dièdres à houle ». In : *Les énergies de la mer*. Actes du colloque tenu à Paris les 13, 14 et 15 juin 1956 organisé par la Société hydrotechnique de France. La Houille blanche.

D'Halluin, Maurice (1942). « Actinométrie et applications de la chaleur solaire ». In : *Le Génie civil* 3075-3076 (janvier 1942), p. 25–29.

Documents algériens (1947). « Le Conseil supérieur de la Recherche scientifique appliquée en Algérie ». In : *Documents algériens* 29 (août 1947).

Dolbert, P-O (1927). « L'usine marémotrice de Rothéneuf ». In : *L'Ouest-éclair* 9414 (août 1927).

Doublet, E. (1926). « L'utilisation de la chaleur solaire. Mouchot ». In : *La Nature* (août 1926), p. 140–142.

Dubos, Bernard-J (1928). *L'atmosphère, source gratuite d'énergie inépuisable dans les régions chaudes et tempérées au Sahara et pour le transsaharien*. Coquemart.

Dubos, Bernard-Jean (1928). « Procédé et appareils pour transformer en énergie utilisable, les variations de la température atmosphérique avec l'altitude ». 670 549.

– (1929). « Procédé et appareils pour transformer en énergie utilisable, les variations de la température atmosphérique avec l'altitude ». 670549 (1ère addition).

– (1931a). « Les usines atmosphériques et la conquête agricole des régions désertiques ». In : *Comptes rendus de l'Académie des sciences coloniales* (décembre 1931).

– (1932). « Procédé et appareils pour la formation artificielle et l'entretien des trombes ». 646006.

– (1935). *Projet d'érection d'un tube météorologique de 600 mètres de haut pour l'Exposition de 1937*. Société d'éditions géographiques, maritimes et coloniales.

– (1939). « Des trombes artificielles dans la défense passive ? » In : *L'aérophile* (mai 1939), p. 101.

Duchêne-Marulaz, Philippe (1987). « Aujourd'hui, l'éolien ». In : *Maîtrise de l'énergie et recherche : quel bilan ? Quel avenir ?* La Documentation française.

Duclaux, Jacques (1950). « L'utilisation du rayonnement solaire ». In : *La Nature* 3182 (juin 1950), p. 164.

Dumas, Maurice (1934). « L'aéro-force Lumière ». In : *Auto-Volt* 66 (novembre 1934).

Durand-Viel, Georges (1946). « Notice nécrologique sur le Docteur Jules Richard ». In : *Bulletin de l'Institut océanographique de Monaco* 892 (janvier 1946). Allocution prononcée à l'Académie des sciences le 26 mars 1945, p. 5–6.

Espitallier, Lieutenant colonel (1890). « L'utilisation pour la force motrice des sources de vapeur naturelles de la Toscane ». In : *Le Génie civil* 64.426 (février 1890), p. 331–334.

Établissements Insol (1941). *L'utilisation de l'énergie solaire pour le chauffage de l'eau par le procédé Insol*.

Exposition universelle de Paris (1878). *Exposition universelle de Paris, 1878. Catalogue général descriptif de l'Exposition, section française. Groupe IV, classe 54, Machines et appareils de la mécanique générale*. Administration.

Fichot, Eugène (1923). *Les marées et leur utilisation industrielle*. Gauthier-Villars.

Figuier, Louis (1882). « L'exposition internationale d'électricité ». In : *L'année scientifique et industrielle* 25, p. 430–479.

Foris (1891). « Emploi du vent comme force motrice pour la commande descience dynamos ». In : *Le Génie civil* (septembre 1891), p. 301–303.

Fortier-Beaulieu, Paul (1923). « Turbine aérienne à axe vertical, à circulation hélicocentripète ». 560.719. Janvier 1923.

– (1924b). « Note sur les essais aérodynamiques de différents modèles de turbines aériennes ». In : *Recherches et inventions* 14 (janvier 1924), p. 525–531.

– (1924c). « Turbine aérienne ». 593.840. Août 1924.

– (1924d). « Turbine aérienne à axe vertical ». 577.695. Février 1924.

Fredouët, Charles (1923a). « Le miracle de la Rance ». In : *L'Ouest-éclair* 7819 (mars 1923).

– (1923b). « Le miracle de la Rance. À qui nous le devrons ». In : *L'Ouest-éclair* 7822 (mars 1923).

– (1923c). « Va-t-on asservir les forces de la mer ? Le miracle de la Rance ». In : *L'Ouest-éclair* 7817 (février 1923).

Frédouët, Charles (1923). « En quoi consistera exactement le miracle de la Rance ? » In : *L'Ouest-éclair* 7821 (mars 1923).

Fusenot, André (1916). « Machine pour l'utilisation des vagues comme force motrice ». 481.537. Avril 1916.

– (1922). « L'utilisation des vagues comme force motrice ». In : *Le Mercure africain* 14 (janvier 1922), p. 16–19.

G, F (1893). « Utilisation des forces naturelles. Moulins à vent ». In : *La lumière électrique* (mars 1893), p. 527–529.

Gagey, R (1904). « Les moulins à vent. Leur travail. Leurs applications en Tunisie ». In : *Bulletin de la direction de l'Agriculture et du Commerce (Tunis)* (janvier 1904), p. 92–123.

Gandillon, Pierre (1925). « La « houille d'or » ». In : *Comptes rendus de l'Association Française pour l'Avancement des Sciences*. 47ème session, p. 171.

– (1930). « La « houille d'or » : Application aux chotts tunisiens ». In : *Comptes rendus de l'Association Française pour l'Avancement des Sciences*. 54ème session, p. 66–71.

– (1932). « Projet de mise en valeur du lac de Macaraïbo au Vénézuela ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 194 (février 1932), p. 556–557.

Gendron, L (1940). « L'utilisation de la chaleur solaire pour le chauffage de l'eau ». In : *Le Génie civil* 3019-3020 (juin 1940), p. 387–390.

Genthial, A (1957). « Séance d'ouverture. Allocution ». In : *Les énergies de la mer. Comptes-rendus des quatrièmes journées de l'hydraulique tenues à Paris les 13, 14 et 15 juin 1956*.

Gentilini, R (1890). « Moulins à vent et turbines atmosphériques ». In : *Le Génie civil* (août 1890), p. 199–202.

Gentilini, R. (1890). « Moulins à vent et turbines atmosphériques ». In : *Le Génie civil* 17.429 (juillet 1890), p. 246–248.

Gervais de Rouville, André (1921). « Sur l'utilisation de l'énergie des marées ». In : *Revue générale de l'électricité* X.18 (novembre 1921), p. 627–931.

Geutch, G (1904). « Les moteurs à vent et leur intérêt du point de vue économique ». In : *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (août 1904), p. 549–556.

Geutch, G. (1904). « Les moteurs à vent et leur intérêt du point de vue économique ». In : *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (avril 1904), p. 283–300.

Gibrat, Robert (1957). « Les usines marémotrices en France ». In : *La Nature* 3267 (juillet 1957), p. 258–261.

Gide, Charles (1902). « La houille blanche ». In : *La semaine littéraire* (décembre 1902).

Ginestous, G. (1929). « Épuration de l'eau par la chaleur solaire ». In : *Recherches et inventions* 180 (juin 1929), p. 225–230.

Ginestous, G (1929a). *L'épurateur solaire familial*. Société anonyme de l'imprimeur rapide.

Ginestous, G. (1931a). « La source chaude d'Aïn-el-Atrous. Son utilisation comme source thermique de force motrice ». In : *La Nature* 2852 (mars 1931). Supplément, p. 236–237.

– (1931b). « Utilisation de l'énergie du vent pour la distillation de l'eau à basse pression ». In : *Congrès d'agronomie du cinquantenaire [du protectorat français en Tunisie]*. Institut national d'agronomie coloniale. 27 avril - 18 mai 1931, p. 642–655.

Girardier, Jean-Pierre (1963). « Les pompes solaires ». Sciences. Université de Dakar.

Gobin (1882). « Utilisation du mouvement des marées ». In : *La Nature* (décembre 1882), p. 71.

Golding, Edward William (1957). « Possibilités d'utilisation économique de l'énergie éolienne ». In : *Sources nouvelles d'énergie et développement économique. Energie solaire. Energie éolienne. Energie des marées. Energie géothermique. Energie thermique des mers.* Nations unies. Département des affaires économiques et sociales.

Gomella, Cyril (1955). « Le problème de la déminéralisation des eaux salines par distillation ». In : *Terres et eaux* 25.

Gougenheim, André et Vsevolod Romanovsky (1957). « Les remontées d'eaux profondes ». In : *Les énergies de la mer*. Actes du colloque tenu à Paris les 13, 14 et 15 juin 1956 organisé par la Société hydrotechnique de France. La houille blanche.

Gouvernement général d'Algérie (1928a). *Assemblée financière. Séance du 22 juin 1928.*

– (1928b). *Assemblée financière. Séance du 31 mai 1928.*

– (1928c). *Assemblée financière. Séance du 6 juin 1928.*

Gradenwitz, Alfred (1908). « L'énergie du soleil comme force motrice ». In : *La Nature* 1829 (juin 1908), p. 2.

Granboulan, Robert (1954). « L'utilisation de très basses chutes par les groupes monoblocs immergés ». In : *La Nature* 3234 (octobre 1954), p. 367–370.

Grasset, Paul (1925). « Bélier maritime à chambre barométrique ». 598.475. Mai 1925.

Gridel, H. (président de session), éd. (1956). *IV$^{èmes}$ Journées de l'hydraulique*. T. I. Question III. Énergie mécanique de la houle : essais sur modèles. Société hydrotechnique de France. Juin 1956.

Groupe de Bellevue (1978). *Projet Alter. Étude d'un avenir énergétique pour la France axé sur le potentiel renouvelable. Esquisse d'un régime à long terme tout solaire*. Syros.

Guillemonat, André (1954). « Un essai industriel de captation de l'énergie solaire à Alger ». In : *Documents algériens* 112 (novembre 1954).

Guilmet, B. (1933). « Distillation de l'eau par la chaleur solaire ». In : *Recherches et inventions* 227 (août 1933), p. 236.

H, E (1883). « Les moulins de marées ». In : *La Nature* (février 1883), p. 164.

Hospitalier, Edouard (1880a). « L'emmagasinement de l'électricité ». In : *La Nature* (avril 1880), p. 305–307.

– (1880b). « L'utilisation des forces naturelles et leur emmagasinement ». In : *La Nature* (novembre 1880), p. 354–355.

– (1880c). « L'utilisation des forces naturelles et leur emmagasinement ». In : *La Nature* (novembre 1880), p. 379–380.

Houdet, Ed (1951). « L'établissement des hélices éoliennes électriques à usage domestique ». In : *Le Génie civil* 3301 (juin 1951).

Huguenin, Albert (1920). « Usine hydraulique utilisant les marées ». 527.846. Décembre 1920.

– (1923). « Roue à aubes pivotantes pour turbines hydrauliques pouvant être parcourues par du fluide moteur suivant deux directions opposées ». 571.35. Octobre 1923.

Hunebelle, Edouard (1922). « L'aéromoteur Costes ». In : *L'Afrique du nord illustrée : journal hebdomadaire d'actualités Nord-Africaine : Algérie, Tunisie, Maroc* (mai 1922).

Imbeaux, Édouard (1925). « Projet de mise en valeur de chutes à créer entre la Méditerrannée et la mer Morte ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 181 (juin 1925), p. 11–15.

Institut économique et juridique de l'énergie (1975). *Alternatives au nucléaire*. Presses universitaires de Grenoble.

Jacquinot, Pierre (1933). « L'utilisation de la force motrice éolienne aux colonies ». In : *Revue internationale des produits coloniaux*, p. 337–341.

Jaudin, Florence (1993). *Convention ADEME BRGM n° 2-07-0024*. BRGM, ADEME, octobre 1993.

Jauvert, P-M (1927). « A propos de l'utilisation des chaleurs tropicales ». In : *La Nature* 2757 (mars 1927). Courrier des lecteurs (Supplément), p. 286.

Joessel, Raymond (1922). « Navires à hélices aériennes pouvant progresser contre le vent ». In : *Bulletin des élèves de l'Ecole nationale supérieure des Mines* (octobre 1922).

Joëssel, Raymond (1918a). « Navire utilisant la poussée du vent pour remonter directement contre lui ». 497.380.

Joëssel, Raymond (1918b). « Système de propulsion des navires par turbines aériennes ». 497.312.

JORF (1919). « Chambre des députés. Débats parlementaires. Séance du 4 juin 1919 ». In : *Journal officielle de la République française*.

– (1928). « Chambre des députés. Débats parlementaires. Séance du 3 décembre 1928 ». In : *Journal officiel de la République française*.

Journal général de l'Algérie de et la Tunisie (1921). « Utilisation de la houille bleue ». In : *Journal général de l'Algérie de et la Tunisie* (mars 1921).

Journal officiel de la République française (1957). « Loi n°57-27 du 10 janvier 1957 créant une Organisation commune des régions sahariennes ». In : *Journal officiel de la République française*.

Journal officiel de la république française (1932). « Chambre des députés. 2e séance du 3 mars 1932 ». In : *Journal officiel de la République française*.

Kervran, Louis (1950). « Barrages-caissons articulés pour usines marémotrices ». In : *Le Génie civil* 3285 (octobre 1950), p. 345–347.

– (1956). « Étude d'un projet d'usine marémotrice à double flot entre Lessay et Carentan (Cotentin) ». In : *Le Génie civil* 3426 (août 1956), p. 285–289.

Kompass international (1925). *Annuaire industriel. Répertoire général de la production française*. Société d'éditions documentaires industrielles.

– (1938). *Annuaire industriel. Répertoire général de la production française*. Société d'éditions documentaires industrielles.

Kuntziger, Jean (1908). « Exposé du principe d'une machine solaire rationnelle ». In : *La Houille blanche* (avril 1908), p. 73–76.

*La Lumière électrique* (1912). « La houille bleue ». In : *La Lumière électrique* 19 (septembre 1912), p. 340–344.

La lumière électrique (1889). « Utilisation de l'énergie des vagues de la mer ». In : *La lumière électrique* 46 (novembre 1889), p. 341–342.

La Nature (1884a). « La turbine atmosphérique ». In : *La Nature* (août 1884), p. 179–180.

– (1884b). « Le pantanémone ». In : *La Nature* (avril 1884), p. 324.

– (1884c). « Turbine atmosphérique ». In : *La Nature* (février 1884), p. 193–194.

– (1889). « Utilisation de la force des vagues ». In : *La Nature* (novembre 1889), p. 357.

– (1907). « L'utilisation des marées ». In : *La Nature(supplément)* (septembre 1907).

– (1911a). « A propos du moteur solaire de M Shuman ». In : *La Nature (supplément)* (décembre 1911).

– (1911b). « A propos du moteur solaire de M Shuman ». In : *La Nature (supplément)* (décembre 1911).

– (1912). « L'utilisation de la chaleur solaire ». In : *La Nature(supplément)* 2054 (octobre 1912), p. 145.

– (1913). « La force motrice par les rayons solaires ». In : *La Nature(supplément)* (mars 1913).
– (1921a). « Á propos de la turbine aérienne ». In : *La Nature* 2442 (janvier 1921). Supplément, p. 25.
– (1921b). « L'aéro-manège ». In : *La Nature* 2476 (septembre 1921). Supplément, p. 86–87.
– (1921c). « Les sources thermales utilisées pour produire de l'énergie ». In : *La Nature* 2444 (février 1921). Supplément, p. 41.
– (1921d). « Utilisation des marées ». In : *La Nature* 2456 (avril 1921), p. 282–287.
– (1922a). « À propos du bateau paradoxal ». In : *La Nature* 2541 (décembre 1922). Supplément, p. 195–196.
– (1922b). « La cuisine solaire ». In : *La Nature* 2530 (septembre 1922), p. 101–102.
– (1922c). « La station marémotrice de l'Aber-Vrac'h (Finistère) ». In : *La Nature* 2517 (juillet 1922), p. 4–5.
– (1922d). « Un bateau paradoxal qui navigue grâce au vent contre vent et courant ». In : *La Nature* 2536 (novembre 1922), p. 305–307.
– (1926a). « A nos lecteurs ». In : *La Nature* (novembre 1926), p. 321–322.
– (1926b). « Le « Barbara », navire à 3 rotors ». In : *La Nature* 2741 (octobre 1926). Supplément, p. 250–251.
– (1926c). « Un navire paradoxal mû par le vent ». In : *La Nature* 2644 (octobre 1926), p. 366–368.
– (1927). « Pour utiliser la chaleur du globe ». In : *La Nature* 2752 (janvier 1927). Courrier des lecteurs (Supplément), p. 46.
– (1931). « Étude sur l'utilisation des marées en France ». In : *La Nature* 2848 (janvier 1931). Critique de l'ouvrage de Georges Moreau, p. 42.
– (1933). « L'aérochargeur ». In : *La Nature* (décembre 1933), p. 526.
– (1952). « Volcans et énergie électrique ». In : *La Nature* 3202 (mars 1952), p. 96.
– (1954). « Le ralentissement de la Terre oblige à définir une nouvelle unité de temps ». In : *La Nature* 3225 (janvier 1954), p. 36.
– (1955a). « Énergie géothermique et eau lourde en Nouvelle-Zélande ». In : *La Nature* 3242 (septembre 1955), p. 356–357.
– (1955b). « L'utilisation de l'énergie solaire ». In : *La Nature* 3247 (novembre 1955), p. 438–445.

La revue générale des sciences pures et appliquées (1931). « L'utilisation indirecte de la chaleur solaire ». In : *La revue générale des sciences pures et appliquées* 24 (décembre 1931), p. 689–690.

La Revue scientifique (1910). « Utilisation du mouvement des vagues de la mer ». In : *La Revue scientifique* (octobre 1910), p. 433.

La Terre marocaine (1937). « G Barre, propriétaire (publicité) ». In : *La Terre marocaine, Revue illustrée* 7.

La Thermique naturelle (1939). « Chauffe-eau solaire à chauffage indirect ». 860.676. Juillet 1939.

Lacroix, Alfred (1946). « Allocution en l'honneur de Jules Richard ». In : *Bulletin de l'Institut océanographique* 892 (janvier 1946), p. 3–4.

Lacroix, G. (1929). « Les moteurs à vent. Les éoliennes électriques Darrieus ». In : *La Nature* 2823 (décembre 1929), p. 547–554.

– (1949). « L'énergie du vent ». In : *La Technique moderne* 41.7-8 (avril 1949), p. 105–111.

– (1950). « Les problèmes électriques soulevés par l'utilisation de l'énergie du vent ». In : *Bulletin de la société française des électriciens* 103 (avril 1950), p. 105–111.

Lancelin, G (1932). « À propos de l'utilisation mécanique du mouvement des vagues ». In : *Recherches et inventions* 209 (février 1932), p. 46–49.

Laporte, Frédéric (1920). « De l'utilisation des courants des marées sur les côtes de France ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 171.171 (décembre 1920), p. 1205–1207.

Laurie, André (1888). *Les exilés de la terre*. J Hetzel et Compagnie.

Lavergne, Gérard (1890). « La question du charbon ». In : *Le Génie civil* VIII.6, p. 90.

Lavinay, Rodolphe et Alfred Beury (1934). « Perfectionnements aux groupes générateurs électriques à moteur éolien ». 787.147.

– (1936). « Perfectionnements aux groupes générateurs électriques à moteurs éoliens ». 787.147.

Le Bon, Gustave (1881a). « Les forces de l'avenir ». In : *Revue scientifique scientifique de la France et de l'étranger* (octobre 1881), p. 269–272.

– (1881b). « Sur l'utilisation des forces naturelles et leur transport ». In : *Revue scienifique de la France et de l'étranger* (juillet 1881), p. 269.

Le courrier d'Ethiopie (1932). « L'utilisation de la chaleur solaire ». In : *Le courrier d'Ethiopie* 17.32 (août 1932), p. 6.

Le Génie civil (1885). « Application des forces naturelles à l'élévation de l'eau ». In : *La Nature* (juillet 1885), p. 221–222.

– (1897). « Utilisation des vagues comme force motrice ». In : *Le Génie civil* (octobre 1897), p. 363–364.

– (1901-09-07). « Utilisation de la chaleur solaire ». In : *Le Génie civil* (septembre 1901-09-07), p. 312.

– (1909). « L'utilisation des marées pour la production de force motrice ». In : *Le Génie civil* 55.1405 (mai 1909), p. 60.

– (1910). « L'utilisation de la force des marées ». In : *Le Génie civil* 57.1464 (juillet 1910), p. 180.

– (1912). « L'utilisation de la force des marées à Mamaroneck ». In : *Le Génie civil* 1559 (avril 1912), p. 518–519.
– (1914). « La station de l'utilisation de l'énergie solaire, au Caire ». In : *Le Génie civil* 1674 (juillet 1914), p. 227.
– (1920). « La production de l'électricité en Palestine, à l'aide des eaux de la Méditerrannée ». In : *Le Génie civil* 77.12 (septembre 1920), p. 240–241.
– (1921). « Projet d'utilisation des marées dans l'estuaire de la Severn (Grande-Bretagne) ». In : *Le Génie civil* 2028 (juin 1921), p. 550–553.
– (1922). « Les disponibilités d'énergie mécanique dans le monde ». In : *Le Génie civil* 2086 (juillet 1922), p. 139–141.
– (1924). « Bateau à cylindres propulseurs système Flettner ». In : *Le Génie civil* 2208 (décembre 1924), p. 526–527.
– (1927). « L'adaptation de la force des marées aux besoins du secteur ». In : *Le Génie civil* 2341 (juin 1927), p. 633–634.
– (1930a). « L'utilisation de l'énergie des marées ». In : *Le Génie civil* 2492 (mai 1930), p. 485–486.
– (1930b). « Production de force motrice par transformation directe de la chaleur solaire ». In : *Le Génie civil* (octobre 1930), p. 350.
– (1933). « L'utilisation de la chaleur solaire au Sahara ». In : *Le Génie civil* (avril 1933), p. 147.
– (1934). « Le projet de barrage dans l'estuaire de la Severn pour la création d'une usine marémotrice en Angleterre ». In : *Le Génie civil* 2650 (mai 1934), p. 492–494.
– (1942). « L'utilisation de l'eau des puits artésiens pour le chauffage thermodynamique ». In : *Le Génie civil* 3090 (août 1942), p. 228.
– (1943). « L'utilisation de la force des marées et de la force du vent ». In : *Le Génie civil* 3118 (octobre 1943). Résumé d'un article de J. Mathivet dans *Le Nord industriel et le Nord charbonnier*, p. 227.
– (1946). « L'utilisation et la mesure de l'énergie du vent ». In : *Le Génie civil* 3183 (septembre 1946). Synthèse d'un article de Pierre Ailleret dans la *Revue générale de l'électricité* (03/1946), p. 1239–1240.
– (1948). « Conduite expérimentale de prise d'eau froide profonde ». In : *Le Génie civil* 3237 (septembre 1948). Résumé d'un article d'André Nizery dans les *Annales des Ponts et chaussées*, p. 354–355.
– (1952). « L'avenir de la production et de la consommation d'énergie électrique ». In : *Le Génie civil* (juillet 1952). Résumé d'un article de Pierre Massé dans la *Revue de l'énergie* (avril 1952), p. 253–254.
– (1955a). « Essai de captation industrielle de l'énergie solaire à Alger ». In : *Le Génie civil* (juin 1955), p. 243.

Le Génie civil (1955b). « Les centrales hydro-solaires ». In : *Le Génie civil* 3401 (juillet 1955), p. 272–274.

– (1955c). « Projet d'utilisation de l'énergie géothermique pour la production de l'aluminium au Chili ». In : *Le Génie civil* 3405 (septembre 1955), p. 359.

– (1956). « La cinquième conférence mondiale de l'énergie ». In : *Le Génie civil* 3433 (novembre 1956), p. 414–416.

Le journal juif (1935). In : *Le Journal juif* (mars 1935), p. 9.

– (1936). In : *Le journal juif* (février 1936), p. 6.

Le Monde (1981). « L'exploitation des gisements géothermiques s'accélère ». In : *Le Monde* (janvier 1981).

Le Mouël, Eugène (1920). « La houille rose ». In : *Le petit journal* 20907 (avril 1920), p. 2.

Le panthéon de l'industrie (1899). « La fabrication des machines agricoles. Une visite chez MM Bompard et Grégoire, à Nîmes ». In : *Le panthéon de l'industrie* 25.1069 (février 1899), p. 5–6.

Leblanc, Maurice (1883). « L'utilisation des forces naturelles en France ». In : *La lumière électrique* (décembre 1883), p. 429–435.

Leblond, A (1885). « Turbine atmosphérique Dumont ». In : *Journal d'agriculture pratique* I, p. 686–687.

Lebreton, Philippe (1974). « L'énergie, comment ? » In : *Après-demain* (novembre 1974).

Lebrun, Hubert (1987). « Le développement industriel de la petite hydraulique ». In : *Maîtrise de l'énergie et recherche : quel bilan ? Quel avenir ?* La Documentation française.

L'écho d'Alger (1926). « Société méditerranée de la houille bleue ». In : *L'écho d'Alger. Journal républicain du matin* 6086 (juin 1926).

Legrand, Max-Albert (1918). *Aux savants, aux ingénieurs, aux industriels de France : La houille bleue : Comment la mer peut nous la donner par l'intermédiaire de l'appareil « hydro-pneumatique »*. Jouve.

– (1920). « La fin de la vie chère ». In : *La revue mondiale* (janvier 1920).

– (1921). « Utilisation de la force des vagues ». In : *La Nature* 2491 (décembre 1921), p. 431–432.

– (1923). « La houille bleue ». In : *Demain* 63 (mars 1923), p. 346–349.

Lejeune, Georges (1962). « Les limitations des distillateurs solaires type serre et l'amélioration possible du rendement par séparation des fonctions ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* (septembre 1962).

Lémonon, E-H (1920). *Les moteurs à vent*. E-H Lémonon.

Lémonon, H (1921). « Utilisons la « houille bleue » ». In : *La Nature* 2482 (octobre 1921), p. 278–283.

Lémonon, H. (1921). « Utilisons la « houille bleue » ». In : *La Nature* 2484 (novembre 1921), p. 310–316.

Lequesne et Lefebvre (1883). « Le panémone ». In : *La Nature* (juillet 1883), p. 107–108.

Les Amis de la terre. Commission de l'énergie (1978). « L'énergie en France. Deuxième partie. Transition et alternatives ». In : *La Gueule ouverte* 198 (février 1978).

Les techniques nouvelles (1954). « L'hydraulique pastorale sur les Hauts-plateaux d'Oranie. Moteurs éoliens et moteurs tthermique dans l'équipement des points d'eau ». In : *Les techniques nouvelles* 61 (janvier 1954), p. 5–8.

*L'Ouest-éclair* (1921). « L'utilisation de l'énergie des marées ». In : *L'Ouest-éclair* 7400 (mai 1921).

– (1928). « Publication de société : Société d'entreprises hydrauliques et d'utilisation industrielle des marées ». In : *L'Ouest-éclair* 9820 (septembre 1928).

L'Ouest-éclair (1930). « Une conférence va se donner à Cherbourg sur l'énergie des marées ». In : *L'Ouest-éclair* 1229 (juillet 1930).

Louppe, Albert (1923). *Rapport fait au nom de la Commission des chemins de fer et transports et de l'outillage national, chargée d'examiner le projet de loi, adopté par la hambre des députés, relatif à la création d'une station marémomotrice d'essai à l'Aber Vrac'h*. Rapp. tech. 2e séance du 21 juin 1923. Sénat.

Lozé, Ed. (1900). *Les charbons britanniques et leur épuisement, recherches sur la puissance du Royaume Uni de Grande Bretagne et d'Irlande*. Ch. Béranger.

Maine et Loire, Conseil général du (1889). « Première session ordinaire ». In : *Rapports du préfet et procès verbal des séances du Conseil*, p. 24–26, 137–150.

Maire, Aimé (1917). 488.662. Décembre 1917.

Mallat de Basillan, Marcel-Jacques-Saint-Ange (1885). *Roman d'un rayon de soleil*. Frinzine Klein et Cie, Editeurs.

Marcotte, Edmond (1930). « Utilisation de la force motrice du vent ». In : *La Revue scientifique* (octobre 1930), p. 595–598.

Masson, Henri (1960). « L'énergie solaire et ses applications ». In : *Annales des Mines* III-IV.

Mathivet, J. (1930). « L'électrification générale de la France, état actuel et développements possibles ». In : *Le Génie civil* XCVII.8 (août 1930), p. 173–176.

Maurain, Charles (1921a). « Les sources d'énergie ». In : *Bulletin officiel de la DRSII* 15 (janvier 1921), p. 1–14.

– (1921b). « Les sources d'énergie ». In : *Bulletin officiel de la DRSII* 16 (février 1921), p. 64–69.

– (1926). « Sur l'utilisation de la chaleur solaire ». In : *Recherches et inventions* 137 (juin 1926), p. 286–293.

Maurel, A (1982). « Énergie solaire et dessalement de l'eau de mer ». In : *La technique de l'eau et de l'assainissement* 430-431 (octobre 1982).

Maynard, Émile (1918a). « Étude sur L'utilisation des marées pour la production de la force motrice ». In : *Revue générale de l'électricité* IV.18 (novembre 1918), p. 653–658.

– (1918b). « Étude sur L'utilisation des marées pour la production de la force motrice ». In : *Revue générale de l'électricité* IV.19 (novembre 1918), p. 697–714.

– (1918c). « Étude sur L'utilisation des marées pour la production de la force motrice ». In : *Revue générale de l'électricité* IV.20 (novembre 1918), p. 749–762.

– (1918d). « Étude sur L'utilisation des marées pour la production de la force motrice ». In : *Revue générale de l'électricité* IV.21 (novembre 1918), p. 793–802.

– (1918e). « Étude sur L'utilisation des marées pour la production de la force motrice ». In : *Revue générale de l'électricité* IV.22 (novembre 1918), p. 823–843.

– (1918f). « Étude sur L'utilisation des marées pour la production de la force motrice ». In : *Revue générale de l'électricité* IV.23 (décembre 1918), p. 865–877.

– (1918g). « Étude sur L'utilisation des marées pour la production de la force motrice ». In : *Revue générale de l'électricité* IV.24 (décembre 1918), p. 903–914.

– (1918h). « Étude sur L'utilisation des marées pour la production de la force motrice ». In : *Revue générale de l'électricité* IV.25 (décembre 1918), p. 947–959.

– (1918i). « Étude sur L'utilisation des marées pour la production de la force motrice ». In : *Revue générale de l'électricité* IV.26 (décembre 1918), p. 997–1007.

Mériel, Yves (1958). « Marémotrice à double flot ». In : *La Nature* 3275 (mars 1958), p. 99.

– (1959). « L'énergie géothermique ». In : *La Nature* 3288 (octobre 1959), p. 356–362.

Micanel, Edgar (1931). « Les industries de la houille blanche ». In : *Revue d'économie politique* (janvier 1931), p. 821–838.

– (1935). « Les industries de la houille blanche ». In : *Revue d'économie politique*, p. 912–956.

Migot, Robert (1922). « La Houille bleue ». In : *Journal général de l'Algérie de et la Tunisie* (janvier 1922).

Ministère de la protection de la nature et de l'environnement (1974). *Rapport sur les relations entre le secteur de l'énergie et l'environnement dans une perspective à long terme*. La Documentation française.

Ministère de l'Agriculture (1897). *Statistique agricoles de la France. Résultats généraux de l'enquête décennale de 1892*. Imprimerie nationale.

– (1936). *Statistique agricole de la France. Résultats généraux de l'enquête de 1929*. Imprimerie nationale.

Ministère de l'Industrie (1977). *Comptes rendus INOVA - Innovation industrielle*. Édition ANRT.

Ministère du commerce, de l'industrie, des postes et des télégraphes (1892). *Exposition universelle internationale de 1900. Rapports du jury international. Groupe VII, agriculture*. Imprimerie nationale.

Moisan, François (1987). « Recherche et maîtrise de l'énergie, éléments de comparaison internationale ». In : *Maîtrise de l'énergie et recherche : quel bilan ? Quel avenir ?* La Documentation française.

Mollin, A (1908). « Les moteurs à vent et leur utilisation à la production de l'énergie électrique ». In : *Revue d'électricité* (janvier 1908), p. 43–46.

Monod, Emile (1890). « Machines et appareils de la mécanique générale ». In : *L'exposition universelle de 1889, Tome III : Sections étrangères et industrielles*. E Dentu.

Moreau, Georges (1931). *Étude sur l'utilisation des marées en France*. Delagrave.

Morel, jean-Bapiste (1946). « Appareil sans fin pour capter et transmettre l'énergie d'un fluide en mouvement ». 938.150.

Moumouni, Abdou (1964). « L'énergie solaire dans les pays africains ». In : *Présence africaine* 2, p. 96–126.

*Sources nouvelles d'énergie et développement économique. Energie solaire. Energie éolienne. Energie des marées. Energie géothermique. Energie thermique des mers.* (1957). Département des affaires économiques et sociales. Nations Unies.

Neel, D (1985). « Les aides financières solaires de l'AFME ». In : *Le solaire dans l'Ouest*. AFME, AFEDES.

Nizery, André (1946). « Étude sur les possibilités d'utilisation de l'énergie thermique des mers ». In : *Bulletin de l'Institut océanographique* 906 (décembre 1946), p. 1–46.

Noyer, Jean (1926). « L'avenir économique de la Bretagne (applications pratiques de la houille bleue) ». Thèse de doct. Université de Paris, faculté de droit.

ONRSI (1925). « Concours organisé par la Résidence Générale de France à Tunis et l'ONRSI, pour l'épuration et la distillation de l'eau ». In : *Recherches et inventions* 108 (janvier 1925), p. 162.

– (1926a). « Concours organisé par la Résidence Générale de France à Tunis et l'ONRSI, pour l'épuration et la distillation de l'eau ». In : *Recherches et inventions* 126 (mars 1926), p. 167.

– (1926b). « Création d'un Comité italien pour l'examen des inventions ». In : *Recherches et inventions* 142 (septembre 1926), p. 634–635.

– (1927). « Concours relatif à la distillation des eaux par l'action de la chaleur solaire ». In : *Recherches et inventions* 154 (juin 1927), p. 205–215.

– (1929). « Deuxième rapport sur le concours relatif à la distillation des eaux par la chaleur solaire ». In : *Recherches et inventions* 181 (octobre 1929), p. 27.

Ouest-France (1947). « L'ingénieur François Baudot expose à nos édiles plans et projets d'utilisation de la « houille bleue »... ainsi que l'éventuelle création du port international Napana ». In : *Ouest-France* (juin 1947).

Pasteur, Félix (1928). « Utilisation thermique de la radiation solaire ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* (juillet 1928), p. 30–32.
– (1932). « Utilisation de la chaleur solaire ». In : *Revue de Génie militaire* (janvier 1932), p. 29–53.
– (1933). « Hydrogenèse aérienne et terrestre ». In : *La Nature* 2902 (avril 1933), p. 299–306.
– (1937). « Le dynamisme solaire ». In : *Revue des deux mondes* (octobre 1937).
– (1942). « L'utilisation pratique de la chaleur solaire ». In : *Le Génie civil* 3087 (juin 1942), p. 169–173.
Pelissier, G (1892a). « L'utilisation des forces naturelles. Moulins à vent ». In : *La Lumière électrique* (avril 1892), p. 65–72.
– (1892b). « Utilisation des forces naturelles. Les moteurs marins ». In : *La Lumière électrique* (mai 1892), p. 19.
Perret, Paul (1920). « La houille rose ». In : *Le journal amusant* 39 (janvier 1920), p. 15.
Perrot, Marcel (1963). *La houille d'or ou l'énergie solaire*. Fayard.
Perrot, Marcel et Maurice Touchais (1963). « L'énergie solaire a-t-elle un avenir industriel ? » In : *Revue des questions scientifiques* (avril 1963).
Perruche, Lucien (1947). « Les pompes à chaleur dans le monde ». In : *La Nature* 3132 (mars 1947), p. 95.
Pierre, Bernard (1985). « Les échangeurs de chaleur, éléments essentiels pour la maîtrise de l'énergie ». In : *Maîtrise de l'énergie et recherche. Quel bilan, quel avenir ?* La Documentation française.
Pinard, Frédéric et Raphaël Sala (1925). « L'utilisation de la force motrice des vagues et le système Pinard-Sala ». In : *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (février 1925), p. 119–134.
Présence africaine (1956). « Le fonds d'investissement pour le développement économique et social des Territoires d'Outre-mer ». In : *Présence africaine* XI (juin 1956), p. 47–56.
Prunieras, Jean (1966). « Contribution à la mise au point des aérogénérateurs dans les établissements de signalisation maritime ». In : *Mécanique électricité* 198 (avril 1966), p. 49–60.
Pyramont, Gérard (1920). « Une nouvelle turbine aérienne à axe vertical ». In : *La Science et la vie* 51 (juin 1920), p. 77–80.
Rachilde (1919). « La houille jaune ». In : *Le journal amusant* 28 (novembre 1919), p. 15.
Ramakers, L (1905). « Nouvel aéro-moteur ». In : *La Nature* (décembre 1905), p. 12–14.

Ramunni, Girolamo (1985). « Le problème de l'économie d'énergie et les grands projets techniques de l'entre-deux-guerres. L'utilisation de l'énergie des mers ». In : *Bulletin d'histoire de l'électricité* 5 (juin 1985).

Rateau, Auguste (1898). « Les turbo-machines ». In : *Revue de mécanique* (mai 1898), p. 477–494.

Razous, Paul (1908). « Utilisation des forces naturelles et la production de l'électricité ». In : *Comptes rendus de la 37ème session de l'Association française pour l'avancement des sciences*. Juillet 1908, p. 195–203.

– (1910). « Utilisation des marées pour la production de force motrice ». In : *Comptes rendus de la 39ème session de l'Association française pour l'avancement des sciences*. Août 1910, p. 108–131.

Région Pays de la Loire et AFME (1986). *La maîtrise de l'énergie dans les Pays de la Loire. Gisements, atouts, enjeux*. Septembre 1986.

Renaud, Paul (1899). « L'électrotechnie agricole en Allemagne ». In : *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (janvier 1899).

Richard, Gustave (1893). « Les moteurs secondaires à l'Exposition universelle ». In : *Revue technique de l'Exposition universelle de 1889, 6e partie, Tome II,Chaudières à vapeur et machines thermiques*. E Bernard et Cie.

– (1894). « La mécanique générale américaine l'Exposition de Chicago. Les moulins à vent ». In : *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (septembre 1894), p. 638–678.

– (1898). « Expériences de M E-C Murphy sur les moulins à vent ». In : *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (avril 1898), p. 509–521.

Richard, Jules (1907). *L'océanographie*. Vuibert et Nony.

– (1927). « Sur la distillation des eaux salées au moyen de la chaleur solaire ». In : *Recherches et inventions* 160 (décembre 1927), p. 474–475.

– (1929). « Distillation de l'eau par la chaleur solaire ». In : *La Nature* 2804 (mars 1929), p. 196–203.

– (1930). « Sur l'emploi du rotor de Savonius et du dynamomètre de Stevenson pour l'utilisation des vagues de la mer ». In : *Recherches et inventions* (février 1930).

– (1931). « Sur l'utilisation du dynamomètre de Stevenson pour l'utilisation des vagues de la mer ». In : *Bulletin de l'Institut océanographique de Monaco* 583, p. 1–12.

– (1933a). « L'utilisation des mouvements de la mer. L'ondo-pompe de Cattaneo ». In : *La Nature* 2907 (juin 1933), p. 529–533.

– (1933b). « Sur l'utilisation des mouvements de la mer par l'ondo-pompe de F. Cattaneo à Voltri ». In : *Bulletin de l'Institut océanographique de Monaco* 625 (juin 1933), p. 1–20.

Richard, Jules et Alfred Henry (1927). « Sur l'utilisation de la chaleur solaire à la production d'énergie électrique ». In : *La Météorologie* (janvier 1927), p. 1–14.

Richet, Charles (1927). « La chaleur solaire source d'électricité ». In : *La Nature* 2766 (juillet 1927), p. 110.

Richou, G (1890). « Utilisation de la puissance des marées. Projet de M Diamant ». In : *Le Génie civil* 17.431 (août 1890), p. 279–281.

Riedhacker, Arthur (1987). « Les enjeux de la filière bois ». In : *Maîtrise de l'énergie et recherche : quel bilan ? Quel avenir ?* La Documentation française.

Riet, Constant (1926a). « L'utilisation de la force motrice du vent ». In : *Le progrès de Sidi-bel-Abbès* 2476 (février 1926).

– (1926b). « L'utilisation de la force motrice du vent ». In : *Le progrès de Sidi-bel-Abbès* 2477 (février 1926).

– (1926c). « L'utilisation de la force motrice du vent ». In : *Le progrès de Sidi-bel-Abbès* 2479 (février 1926).

– (1926d). « L'utilisation de la force motrice du vent ». In : *Le progrès de Sidi-bel-Abbès* 2487 (avril 1926).

– (1926e). « L'utilisation de la force motrice du vent ». In : *Le progrès de Sidi-bel-Abbès* 2489 (mai 1926).

– (1926f). « L'utilisation de la force motrice du vent ». In : *Le progrès de Sidi-bel-Abbès* 2492 (juin 1926).

– (1926g). « L'utilisation de la force motrice du vent ». In : *Le progrès de Sidi-bel-Abbès* 2493 (juin 1926).

Ringelmann, Maximilien (1892). In : *Journal d'agriculture pratique* II, p. 914.

– (1895a). In : *Journal d'agriculture pratique* II, p. 850–851.

– (1895b). *Traité des machines agricoles, Machines et ateliers de préparation des aliments du bétail*. Librairie agricole de la maison rustique.

– (1898a). « Le matériel agricole de la France ». In : *Revue de mécanique* (avril 1898), p. 674–677.

– (1898b). « Revue des perfectionnements apportés aux machines agricoles. Partie II : machines motrices ». In : *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (mars 1898), p. 318–333.

– (1901). *La mécanique à l'exposition de 1900, Le matériel agricole*. Dunod.

– (1904). « Sur le travail mécanique fourni par les moulins à vent. Note présentée par M. Müntz ». In : *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 141 (octobre 1904), p. 688–689.

Rodot, Michel et Pierre Vasseur (1970). « Introduction ». In : *Cahiers de l'AFEDES* 2 (janvier 1970), p. 9–11.

Rolant, Michel (1985a). « Allocution de la séance de clôture ». In : *Maîtrise de l'énergie et recherche : quel bilan ? Quel avenir ?* Journées organisées dans le cadre de la Fête de l'industrie et de la technologie les 3,4,5,10 et 11 décembre 1985, à La Villette. La Documentation française.

– (1985b). « Les deux âges de la maîtrise de l'énergie ». In : *Revue de l'énergie* 379 (décembre 1985). Art. reproduit dans Leray et De la Roncière (dir), **30 ans de ma\IeC {\^\i }trise d** (2003).

Romanovsky, V. (1942). « Chauffage central naturel et gratuit ». In : *La Nature* 3077 (janvier 1942), p. 19–21.

Rosset, Robert (1962). « Les convertisseurs thermoélectroniques, nouveaux dispositifs pour la transformation directe de la chaleur en électricité ». In : *La Nature* (mai 1962), p. 245–249.

Salle et A Capestan (1957). « Travaux anciens et récents sur l'énergie thermique des mers ». In : *Les énergies de la mer*. Actes du colloque tenu à Paris les 13, 14 et 15 juin 1956 organisé par la Société hydrotechnique de France. La houille blanche.

Samuel, Laurent (1974). « Énergie et pouvoir ». In : *Après-demain* (novembre 1974).

Sancery, Raymond (1925). « Pour utiliser l'énergie du vent : voici une solution nouvelle ». In : *La Science et la vie* 130 (avril 1925), p. 297–302.

Schwob, Louis (1927). « L'application du système de distribution de Thury par courant continu à intensité constante, au projet d'usine marémotrice de la Frénaye (Côtes-du-Nord) ». In : *Le Génie civil* 2336 (mai 1927), p. 500–504.

SEMA-Énergie (1982). *Énergies renouvelables au Sahel. Évaluation des projets*. Ministère de la Coopération et du Développement ; ministère des Relations extérieures ; AFME, mai 1982.

Serra, Louis (1953). « Le vent en France et ses possibilités d'utilisation ». In : *La Météorologie* (octobre 1953), p. 273–292.

Séverin, Jules (1908). *Toute la chimie minérale par l'électricité*. H Dunod et E Pinat.

Siemens, Carl-Wilhem (1881). « Utilisation de la chaleur et des autres forces naturelles ». In : *Revue scientifique* (mars 1881), p. 307–312.

Simonin, Louis (1865). « De l'extraction croissante et de l'épuisement de la houille ». In : *Revue des deux mondes* 60 (décembre 1865). novembre-décembre, p. 267–272.

Smith, Lybrand Palmer (1921). « Water elevating device ». 1.412.424. Février 1921.

Société d'encouragement pour l'industrie nationale (1892). « Prix des arts mécaniques ». In : *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (juillet 1892), p. 413–415.

– (1903a). « Concours de moulins à vent de la Société royale d'agriculture d'Angleterre ». In : *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (septembre 1903), p. 378–404.

– (1903b). « Expériences de M E-C Murphy sur les moulins à vent ». In : *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* (avril 1903), p. 510–521.

Société des ingénieurs civils (1948). « L'utilisation de l'énergie thermique des mers ; Aspects économiques de l'utilisation de l'énergie thermique des mers et problèmes de construction ; Problèmes de fonctionnement d'une usine utilisant l'énergie thermique des

mers ». In : *Le Génie civil* 3222 (février 1948). Conférences d'Albert Caquot, Alexandre Nizery et André Nisolle le 21 novembre 1947, p. 36.

Spiridakis, Michaël (1983). « Récupération de l'énergie des vagues apr les systèmes à déferlement ». Thèse de doct. Université de Nantes, École nationale supérieure de mécanique.

Stolpner, Woulf (1933). « Appareil utilisant les rayons solaires pour l'échauffement de l'eau nécessaire à tous les usages : industriels, commerciaux, ddomestique, notamment pour bains et douches ». 762759. Septembre 1933.

Street, Ch (1884). « Utilisation des forces naturelles. Chutes d'eau, marées ». In : *La lumière électrique* (décembre 1884), p. 361–365.

Tellier, Charles (1885). « Application des forces naturelles à l'élévation des l'eau ». In : *Le Génie civil* (août 1885), p. 285.

– (1890). *La conquête pacifique de l'Afrique occidentale par le soleil*. J Michelet.

Terre et eaux (1955). « Les problèmes de dessalement des eaux saumâtres par échanges d'ions et par distillation ». In : *Terres et eaux* 25, p. 4–31.

Tholomé, Jehan (1929a). « Audace, compétence et ténacité ! » In : *L'Ouest-éclair* (janvier 1929).

– (1929b). « Le problème de l'utilisation industrielle des marées dans la Rance maritime ». In : *L'Ouest-éclair* 9943 (janvier 1929).

– (1929c). « le problème de l'utilisation industrielle des marées dans la Rance maritime ». In : *L'Ouest-éclair* 9941 (janvier 1929).

Tiers Monde (1962). « La conférence de Rome sur les nouvelles sources d'énergie ». In : *Tiers Monde*, p. 492–494.

Tissandier, Gaston (1873). « Préface ». In : *La Nature* 1 (juillet 1873), p. V–VIII.

Tommasi, Ferdinand (1869). *Le flux-moteur ou la marée employée comme force motrice à n'importe quelle distance de la mer*. Eugène Lacroix.

Touchais, Maurice (1984). « L'utilisation industrielle de l'énergie solaire, travaux de l'Université française d'Alger ». In : *L'Algérianiste* 28 (décembre 1984), p. 83–84.

Toussaint, Albert (1920). « Aéromoteurs à ajutages convergents-divergents ». 529.301. Décembre 1920.

– (1923b). « L'aéromoteur à ajutage convergent-divergent (système Toussaint) ». In : *Recherches et inventions* 62 (décembre 1923), p. 553–563.

– (1933). « Note sur quelques résultats nouveaux concernant les aéromoteurs ». In : *Recherches et inventions* 225 (juin 1933), p. 159–167.

Troller, A (1921). « Le chauffage sans combustible ». In : *La Nature* 2466 (juillet 1921), p. 31–32.

– (1928). « L'énergie thermique des océans. Le procédé Claude-Boucherot ». In : *La Nature* 2786 (juin 1928), p. 504–508.

– (1929). « Une énergie naturelle utilisable. Les lacs glacés des régions boréales ». In : *La Nature* 2817 (septembre 1929), p. 267–270.

Trombe, Félix (1955). « L'utilisation de l'énergie solaire ». In : *La Nature* 3247 (novembre 1955), p. 438–445.

– (1956). « Allocution sur l'utilisation de l'énergie solaire ». In : *Énergie solaire et éolienne. Actes du colloque de New Delhi*. UNESCO, p. 173–174.

Vadot, Louis (1954). « Les centrales hydro-solaires ». In : *La Houille blanche* (septembre 1954), p. 557–568.

– (1957a). « Étude synoptique des différents types d'éoliennes ». In : *La houille blanche* 2 (mars 1957), p. 189–204.

– (1957b). « Le pompage de l'eau par éoliennes ». In : *La Houille blanche* 4 (septembre 1957), p. 496523.

– (1959). « La production d'énergie électrique par éoliennes ». In : *La Houille blanche* 1 (janvier 1959), p. 3–14.

Valembois, J. (1949). « Un manomètre enregistreur de pressions sous-marines pour la détermination des caractéristiques de la houle par la mesure des variations de pression en profondeur ». In : *La houille blanche*, p. 707–715.

Valembois, Jean (1957). « Possibilité de captage de l'énergie de la houle au moyen de résonateurs ». In : *Les énergies de la mer*. Actes du colloque tenu à Paris les 13, 14 et 15 juin 1956 organisé par la Société hydrotechnique de France. La Houille blanche.

Vallaux, Camille (1946). « Jules Richard, l'homme, le savant, l'organisateur ». In : *Bulletin de l'Institut océanographique* 892 (janvier 1946), p. 11–15.

Vallet, eugène (1931). « Il faut se hâter d'entreprendre le transsaharien ». In : *Le Transafricain* 3.23 (août 1931), p. 12–14.

Van Vloten, P. (1926). « La captation de la puissance des vagues. Avantages et avenir du procédé décrit ». In : *Le Génie civil* 2267 (janvier 1926), p. 80–83.

Vergnet, Marc (1987). « Les enjeux [des énergies solaire, éolienne et de la microhydraulique] ». In : *Maîtrise de l'énergie et recherche : quels enjeux ? Quel avenir ?* La Documentation française.

Viala, Pierre (1923). « L'Office national des recherches scientifiques et industrielles et des inventions ». In : *Recherches et inventions* 39 (janvier 1923), p. 3–9.

Viel, A (1927). « A propos de l'utilisation de la chaleur du globe ». In : *La Nature* 2754 (février 1927). Courrier des lecteurs (Supplément), p. 142.

Vigreux, Léon (1887). « Utilisation de la puissance du vent pour produire et emmagasiner de l'énergie électrique ». In : *Le Génie civil* (août 1887), p. 390.

Villers, R (1930). « L'énergie thermique des océans. Les Expériences de M Georges Claude à Cuba ». In : *La Nature* 2843 (octobre 1930), p. 361–365.

Vincent, Maxime (1924). *Réflexions sur l'utilisation future des énergies naturelles*. Fischbacher.

Vincent, Maxime (1933). *Nouvelle réflexions sur l'utilisation future des énergies naturelles*. Fischbacher.

Weiss, Eugène (1919). « Progrès dans l'utilisation des moteurs à vent ». In : *La Nature* 2415 (juillet 1919), p. 39–43.

– (1920). « Les turbines à vent ». In : *La Nature* 2429 (octobre 1920), p. 257–259.

– (1921a). « La turbines aérienne Costes ». In : *La Nature* 2476 (juillet 1921), p. 87–88.

– (1921b). « Les meilleures formes de turbines à vent ». In : *La Nature* 2457 (mai 1921). Supplément, p. 155–156.

World power conference (1929). *Power resources of the world (potential and developed)*. World power conference.

# Bibliographie


Akrich, Madeleine (1988). « La recherche pour l'innovation ou l'innovation pour la recherche ? Le développement du photovoltaïque en Polynésie ». In : *Culture technique*, p. 318–329.

Andersson, Jenny et Pauline Prat (2015). « Gouverner le « long terme ». La prospective et la production bureaucratique des futurs en France ». In : *Gouvernement et action publique* 3 (mars 2015).

Arrus, René (1985). *L'eau en Algérie, de l'impérialisme au développement*. Presses universitaires de Grenoble.

Banal, Michel (1996). « Les énergies nouvelles étudiées en France après 1945 ». In : *Histoire de l'électricité en France. Tome troisième. 1946-1987*. Fayard, p. 142–168.

– (1997). « Histoire de l'énergie marémotrice en France ». In : *La houille blanche* 3, p. 14–15.

Barbier, Paul (2000). « De d'Arsonval à l'OTEC (1881-1986) : un siècle de recherches sur l'énergie thermique des mers ». In : *Bulletin d'histoire de l'électricité* 35, p. 19–36.

Barjot, Dominique (1994). « Équiper, produire et transporter ». In : *Histoire de l'électricité en France. Tome II, 1919-1946*. Fayard, p. 629–692.

– (2002). « Les entreprises françaises et l'électrification de l'Afrique du Nord : le cas de la Société générale d'entreprises ». In : *Outre-mers* 334-335.

Barreau, Joël, Jean Guiffan et Jean-Louis Liters (1992). *Un grand lycée de province : le lycée Clémenceau de Nantes dans l'histoire et la littérature depuis le Premier Empire*. Thonon-les-Bains : l'Albaron.

Bastin, Antoine et Jean-Yves Bernard (1996). « Recherche et développement pour l'énergie électrique : la Direction des études et recherches d'Électricité de France ». In : *Histoire de l'électricité en France. Tome troisième 1946-1987*. Fayard, p. 417–493.

Beltran, Alain (1987). « Les pouvoirs publics face à l'innovation. Développement de l'électricité et adaptation du cadre juridique (années 1880-années 1920) ». In : *Histoire, économie et société* 6.2. 2e trimestre, p. 157–180.

Beltran, Alain et Patrice Carré (2016). *La vie électrique. Histoire et imaginaire*. Belin.

Beltran, Alain et Patrice A Carré (2000). « Une fin de siècle électrique ». In : *Les cahiers de médiologie* 10 (février 2000).

Beltran, Alain et Patrice Alexandre Carré (1991). *La fée et la servante*. Belin.

Benoît, Serge (1985). « De l'hydro-mécanique à l'hydro-électricité. Le rôle des sites hydrauliques anciens dans l'électrification de la France : 1880-1914 ». In : *La France des électriciens. 1880-1914*. Presse universitaire de France, p. 5–36.

– (1991a). « La force motrice : transport et divisibilité ». In : *Histoire générale de l'électricité en France. Tome premier, Espoirs et conquêtes 1881-1918*. Sous la dir. de François ; Caron et al. Fayard, p. 166–189.

– (1991b). « Système technique et usages de l'électricité ». In : *Histoire générale de l'électricité en France. Tome premier, Espoirs et conquêtes 1881-1918*. Sous la dir. de François ; Caron et al. Fayard, p. 116–197.

– (1998). « La recherche expérimentale en mécanique et ses conséquences iindustrielle : le cas de la construction française de turbines hydrauliques, c. 1870-c. 1950 ». In : *Histoire de la mécanique appliquée. Enseignement, recherche et pratiques mécaniciennes en France après 1880*. Fontanon, Claudine.

Benoît, Serge, Gérard Emptoz et Denis Woronoff (2006). *Encourager l'innovation en France et en Europe. Autour du bicentenaire de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale*. CTHS.

Bensaude-Vincent, Bernadette (1993). « Un public pour la science. L'essor de la vulgarisation au XIX^e^ siècle ». In : *Réseaux* 11.58, p. 47–66.

Bernardini, Jean-Marc (1997). *Le darwinisme social en France (1859-1918). Fascination et rejet d'une idéologie*. CNRS Éditions.

Berthonnet, Arnaud (2003). « L'électrification rurale, ou le développement de la « fée électricité » au coeur des campagnes françaises dans le premier XXème siècle ». In : *Histoire et sociétés rurales* 19. 1er semestre, p. 193–219.

Bidault, Ghislaine (2006). « Une paysage institutionnel transformé. Planification, régionalisation et organisles (1958-1985) ». In : *Le gouvernement de la recherche*. Sous la dir. d'Alain Chatriot et Vincent Duclert. La Découverte.

Blondel, Christine (2010). « La reconnaissance de l'électricité médicale et de ses « machines à guérir » par les scientifiques français, 1880-1930 ». In : *Annales historiques de l'électricité* (décembre 2010), p. 38–51.

Bodiguel, Jean-Luc (2006). « La DATAR : quarante ans d'histoire ». In : *Revue française d'Administration publique* (mars 2006).

Bonnefille, René (1976b). « Les réalisations d'Électricité de France concernant l'énergie marémotrice ». In : *La Houille blanche* 2 (avril 1976), p. 87–149.

Bonneuil, Christophe (1991). *Des savants pour l'Empire. La structuration des recherches scientifiques coloniales au temps de la « mise en valeur » des colonies françaises, 1917-1945*. ORSTOM Éditions.

Bonneuil, Christophe et Jean-Baptiste Fressoz (2013). *L'événement anthropocène*. Seuil.

Bonneuil, Christophe, Céline Pessis et Sezin Topçu (2015). « Introduction. Pour en finir avec les « Trente glorieuses » ». In : *Une autre histoire des Trente glorieuses. Modernisation, contestations et pollutions dans la France d'après-guerre*. Sous la dir. de Christophe Bonneuil, Céline Pessis et Sezin Topçu. La Découverte.

Bonneuil, Christophe et Dominique Pestre (2015). « Le siècle des technosciences (depuis 1914) ». In : *Histoire des sciences et des savoirs. 3. Le siècle des technosciences*. Sous la dir. de Christophe Bonneuil et Dominique Pestre. Seuil.

Bordes, Jean-Louis (2010). « Les barrages en France du XVIIIème à la fin du XXème siècle ». In : *Pour mémoire* 9. Hiver, p. 78–118.

Boulat, Régis (2015). « Jean Fourastié, apôtre de la productivité ». In : *Une autre histoire des Trente glorieuses. Modernisation, contestations et pollutions dans la France d'après-guerre*. Sous la dir. de Christophe Bonneuil, Céline Pessis et Sezin Topçu. La Découverte.

Bouneau, Christophe (1994a). « Croissance des réseaux et interconnexion ». In : *Histoire générale de l'électricité en France. Tome deuxième. L'interconnexion et le marché*. Sous la dir. d'Henri Lévy-Leboyer Maurice et Morsel. Fayard, p. 800–852.

– (1994b). « Le transport d'énergie et l'interconnexion ». In : *Histoire générale de l'électricité en France. Tome deuxième. L'interconnexion et le marché*. Sous la dir. d'Henri Lévy-Leboyer Maurice et Morsel. Fayard, p. 777–800.

Bourg, Dominique (1999). « Technique ». In : *Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences*. Sous la dir. de Dominique Lecourt. PUF.

Bouvet, Jacques (2003). « Témoignage. » In : *30 ans de maîtrise de l'énergie*. ATEE.

Bouvier, Yves (2009). « Qui perd gagne. La stratégie industrielle de la Compagnie générale d'électricité dans le nucléaire, des années 1960 à la fin des années 1980 ». In : *État et énergie. XIX$^{e}$-XX$^{e}$ siècles*. Comité pour l'histoire économique et financière de la France.

– (2012a). « Économiser plus pour consommer plus. Les ambiguïtés de la communication d'EDF au temps des économies d'énergie ». In : *Annales historiques de l'électricité* 10 (janvier 2012), p. 31–42.

– (2012b). « Les transitions énergétiques dans l'histoire, entre succession des techniques et sédimentation des enjeux ». In : *Les défis énergétiques du XXIe siècle*. Sous la dir. d'Yves Bouvier. 2. Les défis énergétiques du XIXe siècle. P.I.E.-P. Lang, p. 23–36. isbn : 9789052018546.

– (2016). « Renouveler l'Europe de l'énergie depuis les années 1950 ». In : *L'Europe en transitions. Énergie, mobilité, communication. XVIII$^{e}$-XXI$^{e}$ siècles*. Nouveau monde.

Bouvier, Yves et Sophie Pehlivanian, éds. (2013). *Les politiques publiques de l'énergie solaire*. Victoires éditions, décembre 2013.

Cardot, Fabienne (1991a). « Le milieu des électriciens ». In : *Histoire générale de l'électricité en France. Tome premier, Espoirs et conquêtes 1881-1918*. Sous la dir. de François ; Caron et al. Fayard, p. 17–53.

– (1991b). « L'électricité, merveille du siècle ». In : *Histoire générale de l'électricité en France. Tome premier, Espoirs et conquêtes 1881-1918*. Fayard, p. 212–245.

Caron, François (1991). « La distribution : des installations privées aux centrales. Les solutions techniques ». In : *Histoire générale de l'électricité en France. Tome premier, Espoirs et conquêtes 1881-1918*. Sous la dir. de François ; Caron et al. Fayard, p. 394–399.

– (1997). *Les deux révolutions industrielles du* XX*e siècle*. Albin Michel.

– (2010). *La dynamique de l'innovation. Changement technique et changement social (XVIe-XXe siècles)*. Gallimard.

Carré, François (2001). « Les grandes expéditions océanographiques 1900-1956 ». In : *Sous la mer, Le sixième continent, Actes du colloque international tenu à l'Institut catholique de Paris (8-10 décembre 1999)*. Presses de l'Université Paris-Sorbonne.

Chaib, Sabah (2016). « Les coopérants français en Algérie (1962-1966). Récits croisés pour une ébauche de portrait ». In : *Cahiers d'études africaines* 221 (janvier 2016).

Charle, Christophe (2012). *Discordance des temps. Une brève histoire de la modernité*. Armand Colin.

Chartier, Philippe (2003). « Témoignage. » In : *30 ans de maîtrise de l'énergie*. ATEE.

– (2015). « L'évolution de la politique de recherche en matière d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables ». In : *Pour mémoire* (juin 2015).

Chauvin-Michel, Marion (2013). « Architectures solaires et politiques énergétiques en France ». In : *Annales historiques de l'électricité* (décembre 2013), p. 27–39.

Chélini, Michel-Pierre (2009). « Le charbon français de 1914 à 1946. Une modernisation limitée ». In : *État et énergie* XIX$^e$ - XX$^e$ *siècle*. Comité pour l'histoire économique et financière de la France, p. 109–127.

Chessel, Marie-Emmanuelle (2012). *Histoire de la consommation*. La Découverte.

Claverie, Maurice (2011). « Du PIRDES au PIRSEM, Les PIR dans la politique de la recherche au CNRS ». In : *Energies solaires, illuminer leur avenir sous l'éclairage de l'histoire*. Sous la dir. de Comité pour l'histoire du CNRS.

Cloarec, Gisèle et Christophe Perrocheau, éds. (2012). *Rendre possible. Du Plan construction au PUCA : 40 ans de réalisations expérimentales*. PUCA.

Cohen, Yves et Dominique Pestre (1998). « Présentation ». In : *Annales. Histoire, sciences sociales*.

Comité d'histoire du ministère de l'Environnement (2007). « L'administration centrale des politiques publiques de l'Environnement et du Cadre de vie. Table ronde de la journée d'études consacrée à l'histoire du ministère de l'Environnement et de la Qualité de vie, 15 janvier 2007 ». In : *Pour mémoire*.

Comité pour l'histoire économique et financière de la France, éd. (2009). *Qui perd gagne. La stratégie industrielle de la Compagnie générale d'électricité dans le nucléaire, des années 1960 à la fin des années 1980*. Comité pour l'histoire économique et financière de la France.

Cooper, Frederic (2013). « Conflits, réformes et décolonisation. La situation coloniale mise en cause ». In : *Les empires coloniaux. XIX$^{e}$-XX$^{e}$ siècles*. Points.

Dalmasso, Anne et Éric Robert (2007). « Recherche et innovation dans l'industrie hydraulique : Neyrpic-sogreah daes années 1930 aux années 1960 ». In : *Annales historiques de l'électricité* 5 (janvier 2007), p. 47–62.

Dard, Olivier (1998). « Paroles d'experts, représentations et mémoires : le cas des modernisateurs ». In : *Territoires contemporains. Bulletin de l'Institut d'histoire contemporaine* 5, p. 33–45.

Daumas, Maurice, éd. (1978). *Les techniques de la civilisation industrielle : énergie et matériaux*. PUF.

David, Paul A. (1985). « Clio and the economics of QWERTY ». In : *The American economic review* 75.2 (mai 1985), p. 332–337.

Debeir, Jean-Claude., Jean-Paul. Deléage et Daniel. Hémery (2013). *Une histoire de l'énergie. Les servitudes de la puissance*. Flammarion. isbn : 9782081293618.

Defaye, Serge (2016). « Chauffage collectif et industriel au bois : un développement tributaire du baril de pétrole et des politiques publiques ». In : *La revue de l'énergie* 630 (mars 2016).

Demagny-Van Eyseren, Armelle (2009). « La politique pétrolière durant les Trente glorieuses ». In : *État et énergie. XIX$^{e}$-XX$^{e}$ siècle*. Comité pour l'histoire économique et financière de la France, p. 357–369.

Denord, François et Paul-André Rosenthal (2013). « Comment lier l'économique et le social ? Une analyse structurale des lieux d'expertise sous le régime de Vichy ». In : *Gouvernement et action publique*.

Desvignes, François (1970). « AApplication terrestres des photopiles solaires ». In : *Cahiers de l'AFEDES* (janvier 1970), p. 54–62.

Dubois, Jean (1996). « La société de consommation électrique ». In : *Histoire de l'électricité en France. Tome troisième. 1946-1987*. Sous la dir. d'Henri Morsel. Fayard.

Duclert, Vincent (2004). « La naissance de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique. La construction d'un modèle partagé de gouvernement dans les années soixante ». In : *Revue française d'Administration publique* 112.4, p. 647–658.

Dumaine, A-L (1955). « La signification réelle du second plan d'Équipement et de modernisation des Territoires d'Outre-mer ». In : *Présence africaine* I-II (janvier 1955), p. 66–93.

Dupas, Agathe (2013). « L'évaluation de la consommation d'énergie afin d'agir sur sa production en France : prévision, prospective et planification ». Mémoire de master dirigé par Pierre Teissier. Mém.de mast. Université de Nantes.

Edgerton, David et Dominique Pestre (1998). « De l ' innovation aux usages : Dix thèses éclectiques sur l ' histoire des techniques ». In : *Annales. Histoire, sciences sociales* 5.4, p. 815–837.

Étienne, Claire et Julie Girard (2007). « Ville nouvelle de Val-de-Reuil. Un patrimoine en devenir ». In : *Histoire urbaine* 10.3 (mars 2007), p. 77–100.

Évrard, Aurélien (2013). *Contre vent et marées. Politiques publiques des énergies renouvelables*. Presses de Sciences Po.

Fernandez, Sara (2014). « Gouverner les eaux depuis 1945. Internationalisation et intensification des flux de capitaux, de techniques et de modèles ». In : *Le gouvernement des technosciences. Gouverner le progrès et ses dégâts depuis 1945*. La Découverte.

Flichy, Patrice (2003). *L'innovation technique. Récents développements en sciences sociales. Vers une nouvelle théorie de l'innovation*. La Découverte.

Fontaine, Marion et Xavier Vigna (2014). « La grève des mineurs de l'automne 1948 en France ». In : *Vingtième siècle. Revue d'histoire*, p. 21–34.

Fontanon, Claudine (1998). « La naissance de l'aérodynamique expérimentale et ses applications à l'aviation. Une nouvelle configuration socio-technique ». In : *Histoire de la mécanique appliquée. Enseignement, recherches et pratiques mécaniciennes en France après 1880*. Sous la dir. de Claudine Fontanon. ENS Éditions, p. 57–88.

– (2004). « Eiffel, Darrieus et l'aviation ». In : *Le Paris des Centraliens, bâtisseurs et entrepreneurs*. Sous la dir. de Béatrice De Andia. Action artistique de la ville de Paris, p. 185–189.

– (2010). « Stephane Drezwiecki, concepteur de sous-marins au service des marines russes et françaises ». In : *Actes d'història de la ciència i de la tècnica* 3.2, p. 51–64.

Fredj, Claire et Marie-Albane De Suremain (2013). « Un Prométhée colonial ? Encadrement et transformation des sociétés ». In : *Les empires coloniaux*. Sous la dir. de Pierre Singaravélou. Points, p. 257–299.

Frémeaux, Jacques et d'Almeida-Topor Hélène (2002). « Rapport de synthèse ». In : *Outre-mers*.

Fréry, Frédéric (2014). « La voiture électrique, une techniologie éternellement émergente ». In : *Harvard Business Review* (janvier 2014).

Fressoz, Jean-Baptiste (2013). « Pour une histoire désorientée de l'énergie ». In : *Entropia* 15. L'histoire désorientée, p. 173–187.

Fressoz, Jean-Baptiste, Frédéric Graber et al. (2014). *Introduction à l'histoire environnementale*. La Découverte.

Fressoz, Jean-Baptiste et François Jarrige (2013). « L'histoire et l'idéologie productiviste. Les récits de la « révolution industrielle » après 1945 ». In : *Une autre histoire*

*des Trente glorieuses. Modernisation, contestation et pollutions dans la France d'après-guerre*. La Découverte.

Fressoz, Jean-Baptiste et Fabien Locher (2010). « Le climat fragile de la modernité. Petite histoire climatique de la réflexivité environnementale ». In : *La vie des idées* (avril 2010).

Fureix, Emmanuel et François Jarrige (2015). *La modernité désenchantée. Relire l'histoire du* XIX$^{e}$ *siècle français*. La Découverte.

Gaida, Peter (2014). *Camps de travail sous Vichy : les « Groupes de Travailleurs Etrangers »(GTE) en France et en Afrique du Nord 1940-1944*. Lulu press.

Galvez Behar, Gabriel (2008). *La République des inventeurs. Propriété et organisation de l'innovation en France (1791-1922)*. Presses universitaires de Rennes.

– (2016). « Les Empires et leurs brevets ». In : *Les techniques et la globalisation au* XX$^{e}$ *siècle*. Sous la dir. de Liliane Hilaire-Perez et Larissa Zakharova. PUR.

Garçon, Anne-Françoise (2012). « Pourquoi l'eau vint aux machines... » In : *L'imaginaire et la pensée technique*. Sous la dir. d'Anne-Françoise Garçon. Garnier.

Gauthier, Michel (2005). *Énergie thermique des mers. Le programme français jusqu'au milieu des années 1980. Le projet ETM 5 MW Tahiti*. Rapp. tech. IFREMER.

Gille, Bertrand (1978). *Histoire des techniques. Technique et civilisations. Technique et sciences.* Encyclopédie La Pléiade.

Girardier, Jean-Pierre (1995). « Les pompes solaires thermodynamiques et leur histoire ». In : *L'énergie solaire en France*. Sous la dir. d'Alexandre Herléa. Actes du 111$^{e}$ congrès national des sociétés historiques et scientifiques. Éditions du CTHS, p. 127–143.

Gispert, Hélène (2002). « « Par la science, pour la patrie », l'Association française pour l'avancement des sciences (AFAS), 1872-1914 : Un projet d'histoire des sciences et de leur diffusion ». In : *Revue d'histoire des sciences* 55.2, p. 295–300.

Goubert, Jean-Paul (1986). *La conquête de l'eau. L'avènement de la santé à l'âge industriel*. Robert Laffont.

Gras, Alain (1997). *Les macro-systèmes techniques*. PUF. Que sais-je ?

– (2003). *Fragilité de la puissance. Se libérer de l'emprise technologique*. Fayard.

– (2007). *Le choix du feu : aux origines de la crise climatique*. Fayard, p. 281.

Grelon, André (1994). « Die ingenieure der Ponts et chaussées. Von der Eroberung desnationalen Raume zur Raumordnung ». In : *Ingenieure in Frankreich, 1747-1990*. Sous la dir. d'André Grelon et Heiner Stück. Campus.

Griset, Pascal (2011). *Du Cemagref à l'IRSTEA, Un engagement pour la recherche environnementale*. Quae.

Gueslin, André (1997). *l'État, l'économie et la société française,* XIX$^{e}$ - XX$^{e}$ *siècles*. Hachette.

Guillé, Dominique (2008). « L'influence mutuelle des projets français et nord-américains dans le domaine de l'énergie marémotrice durant l'entre deux guerres ». In : *Échanges scientifiques et techniques, d'une rive atlantique à l'autre.*

Guillemot, Hélène (2014). « Les désaccords sur le changement climatique en France : au-delà d'un climat bipolaire ». In : *Nature, Sciences, sociétés* 22.4 (avril 2014), p. 340–350.

Guthleben, Denis (2007). « Coup de soleil au CNRS... La genèse du PIRDES ». In : *Revue pour l'histoire du CNRS* 17.

– (2009). *Histoire du CNRS de 1939 à nos jours.* Armand Colin.

– (2011). *Rêves de savants. Étonnantes inventions de l'entre-deux-guerres.* Armand Colin.

Heaulmé, Emmanuelle (2014). « Hydroélectricité et conflits paysagers dans la montagne pyrénéenne début du XXe siècle à la création du parc national ». In : *Revue scientifique sur la conception et l'aménagement de l'espace* (septembre 2014).

Hecht, Gabrielle (2014). *Le rayonnement de la France. Énergie nucléaire et identité nationale après la seconde guerre mondiale.* Éditions Amsterdam.

Herléa, Alexandre, éd. (1995). *L'énergie solaire en France. Actes du 118$^{e}$ congrès national des sociétés historique et scientifiques (Pau, 25-29 octobre 1993).* Éditions du CTHS.

Hilaire-Perez, Liliane (2003). « Pratiques inventives, cheminements innovants, crédits et légitimations ». In : *Les chemins de la nouveauté. Innover, inventer au regard de l'histoire.* Sous la dir. de Liliane Hilaire-Perez et Anne-Françoise Garçon. Éditions du CTHS.

Hills, Richard L. (1996). *Power from wind. A history of windmill technology.* Cambridge university press.

Hughes, Thomas P. (1989). « The evolution of large technological systems ». In : *The social construction of technological systems.* Sous la dir. de Wiebe E. Bijker, Thomas P. Hughes et Pinch Trevor. The MIT Press.

– (1998). « L'histoire comme systèmes en évolution ». In : *Annales. Histoire, sciences sociales* 53.4-5 (juillet 1998), p. 839–857.

Illich, Ivan (1973). *La convivialité.* Seuil.

International association of hydraulic engineering and research (2009). *Hydraulicians in Europe 1800-2000, Vol II.* Sous la dir. de Willi Hager. CRC Press.

Janin, Robert (1996). « Convergence des pratiques technico-économiques à l'Électricité de France (1945-1986) ». In : *Histoire de l'électricité en France. Tome troisième 1946-1987.* Sous la dir. d'Henri Morsel. Fayard, p. 361–416.

Jarrige, François (2010). « og Mettre le soleil en bouteille fg{} : les appareils de Mouchot et l'imaginaire solaire au début de la Troisième République ». In : *Romantisme* 150.4 (avril 2010), p. 85–96.

Johnson, Fredrik Albritton (2014). « The origins of cornucopianism : a preliminary genealogy ». In : *Critical historical studies*.

Kryza, Franz T (2003). *The power of light. The epic story of man's quest to harness the sun*. Mac-Graw Hill.

Lacroix, Annick (2014). « La transition administrative de l'Algérie coloniale à l'Algérie indépendante : le cas des PTT ». In : *Histoire de l'Algérie à la période coloniale*. La Découverte, p. 570–575.

Lacroix, G (1943). « L'état actuel du problème des aéromoteurs ». In : *Le Génie civil* 120.3103 (février 1943). Conférence à la Société des ingénieurs civils, p. 46.

Lakroum, Monique (1989). « Les projets français de transsaharien, (XIXe-XXe s), un challenge pour l'industrie ». In : *Technique et culture* 19, p. 295–302.

Lanthier, Pierre (1991). « L'industrie de la construction électrique avant 1914 ». In : *Histoire de l'électricité en France. Tome premier, Espoirs et conquêtes 1881-1918*. Sous la dir. de François ; Caron et al., p. 671–705.

– (1994). « Les entreprises du secteur électrique : la construction électrique ». In : *Histoire de l'électricité en France. Tome II, 1919-1946*. Sous la dir. de Maurice Lévy-Leboyer et Henri Morsel. Fayard, p. 1020–1112.

Laponche, Bernard (2003). « Entretien ». In : *30 ans de maîtrise de l'énergie*. ATEE.

– (2015). « De l'Agence des économies d'énergie à l'Agence française de la maîtrise de l'énergie ». In : *Pour mémoire* 15 (juin 2015).

Le Petit Robert (1993). *Le petit Robert, dictionnaire de la langue française*. Dictionnaires Le Robert.

Lefeuvre, Daniel (2002). « L'électricité en Algérie. De la rationalisation à la nationalisation, les enjeux d'une réforme : 1937-1947 ». In : *Outre-mer* 334-335. 1er semestre, p. 479–490.

Leray, Théo et Bertrand De la Roncière (2003a). « Introduction ». In : *30 ans de maîtrise de l'énergie*. ATEE.

– (2003b). « L'époque de la maîtrise de l'énergie ». In : *30 ans de maîtrise de l'énergie*. ATEE.

Lévy-Leboyer, Maurice (1994a). « Introduction générale ». In : *Histoire de l'électricité en France. Tome II, 1919-1946*. Sous la dir. d'Henri Lévy-Leboyer Maurice et Morsel. Fayard, p. 13–25.

– (1994b). « Panorama de L'électrification, de la Grande guerre à la nationalisation ». In : *Histoire de l'électricité en France. Tome II, 1919-1946*. Sous la dir. d'Henri Lévy-Leboyer Maurice et Morsel. Fayard, p. 27–127.

Liébard, Alain (2015). « L'évolution de la politique des énergies renouvelables depuis les années 1970 ». In : *Pour mémoire* 15 (juin 2015), p. 26–41.

Madureira, Nino Luis (2012). « The anxiety of abundance : William Stanley Jevons and Coal scarcity in the nineteenth century ». In : *Environment and history* 18, p. 395–421.

Maleville, Georges (1996). « La naissance de l'Électricité de France ». In : *Histoire de l'électricité en France. Tome troisième. 1946-1987*. Fayard, p. 35–96.

Malti, Hocine (2014). « Le pétrole saharien et son rôle dans la guerre de libération (1956-1962) ». In : *Histoire de l'Algérie à la période coloniales*. La Découverte, p. 553–558.

Marçot, Jean-Louis (2003). *Une mer au Sahara. Mirages de la colonisation. Algérie, Tunisie*. Éditions de la différence.

Margairaz, Michel et Henry Rousso (1992). « Vichy, la guerre et les entreprises ». In : *Histoire, économie et société*.

Marty, Frédéric (2000). « L'énergie thermique des mers et l'énergie des marées. Trajectoires croisées de deux projets industriels ». In : *Bulletin d'histoire de l'électricité* 35.

Mayaud, Jean-Luc (1999). *La petite exploitation rurale triomphante*. Belin.

Meyhong, Stéphane William et Robert Edgar Ndong (2011). « L'électrification de l'Afrique équatoriale française (AEF) dans la période de l'après Seconde Guerre mondiale : aménagements hydroélectriques et rivalités interterritoriales ». In : *Revue historique* 657 (janvier 2011), p. 93–118.

Mitchell, Timothy (2011). *Petrocratia*. Ere.

Moïse, Robert et Maurice Daumas (1978). « L'électricité industrielle ». In : *Histoire générale des technique. Tome 4 : les techniques de la civilisation industrielle : énergie et matériaux*. Sous la dir. de Maurice Daumas, p. 313–490.

Mom, Gijs (2009). « Compétition et coexistence : la motorisation des transports terrestres et le lent processus de substitution de la traction équine ». In : *Le mouvement social* (avril 2009).

Monney, Ch. (1943). « L'état actuel du problème des aéromoteurs ». In : *Le Génie civil* 120.3103 (février 1943). Conférence à la Société des ingénieurs civils, p. 46.

Morsel, Henri (1991a). « L'électricité dans l'économie générale du pays ». In : *Histoire générale de l'électricité en France. Tome premier, Espoirs et conquêtes 1881-1918*. Sous la dir. de François ; Caron et al. Fayard, p. 504–550.

– (1991b). « L'hydroélectricité ». In : *Histoire générale de l'électricité en France. Tome premier, Espoirs et conquêtes 1881-1918*. Sous la dir. de François ; Caron et al. Fayard, p. 594–670.

– (1994). « La production hydraulique ». In : *Histoire de l'électricité en France. Tome II, 1919-1946*. Sous la dir. de Maurice Lévy-Leboyer et Henri Morsel. Fayard, p. 733–776.

– (1996a). « Avant-propos. Introduction générale ». In : *Histoire de l'électricité en France. Tome troisième. 1946-1987*. Sous la dir. d'Henri Morsel. Fayard, p. 9–26.

– (1996b). « Conclusion (La société de consommation électrique) ». In : *Histoire de l'électricité en France. Tome troisème. 1946-1987*. Sous la dir. d'Henri Morsel. Fayard, p. 673–679.
– (1996c). « Le temps de la demande ». In : *Histoire de l'électricité en France. Tome troisème. 1946-1987*. Sous la dir. d'Henri Morsel. Fayard, p. 183–202.
– (1996d). « Le tournant nucléaire (1973-1987) ». In : *Histoire de l'électricité en France. Tome troisème. 1946-1987*. Fayard, p. 577–682.

Mumford, Lewis (2016). *Technique et civilisation*. Parenthèse.

Naegel, Paul (2014). « L'usine marémotrice de la Rance : son histoire pour partie revisitée ». In : *La Houille blanche* 2 (95-100 2014).

Pehlivanian, Sophie (2013). « Le soleil à l'affiche. Entre promotion et contestation ». In : *Annales historiques de l'électricité* (décembre 2013).
– (2014). « Histoire de l'énergie solaire en France : science, technologies et patrimoine d'une filière d'avenir ». Thèse de doct. Université de Grenoble.

Percebois, Jacques (2009). « Les stratégies de réponse face aux chocs pétroliers. Quels enseignements au vu de quelques expériences ? » In : *État et énergie. XIX$^{e}$-XX$^{e}$ siècles*. Comité pour l'histoire économique et financière de la France.

Pervillé, Guy (1993). *De l'empire français à la décolonisation*. Hachette.

Pestel, Jean-Claude (2010). « Les éoliennes Bollée et Lebert de la Touraine ». In : *Bulletin de la société archéologique de Touraine* LVI, p. 229–243.

Pestre, Dominique (2003). *Science, argent et politique. Un essai d'interprétation*. INRA.
– (2014). « Conclusion. Le gouvernement des progrès et ses dégâts. Un essai de lecture globale ». In : *Le gouvernement des technosciences. Gouverner le progrès et ses dégâts depuis 1945*. La Découverte.

Pharabod, François (1993). « Des miroirs ardents aux centrales solaires ». In : *L'énergie solaire en France*. Sous la dir. d'Alexandre Herléa. Éditions du CTHS, p. 35–68.

Picard, Jean-François (1990). *La république des savants. La recherche française et le CNRS*. Flammarion.

Picard, Jean-François et Élisabeth Pradoura (1988). « La longue marche vers le CNRS (1901-1945) ». In : *Cahiers pour l'histoire du CNRS* 01. Article remanié en 2009.

Picon, Antoine (1991). « L'invention de l'ingénieur moderne. L'école des Ponts et chaussées, 1747-1851 ». Thèse de doct. Ecole des hautes études en sciences sociales.

Puiseux, Louis (1982). « Les bifurcations de la politique énergétique française depuis la guerre ». In : *Annales. Économies, sociétés, civilisations.* 4, p. 609–620.

Puyo, Jean Yves (2009). « Le développement de la houille blanche dans les Pyrénées Occidentales ». In : *Innovation dans la gestion environnementale des territoires de montagne*. Sous la dir. de Jean Paul Bravard. Editions du CTHS, p. 49–60.

RADVANAYI, Pierre et Monique BORDRY (1989). « Genèse très constastée de la société Kaiser-Wilhem (1911) et du CNRS (1939) ». In : *Cahiers pour l'histoire du CNRS* (mars 1989).

RAINEAU, Laurence (2009). « L'imaginaire des énergies renouvelables ». In : *Énergie et société. Sciences, gouvernance et usages*. Edisud, p. 205–213.

RAMUNNI, Girolamo et Jean DEFLANDRE (2001). « Faire face à la crise du pétrole : l'énergie solaire au CNRS ». In : *Cahiers pour l'histoire du CNRS* 4.

RIGHTER, Robert W. (1996). *Wind energy in America. A history*. University of Oklahoma press.

RIST, Gilbert (2013). *Le développement. Histoire d'une croyance occidentale*. Presses de Sciences Po.

RIVALS, Claude (2000). *Le moulin et le meunier, une technique et un métier*. Empreinte.

RODOT, Michel (1993). « Les photopiles solaires : du laboratoire au seuil de la diffusion massive ». In : *L'énergie solaire en France*. Éditions du CTHS, p. 85–106.

ROGIER, Étienne (2000a). « Constantin, précurseur des éoliennes modernes ». In : *Systèmes solaire* 136.

– (2000b). « L'électricité éolienne, de la Belle époque à EDF ». In : *Les cahiers d'Éole* 2 (novembre 2000), p. 8–20.

– (2002). « Les éoliennes multipales, progrès et tradition ». In : *Les Cahiers d'Eole* 2 (décembre 2002).

ROSENFELD, Jacques (1957). « Une expériene d'analyse du coût des services : les circonscriptions électriques ». In : *La Revue administrative* 10.55 (janvier 1957), p. 79–83.

ROSS, Kristin (2006). *Rouler plus vite, laver plus blanc. Modernisation de la France et décolonisation au tournant des années soixante*. Flammarion.

SAUL, Samir (2002). « L'électrification du Maroc à l'époque du protectorat ». In : *Outremer* 89.334-335. 1er semestre, p. 491–512.

SCHMID, Anne-Françoise (1999). « Invention ». In : *Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences*. Sous la dir. de Dominique LECOURT. PUF.

SESSION), De Rouville (président de, éd. (1956). *IV$^{èmes}$ Journées de l'hydraulique*. T. II. Question IV. Énergie de la houle : utilisation. Discussion. Société hydrotechnique de France. Juin 1956.

SIMON, Bernard (1998). « Max Ringelmann (1861-1930) et la recherche en machinisme agricole ». In : *Histoire de la mécanique appliquée, Enseignement, recherche et pratiques mécaniciennes en France après 1885*. Sous la dir. de Claudine FONTANON. ENS Editions, p. 47–55.

SINGARAVELOU, Pierre (2013). « Introduction. Situations coloniales et formations impériales : approches historiographiques ». In : *Les empires coloniaux, XIX$^{e}$ - XX$^{e}$ siècles*. Points.

Stahl, Pierre (1992). « Le rôle des élus publics dans l'entre-deux-guerres ». In : *Histoire de l'électricité en France. Tome II, 1919-1946*. Fayard.

Syrota, Jean (2003). « Témoignage. « De bons résultats avec peu de moyens et beaucoup d'enthousiasme » ». In : *30 ans de maîtrise de l'énergie*. Sous la dir. de Bertrand De la Roncière et Théo Leray. ATEE.

Taton, René (1983). *La Science contemporaine, Vol 2, Le XXème siècle, Années 1900-1960*. PUF.

Teissier, Pierre (2007). « L'émergence de la chimie du solide en France (1950-2000) : de la formation d'une communauté à sa dispersion ». Thèse de doct. Université Paris X.

– (2013). « Le solaire passif à l'ombre de la politique énergétique française (1945-1986) ». In : *Annales historiques de l'électricité* 11 (décembre 2013), p. 11–25.

– (2015). « Fours et maisons solaires de Mont-Louis-Odeillo. Interstices, intersciences et internationalismes de la recherche contemporaine ». In : *Dans le champ solaire. Cartographie d'un objet scientifique*. Hermann, p. 181–219.

Thénault, Sylvie (2013). « L'État colonial. Une question de domination ». In : *Les empires coloniaux,* XIX$^{e}$-XX*ĕ siècles*. Sous la dir. de Pierre Singaravélou. Points.

Thoening, Jean-Claude (2010). « Politique publique ». In : *Dictionnaire des politiques publiques*. Sous la dir. de Ravinet Pauline Boussaguet Laurie Jacquot Sophie. Presses de Sciences Po.

Topçu, Sezin (2013). *La France nucléaire. L'art de gouverner une technologie contestée*. Seuil.

– (2015). « Atome, gloire et désenchantement ». In : *Une autre histoire des Trente glorieuses. Modernisation, contestations et pollutions dans la France d'après-guerre*. Sous la dir. de Christophe Bonneuil, Céline Pessis et Sezin Topçu. La Découverte, p. 189–209.

Vadelorge, Loïc (2003). « Des villes pour mémoire ». In : *Ethnologie française* 33.1 (janvier 2003).

Van Corneval, Pierre et Philippe Subra (2017). « Écotaxe : retour sur l'échec d'une réforme environnementale ». In : *Géopolitique de l'environnement* (février 2017).

Varaschin, Denis (1998). « Légendes d'un siècle : cent ans de politique hydroélectrique française ». In : *Annales des Mines* (août 1998), p. 27–33.

– (2002). « EDF et l'Outre-mer, de 1946 à 1960 ». In : *Outre-mers* 89.334-335, p. 387–408.

– (2009a). « État et électricité en France en perspective historique ». In : *État et énergie.* XIX$^{e}$-XX$^{e}$ *s*. Sous la dir. d'Alain Beltran et al. Comité pour l'histoire économique et financière de la France.

– (2009b). « Pas de veine pour le charbon français ». In : *État et énergie.* XIX$^{e}$-XX$^{e}$ *siècles*. Sous la dir. d'Alain Beltran et al. Comité pour l'histoire économique et financière de la France.

VIOLLET, Pierre-Louis (2005). *Histoire de l'énergie hydraulique, moulins, pompes, roues et turbines de l'Antiquité au XXème siècle*. Presses de l'Ecole nationale des Ponts et chaussées.

VUILLET, Bernard (2009). « Sources pour l'histoire de la politique énergétique française aux XIX^e et XX^e siècles ». In : *État et énergie,* XIX^e - XX^e *siècles*. Comité pour l'histoire économique et financière de la France.

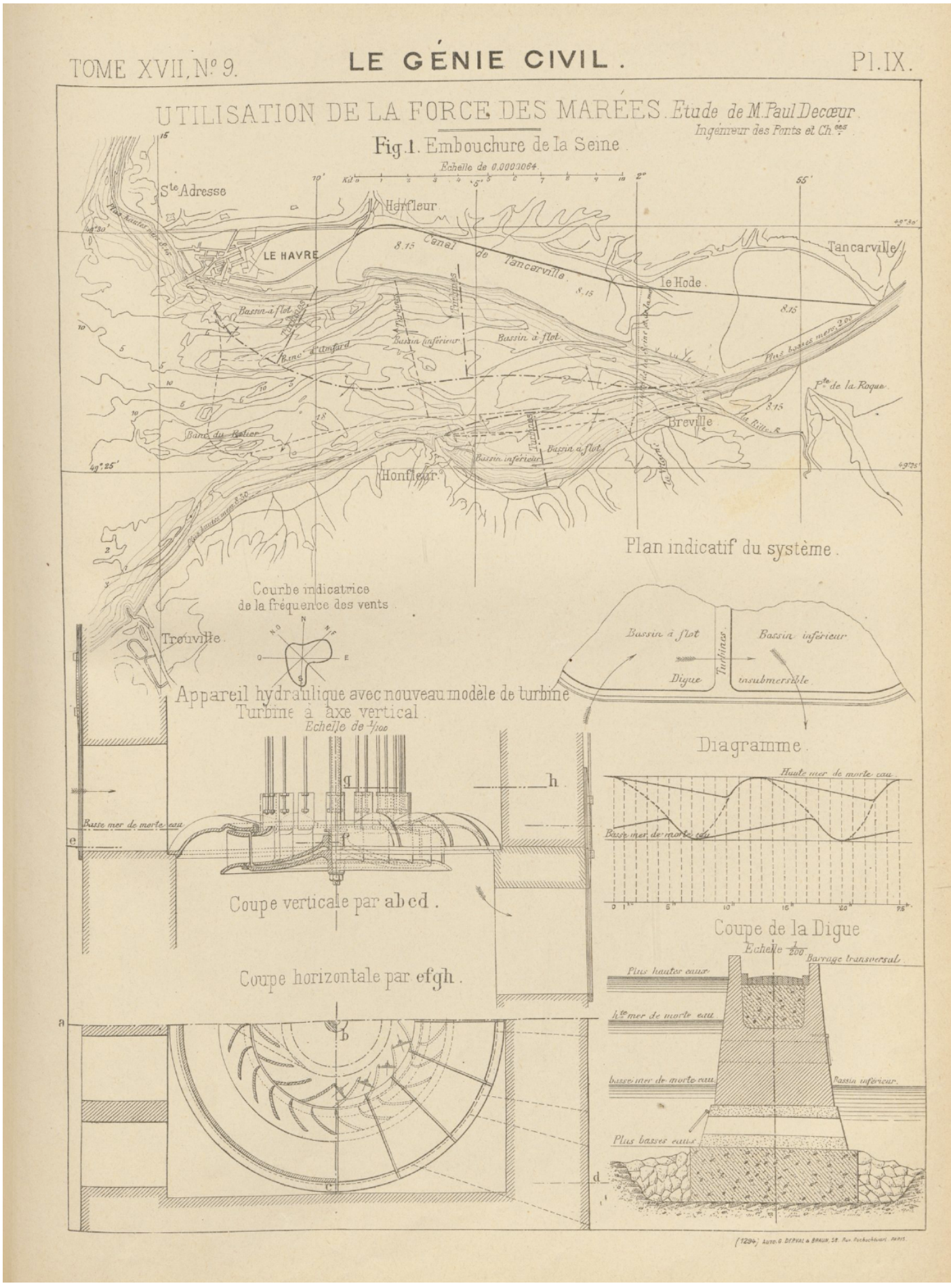
WALTER, John et Girard RÉGIS (2002-2015). *The éolienne Bollée, A concise illustrated history of the unique French wind engine, from 1868 to the present day*. publié en ligne pour "Les Amis de l'Éolienne Bollée/The Friends of the Éolienne Bollée". Archiving industry.

WILLIOT, Jean-Pierre (2009). « Les entreprises gazières françaises et l'État : les logiques de la tutelle publique ». In : *État et énergie.* XIX^e-XX^e *siècles*. Comité pour l'histoire économique et financière de la France.

WORONOFF, Denis (1994). *Histoire de l'industrie en France du XVIe siècle à nos jours*. Seuil.

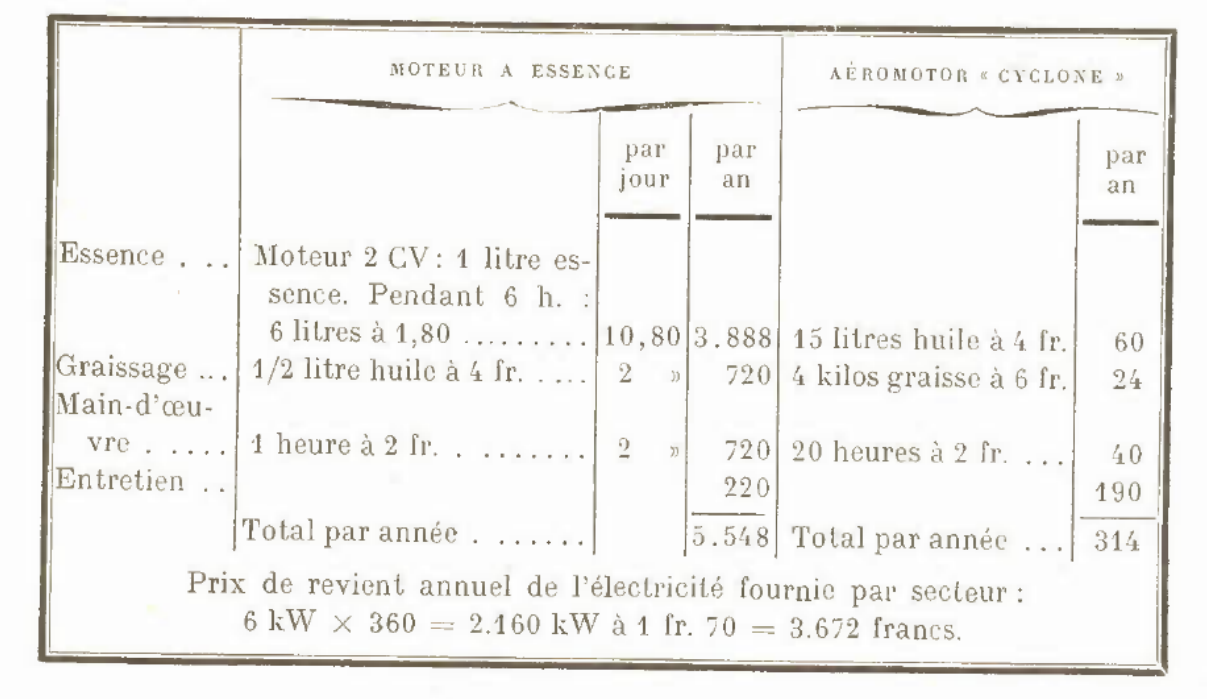
# Annexe A

# Projet Decoeur : cycle, turbine, plan de l'aménagement du Havre


TOME XVII, N° 9.
LE GÉNIE CIVIL.
Pl. IX.
UTILISATION DE LA FORCE DES MARÉES. Etude de M. Paul Decœur.
Ingénieur des Ponts et Chaussées.
Fig. 1. Embouchure de la Seine.
Echelle de 0,000064
Ste Adresse
Honfleur
LE HAVRE
Canal de Tancarville
Tancarville
le Hode
Bassin à flot
Bassin inférieur
Bassin à flot
Banc d'Amfard
Pte de la Roque
Breville
Banc du Ratier
Bassin à flot
Bassin inférieur
Honfleur
Trouville
Plan indicatif du système.
Courbe indicatrice de la fréquence des vents
Bassin à flot
Turbines
Bassin inférieur
Digue
insubmersible
Appareil hydraulique avec nouveau modèle de turbine
Turbine à axe vertical.
Echelle de 1/100
Diagramme.
Haute mer de morte eau
Basse mer de morte eau
Coupe verticale par abcd.
Coupe de la Digue
Echelle 1/200
Barrage transversal
Plus hautes eaux
Haute mer de morte eau
basse mer de morte eau
Bassin inférieur
Plus basses eaux
Coupe horizontale par efgh.

# Annexe B

# Prix de revient annuel entre l'électricité obtenue par un aéromoteur Cyclone, un moteur à essence et le réseau électrique



| | MOTEUR A ESSENCE | par jour | par an | AÉROMOTOR « CYCLONE » | par an |
|---|---|---|---|---|---|
| Essence . . . | Moteur 2 CV : 1 litre essence. Pendant 6 h. : 6 litres à 1,80 . . . . . | 10,80 | 3.888 | 15 litres huile à 4 fr. | 60 |
| Graissage . . . | 1/2 litre huile à 4 fr. . . . | 2 » | 720 | 4 kilos graisse à 6 fr. | 24 |
| Main-d'œuvre . . . . | 1 heure à 2 fr. . . . . | 2 » | 720 | 20 heures à 2 fr. . . . | 40 |
| Entretien . . | | | 220 | | 190 |
| | Total par année . . . . . | | 5.548 | Total par année . . . | 314 |

Prix de revient annuel de l'électricité fournie par secteur :
6 kW × 360 = 2.160 kW à 1 fr. 70 = 3.672 francs.

FIGURE B.1 – Tableau comparatif du prix de revient annuel entre l'électricité obtenue à partir d'un moteur Cyclone, d'un moteur à essence et d'un réseau de distribution d'électricité (1933) (CHAMPLY, 1933, p. 243)

# Annexe C

# Publicité de la Société des ateliers mécaniques Saint-Jacques

1. Issu de E.-H. Lémonon, 1920 (publicités à la fin de l'ouvrage)




FIGURE C.1 – Publicité de la Société des ateliers mécaniques Saint-Jacques (1920) [1]

# Annexe D

# Composition de la Commission de la houille bleue (1919-1941)

1. À partir de AN 1977 0313/46, p.d.

TABLE D.1 – Composition de la Commission de la houille bleue (1919-1921) [1]

| Nom, prénom (Dates) | Fonction | Formation, grade | Profession |
|---|---|---|---|
| **Période : 1919-1920** | | | |
| De la Brosse, René (1856-1928) | Président | Inspecteur général des Ponts et Chaussées | Inspecteur général des Forces hydrauliques |
| Gervais de Rouville, André (1882-1979) | Secrétaire | Ingénieur en chef des Ponts et chaussées | Ingénieur en chef du Service des phares et balises |
| Renaud, Joseph (1854-1921) | Membre | Ingénieur hydrographe en chef de la Marine | Directeur du service hydrographique de la Marines |
| Janet, Paul (1863-1937) | Membre | Normalien, agrégé | Directeur de l'École supérieure d'électricité |
| Bouchayer, Hippolyte | Membre | Ingénieur des Arts et manufactures (spécialiste de l'hydraulique) | Industriel |
| **Période : 1920-1921** | | | |
| . De la Brosse, René (1856-1928) | Président | Inspecteur général des Ponts et Chaussées | Inspecteur général des Forces hydrauliques |
| Voisin | Vice-président | Inspecteur général des Ponts et chaussées | Attaché au service des Travaux maritimes de la Marine |
| Gervais de Rouville, André (1882-1979) | Secrétaire | Ingénieur en chef des Ponts et chaussées | Ingénieur en chef du Service des phares et balises |
| Renaud, Joseph (1854-1921) | Membre | Ingénieur hydrographe en chef de la Marine | Directeur du service hydrographique de la Marines |
| Janet, Paul (1863-1937) | Membre | Normalien, agrégé | Directeur de l'École supérieure d'électricité |
| Fichot, Eugène | Membre | Ingénieur hydrographe en chef de la Marine | |
| Amet, Jean-François (1861-1940) | Membre | Vice-Amiral | |
| Maroger | Membre | | |
| Bouchayer, Hippolyte | Membre | Ingénieur des Arts et manufactures (spécialiste de l'hydraulique) | Industriel |

TABLE D.2 – Composition de la Commission de la houille bleue (1921-1928)

| | | | |
|---|---|---|---|
| Période : 1921-1926 [c] | | | |
| De la Brosse, René (1856-1928) | Président | Inspecteur général des Ponts et Chaussées | Inspecteur général des Forces hydrauliques |
| Voisin | Vice-président | Inspecteur général des Ponts et chaussées | Attaché au service des Travaux maritimes de la Marine |
| Gervais de Rouville, André (1882-1979) | Secrétaire | Ingénieur en chef des Ponts et chaussées | Ingénieur en chef du Service des phares et balises |
| Janet, Paul (1863-1937) | Membre | Normalien, agrégé | Directeur de l'École supérieure d'électricité |
| Fichot, Eugène | Membre | Ingénieur hydrographe en chef de la Marine | |
| Amet, Jean-François (1861-1940) | Membre | Vice-Amiral | |
| Moreau | Membre | Vice-Amiral | |
| Eydoux, Denis (1876-1969) | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Professeur d'hydraulique industrielle à l'École des Ponts et chaussées |
| Période : 1926-1928 | | | |
| De la Brosse, René (1856-1928) | Président | Inspecteur général des Ponts et Chaussées | Inspecteur général des Forces hydrauliques |
| Voisin | Vice-président | Inspecteur général des Ponts et chaussées | Attaché au service des Travaux maritimes de la Marine |
| Gervais de Rouville, André (1882-1979) | Secrétaire | Ingénieur en chef des Ponts et chaussées | Ingénieur en chef du Service des phares et balises |
| Janet, Paul (1863-1937) | Membre | Normalien, agrégé | Directeur de l'École supérieure d'électricité |
| Fichot, Eugène | Membre | Ingénieur hydrographe en chef de la Marine | |
| Amet, Jean-François (1861-1940) | Membre | Vice-Amiral | |
| Moreau | Membre | Vice-Amiral | |
| Eydoux, Denis (1876-1969) | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Professeur d'hydraulique industrielle à l'École des Ponts et chaussées |
| Bricard, Georges | Membre | Ingénieur en chef du génie maritime | En retraite [d] |
| Bouchayer, Hippolyte | Membre | Ingénieur des Arts et manufactures (spécialiste de l'hydraulique) | Industriel |

*a.* Renaud est décédé.
*b.* Remplace Eydoux.
*c.* Renaud est décédé.
*d.* Remplace Eydoux.

TABLE D.3 – Composition de la Commission de la houille bleue (1928-1929)

| Période : 1928-1929 [d] | | | |
|---|---|---|---|
| Nom, prénom (Dates) | Fonction | Formation, grade | Profession |
| Moreau | Président | Vice-Amiral | |
| Voisin | Vice-président | Inspecteur général des Ponts et chaussées | Attaché au service des Travaux maritimes de la Marine |
| Gervais de Rouville, André (1882-1979) | Secrétaire | Ingénieur en chef des Ponts et chaussées | Ingénieur en chef du Service des phares et balises |
| Janet, Paul (1863-1937) | Membre | Normalien, agrégé | Directeur de l'École supérieure d'électricité |
| Fichot, Eugène | Membre | Ingénieur hydrographe en chef de la Marine | |
| Amet, Jean-François (1861-1940) | Membre | Vice-Amiral | |
| Eydoux, Denis (1876-1969) | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Professeur d'hydraulique industrielle à l'École des Ponts et chaussées |
| Bricard, Georges | Membre | Ingénieur en chef du génie maritime | En retraite [e] |
| Willemin | Membre | Inspecteur général des Ponts et chaussées | Inspecteur général des Forces hydrauliques [f] |
| Manesse | Membre | | |
| Bouchayer, Hippolyte | Membre | Ingénieur des Arts et manufactures (spécialiste de l'hydraulique) | Industriel |

*a.* De la Brosse est parti en retraite.
*b.* Remplace Eydoux.
*c.* Remplace numérairement De la Brosse
*d.* De la Brosse est parti en retraite.
*e.* Remplace Eydoux.
*f.* Remplace numérairement De la Brosse

TABLE D.4 – Composition de la Commission de la houille bleue (1929-1935)

| Période : 1929-1935 [c] | | | |
|---|---|---|---|
| Nom, prénom (Dates) | Fonction | Formation, grade | Profession |
| Amet, Jean-François (1861-1940) | Président | Vice-Amiral | |
| Voisin | Vice-président | Inspecteur général des Ponts et chaussées | Attaché au service des Travaux maritimes de la Marine |
| Gervais de Rouville, André (1882-1979) | Secrétaire | Ingénieur en chef des Ponts et chaussées | Ingénieur en chef du Service des phares et balises |
| Ailleret, Pierre (1900-1996) | Secrétaire-adjoint | Ingénieur de l'Ecole supérieure d'électricité | Attaché au Service central des Forces hydrauliques et des distributions d'énergie électrique |
| Janet, Paul (1863-1937) | Membre | Normalien, agrégé | Directeur de l'École supérieure d'électricité |
| Fichot, Eugène | Membre | Ingénieur hydrographe en chef de la Marine | |
| Eydoux, Denis (1876-1969) | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Professeur d'hydraulique industrielle à l'École des Ponts et chaussées |
| Bricard, Georges | Membre | Ingénieur en chef du génie maritime | En retraite [d] |
| Willemin | Membre | Inspecteur général des Ponts et chaussées | Inspecteur général des Forces hydrauliques |
| Bouchayer, Hippolyte | Membre | Ingénieur des Arts et manufactures (spécialiste de l'hydraulique) | Industriel |

*a.* Moreau est décédé.
*b.* Remplace Eydoux.
*c.* Moreau est décédé.
*d.* Remplace Eydoux.

TABLE D.5 – Composition de la Commission de la houille bleue (1935-1937)

| Période : 1935-1937 [c] | | | |
|---|---|---|---|
| Nom, prénom (Dates) | Fonction | Formation, grade | Profession |
| Amet, Jean-François (1861-1940) | Président | Vice-Amiral | |
| Voisin | Vice-président | Inspecteur général des Ponts et chaussées | Attaché au service des Travaux maritimes de la Marine |
| Gervais de Rouville, André (1882-1979) | Secrétaire | Ingénieur en chef des Ponts et chaussées | Ingénieur en chef du Service des phares et balises |
| Janet, Paul (1863-1937) | Membre | Normalien, agrégé | Directeur de l'École supérieure d'électricité |
| Fichot, Eugène | Membre | Ingénieur hydrographe en chef de la Marine | |
| Eydoux, Denis (1876-1969) | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Professeur d'hydraulique industrielle à l'École des Ponts et chaussées |
| Bricard, Georges | Membre | Ingénieur en chef du génie maritime | En retraite [d] |
| Willemin | Membre | Inspecteur général des Ponts et chaussées | Inspecteur général des Forces hydrauliques |
| Montigny, Georges (1879-1970) | Membre | Inspecteur général des Ponts et chaussées | Chargé du service des Forces hydrauliques et des distributions d'énergie électrique |
| Besson | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Attaché au Service des Forces hydrauliques et des distributions d'énergie électrique |
| Bouchayer, Hippolyte | Membre | Ingénieur des Arts et manufactures (spécialiste de l'hydraulique) | Industriel |

*a.* Voisin est parti en retraite.
*b.* Remplace Eydoux.
*c.* Voisin est parti en retraite.
*d.* Remplace Eydoux.

TABLE D.6 – Composition de la Commission de la houille bleue (1937-1941)

| Période : 1937-1941 [c] | | | |
|---|---|---|---|
| Nom, prénom (Dates) | Fonction | Formation, grade | Profession |
| Amet, Jean-François (1861-1940) | Président | Vice-Amiral | |
| Voisin | Vice-président | Inspecteur général des Ponts et chaussées | Attaché au service des Travaux maritimes de la Marine |
| Gervais de Rouville, André (1882-1979) | Secrétaire | Ingénieur en chef des Ponts et chaussées | Ingénieur en chef du Service des phares et balises |
| Janet, Paul (1863-1937) | Membre | Normalien, agrégé | Directeur de l'École supérieure d'électricité |
| Fichot, Eugène | Membre | Ingénieur hydrographe en chef de la Marine | |
| Eydoux, Denis (1876-1969) | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Directeur des études de l'École polytechnique |
| Bricard, Georges | Membre | Ingénieur en chef du génie maritime | En retraite [d] |
| Willemin | Membre | Inspecteur général des Ponts et chaussées | Inspecteur général des Forces hydrauliques |
| Montigny, Georges (1879-1970) | Membre | Inspecteur général des Ponts et chaussées | Chargé du service des Forces hydrauliques et des distributions d'énergie électrique |
| Besson | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Attaché au Service des Forces hydrauliques et des distributions d'énergie électrique |
| Liénard, Alfred-Marie (1854-1958) | Membre | Ingénieur des Mines | Ancien professeur d'électricité à l'École des mines, en retraite |
| Fallou | Membre | | Ingénieur-conseil |
| Bouchayer, Hippolyte | Membre | Ingénieur des Arts et manufactures (spécialiste de l'hydraulique) | Industriel |

*a.* Paul Janet est décédé/.
*b.* Remplace Eydoux.
*c.* Paul Janet est décédé/.
*d.* Remplace Eydoux.

TABLE D.7 – Composition de la Commission de la houille bleue (1941)

| Année 1941 [c] | | | |
|---|---|---|---|
| Nom, prénom (Dates) | Fonction | Formation, grade | Profession |
| Montigny, Georges (1879-1970) | Président | Inspecteur général des Ponts et chaussées | Chargé du service des Forces hydrauliques et des distributions d'énergie électrique |
| Olivier-Martin | Secrétaire | Ingénieur des Ponts et chaussées | |
| Gervais de Rouville, André (1882-1979) | Membre | Ingénieur en chef des Ponts et chaussées | Ingénieur en chef du Service des phares et balises |
| Janet, Paul (1863-1937) | Membre | Normalien, agrégé | Directeur de l'École supérieure d'électricité |
| Fichot, Eugène | Membre | Ingénieur hydrographe en chef de la Marine | |
| Eydoux, Denis (1876-1969) | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Directeur des études de l'École polytechnique |
| Bricard, Georges | Membre | Ingénieur en chef du génie maritime | En retraite [d] |
| Besson | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Attaché au Service des Forces hydrauliques et des distributions d'énergie électrique |
| Fallou | Membre | | Ingénieur-conseil |
| Courtier, André (1877-1958) | Membre | Ingénieur hydrographe en chef de la Marine | Directeur du service hydrographique |
| Crescent, Charles | Membre | Inspecteur général des Ponts et chaussées | |
| Rossignol de Fargues | Membre | Inspecteur général des Ponts et chaussées | |
| Bouchayer, Hippolyte | Membre | Ingénieur des Arts et manufactures (spécialiste de l'hydraulique) | Industriel |

*a.* Amet et Fichot sont décédés. Willemin et Liénard sont partis en retraite.
*b.* Remplace Eydoux.
*c.* Amet et Fichot sont décédés. Willemin et Liénard sont partis en retraite.
*d.* Remplace Eydoux.

# Annexe E

# Composition du Comité technique de l'énergie des mers (1949)

1. AN 1977 0614/3, 1941, Composition du Comité technique de l'énergie des mers, 14/11/1949.

| Nom, prénom | Fonction | Formation, grade | Profession |
|---|---|---|---|
| Gervais de Rouville, André | Président | Inspecteur général des Ponts et chaussées | Directeur des Phares et balises |
| Barrillon, Émile-Georges | Vice-président | Ingénieur général du Génie maritime | En retraite |
| Thomas-Collignon | Secrétaire général | Ingénieur en chef des Ponts et chaussées | |
| Chauvez | Secrétaire | Ingénieur des Mines | |
| Ailleret, Pierre | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Directeur de la Direction des études et recherches (EDF) |
| Besson | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | |
| Bizot, Émile | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | |
| Brard, Roger | Membre | Ingénieur en chef du Génie maritime | |
| Bricard, Georges | Membre | Ingénieur en chef du Génie maritime | En retraite |
| Chalon | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | |
| Courtier, André | Membre | Ingénieur hydrographe général | En retraite |
| Coyne, André | Membre | Inspecteur général des Ponts et chaussées | En disponibilité |
| Dupin, Jean | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Dirigeant d'Alais Froges et Camargue (aluminium) |
| Eydoux, Denis | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Directeur des études de l'École polytechnique |
| Freyssinet, Eugène | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Dirigeant de la Société technique pour l'utilisation de la précontrainte (génie civil) |
| Gariel, Maurice | Membre | Ingénieur ESE | Ingénieur à Neyrpic |
| Gougenheim, André | Membre | Ingénieur hydrographe en chef de la Marine | |
| Henry | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Ingénieur à la Compagnie nationale du Rhône |
| Hupner, Henri | Membre | Inspecteur général des Ponts et chaussées | Chef du service technique des Grands barrages |
| Le Bourhis, Pierre | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | PDG d'Alsthom |
| Nizery, André | Membre | Ingénieur des Ponts et Chaussées | Secrétaire général de l'OSRC, directeur de L'énergie des mers |
| Notté | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Directeur de section au Conseil général des Ponts et chaussées |
| Outrey | Membre | Inspecteur général des Ponts et chaussées | |
| Pétry | Membre | Ingénieur en chef des Ponts et chaussées | Directeur adjoint du service des Phares et balises |
| Vicaire | Membre | Ingénieur des Mines | DG des établissements Schneider |

FIGURE E.1 – Composition du Comité technique de l'énergie des mers (1949) [1]

# Annexe F

# Brochure de la Société anonyme de construction de Paimboeuf

2. AN 1977 0614/3, 1941, Chemise Éoliennes-aérogénérateurs 1942-1946.

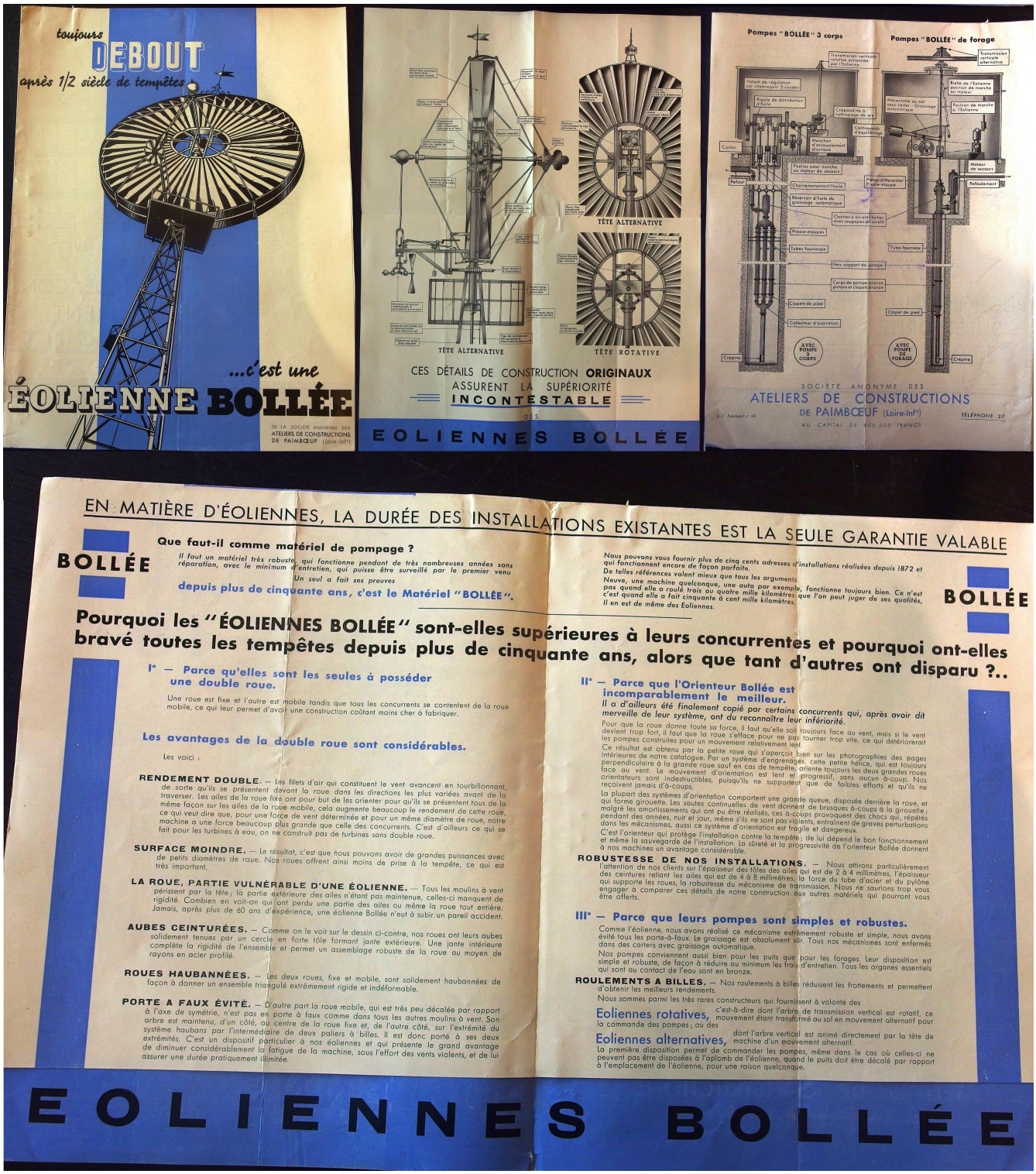



FIGURE F.1 – Brochure de la Société anonyme de construction de Paimboeuf : les éoliennes Bollée (années 1940) [2]

# Annexe G

# Composition des sous-commissions du Comité technique de l'énergie des mers (1944)

2. AN 1977 0614/3, 1941, Constitution des sous-commissions du Comité technique de l'énergie des mers, 30/06/1944

| | |
|---|---|
| **1ère sous-commission des cycles** | |
| Objet | Résumé des notions acquises sur les cycles :conditions optima d'emploi de chaque nature de cycle dans les diverses circonstances |
| Président | Bricard (ingénieur en chef du Génie maritime en retraite) |
| Membres | Benezit, Henry, Outrey |
| **2ème sous-commission de la station d'essai** | |
| Objet | Valeur respective des divers emplacements envisagés pour une station marémotrice d'essai |
| Président | Barrillon (ingénieur en chef du Génie maritime en retraite) |
| Membres | Ailleret, Besson, Bricard, Courtier, Notté |
| **3ème sous-commission des ouvrages types de génie civil** | |
| Objet | Critique des types d'ouvrages proposés pour le barrage d'une baie largement ouverte à la mer ; détermination sommaire de types d'ouvrages applicables éventuellement au barrage de la baie du Mont-Saint-Michel |
| Président | Notté (Président de section au Conseil général des Ponts et chaussées) |
| Membres | Benezit, Bizot, Nizery, Outrey |
| **4ème sous-commission des installations électriques et mécaniques** | |
| Objet | Types de turbines et d'alternateurs applicables à une station marémotrice. Leur liaison mutuelle et avec un poste de transformation |
| Président | Barrillon |
| Membres | Ailleret, Besson, Bricard, Detoeuf, Lamothe |
| **5ème sous-commission des vannages** | |
| Objet | Meilleurs systèmes de vannes et meilleures dispositions du vannage dans une grande station marémotrice |
| Président | Bricard |
| Membres | Barrillon, Benezit, Coyne, Detoeuf, Lamothe |
| **6ème sous-commission de la régularisation de l'énergie** | |
| Objet | Problème de la régularisation autonome d'une grande station marémotrice, ou conditions de l'absorption plus ou moins complète de sa production dans le réseau électrique national. |
| Président | Besson (ingénieur en chef des Ponts et chaussées, en disponibilité) |
| Membres | Ailleret, Bizot, Nizery |
| **7ème sous-commission des Études hydrographiques** | |
| Objet | Influence d'une digue barrant certaines étendues de mer sur la dénivellation et l'allure de la marée, notamment en Rance et en baie du Mont-Saint-Michel |
| Président | Courtier (ingénieur hydrographe général, en retraite) |

FIGURE G.1 – Composition des sous-commissions du Comité technique de l'énergie des mers (1944) [2]

# Annexe H

# Composition du Comité technique de l'énergie des vents

1. AN F14 20 902, p.d., Arrêté constituant le Comité technique de l'énergie des vents, 27/01/1945.
2. AN F14 20 902, p.d., Comité technique de l'énergie des vents, Procès-verbal de la séance du 21/01/1949.

| **Nom, Prénom** | **Fonction** | **Formation, grade** | **Profession/Institution** |
|---|---|---|---|
| Crescent, Charles | Président | Inspecteur général des Ponts et chaussée | |
| Génissieu, Étienne | Vice-président | Inspecteur général des Ponts et chaussées | |
| Pétry, Paul | Secrétaire général | Ingénieur en chef des Ponts et chaussées | Service des Phares et balises |
| Ginocchio, Roger | Secrétaire | Ingénieur des Ponts et chaussées | Service des Phares et balises |
| Ailleret, Pierre | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Hors cadre<br>COEE |
| Besson | Membre | Ingénieur en chef des Ponts et chaussées | |
| Bizot, Émile | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | |
| Caquot, Albert | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Académie des sciences |
| Detoeuf, Auguste | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Hors cadre |
| Rossignol de Fargues | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | |
| Foch | Membre | | Professeur à la faculté des sciences de Paris |
| Gérardin | Membre | Ingénieur en chef de l'Aéronautique | |
| Guilloux | Membre | | Sous-chef de la section technique à Office national météorologique |
| Lamothe | Membre | Ingénieur général des Industries navales | |
| Legendre | Membre | Ingénieur principal des industries navales | |
| Nizery, André | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Société l'Énergie des mers |
| Rocard | Membre | | Professeur à la faculté des sciences de Paris |
| Roussel | Membre | Ingénieur de l'Aéronautique | |
| Gervais de Rouville, André | Membre | Inspecteur général des Ponts et chaussées | Directeur du service des Phares et balises |

FIGURE H.1 – Composition du Comité technique de l'énergie des vents (01/1945) [1]

| **Nom, Prénom** | **Fonction** | **Formation, grade** | **Profession/Institution** |
|---|---|---|---|
| Crescent, Charles | Président | Inspecteur général des Ponts et chaussée | |
| Génissieu, Étienne | Vice-président | Inspecteur général des Ponts et chaussées | |
| Pétry, Paul | Secrétaire général | Ingénieur en chef des Ponts et chaussées | Service des Phares et balises |
| Ginocchio, Roger | Secrétaire | Ingénieur des Ponts et chaussées | Service des Phares et balises |
| Calvet | | | |
| Ailleret, Pierre | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Hors cadre COEE |
| Besson | Membre | Ingénieur en chef des Ponts et chaussées | |
| Bizot, Émile | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | |
| Caquot, Albert | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Académie des sciences |
| Darrieus, Georges | Membre | Ingénieur École centrale de Paris | Société de condensation et d'applications mécaniques |
| Rossignol de Fargues | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | |
| Foch | Membre | | Professeur à la faculté des sciences de Paris |
| Gérardin | Membre | Ingénieur en chef de l'Aéronautique | |
| Guilloux | Membre | | Sous-chef de la section technique à Office national météorologique |
| Legendre | Membre | Ingénieur principal des industries navales | |
| Nizery, André | Membre | Ingénieur des Ponts et chaussées | Société l'Énergie des mers |
| Paimboeuf, Maurice | Maurice | | EDF |
| Rocard | Membre | | Professeur à la faculté des sciences de Paris |
| Roussel | Membre | Ingénieur de l'Aéronautique | |
| Gervais de Rouville, André | Membre | Inspecteur général des Ponts et chaussées | Directeur du service des Phares et balises |

FIGURE H.2 – Composition du Comité technique de l'énergie des vents (01/1949) [2]

# Annexe I

# Publicités de la société Insol (vers 1940)

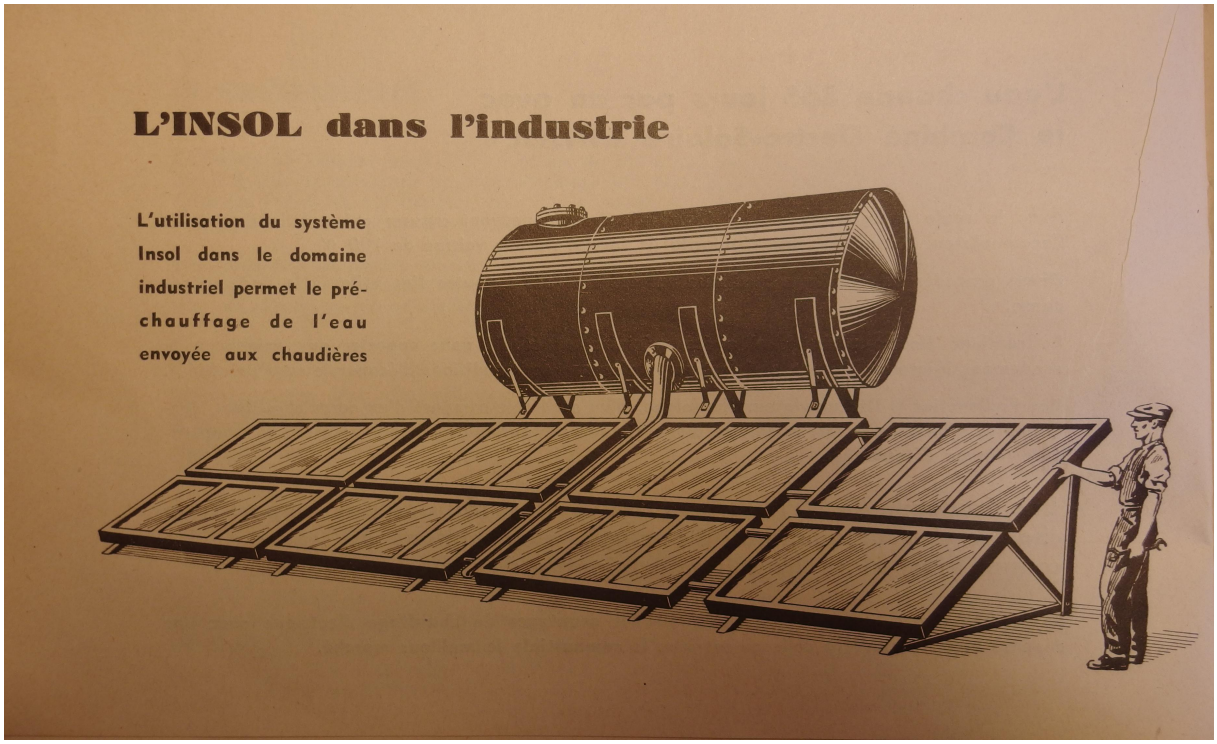



FIGURE I.1 – Publicité pour les chauffe-eau Insol (vers 1940) [1]

1. ANOM 93COL17, p.d., Brochure des établissements Insol sur les chauffe-eau Insol, vers 1940.

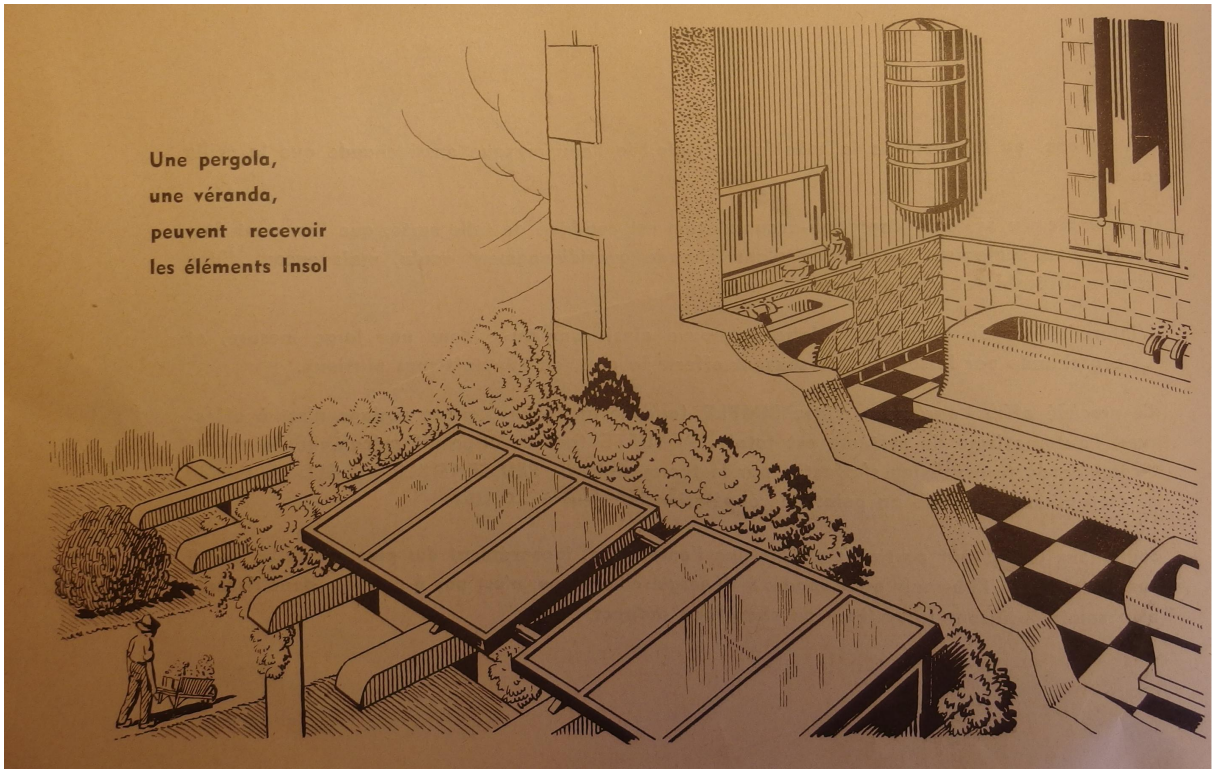



FIGURE I.2 – Publicité pour les chauffe-eau Insol (vers 1940)

# Annexe J

# Chauffe-eau système Pasteur commandé par l'AOF en 1942

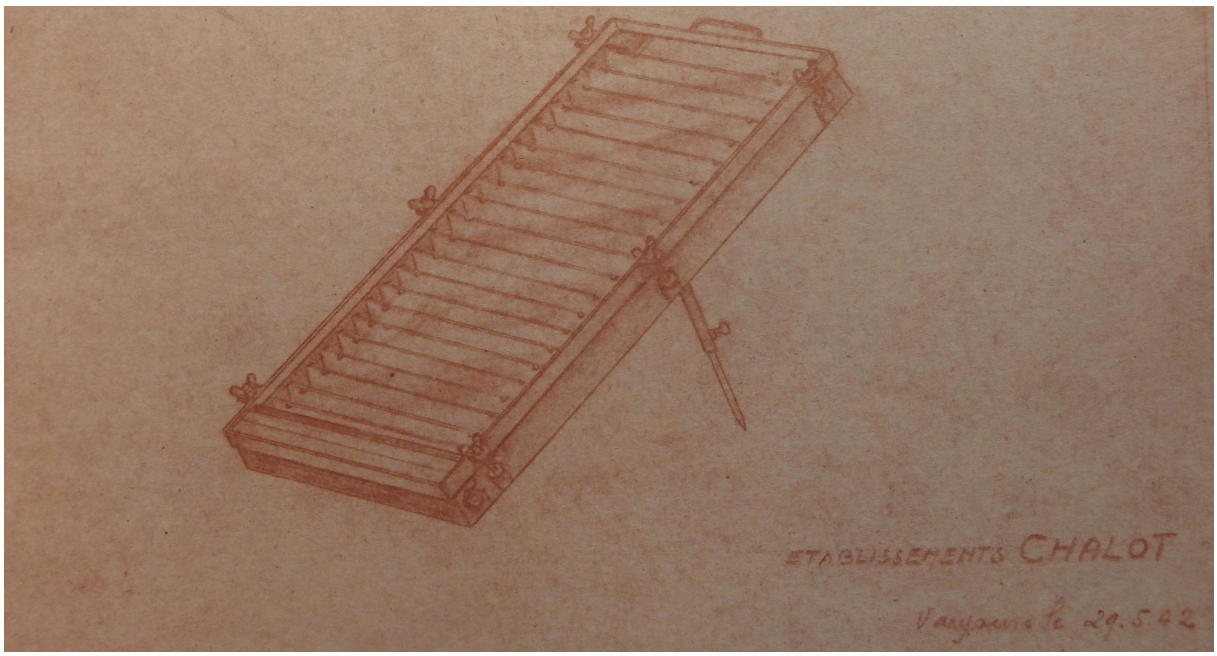



FIGURE J.1 – Appareil distillateur système Pasteur commandé en dix exemplaires en 1942 par le secrétariat d'État aux colonies pour le compte de l'AOF [2]

2. ANOM 93COL18, p.d., Notice de la société Chalot sur les caisses chauffantes distillatrices système Pasteur, 15/06/1942.

# Annexe K

# Brochure de l'Office général des éoliennes (v. 1950)

2. AN 1991 0305/3, p.d.
4. AN 1991 0305/3, p.d.




FIGURE K.1 – Brochure de l'Office général des éoliennes et toutes ses applications (années 1950) [2]




FIGURE K.2 – Brochure de l'Office général des éoliennes et toutes ses applications (années 1950) [4]

# Annexe L

# La Houille bleue et fluviale - Projet de François Baudot

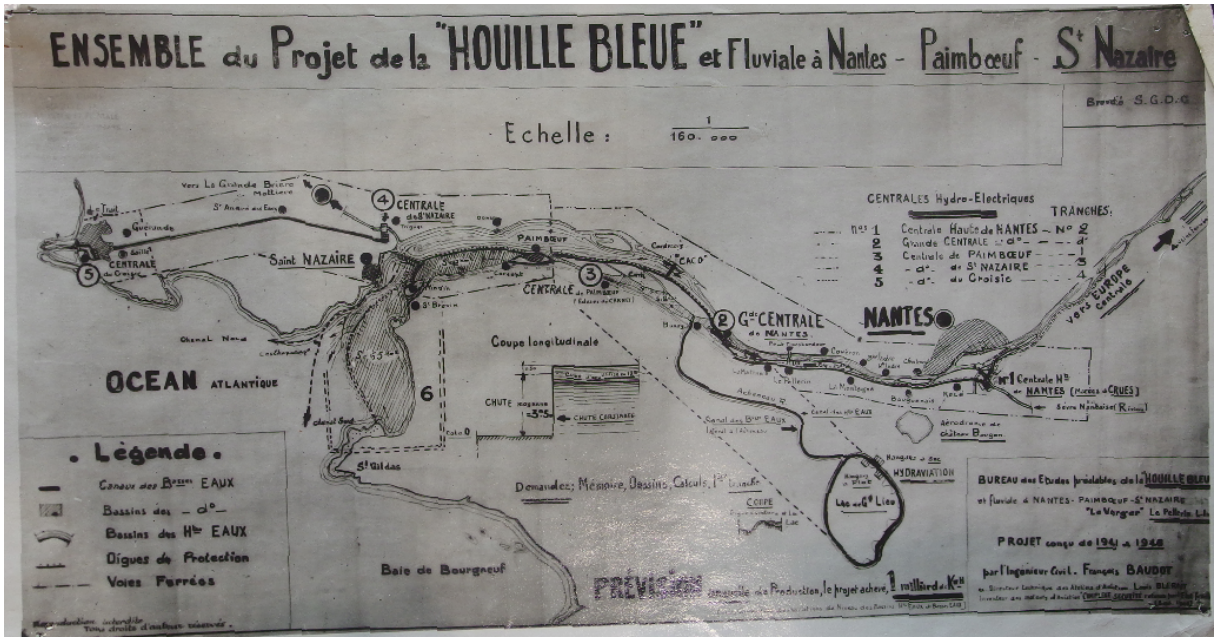



FIGURE L.1 – Plan d'ensemble du projet NAPANA de François Baudot (v. 1947-1950) [1]

1. AN 1977 0605/5, p.d., Bureau des études préalables de la Houille bleue et fluviale à Nantes Paimboeuf Saint-Nazaire, Plan d'ensemble du projet NAPANA, v. 1947-1950

3. AN 1977 0605/5, p.d., François Baudot, Vue d'artiste du port de Saint-Nazaire muni d'un barrage marémoteur selon les conceptions de Baudot, 08/1946.

5. AN 1977 0605/5, p.d., Brochure de propagande de François Baudot pour son projet NAPANA, v. 1947-1950.

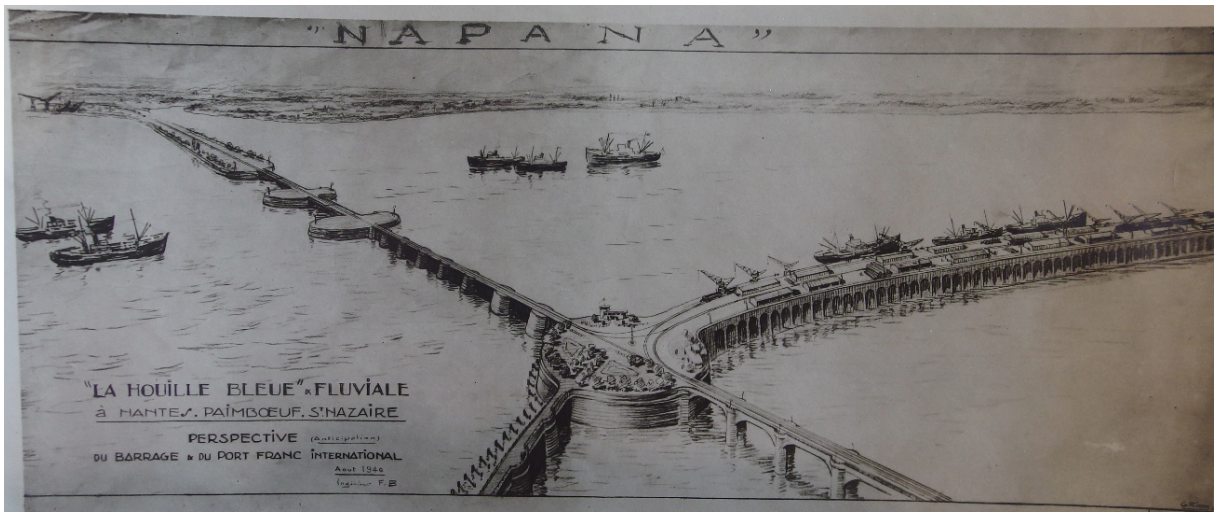
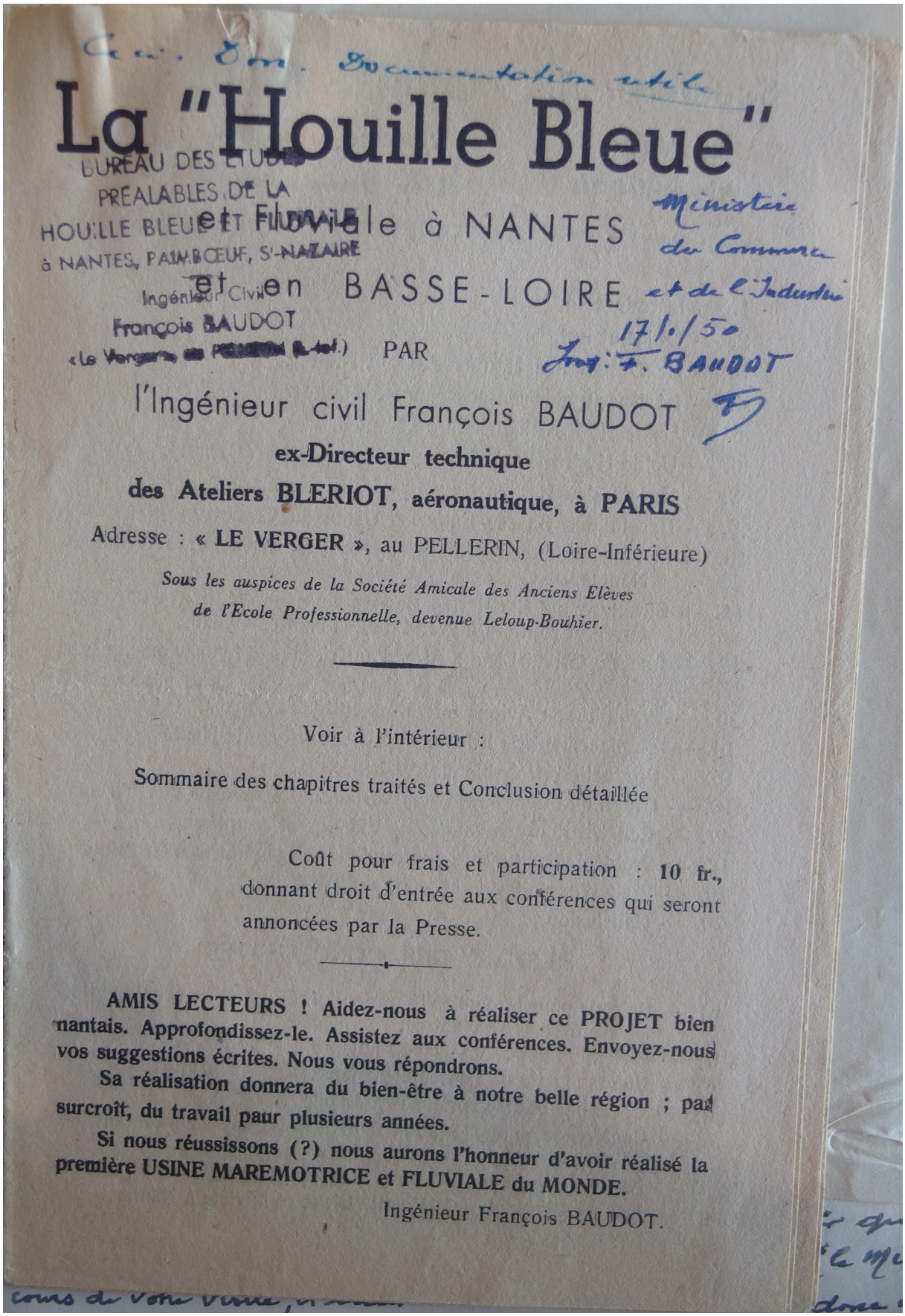



FIGURE L.2 – Vue d'artiste du port aménagé selon le projet de François Baudot (1946) [3]



# La "Houille Bleue"

BUREAU DES ETUDES
PREALABLES DE LA
HOUILLE BLEUE ET FLUVIALE
à NANTES, PAIMBŒUF, ST-NAZAIRE

Ingénieur Civil
François BAUDOT
«Le Verger» au PELLERIN (L.-Inf.)

## et Fluviale à NANTES et en BASSE-LOIRE

PAR

l'Ingénieur civil François BAUDOT

**ex-Directeur technique**
**des Ateliers BLERIOT, aéronautique, à PARIS**

Adresse : « **LE VERGER** », au PELLERIN, (Loire-Inférieure)

*Sous les auspices de la Société Amicale des Anciens Elèves de l'Ecole Professionnelle, devenue Leloup-Bouhier.*

Voir à l'intérieur :

Sommaire des chapitres traités et Conclusion détaillée

Coût pour frais et participation : **10 fr.**, donnant droit d'entrée aux conférences qui seront annoncées par la Presse.

**AMIS LECTEURS ! Aidez-nous à réaliser ce PROJET bien nantais. Approfondissez-le. Assistez aux conférences. Envoyez-nous vos suggestions écrites. Nous vous répondrons.**

**Sa réalisation donnera du bien-être à notre belle région ; par surcroît, du travail paur plusieurs années.**

**Si nous réussissons (?) nous aurons l'honneur d'avoir réalisé la première USINE MAREMOTRICE et FLUVIALE du MONDE.**

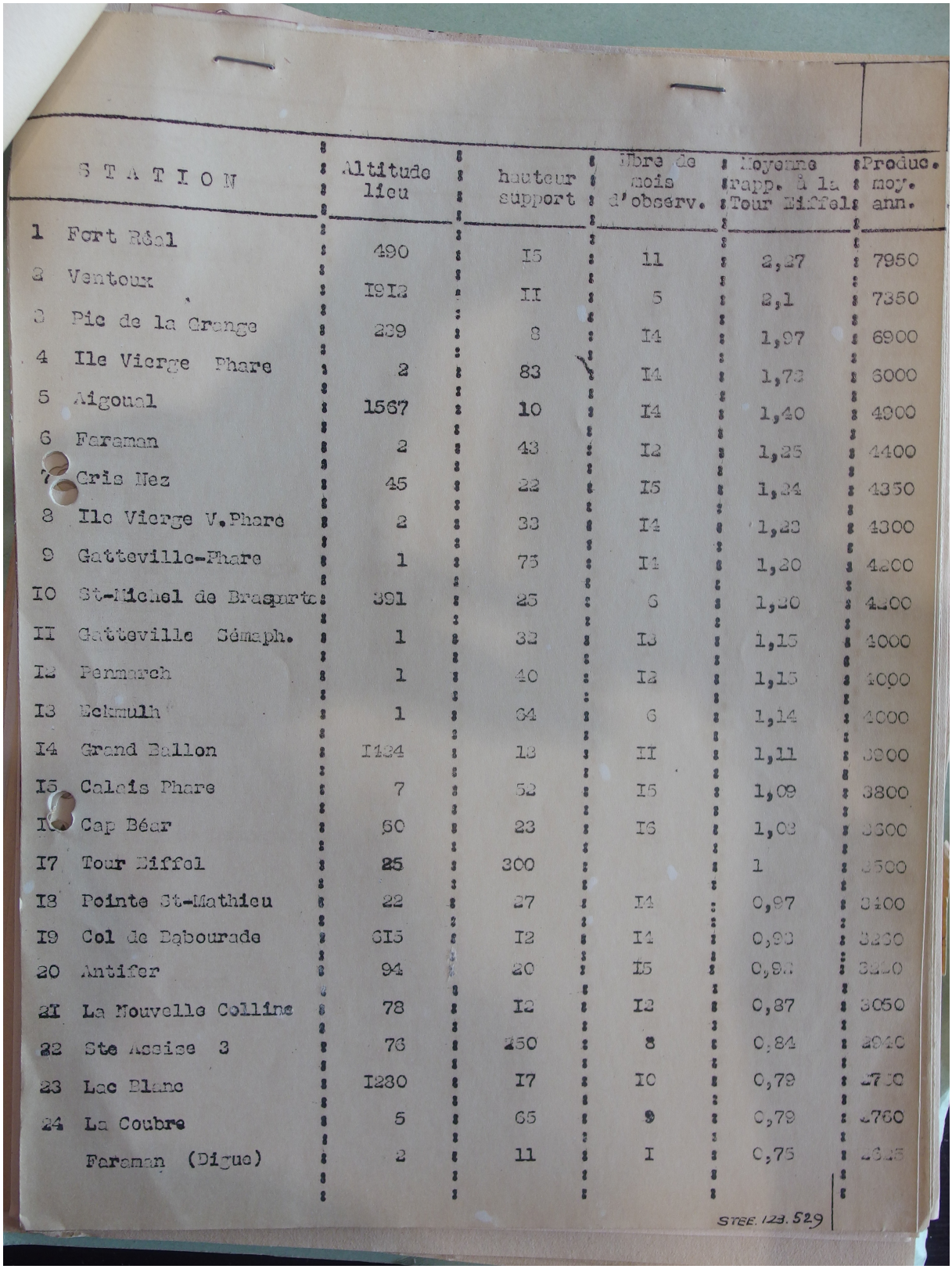
Ingénieur François BAUDOT.

FIGURE L.3 – Brochure de propagande de François Baudot pour son projet NAPANA (v. 1947-1950) [5]

# Annexe M

# Relevés de l'énergie éolienne par le Comité technique de l'énergie des vents en France métropolitaine

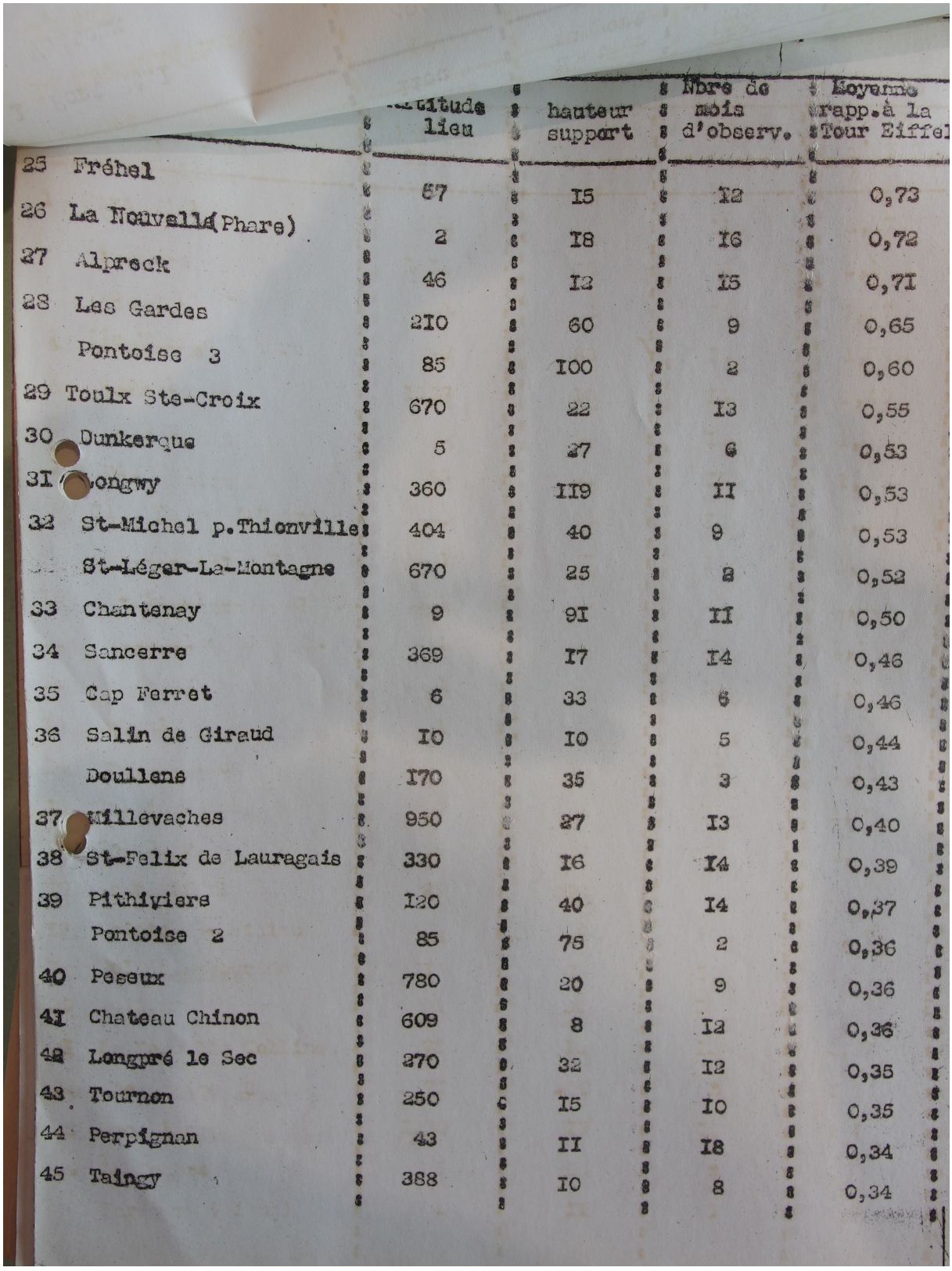
2. AN F14 20 902, p.d., CTEV, Prospection des sites, 03/12/1948.



| | STATION | Altitude lieu | hauteur support | Nbre de mois d'observ. | Moyenne rapp. à la Tour Eiffel | Produc. moy. ann. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Fort Réal | 490 | I5 | 11 | 2,27 | 7950 |
| 2 | Ventoux | I9I2 | II | 5 | 2,1 | 7350 |
| 3 | Pic de la Grange | 289 | 8 | I4 | 1,97 | 6900 |
| 4 | Ile Vierge Phare | 2 | 83 | I4 | 1,73 | 6000 |
| 5 | Aigoual | 1567 | 10 | I4 | 1,40 | 4900 |
| 6 | Faraman | 2 | 43 | I2 | 1,25 | 4400 |
| 7 | Cris Nez | 45 | 22 | I5 | 1,24 | 4350 |
| 8 | Ile Vierge V.Phare | 2 | 33 | I4 | 1,23 | 4300 |
| 9 | Gatteville-Phare | 1 | 75 | I4 | 1,20 | 4200 |
| I0 | St-Michel de Braspartz | 391 | 25 | 6 | 1,20 | 4200 |
| II | Gatteville Sémaph. | 1 | 32 | I3 | 1,15 | 4000 |
| I2 | Penmarch | 1 | 40 | I2 | 1,15 | 4000 |
| I3 | Belmulh | 1 | 64 | 6 | 1,14 | 4000 |
| I4 | Grand Ballon | I424 | 18 | II | 1,11 | 3900 |
| I5 | Calais Phare | 7 | 52 | I5 | 1,09 | 3800 |
| I6 | Cap Béar | 60 | 23 | I6 | 1,08 | 3800 |
| I7 | Tour Eiffel | 25 | 300 | | 1 | 3500 |
| I8 | Pointe St-Mathieu | 22 | 27 | I4 | 0,97 | 3400 |
| I9 | Col de Dabourade | 6I5 | I2 | I4 | 0,93 | 3250 |
| 20 | Antifer | 94 | 20 | I5 | 0,9[illegible] | 3250 |
| 2I | La Nouvelle Colline | 78 | I2 | I2 | 0,87 | 3050 |
| 22 | Ste Assise 3 | 76 | 250 | 8 | 0,84 | 2940 |
| 23 | Lac Blanc | I280 | I7 | I0 | 0,79 | 2750 |
| 24 | La Coubre | 5 | 65 | 9 | 0,79 | 2760 |
| | Faraman (Digue) | 2 | 11 | I | 0,75 | 2625 |

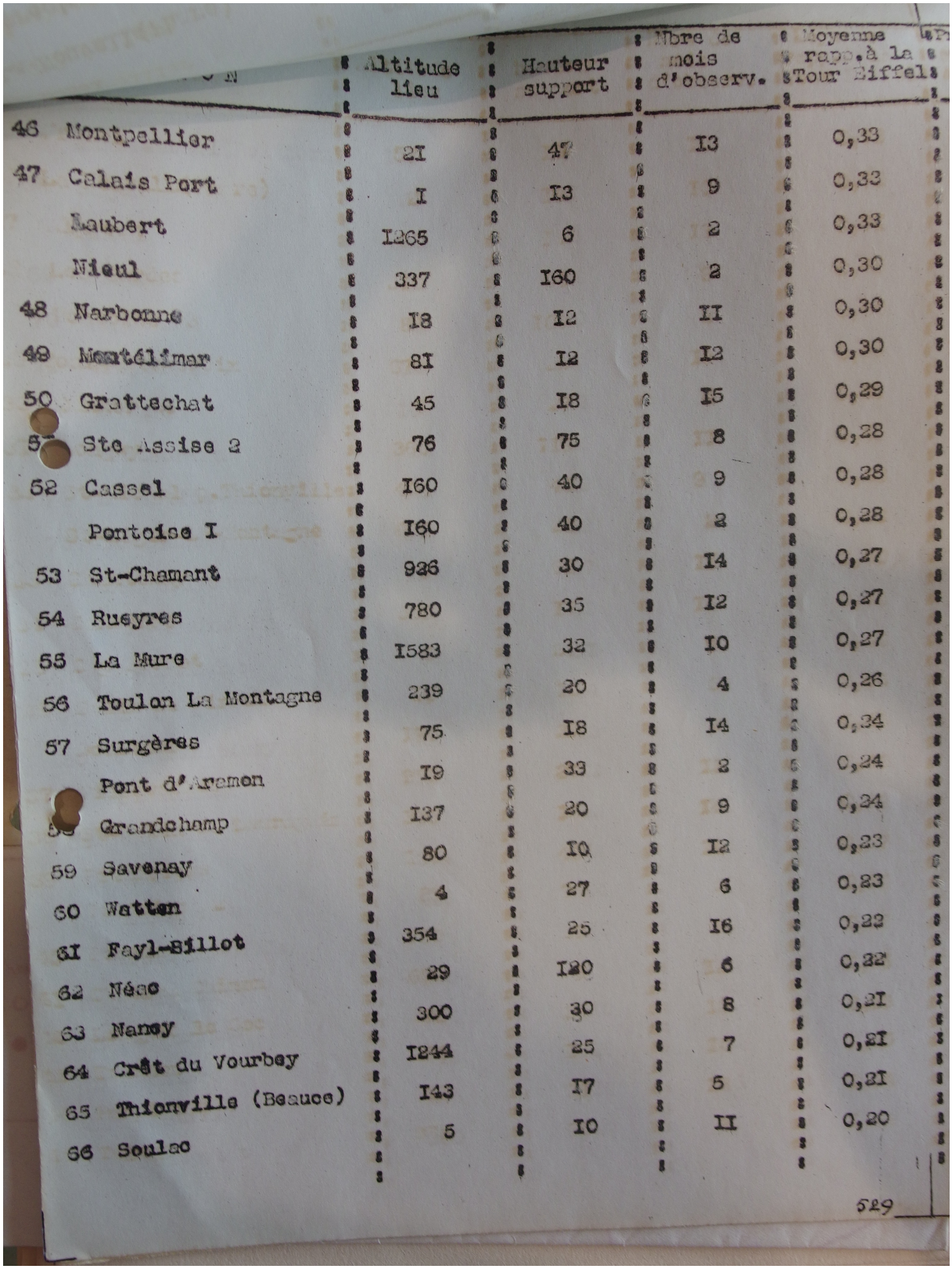
STEE. 123. 529

FIGURE M.1 – Relevés de l'énergie éolienne par le Comité technique de l'énergie des vents en France métropolitaine (1948) [2]



| | | Altitude lieu | hauteur support | Nbre de mois d'observ. | Moyenne rapp.à la Tour Eiffel |
|---|---|---|---|---|---|
| 25 | Fréhel | 67 | I5 | I2 | 0,73 |
| 26 | La Nouvelle(Phare) | 2 | I8 | I6 | 0,72 |
| 27 | Alprech | 46 | I2 | I5 | 0,7I |
| 28 | Les Gardes | 2I0 | 60 | 9 | 0,65 |
| | Pontoise 3 | 85 | I00 | 2 | 0,60 |
| 29 | Toulx Ste-Croix | 670 | 22 | I3 | 0,55 |
| 30 | Dunkerque | 5 | 27 | 6 | 0,53 |
| 3I | Longwy | 360 | II9 | II | 0,53 |
| 32 | St-Michel p.Thionville | 404 | 40 | 9 | 0,53 |
| | St-Léger-La-Montagne | 670 | 25 | 8 | 0,52 |
| 33 | Chantenay | 9 | 9I | II | 0,50 |
| 34 | Sancerre | 369 | I7 | I4 | 0,46 |
| 35 | Cap Ferret | 6 | 33 | 6 | 0,46 |
| 36 | Salin de Giraud | I0 | I0 | 5 | 0,44 |
| | Doullens | I70 | 35 | 3 | 0,43 |
| 37 | Millevaches | 950 | 27 | I3 | 0,40 |
| 38 | St-Felix de Lauragais | 330 | I6 | I4 | 0,39 |
| 39 | Pithiviers | I20 | 40 | I4 | 0,37 |
| | Pontoise 2 | 85 | 75 | 2 | 0,36 |
| 40 | Peseux | 780 | 20 | 9 | 0,36 |
| 4I | Chateau Chinon | 609 | 8 | I2 | 0,36 |
| 42 | Longpré le Sec | 270 | 32 | I2 | 0,35 |
| 43 | Tournon | 250 | I5 | I0 | 0,35 |
| 44 | Perpignan | 43 | II | I8 | 0,34 |
| 45 | Taingy | 388 | I0 | 8 | 0,34 |

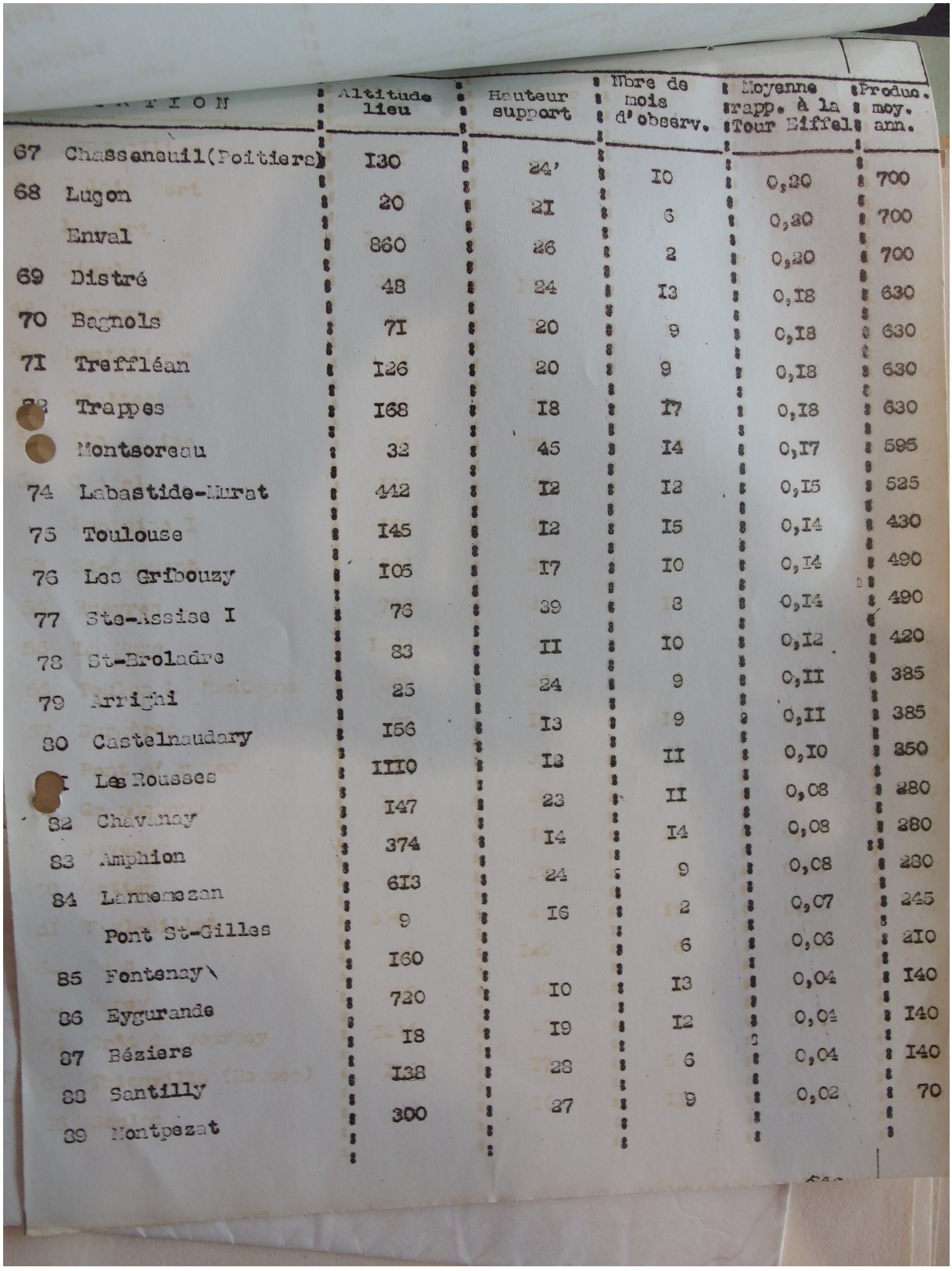
FIGURE M.2 – Relevés de l'énergie éolienne par le Comité technique de l'énergie des vents en France métropolitaine (1948)



| N | | Altitude lieu | Hauteur support | Nbre de mois d'observ. | Moyenne rapp. à la Tour Eiffel |
|---|---|---|---|---|---|
| 46 | Montpellier | 2I | 47 | I3 | 0,33 |
| 47 | Calais Port | I | I3 | 9 | 0,33 |
| | Laubert | I265 | 6 | 2 | 0,33 |
| | Nieul | 337 | I60 | 2 | 0,30 |
| 48 | Narbonne | I8 | I2 | II | 0,30 |
| 48 | Montélimar | 8I | I2 | I2 | 0,30 |
| 50 | Grattechat | 45 | I8 | I5 | 0,29 |
| 5[illegible] | Ste Assise 2 | 76 | 75 | 8 | 0,28 |
| 52 | Cassel | I60 | 40 | 9 | 0,28 |
| | Pontoise I | I60 | 40 | 2 | 0,28 |
| 53 | St-Chamant | 926 | 30 | I4 | 0,27 |
| 54 | Rueyres | 780 | 35 | I2 | 0,27 |
| 55 | La Mure | I583 | 32 | I0 | 0,27 |
| 56 | Toulon La Montagne | 239 | 20 | 4 | 0,26 |
| 57 | Surgères | 75 | I8 | I4 | 0,34 |
| | Pont d'Aramon | I9 | 33 | 2 | 0,24 |
| 5[illegible] | Grandchamp | I37 | 20 | 9 | 0,24 |
| 59 | Savenay | 80 | I0 | I2 | 0,23 |
| 60 | Watten | 4 | 27 | 6 | 0,23 |
| 6I | Fayl-Billot | 354 | 25 | I6 | 0,22 |
| 62 | Néac | 29 | I20 | 6 | 0,32 |
| 63 | Nancy | 300 | 30 | 8 | 0,2I |
| 64 | Crêt du Vourbey | I244 | 25 | 7 | 0,2I |
| 65 | Thionville (Beauce) | I43 | I7 | 5 | 0,2I |
| 66 | Soulac | 5 | I0 | II | 0,20 |

529

FIGURE M.3 – Relevés de l'énergie éolienne par le Comité technique de l'énergie des vents en France métropolitaine (1948)



| | | Altitude lieu | Hauteur support | Nbre de mois d'observ. | Moyenne rapp. à la Tour Eiffel | Produc. moy. ann. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 67 | Chasseneuil(Poitiers) | I30 | 24' | I0 | 0,20 | 700 |
| 68 | Lugon | 20 | 2I | 6 | 0,20 | 700 |
| | Enval | 860 | 26 | 2 | 0,20 | 700 |
| 69 | Distré | 48 | 24 | I3 | 0,I8 | 630 |
| 70 | Bagnols | 7I | 20 | 9 | 0,I8 | 630 |
| 7I | Treffléan | I26 | 20 | 9 | 0,I8 | 630 |
| [illegible] | Trappes | I68 | I8 | I7 | 0,I8 | 630 |
| [illegible] | Montsoreau | 32 | 45 | I4 | 0,I7 | 595 |
| 74 | Labastide-Murat | 442 | I2 | I2 | 0,I5 | 525 |
| 75 | Toulouse | I45 | I2 | I5 | 0,I4 | 430 |
| 76 | Les Gribouzy | I05 | I7 | I0 | 0,I4 | 490 |
| 77 | Ste-Assise I | 76 | 39 | 8 | 0,I4 | 490 |
| 78 | St-Broladre | 83 | II | I0 | 0,I2 | 420 |
| 79 | Arrighi | 25 | 24 | 9 | 0,II | 385 |
| 80 | Castelnaudary | I56 | I3 | 9 | 0,II | 385 |
| [illegible] | Les Rousses | III0 | I2 | II | 0,I0 | 350 |
| 82 | Chavanay | I47 | 23 | II | 0,08 | 280 |
| 83 | Amphion | 374 | I4 | I4 | 0,08 | 280 |
| 84 | Lannemezan | 6I3 | 24 | 9 | 0,08 | 280 |
| | Pont St-Gilles | 9 | I6 | 2 | 0,07 | 245 |
| 85 | Fontenay | I60 | | 6 | 0,06 | 2I0 |
| 86 | Eygurande | 720 | I0 | I3 | 0,04 | I40 |
| 87 | Béziers | I8 | I9 | I2 | 0,04 | I40 |
| 88 | Santilly | I38 | 28 | 6 | 0,04 | I40 |
| 89 | Montpezat | 300 | 27 | 9 | 0,02 | 70 |

FIGURE M.4 – Relevés de l'énergie éolienne par le Comité technique de l'énergie des vents en France métropolitaine (1948)

# Annexe N

# Cartes des Hauts plateaux oranais. Points d'eau aménagés par le Service de la colonisation et de l'hydraulique en 1954

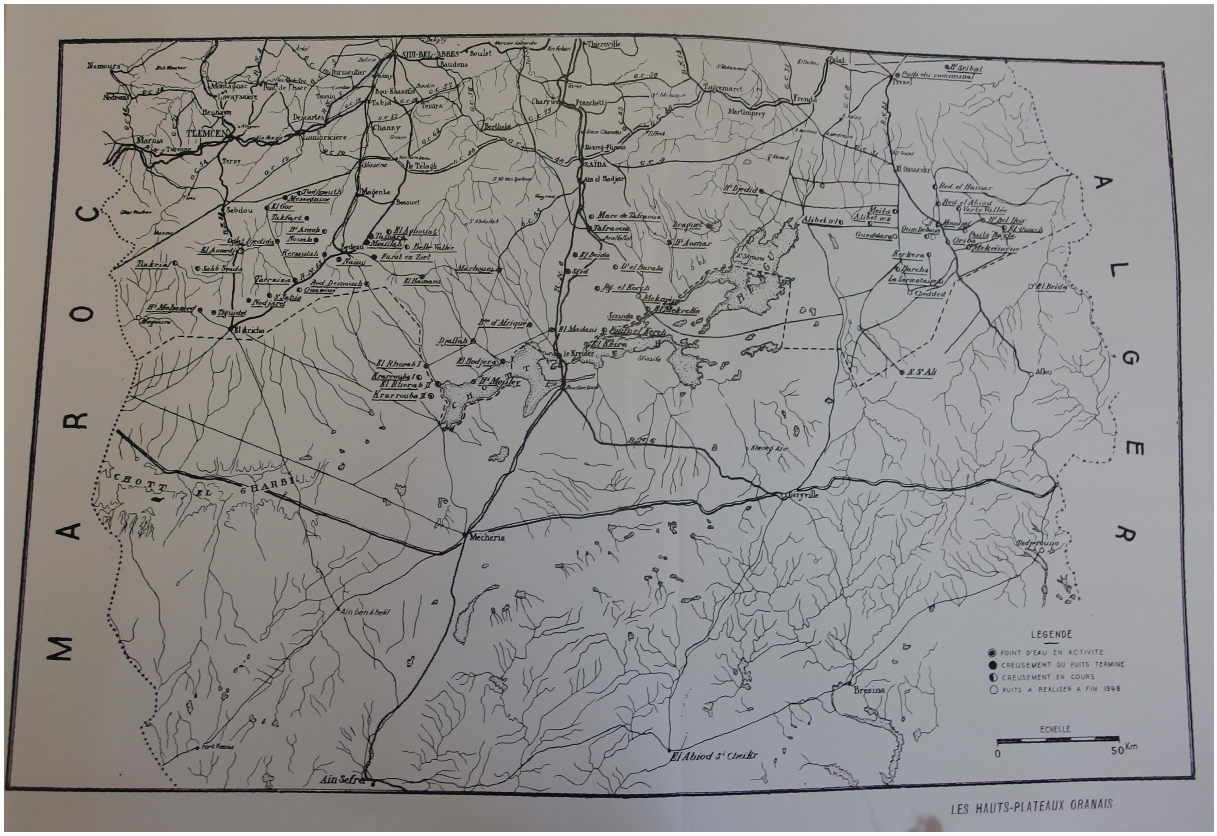



FIGURE N.1 – Carte des Hauts plateaux oranais (pour avoir une idée de l'échelle)(AVARGUES et RIPOLL, 1954)

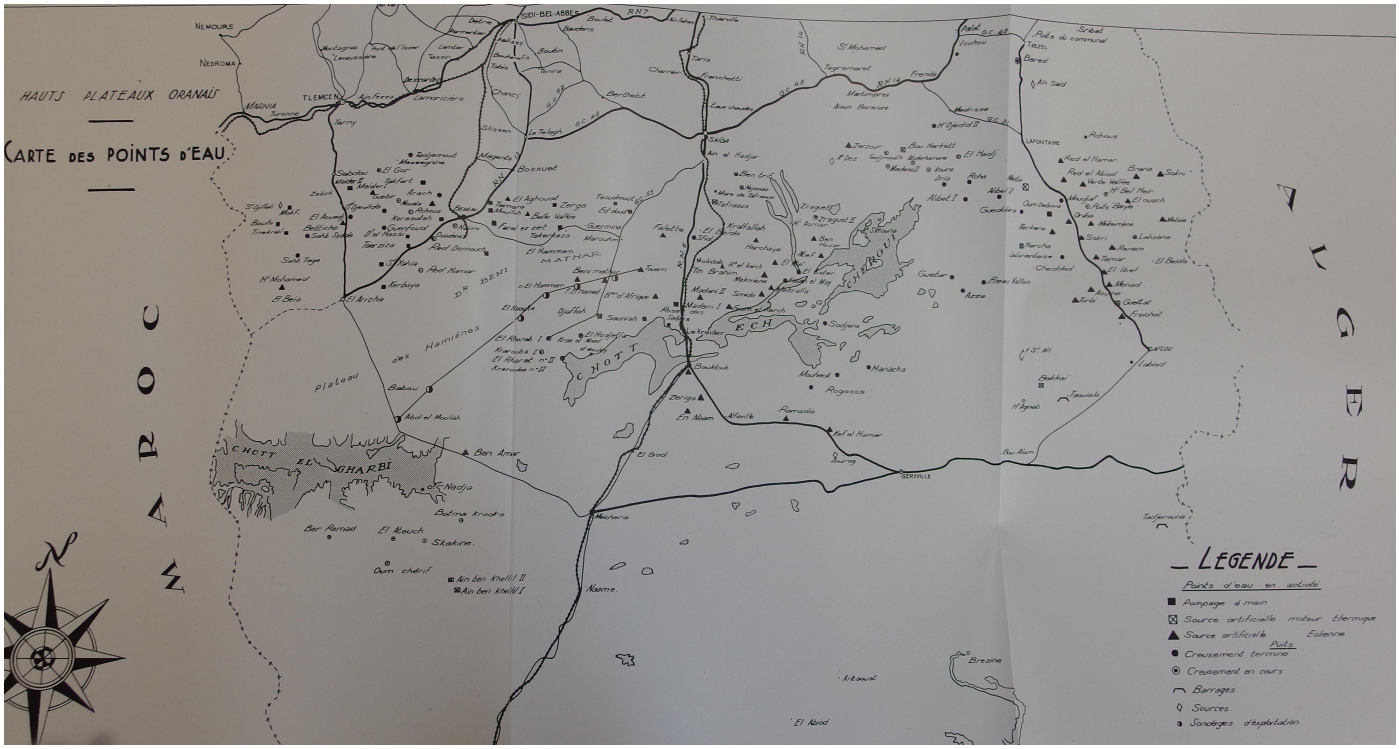
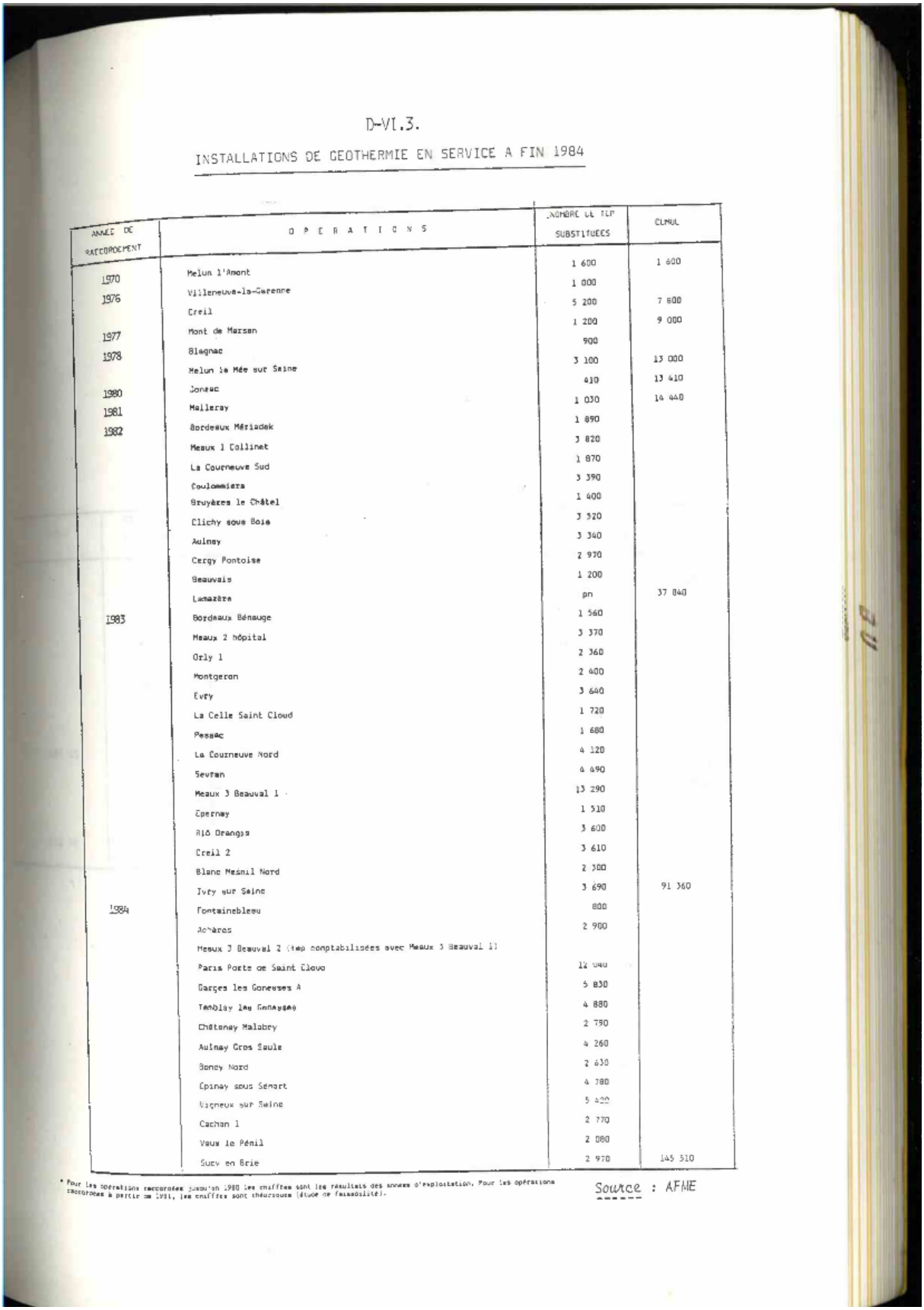



FIGURE N.2 – Carte des points d'eau aménagés par le Service de la colonisation et de l'hydraulique en 1954 dans les Hauts plateaux oranais (AVARGUES et RIPOLL, 1954)

# Annexe O

# Liste des installations géothermiques mises en service entre 1970 et 1986



D-VI.3.

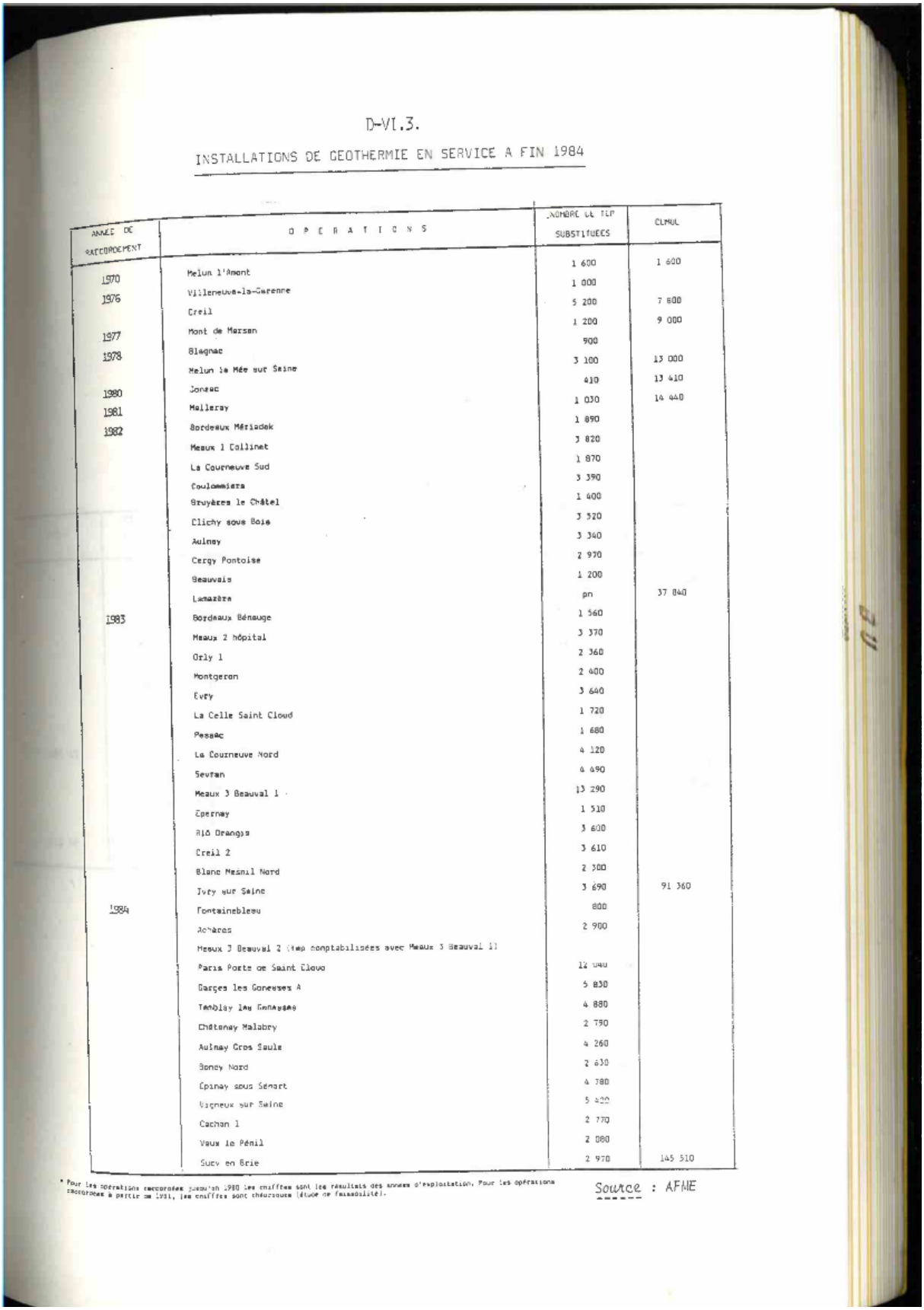
INSTALLATIONS DE GEOTHERMIE EN SERVICE A FIN 1984

| ANNEE DE RACCORDEMENT | O P E R A T I O N S | NOMBRE DE TEP SUBSTITUEES | CUMUL |
|---|---|---|---|
| 1970 | Melun l'Amont | 1 600 | 1 600 |
| | Villeneuve-la-Garenne | 1 000 | |
| 1976 | Creil | 5 200 | 7 800 |
| | Mont de Marsan | 1 200 | 9 000 |
| 1977 | Blagnac | 900 | |
| 1978 | Melun le Mée sur Seine | 3 100 | 13 000 |
| | Jonzac | 410 | 13 410 |
| 1980 | Mallemay | 1 030 | 14 440 |
| 1981 | Bordeaux Mériadek | 1 890 | |
| 1982 | Meaux 1 Collinet | 3 820 | |
| | La Courneuve Sud | 1 870 | |
| | Coulommiers | 3 390 | |
| | Bruyères le Châtel | 1 400 | |
| | Clichy sous Bois | 3 320 | |
| | Aulnay | 3 340 | |
| | Cergy Pontoise | 2 970 | |
| | Beauvais | 1 200 | |
| | Lamazère | pn | 37 840 |
| 1983 | Bordeaux Bénauge | 1 560 | |
| | Meaux 2 hôpital | 3 370 | |
| | Orly 1 | 2 360 | |
| | Montgeron | 2 400 | |
| | Evry | 3 640 | |
| | La Celle Saint Cloud | 1 720 | |
| | Pessac | 1 680 | |
| | La Courneuve Nord | 4 120 | |
| | Sevran | 4 490 | |
| | Meaux 3 Beauval 1 | 13 290 | |
| | Epernay | 1 510 | |
| | RIO Orangis | 3 600 | |
| | Creil 2 | 3 610 | |
| | Blanc Mesnil Nord | 2 300 | |
| | Ivry sur Seine | 3 690 | 91 360 |
| 1984 | Fontainebleau | 800 | |
| | Achères | 2 900 | |
| | Meaux 3 Beauval 2 (tep comptabilisées avec Meaux 3 Beauval 1) | | |
| | Paris Porte de Saint Cloud | 12 040 | |
| | Garges les Gonesses A | 5 830 | |
| | Tremblay les Gonesses | 4 880 | |
| | Châtenay Malabry | 2 790 | |
| | Aulnay Gros Saule | 4 260 | |
| | Bondy Nord | 2 630 | |
| | Epinay sous Sénart | 4 380 | |
| | Vigneux sur Seine | 5 420 | |
| | Cachan 1 | 2 770 | |
| | Vaux le Pénil | 2 080 | |
| | Sucy en Brie | 2 970 | 145 510 |

* Pour les opérations raccordées jusqu'en 1980 les chiffres sont les résultats des années d'exploitation. Pour les opérations raccordées à partir de 1981, les chiffres sont théoriques (étude de faisabilité).

Source : AFME

FIGURE O.1 – Installations géothermiques mises en service entre 1970 et 1986 (AFME, 1985, p. D-IV-3)



D-VI.3.

INSTALLATIONS DE GEOTHERMIE EN SERVICE A FIN 1984

| ANNEE DE RACCORDEMENT | O P E R A T I O N S | NOMBRE DE TEP SUBSTITUEES | CUMUL |
|---|---|---|---|
| 1970 | Melun l'Amont | 1 600 | 1 600 |
| | Villeneuve-la-Garenne | 1 000 | |
| 1976 | Creil | 5 200 | 7 800 |
| | Mont de Marsan | 1 200 | 9 000 |
| 1977 | Blagnac | 900 | |
| 1978 | Melun la Mée sur Seine | 3 100 | 13 000 |
| | Jonzac | 410 | 13 410 |
| 1980 | Mallemay | 1 030 | 14 440 |
| 1981 | Bordeaux Mériadek | 1 890 | |
| 1982 | Meaux 1 Collinet | 3 820 | |
| | La Courneuve Sud | 1 870 | |
| | Coulommiers | 3 390 | |
| | Bruyères le Châtel | 1 400 | |
| | Clichy sous Bois | 3 320 | |
| | Aulnay | 3 340 | |
| | Cergy Pontoise | 2 970 | |
| | Beauvais | 1 200 | |
| | Lamazère | pn | 37 840 |
| 1983 | Bordeaux Bénauge | 1 560 | |
| | Meaux 2 hôpital | 3 370 | |
| | Orly 1 | 2 360 | |
| | Montgeron | 2 400 | |
| | Evry | 3 640 | |
| | La Celle Saint Cloud | 1 720 | |
| | Pessac | 1 680 | |
| | La Courneuve Nord | 4 120 | |
| | Sevran | 4 490 | |
| | Meaux 3 Beauval 1 | 13 290 | |
| | Epernay | 1 510 | |
| | RIO Orangis | 3 600 | |
| | Creil 2 | 3 610 | |
| | Blanc Mesnil Nord | 2 300 | |
| | Ivry sur Seine | 3 690 | 91 360 |
| 1984 | Fontainebleau | 800 | |
| | Achères | 2 900 | |
| | Meaux 3 Beauval 2 (tep comptabilisées avec Meaux 3 Beauval 1) | | |
| | Paris Porte de Saint Cloud | 12 000 | |
| | Garges les Gonesses A | 5 830 | |
| | Tremblay les Gonesses | 4 880 | |
| | Châtenay Malabry | 2 790 | |
| | Aulnay Gros Saule | 4 260 | |
| | Bondy Nord | 2 630 | |
| | Epinay sous Sénart | 4 380 | |
| | Vigneux sur Seine | 5 400 | |
| | Cachan 1 | 2 770 | |
| | Vaux le Pénil | 2 080 | |
| | Sucy en Brie | 2 970 | 145 510 |

* Pour les opérations raccordées jusqu'en 1980 les chiffres sont les résultats des années d'exploitation. Pour les opérations raccordées à partir de 1981, les chiffres sont théoriques (étude de faisabilité).

Source : AFME

FIGURE O.2 – Installations géothermiques mises en service entre 1970 et 1986 (suite) (AFME, 1985, p. D-IV-4)

# Annexe P

# Centrales ETM Empain-Schneider et CGE (1980)

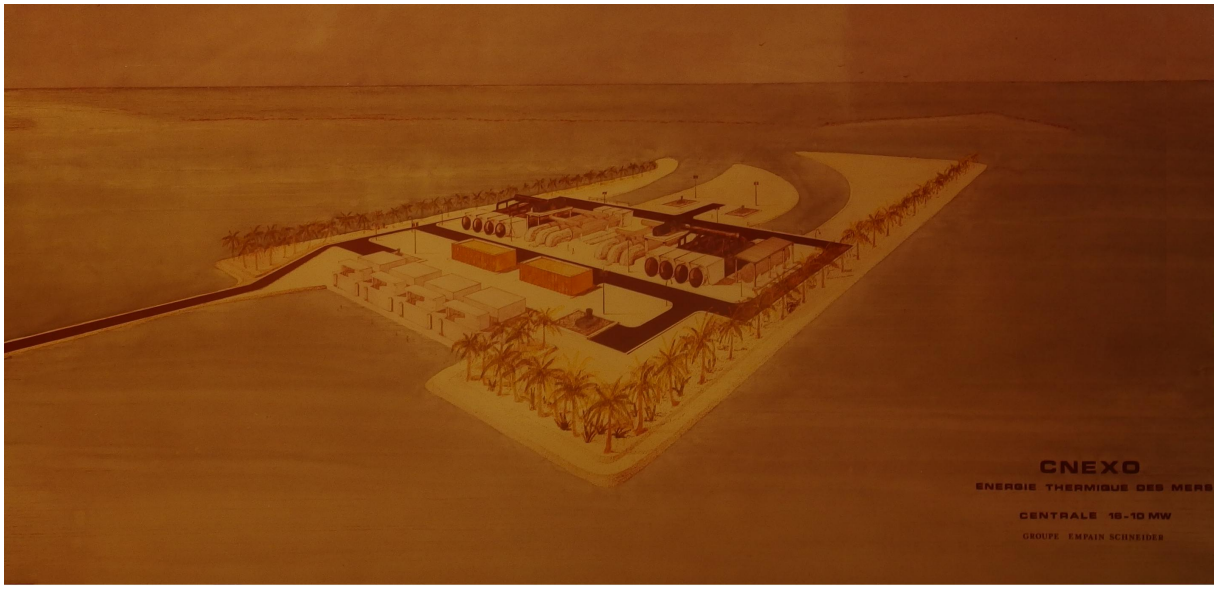



FIGURE P.1 – Vue d'artiste d'une centrale maréthermique par Empain-Schneider (à terre, cycle fermé) (1980) [2]

2. AN 2008 0658/57, p.d., Empain-Schneider, Rapport final d'étude de faisabilité d'une centrale maréthermique pour le CNEXO, 01/1980.

4. AN 2008 0658/56, p.d., CGE, Rapport final d'étude de faisabilité d'une centrale maréthermique pour le CNEXO, 31/01/1980.

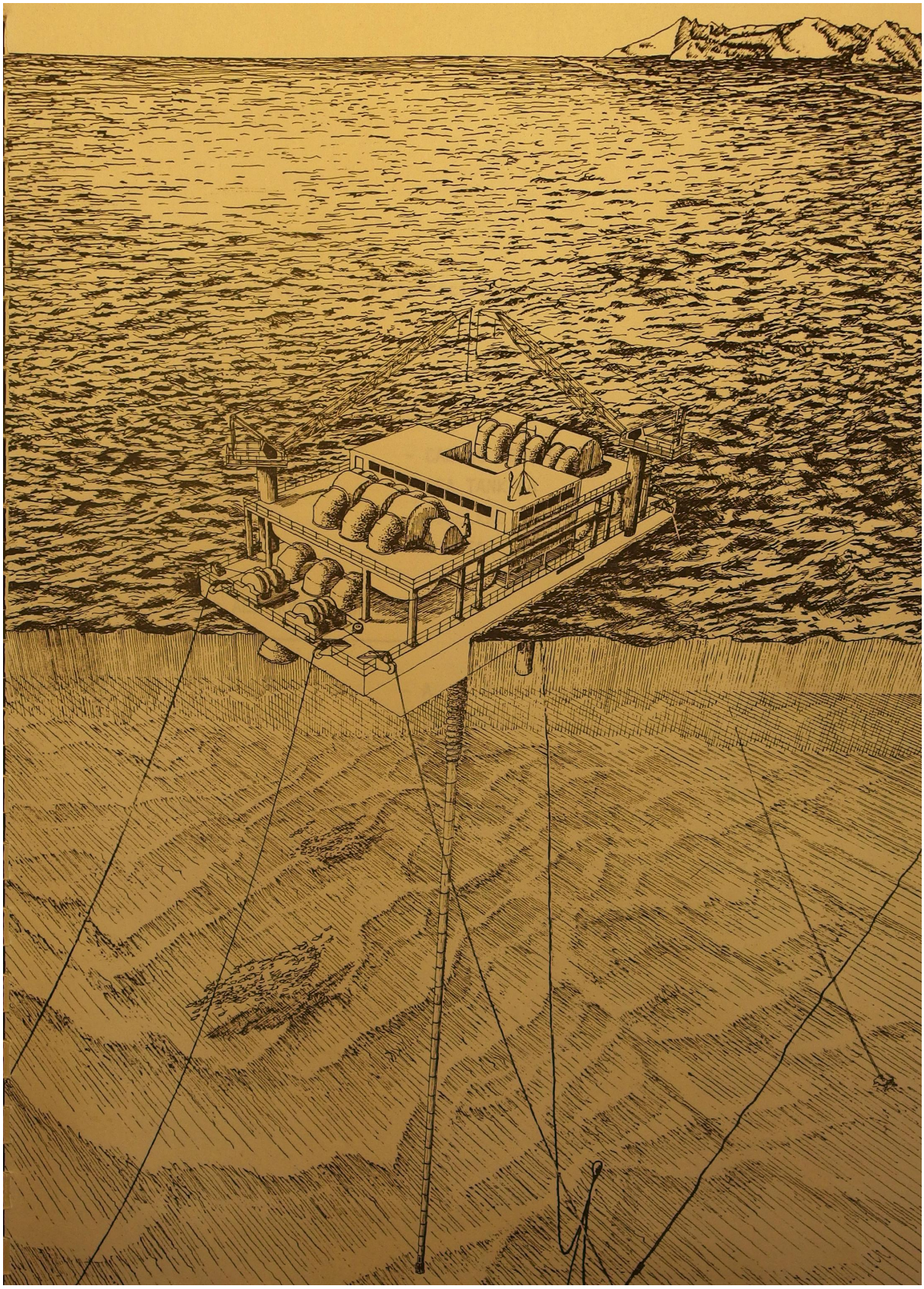


FIGURE P.2 – Vue d'artiste d'une centrale maréthermique par la CGE (flottante, cycle ouvert) (1980) [4]

# Index des noms d'acteurs


Lys, Jacques, 655

Abbot, Charles, 239
Abbot, Charles, 176
Aigrain, Pierre, 423, 458, 463, 518, 640
Ailleret, Pierre, 317, 346, 351, 354, 366, 372–374, 377, 379–389, 412, 415, 426, 429, 435–437, 439–441, 446, 479, 480, 518
Albert Ier (Prince de Monaco), 294, 296
Aldrich, L. B., 176
Alfond, Jacques, 554
Allary, 235
Amet (Amiral), 169, 256, 261, 265–267
Andreau, Jean-Édouard, 440, 441, 446, 447, 450, 488, 500, 501, 518
Apertet, J., 323, 344
Argand, André, 435, 442
Argand, André, 418, 422
Arrhenius, Svante, 156, 157, 228, 248
Arsandaux, Louis, 384–387, 453
Aubert, Edmond, 375, 376
Aubin, 434
Audraud, Antoine, 95, 96
Auriol, Vincent, 433, 434
Avargues, J., 206, 483, 487–490

Bétier, Gaston, 365, 503, 504
Baclé, L., 81
Bahon, Max, 276
Bailly du Bois, Bernard, 554
Banal, Michel, 20, 25, 26, 426, 431, 706
Barbey, Jacques, 400–404, 406, 407, 410, 413, 459, 461, 525
Baré, Jules, 169, 269, 274
Barjot, Henri, 158, 163, 164, 166, 175–177, 179, 190, 191, 193, 209, 357, 397, 400, 402, 404, 407, 408, 410, 459, 510
Barrère, Marcel, 554, 648
Barraud, 406
Bars, Yves, 482, 483, 497, 499
Basiaux, Paul, 185–187, 208, 361
Baudot, François, 433, 434
Bauzil, 497
Beau, Christian, 326, 344, 346, 391–393, 397, 401–405, 408, 477, 495
Beaufils (mécanicien), 213
Bergeron, Jean-Paul, 459, 471
Bergès, Aristide, 63
Berland, Jean, 177, 185, 240, 241, 246
Berthelot, Charles, 79
Berthier, 400–402
Bertholon, 453
Bertin, 216
Beury, Alfred, 208
Bichelonne, Jean, 371–374, 383, 433
Bienvenu, Claude, 554, 654
Bigourdan, Guillaume, 209, 273
Bizot, 393
Bléhaut, Henri, 392, 393, 395
Blanc-Lapierre, André, 506
Blyth, James, 99, 119, 120
Boisnier, Georges, 169, 256, 261, 262, 264, 266–268, 278
Boisse de Black, J., 177
Boiteux, Marcel, 20

Bonnefille, René, 25, 426, 428, 433, 706
Bonnet, 129
Bouchaud-Praceiq, Édouard, 71, 118, 125, 126, 665, 696
Bouchayer, Hippolyte, 254, 256, 265
Boucherot, Paul, 23, 159, 163, 168, 174, 175, 184, 188, 189, 191, 193, 199, 217, 220, 409, 643, 690
Bourdarie, Charles, 190
Bourdeau, Louis, 78, 81, 83, 84
Bourdelles, 119, 120
Bourgeois, R., 554
Bréguet, Louis, 385, 388
Bresson, Henri, 64, 65
Bretel, Georges, 208, 453
Bricard, 374, 434
Bricard, Georges, 275, 276
Broca, André, 236
Brugères, 252
Brunellière, 434
Brush, Charles, 99, 119, 120

Capestan, 477
Caquot, Albert, 272, 273, 359, 363, 375, 376, 383, 391, 393, 395, 428, 433, 476, 518, 585
Carde, Jules, 190
Castaing, Raymond, 565
Caufourier, Paul, 177, 178, 185, 240
Causse, Jean-Pierre, 554, 618
Caustier, Eugène, 78
Chabbal, Robert, 548, 565, 618
Chadenson, Lucien, 401–403
Champly, René, 107, 186, 207
Charcot, Jean, 296
Charles-Roux, A., 196
Chartier, Philippe, 57, 537, 548, 554, 560–562, 564, 565, 574, 575, 577, 597, 610, 613, 615, 618, 652, 660
Claude, André-Georges, 363
Claude, Georges, 23, 26, 53, 144, 148, 149, 158, 159, 168, 174, 175, 178, 179, 181, 184, 185, 188, 189, 191, 193, 199, 203, 205, 211, 216–221, 225, 226, 249, 250, 308–310, 345, 353, 355, 357, 363, 367, 390, 391, 396, 397, 399, 402, 409, 410, 413, 475, 524, 611, 624, 638, 643, 659, 661, 672, 690
Clément, Alain, 57, 538, 634, 662, 668–671
Colli, Jean-Claude, 546, 547, 557, 625, 626
Combault, 106
Constantin, Louis, 25, 148, 158, 172, 173, 185–187, 194–196, 205, 212, 214, 216, 227, 232–238, 246, 248–250, 308, 310, 389, 453, 707
Côte d'Ivoire, 379, 393–395, 403, 475–477, 479, 519
Côte, Étienne-F, 160
Coyne, André, 255, 258, 259, 261, 263, 280, 285, 287–292, 298, 303, 378, 391, 665, 707
Crescent, Charles, 372–377, 383, 391, 437, 499
Crouzet, Étienne, 479–481, 496–499
Cubaud, Pierre, 589

D'Arsonval, Arsène, 76, 77, 79, 96, 97, 129, 189, 705
D'Halluin, Maurice, 366
D'Ornano, Michel, 546, 548, 628
Dagnicourt, 393
Dain, 284
Dalloz, Gaston., 235, 236
Damy, Gilbert, 663–666, 669, 671
Daniels, Farrington, 326, 352
Darche, Paul, 242, 243, 284
Darnault, 407
Darrieus, Georges, 148, 172, 187, 194, 195,

205, 211, 214, 221, 222, 224–227, 250, 351, 362, 366, 389, 450–452, 493, 499, 518
De Goyon, Charles (Duc de Feltre), 117, 119, 122, 133, 134
De Goyon, Charles (duc de Feltre), 71, 95, 702
de Goyon, Charles (duc de Feltre), 205, 449
De Graffigny, Henri, 77, 81, 92
De l'Angle Beaumanoir, Raoul, 117
De l'Angle-Beaumanoir, Raoul, 119, 120, 122, 133, 134
De la Barre (comte), 122
De la Brosse, René, 253–256, 261–267, 270, 271, 274, 287, 558
De la Goupillère, Haton, 112, 113
De Lamare, 566, 651–656, 658
De Launay, Louis, 155
De Montgolfier, P., 252
De Ricou, Charley, 455
De Rouville, André Gervais, 254, 255, 262, 263, 265, 274, 278, 282, 287, 299, 374, 390, 429, 430, 432, 522
De Tregomain, Georges Aubert, 255, 257, 276, 278
De Virel, Jean-Louis, 423, 424, 509
De Waleffe, Maurice, 165
Decœur, Paul, 71, 118, 123, 124, 267
Deflandre, Jean, 576, 577
Defour, André, 170, 257, 272, 273, 279, 375, 376
Delanghe, G., 172
Deparis, Gustave, 361, 362, 440
Deprez, Marcel, 76–78, 91, 97, 123
Desdemaine-Hugon, Guy, 405–407
Dessol, A., 157
Dessoliers, Hyppolyte, 129, 188
Dessus, Benjamin, 574, 575
Desvignes, François, 462
Deutsch de la Meurthe, Émile, 229
Devaux, Pierre, 170, 281, 349, 353, 358–360, 363, 367, 430, 470
Devin, Bernard, 554, 616
Diamant, 123
Dieterlen, Henry, 405–407, 410, 413
Dorand, René, 385, 387
Drouhin, 450, 483
Drouot, 586
Drzewiecki, Stéfan, 233
Dubos, Bernard-Jean, 163, 189, 190, 193, 308, 386, 440
Duchêne-Marulaz, Philippe, 620
Dupin, Jean, 272, 372, 373, 375, 376
Duport, J.-P., 665
Duquennois, Hilaire, 482, 500
Durand, 501
Durand, Henri, 548, 554, 557

Eiffel, Gustave, 213, 231–234
Ericsson, John, 129, 130, 157
Escaffre, Joseph, 163, 164, 171, 172, 186, 206, 207
Estrade, J., 453

Fages-Bonnery, André, 353
Fages-Bonnery, André, 453
Favez, B., 665
Fenard, Raymond, 400–402
Fichot, Eugène, 260
Figuier, Louis, 91
Fischer, Louis, 345, 378
Flettner, Anton, 172, 173, 194, 212, 216, 238, 250, 297, 310
Foëx, Marc, 365, 459
Forest, Louis, 252
Fortier-Beaulieu, André, 453
Fortier-Beaulieu, Paul, 187, 195, 232, 249
Fourault, Paul, 375
Foveau de Courmelles, François-Victor, 252

Fowle, C. G., 176
François-Marsal, 276
Frédouët, Charlet, 278
Fréjacques, Claude, 648
Freyssinet, Eugène, 378, 379, 385
Frixon, 503
Fusenot, André, 170, 282–287, 665

Gac, André, 554
Gagey, R., 111, 114, 115
Gaïsset Edmond, 453
Galliot, Armand, 393
Gandillon, Pierre, 163, 177, 185, 191–193, 209, 308, 349, 357, 366, 526
Gariel, Maurice, 393–395
Garnault, André, 554
Gauthier, Michel, 663–666, 671
Génissieu, Étienne, 384, 390, 391, 393
Ghardaïa, 244, 281–283, 296, 303, 309
Ghiraldi, F., 364
Giannoni, Pierre, 280, 281, 284, 497
Gibrat, Robert, 257, 258, 316, 326, 345, 358, 366, 371–373, 376, 377, 383, 390, 393, 394, 426, 432, 518, 626, 629
Gide, Charles, 89
Ginocchio, Roger, 384, 449, 482
Girardier, Jean-Pierre, 512–515
Giraud, André, 636
Giraud, Henri, 378, 379
Giry, Charles, 280, 281, 284, 497
Giscard d'Estaing, Valéry, 547, 553
Godin, 648
Golding, Edward William, 325, 326, 361, 362
Gomella, Cyril, 506
Gougenheim, André, 475
Gout, Paul, 270
Grasset, Paul, 161, 170, 254, 255, 280, 281, 284–286, 288, 289, 304, 310, 377, 665, 698
Gridel, H., 665
Gros, Ferdinand, 274, 276
Guével, Pierre, 668, 670
Guillemonat, André, 503, 508
Guillemonat, André, 504
Guilmet, 242
Guinand, 243

Harouimi, Armand, 504
Hatinguais, 284
Hemar, Jacques, 450
Henri-La Blanchetais, Charlotte, 365, 459
Henry, Alfred, 185, 194, 243
Henry, Eugène, 490, 491, 518
Hermitte, Louis, 345
Herriot, Édouard, 252
Hiorth, A., 192
Hodgson, 192
Holl, 422
Horsnail, 100
Hospitalier, Édouard, 77, 94, 95
Houdet, 361
Hubert, Henry, 190
Huguenin, Albert, 276
Hurez, Bernard, 554

Imbeaux, Édouard, 191, 192
Inizan, Vincent, 276, 279

Jacob, Charles, 320, 391–393, 398, 403, 404
Jacquard, Jean-Pierre, 554
Jacquinot, Pierre, 111, 196
Janet, Paul, 254, 265
Jaulin, Robert, 624
Jauvert, 210
Jeannel, René, 399, 400, 403, 408, 495
Jevons, William Stanley, 68, 69
Joëssel, Joseph-Émile, 211
Joëssel, Raymond, 149, 162, 196, 203, 205, 211–214, 216, 225–227, 233, 235–238, 248, 250, 308, 310

Joliot-Curie, Frédéric, 320, 334
Joyant, Édouard, 391
Juston-Courmat, Fridal, 507

Kervran, Louis, 357, 358
Kravtchenko, J., 665
Kuntziger, Jean, 129

La Cour, Poul, 99, 119
La Prairie, Jacques, 637
Lacombe, Henri, 638
Lacroix, G., 172, 187, 194–196, 222–224, 250, 326, 361–363, 366, 452, 484, 493
Lanaud, Henri, 453
Lancelin (Commandant), 229
Laporte, 209
Lapresle, Antonin, 232
Lauboeuf, 216
Laugier, Henri, 319
Lavergne, Gérard, 78
Lavigne, J., 482, 483
Lavinay, Rodolphe, 208
Le Bon, Gustave, 76, 77, 79, 82, 85, 88, 96, 97
Le Chatelier, Henry, 219
Le Méhauté, J., 665
Le Trocquer, Yves, 160, 276, 279
Leblanc, Maurice, 80, 189
Lebreton, Philippe, 623, 625
Lecornu, Léon, 190, 235
Legrand, Max-Albert, 160, 167, 169, 209, 210, 216, 252–254, 260, 264, 283, 357
Lejeune, Georges, 365, 506
Lémonon, E-H, 104, 170
Liébard, Alain, 576, 599, 622, 628
Lochard, 391
Louppe, Albert, 158
Lovins, Amory, 572
Lozé, Ed., 78
Lys, Jacques, 654

Mahl, 554
Maire, Aimé, 255, 257, 270, 273, 276–278
Malacam, Robert, 393, 405
Marchand, Philippe, 26, 57, 538, 613, 616, 634–639, 643, 651, 656, 657, 662, 664, 669, 670
Marcotte, Edmond, 158
Marcou, Clovis, 665
Martunizzi, Santo, 507
Massart, Georges, 638
Massé, Pierre, 351
Masson, Henri, 326, 398, 423, 424, 463, 465, 466, 477, 510–514, 518
Maugard, Alain, 554
Maurain, Charles, 152, 157, 228, 229, 236, 239, 240, 242, 246, 248, 403, 459
Maynard, Pierre-Émile, 169, 253
Mendès-France, Pierre, 319
Menissier, 493
Micanel, Edgard, 249, 453
Migeon, 161, 286
Ministère de l'Agriculture, 68
Moisan, François, 612
Molinié, Marcel, 252
Monteil, 393
Moreau (Amiral), 258, 265
Moreau, Georges, 170
Morel, Jean-Baptiste, 440, 441, 446, 518, 525
Mouchot, Augustin, 23, 25, 46, 176, 191, 410
Moumouni, Abdou, 470, 471, 514
Murphy, Edward Charles, 99, 113

Nansouty, Max de, 99, 100, 103
Nisolle, Léon, 393, 395
Nizery, André, 326, 383, 392–398, 403, 410, 421, 425, 427, 471, 475–477, 518

Paimboeuf, 422, 480
Painlevé, Paul, 219, 234
Palz, Wolfgang, 615

Parisot, Léon, 276, 278
Pasteur, Félix, 163, 176, 240, 243–245, 247, 248, 357, 366, 400, 402, 404, 405, 407, 408, 410, 413, 461
Pein, 100
Pelissier, G., 120
Pelnard-Considère, R., 665
Peltier, R., 395, 495, 496
Péri, Georges, 550, 551
Perret, Paul, 165
Perrot, Charles, 504, 506
Perrot, Marcel, 326, 346, 349, 365, 424, 458, 464–466, 474, 507–509, 518
Perroy, A., 554
Perruche, Lucien, 342
Pétry, Paul, 208, 223, 287, 289–292, 345, 346, 378–380, 382–389, 412, 422, 435–438, 441, 442, 447, 449–452, 454, 479–483, 488, 493–495, 497, 501
Pichon, A., 481
Piedfort (Abbé), 235
Pierre, Claude, 648
Pifre, Abel, 90, 126, 127, 129, 130
Piketty, Gérard, 637, 640, 648–651, 662, 669, 670
Pinard, Félix, 158, 284, 296
Pirhes Castanho, J., 665
Planté, Gaston, 94
Poggi, 453, 482
Poincaré, Raymond, 219
Portier, 479
Pouget, 240
Pris, 232
Pujol, Jean-Claude, 650, 651, 653, 654

Rateau, Auguste, 113, 218, 226, 273
Rauber, 499
Rederon, 648
Remenieras, Gaston, 365, 398, 421–424, 462–464, 513
Renaud, Joseph, 254
Richard, Gustave, 112
Richard, Jules, 161, 170, 176, 185, 194, 195, 229, 240, 241, 243, 246, 248, 251, 280, 284, 293–302, 310, 495, 665, 666, 671, 696
Riet, Constant, 210
Ringelmann, Maximilien, 102, 108, 113, 114
Ripoll, R., 206, 483, 487–490
Robert, R., 665
Robida, Albert, 63
Robieux, Jean, 554
Rockland, 100
Rodot, Michel, 422, 458, 462, 463, 509, 550, 554
Rolant, Michel, 559, 569, 574, 582, 617, 619
Romani, Gaston, 450
Romani, Lucien, 440–443, 518
Romanovsky, Vsevolod, 475
Rossignol de Fargues, 286, 374, 383
Roudaire, Élie, 192
Rousseau, Emmanuel, 390, 391
Roux, Edmond, 372

Saigot, 447, 450, 488
Saint, Lucien, 190, 239
Sala, Rapahaël, 158, 284, 296
Salado, R., 486
Salle, 477
Salter, Steven, 662
Samuel, Laurent, 624
Sancery, Raymond, 297
Santon, L., 665
Saunders, 100
Savonius, Sigurd, 297, 298
Savornin, Jean, 365, 504, 505, 518
Schaer, G., 665
Schneider, 551

Schwob, Louis, 169
Serra, Louis, 343, 361, 436, 438
Séverin, Jules, 160
Séverin, jules, 98
Shuman, Frank, 93, 99, 129, 130
Siemens, Charles, 96
Sillard, Yves, 637, 651, 652, 654
Simon, P., 192
Simonin, Louis, 80, 82, 88
Smith, Lybrand, 288, 289, 291
Soergel, 192
Solari, Émile, 252
Solomon, Ionel, 554
Spiridakis, Mickaël, 668–670, 673
Stevenson, Thomas, 296
Stolpner, Woulf, 244, 405, 407
Street, Ch., 81
Syrota, Jean, 545, 655, 656, 659

Telkes, Maria, 506
Tellier, Charles, 70, 71, 76, 127–129, 133, 135, 188, 189, 246, 410, 702, 704
Tessier, 586
Thacker, Maneklal Sankalchand, 323
Thibaudin, R., 257, 258, 372
Thiennot, 654
Thomson, William, 88
Tissandier, Gaston, 71
Tommasi, Ferdinand, 95
Toth, 586
Touchais, Maurice, 465, 474, 504, 508, 509, 526
Toussaint, Albert, 227, 229–233, 247, 248
Troller, André, 189, 190
Trombe, Félix, 326, 345, 364, 365, 367, 423, 424, 458–461, 464–467, 471, 502, 504, 510, 518, 611

Véron, Marcel, 403, 406
Vadot, Louis, 326, 346, 362, 365, 442, 447, 484, 485, 518, 526
Valembois, Jean, 665
Vallaux, 294
Vallet, Eugène, 246
Van Vloten, P., 169
Vasseur, Pierre, 463
Vaubourdolle, 383
Vergnet, Marc, 616
Vialaron, André, 551
Vigreux, Léon, 96, 117, 120

White, Leslie, 323
Willemin, 391
Wolff, Arthur R., 99, 113

# Index des institutions


Académie des sciences, 70, 112, 114, 118, 123, 126, 127, 152, 168, 169, 172, 174, 175, 190–192, 209, 216–218, 225, 236, 238, 243, 273, 295, 301, 346, 363, 365
Académie des sciences coloniales, 190
Aermotor, 104, 111, 114, 488, 489, 516
Aérowatt, 445, 446, 451, 541, 599, 616, 620, 677
Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), 40, 41
Agence de la qualité de l'air (AQE), 564
Agence des économies d'énergie, 51, 533, 537, 543–545, 547, 548, 553, 555, 558, 559, 566, 567, 579, 595, 596
Agence française pour la maîtrise de l'énergie (ADEME), 563–565, 567, 622, 628, 633
Agence française pour la maîtrise de l'énergie (AFME), 24, 44, 55, 57, 537, 538, 543, 552, 558–570, 574, 576–579, 589–593, 597, 598, 600, 604, 605, 607, 609–613, 616–619, 622, 624, 626–628, 631–633, 645, 652, 658, 660, 675, 676, 692, 693
Agence nationale d'élimination et de valorisation des déchets (ANRED), 563, 564
Agence nationale de valorisation de la recherche (ANVAR), 544, 577, 595, 648, 649, 658, 659, 670
Air liquide, 217
Alsthom, 370, 375, 377, 379, 380, 385, 388, 394, 399, 418, 427, 640, 642, 645, 650, 653, 659, 660, 675
Amis de la Terre, 537, 571, 576, 622–624
Araou, 104, 105, 205
Areva, 21
Association des amis de l'éolienne Bollée, 26, 104
Association for applied solar energy (AFASE), 325, 326, 509
Association française pour l'avancement des sciences (AFAS), 70, 126, 163, 190, 191, 193, 209, 210
Association néerlandaise pour les progrès de l'industrie, 99
Association française pour l'étude et le développement de l'énergie solaire (AFEDES), 419, 423, 424, 459, 465, 466, 468, 472, 509, 510, 519, 523, 527, 550
Association pour la recherche et l'utilisation de l'énergie solaire (ARESA), 504, 507, 508, 516
Association scientifique et technique pour l'exploitation des océans (Asteo), 617, 638–640, 642
Atelier impérial de Meudon, 126
Ateliers et chantiers de France à Dunkerke, 501
Auguste Bollée, 111

Beaufils (mécanicien), 214
Beaume, 104, 114, 119

Beaume (puis Henry puis Henry-Beaume), 205
Bertin, 640
Blanc, 111
Bompard et Grégoire, 104, 106
Bouvier, 269
Boving and Co, 269
British Electrical Authority (BEA), 501
Brown Bovery, 398
Bureau d'études scientifiques et techniques (B.E.S.T), 338, 419, 440–446, 450, 451, 456, 457, 489, 523, 525, 526, 620
Bureau de recherches pour le pétrole (BRP), 507
Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), 545, 546, 555, 586, 598, 601, 630
Bureau de recherches pour le pétrole (BRP), 317

Caisse centrale de la France d'Outre-mer, 327
Caisse des dépôts et des consignations, 546
Centre national d'études spatiales (CNES), 366, 419, 458, 462, 463, 466, 522, 548, 550, 551, 565, 634, 639
Centre national de la recherche scientifique (CNRS), 24, 25, 51, 54, 55, 146, 319–321, 326, 335, 337–339, 355, 357, 364, 365, 370, 391, 393, 398–400, 402–404, 406, 408–411, 413, 415, 416, 418, 419, 421, 424, 458–463, 466, 472, 502–504, 507, 510, 514, 518, 521, 522, 525, 536, 541–543, 548–552, 554, 555, 559, 566, 567, 579, 582, 583, 594, 611, 613, 618, 627, 639, 675
Centre national de la recherche scientifique appliquée (CNRSA), 146
Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts (CEMAGREF), 551, 555
Centre national pour l'exploitation des océans (CNEXO), 26, 55, 57, 58, 536, 538, 542, 556, 565–567, 600, 607, 613, 615, 616, 622, 633–642, 644, 646–656, 658–660, 662–673, 675, 678, 690, 696, 701, 703, 705
CGT, 330
Charbonnages de France, 317, 318, 330, 331, 546
Chêne, 122, 205, 207
Club de Rome, 534
Comité interministériel pour la recherche scientifique et technique, 321
COMES (Commissariat à l'énergie solaire), 24, 51, 55, 537, 538, 543, 545, 548, 551–559, 561, 563, 565–570, 576, 577, 579, 586–588, 593, 594, 596, 597, 600, 601, 603–607, 609–611, 616–619, 624, 627, 631–633, 652
Comité technique de l'énergie des mers (ministère de l'Industrie), 374
Comité consultatif de la recherche scientifique et technique, 321
Comité d'organisation de l'énergie électrique (COEE), 316, 317, 335, 339, 369, 371, 373, 377, 379, 380, 384, 385, 388, 389, 411, 437, 522, 609, 621
Comité d'études et de recherches scientifiques pour l'aménagement et l'utilisation des forces hydrauliques (min. des Travaux publics), 141
Comité de l'énergie solaire (COMES), 543, 544, 547–549
Comité du vent, 453, 454
Comité géothermie, 58
Comité géothermie (ministère de l'Industrie), 537, 543, 545–549, 555, 558, 565–

567, 583, 596, 598, 601
Comité technique de l'énergie des mers, 58
Comité technique de l'énergie des mers (ministère de l'Industrie), 357, 358, 373–375, 377, 383, 386, 389, 398, 411, 426, 429, 433, 434, 476
Comité technique de l'énergie des vents, 58
Comité technique de l'énergie des vents (ministère de l'Industrie), 378, 383, 384, 386, 387, 398, 418, 428, 435–437, 439–441, 443, 450, 454, 456, 457, 474, 478, 480–483, 517, 525
Commissariat à l'énergie atomique (CEA), 51, 317, 318, 334, 460, 514, 537, 541, 542, 550, 551, 554, 555, 557, 559, 565, 578, 579, 582, 599, 610, 611, 616, 619–622, 624, 627, 629, 631, 642, 647, 657, 661, 669, 673, 675
Commissariat général au Plan, 314, 315, 328, 338, 341, 347–349, 352–354, 416
Commission d'utilisation des Combustibles (min. des Travaux publics), 140
Commission de l'énergie solaire (Algérie), 503
Commission de la houille bleue, 58
Commission de la houille bleue (ministère des Travaux publics), 25, 144, 148, 152, 155, 157, 160, 161, 168–170, 178, 183, 188, 201, 203, 204, 216, 219, 229, 250, 251, 254–257, 259–261, 263–266, 270–273, 275, 276, 278–282, 284, 286–288, 290–292, 294, 299, 302, 303, 309, 310, 665, 706
Commission de modernisation de l'Algérie, de la Tunisie et du Maroc (Commissariat général au Plan), 327
Commission de modernisation et d'équipement des territoires d'Outre-mer, 327, 418, 471, 475, 476, 479
Communauté économique européenne (CEE), 591
Communauté européenne du charbon et de l'acier (CECA), 330
Compagnie africaine de matériel éolien (CAME), 484, 491, 492, 526
Compagnie centrale d'énergie électrique, 372
Compagnie de Mossamédès, 111
Compagnie des forges d'Audincourt, 162, 211
Compagnie des produits chimiques Alais Froges et Camargue, 372
Compagnie du littoral méditerranéen, 372
Compagnie électrique de la Loire et du Centre, 372, 373
Compagnie électro-mécanique, 53, 54, 149, 171, 187, 195, 196, 203, 211, 221, 223–227, 249, 250, 309, 326, 357, 359, 361, 370, 375, 377, 394, 396, 399, 434, 450, 452, 456, 476, 493, 494, 497, 498
Compagnie générale d'électricité (CGE), 372, 373, 462, 554, 616, 617, 638, 640, 642, 644, 646–650, 652, 653, 659–661
Compagnie générale de chauffe, 546, 598
Compagnie hydro-électrique d'Auvergne, 372
Compagnie industrielle des aéromoteurs (CIAMO), 445, 451
Compagnie maritime du canal de Suez, 276
Compagnie nationale du Rhône (CNR), 318
Condensateurs Delas, 394
Confédération française démocratique du travail (CFDT), 574, 577, 582
Confédération générale du travail (CFDT), 537
Confédération générale du travail (CGT), 582
Conseil général d'Ille et Vilaine, 278, 302
Conseil général d'Indre et Loire, 126
Conseil général des Côtes du Nord, 302

Conseil général des Côtes du Nord, 278
Conseil général du Finistère, 276, 279, 302
Conseil général du Maine et Loire, 105
Conseil supérieur de la recherche appliquée d'Algérie (CRSAA), 503
Conservatoire national des Arts et métiers (CNAM), 18, 57, 126, 234, 393
Costes, 206
Creusot-Loire, 582, 642, 645, 650, 660, 661
Cyclone, 207

David, Henri, 104
Dax (ville de), 598
Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale (DATAR), 545, 601, 603–606, 608, 633
Délégation aux énergies nouvelles, 537, 543, 545–549, 553, 557, 566, 567, 569, 574, 583, 617, 618, 622, 625, 627, 633, 642
Délégation générale à l'économie nationale, 314, 320, 369, 378, 416, 494
Délégation générale à la recherche scientifique et technique (DGRST), 51, 319, 321, 348, 424, 472, 508, 509, 512–514, 536, 542–545, 547–549, 554, 565–567, 574, 583, 594–596, 637, 639, 640, 648–651, 653, 658, 659
Department of Energy, 613, 638, 662
Direction de l'Hydraulique et des Améliorations agricoles, 65
Direction de la Technologie, de l'Environnement industriel et des Mines (DITEIM, ministère de l'Industrie), 544, 545, 547, 595
Direction générale de l'énergie, 544, 546, 548
Direction générale de l'énergie et des matières premières (DGEMP), 534, 655, 656, 658–660
Division Énergie du vent (EDF), 343, 361, 387, 389, 415, 435–437, 439–441, 444, 447, 457, 480, 483, 498, 499
Dumont, A., 104
Durey-Sohy, 104

École centrale de Nantes, 57
École centrale des Arts et manufactures, 71, 96, 100, 120, 122
École centrale des arts et manufactures, 221
École coloniale d'agriculture de Tunis, 111, 114
École d'agriculture de Sidi-bel-Abbès, 210
École des constructions aéronautiques, 158
École des mines de Paris, 112
École nationale d'agriculture de Grignon, 113
École nationale supérieure de Marine de Nantes, 538, 664, 666, 667, 669
École polytechnique, 189, 318, 453, 554
École supérieure d'aéronautique, 173
École supérieure d'électricité, 254, 255, 286, 375, 455
École supérieure de physique et de chimie industrielle de Paris, 77
École technique supérieure de Dantzig, 157
Électricité de France (EDF), 20, 21, 25, 26, 29, 54, 57, 58, 141, 279, 317, 318, 323, 324, 326, 328, 329, 332, 333, 335, 338, 339, 342, 343, 345, 346, 351, 352, 354, 357, 358, 361, 362, 365, 371, 377, 387, 389, 398, 415–427, 429–444, 446–448, 450–452, 454–458, 463, 464, 467–469, 474, 476, 478–483, 493, 497–500, 515, 517–519, 522, 524–526, 531–534, 537, 541, 551, 554, 555, 559, 560, 566, 568, 569, 576, 578, 579, 582, 585, 588, 591, 595, 599, 600, 603, 609, 618, 620, 621, 624, 627, 629, 635, 637, 648, 649, 654, 655, 658–661, 664, 665, 668, 673,

675–677, 692, 693, 696–698, 706, 707
Electricite de Tahiti (EdT), 642
Électricité de Tahiti (EdT), 641, 650, 651, 654, 655, 673
Électricité de Tahiti (EdT), 642
Électricité de Tahiti (EdT), 655, 658
Électricité et gaz d'Algérie, 329, 417, 473, 479, 482, 500–502, 504, 515–517, 522, 525
Électricité et gaz d'Algérie (EGA), 503
Électricite et gaz du Nord, 372
Électrochimie, électrométallurgie d'Ugine, 372, 373
Électronique Marcel Dassault, 640
Elf, 546, 582, 598, 616
Empain-Schneider, 617, 640, 642, 645–650, 652, 653, 660
Énergie électrique du Maroc, 472, 482, 497, 499, 525
Énergie électrique du Sud-Ouest, 372, 373
Énergie industrielle, 372
Energy research and development administration, 638
Enfield Cables Limited, 501
Ergocéan, 650–654, 669
Escaffre, 206
Escher-Wyss, 53, 269, 271, 274, 276
Établissements Bollée, 104, 110, 111, 206–208, 379
Établissements Sainrap et Brice, 396
ETELEC, 504
Eurocéan, 639

Fonds d'investissement pour le développement économique et social de l'Outre-mer (FIDES), 327, 425, 471, 472, 481, 495, 496, 513, 522
Forces motrices de la Truyère, 372, 373
Forces motrices de la Vienne, 372
Forges et ateliers du Creusot, 427

Gaz de France (GDF), 317, 318, 427, 468, 582
General electrics, 661
Géo-chaleur (société nationale), 546
Gouvernement général d'Afrique occidentale française (AOF), 379, 391, 394, 397, 399, 409, 510, 515, 516
Gouvernement général d'Algérie, 210, 339, 400, 401, 417, 451, 460, 485, 486, 491, 503, 508, 515, 516
Gouverner, 269
Groupe de Bellevue, 537, 573, 574, 576, 577, 623, 625, 627
Groupe interministériel des énergies nouvelles, 548
Groupement de propagande La Houille bleue, 210, 252

Hamm, 122

Indian Institute of Science, 323
Ingénieurs-conseils coopérateurs (ICCO), 375, 376
Insol, 244, 245, 400, 402, 404–407, 410, 413, 459, 464, 512, 526
Inspection générale de l'Union française et de l'étranger (IGUFE), 328, 425, 475
Inspection générale pour la coopération hors métropole (EDF), 323
Institut aérodynamique de Moscou, 232
Institut aérotechnique de Toulouse, 443
Institut aérotechnique de Saint-Cyr (IAT), 147, 171, 173, 201, 227, 229–233, 247, 248, 360, 443, 447
Institut central de l'énergie du vent (Russie), 383
Institut d'agriculture de Maison-Carrée, 210
Institut d'agriculture de Sidi-bel-Abbès, 210
Institut de Physique du Globe, 402, 403

Institut de Physique du Globe de Paris, 147, 240, 242, 248
Institut de Physique du Globe de Paris, 201
Institut économique et juridique de l'énergie (IEJE), 550, 573, 574, 604
Institut français de recherches pour l'exploitation de la mer (Ifremer), 634, 637, 657, 658
Institut français du pétrole (IFP), 590
Institut géographique national (IGN), 601
Institut national de la recherche agronomique (INRA), 55, 548, 551, 554, 555, 559, 565, 567, 575, 597, 602

Jacquart, 103
Jeumont, 427
Jeumont-Schneider, 642, 650, 660

Kronembourg, 545

L'Énergie des mers, 326, 338, 344, 354, 357, 359, 371, 395, 425, 426, 433, 472, 474, 476, 477, 511, 516, 517, 524, 611, 638, 659, 675, 691, 705
La Thermique naturelle, 366, 405
Laboratoire aérodynamique de Göttingen, 172
Laboratoire d'hydrodynamique maritime, 161, 285, 286
Laboratoire d'hydrodynamique navale (LHN), 538, 664, 667, 668, 670
Laboratoire dauphinois d'hydraulique, 394, 427, 498
Laboratoire de chimie du solide (École normale supérieure), 522
Laboratoire de l'énergie solaire (CNRS), 365, 458, 460–464, 468, 502, 522, 523, 527
Laboratoire de physique des solides (École normale supérieure), 423, 458, 463
Laboratoire Eiffel, 147, 213, 229, 230, 232, 233, 238
Le Bourdonnais, 372
Leclercq, 111
Leflaive et Cie, 269
Lepeaute, Henry, 103
Lequesne et Lefebvre, 105
Leroy-Somer, 614
Ligue maritime, 210
Lokheed, 639
Lykkegaard, 440, 441, 457, 473, 498, 516, 525

Maraget, 213
Matériel électrique SW, 427
Ministère de l'Industrie, 286
Ministère de l'Agriculture, 51, 65, 90, 107, 109, 113, 135, 206, 548, 558, 566, 567, 586
Ministère de l'Environnement, 548, 566, 567, 628
Ministère de l'Équipement, 51, 545, 548, 565, 566, 595, 596
Ministère de l'Industrie, 143, 208, 259, 260, 273, 286, 316–318, 331, 332, 338, 357, 369, 371–378, 380, 383, 384, 386–388, 390, 393, 411, 415, 416, 426, 431, 433, 434, 491, 518, 519, 521, 531, 533, 542–548, 553, 554, 560, 563–569, 577, 582, 585, 586, 594–596, 627, 631, 636, 637, 642, 648, 649, 651–654, 656, 667, 673, 692
Ministère de l'Instruction publique, 126
Ministère de la Guerre, 146, 219, 236, 243–245, 247, 309, 390, 405
Ministère de la Mer, 658
Ministère de la Recherche, 51, 321, 542–544, 546, 548, 554, 558, 560–562, 564, 566, 567, 594, 648, 651–653, 656
Ministère des Colonies, 51, 190, 196, 204, 219, 221, 236, 245, 320, 322, 337,

370, 371, 379, 385, 389–394, 397–413, 415, 459–461, 464, 479, 515, 521, 522, 525
Ministère des Travaux publics, 25, 48, 51, 53, 57, 58, 127, 135, 140, 141, 144, 147, 160, 169, 190, 201, 205, 219, 228–230, 236, 244, 246, 248, 251–258, 260, 263, 264, 276, 278, 282, 287, 290, 292, 302–304, 309, 369, 384, 434, 461, 566
Musée océanographique de Monaco, 57, 147, 161, 170, 185, 194, 197, 201, 240, 246, 280, 294–296, 298–301, 304, 310, 671, 696
Muséum d'histoire naturelle, 638, 657

Neyrpic, 284
Neyrtec, 640, 642, 660

Observatoire central de l'Indochine, 242
Office d'Empire pour l'énergie aérienne (Allemagne), 383
Office de recherche scientifique coloniale (ORSC), 319–321, 335, 339, 370, 399, 400, 403, 404, 408–410, 413, 472, 474, 478, 481, 493, 495, 496, 516, 517, 521, 522
Office général des éoliennes (OGE), 454
Office national d'études et de recherches aérospatiales (ONERA), 554, 599, 620, 648, 659, 677
Office national de la recherche scientifique et industrielle et des inventions (ONRSI), 139, 146–149, 155, 171, 172, 176, 177, 185, 201, 203–205, 216, 227–230, 232, 233, 236–244, 246–250, 280, 293, 309, 319, 400, 408, 410, 411, 413, 460, 495, 525, 702
Office national des recherches scientifiques et industrielles et des inventions (ONRSI), 57
Omnium régional d'électricité, 375
Organisation commune des régions sahariennes (OCRS), 507
Organisation des nations unies (ONU), 322, 325, 326, 355, 362, 432, 657
Organisation du traité de l'Atlantique Nord (OTAN), 509, 510
Organisation européenne de coopération économique (OECE), 325, 502, 505, 516, 522, 568
Organisme d'études de l'Énergie thermique des mers, 379, 390, 392–399, 403, 409, 412, 415, 417, 474, 475, 510
Oriolle, 103

Paruelle, 205
Péchiney, 653
Péchiney-L'Aluminium français, 406
Philips, 57, 462, 463, 548, 550, 554
Photowatt, 616, 619, 620, 676
Pilter, 111, 205
Plan construction, 544–548, 551, 554, 566, 594, 595
Plan Marshall, 331
Plissonnier, 104
Prache et Bouillon, 394, 496
Pyrénéenne d'énergie électrique, 372
Pyrhelios, 404

Radiasol, 407, 464, 512, 513, 526
Radiotechnique-Compélec, 462
Rambaulr, 269
Rateau, 53, 221, 225, 345, 359, 371, 379, 385, 388, 394, 396, 399, 476, 494, 495, 642, 659, 660, 675
Ratier (Société), 384–386, 388, 453
Région Pays de la Loire, 44, 563, 605
Renault, 620
Résidence générale de France au Maroc, 190, 201, 223

Résidence générale de France en Tunisie, 201, 309

Sautter-Harlé, 449, 493, 504
Schabaver, 104, 110, 119, 120
Schneider et Cie, 269
Sea Tank, 642, 661, 675
Secrétariat d'État aux communications, 369, 400, 408–411, 521
Seri-Renault, 614
Service de la colonisation et de l'hydraulique (Algérie), 447, 451, 455, 478, 479, 482, 483, 485–488, 492, 493, 502, 504–506, 515, 516, 522, 525, 526
Service de la Colonisation et de l'hydraulique (Algérie), 58
Service de la Colonisation et de l'hydraulique d'Afrique occidentale française (AOF), 481, 515
Service de la colonisation et de l'hydraulique d'Afrique occidentale française (AOF), 449
Service des eaux de la ville de Paris, 395
Service des Phares et balises, 117, 119, 120, 254, 338, 374, 384, 388, 417, 419, 420, 422, 428, 435–438, 449–452, 454, 456, 457, 478–483, 493, 517, 526, 527, 541, 599, 620, 635, 663, 664, 677, 702
Service des Travaux publics des Colonies, 112
Service hydrographique de Brest, 257, 280
Service maritime de Saint-Nazaire, 253
Service maritime du Finistère, 285, 287, 289
Service météorologique de Tunisie, 178, 240
Service technique des grands barrages (min. des Travaux publics), 287
Shell, 546, 582, 598, 675
Singrün, 269
Smithsonian Institution, 176
Società Boracifera di Larderello, 100
Société alsacienne de constructions mécaniques (SACM), 218, 221, 225, 226, 269
Société d'électricité de l'Ouest, 372
Société d'encouragement pour l'Industrie nationale, 112
Société d'encouragement pour l'Industrie nationale (SEIN), 70, 88, 173, 284
Société d'entreprises hydrauliques et d'utilisation des marées, 272, 276–278
Société d'études pour l'utilisation des marées, 372–374
Société de Commentry, Fourchambault et Decazzeville, 269
Société de condensation et d'applications mécaniques, 394, 396, 436, 450–452, 493, 496, 525
Société de transport d'énergie du Rhône, des Alpes et du Centre, 372
Société des chemins de fer Méditerranée-Niger, 400, 401, 403, 408, 411
Société des eaux de la ville de Marseille, 510
Société des ingénieurs civils de France, 70, 126, 216
Société financière pour l'industrie, 274, 275
Société française d'études thermiques et d'énergie solaire, 473, 474, 502, 515, 523, 541, 620, 675
Société française des thermiciens (SFT), 468, 512–514
Société hydrotechnique de France, 284
Société internationale des électriciens, 96
Société internationale pour l'exploitation de la houille bleue (SIEHB), 276
Société Lebon, 372
Société marocaine d'études de la houle et du vent (SMEHV), 479, 482, 483, 497–499, 515, 525, 665

Société méditerranéenne de la houille bleue, 282
Société métallurgique et navale Dunkerke Normandie, 640
Société nationale des pétroles d'Aquitaine, 316, 331
Société royale d'Angleterre, 99
Société d'études et d'entreprises pour l'industrie, 257, 272–278
Solems, 619
Sous-secrétariat d'État des inventions, 146
Spie-Batignolles, 650, 660
Station hydrologique de Touggourt, 177, 185
Sun Power Company, 99

Teisset, Rose et Brault, 269
Territoire de Tahiti, 642
Total, 21, 546, 598, 648, 659, 675
Touzelin, 103

Union d'électricité, 370, 372, 373, 385
Union des producteurs d'électricité de Pyrénées occidentales, 372
Union européenne, 50, 564, 567, 610, 613–616, 620, 621, 631
Union industrielle et d'entreprises, 640, 664, 666, 667
Union maritime de Basse-Loire, 434
Union nationale des fédérations d'organismes HLM, 546
Université de Grenoble, 401, 428, 453
Université de Paris, 156
Université d'Alger, 326, 338, 364, 458, 473, 474, 502, 504–507, 515, 525
Université de Bari, 505
Université de Dakar, 326, 364, 365, 407, 423, 458, 473, 474, 512–515, 523, 525, 526
Université de Marseille, 423, 464–466, 473, 503, 506, 508, 510, 523
Université de Paris, 154
Université de Savoie, 25

Westinghouse, 660, 661

# Index des noms de lieux


Aber Benoît, 256
Aber Ildut, 256
Aber Wrac'h, 144, 148, 158, 160, 169–171, 178, 183, 255–258, 264, 266, 269, 271–276, 278, 279, 303, 374, 375, 524
Abidjan, 26, 219, 357, 359, 390–395, 397–399, 408, 409, 475–477, 524, 526
Afrique équatoriale française (AEF), 44, 397, 479, 481, 484, 491
Afrique occidentale française (AOF), 44, 244, 379, 400, 405, 409, 410, 415, 471, 475–477, 479, 481, 482, 484, 491, 510, 515, 516
Aigrettes (îlot des), 483
Alger, 24, 193, 208, 210, 240, 242, 280, 282, 284, 338, 365, 415, 417, 501, 503–505, 517, 518, 522, 526
Algérie, 24, 58, 69, 111, 126, 127, 129, 146, 158, 161, 170, 176, 185, 193, 195, 201, 206, 208, 210, 239, 240, 242–244, 284, 313, 322, 323, 325, 327, 329, 331, 339, 366, 400–402, 405, 407, 415, 417, 450, 451, 460, 465, 472, 474, 478, 479, 482–488, 490–493, 497, 500, 502–509, 515, 516, 518, 519, 525, 526, 695, 703
Allemagne, 64, 74, 81, 146, 163, 212, 216, 238, 313, 383, 388, 488, 516
Alpes, 63, 64
Angleterre, 119
Anjou, 278
Antilles, 176
Arctique, 191
Argenteuil, 103
Assal (lac), 193
Athènes, 668, 671
Atlas, 485
Aude (département), 342, 394–396, 402, 453
Audincourt, 162, 211, 214
Auteuil, 76, 118, 127, 128, 213, 229
Auxy, 171

Bages, 110
Bari, 505
Bataillon d'Afrique, 489
Beauce, 278
Beaumont, 598
Bedeau, 487, 490
Belgique, 64, 81, 107
Ben Gardane, 241, 242, 246
Berlin, 157
Biarritz, 161, 243, 280, 285, 286
Bidon V, 402
Birskra, 506
Bône, 185
Bora-Bora (île de), 657
Bordeaux, 464
Bougarouni (cap), 483
Bouillante, 579, 676, 677
Boulogne, 484
Bouzaréah, 365, 504, 505, 507, 508, 526
Brebis (pointe de la), 427
Brésil, 220, 397, 636
Brest, 26, 184, 235, 257, 274, 275, 280, 287,

289–292, 637, 648, 657, 669
Bretagne, 122, 142, 154, 160, 184, 188, 279, 292, 606, 636
Briantais (pointe du), 427

Cadarache, 620, 647
Caen, 208
Calais, 235
Californie, 613, 619
Cameroun, 479
Canada, 636
Capette (Domaine de la), 106
Carcassonne, 405, 420, 453
Casablanca, 464, 495, 497
Castres, 104
Cayar (fossé de), 394, 397
Cergy-Pontoise, 596
Ceylan, 397
Chambéry, 401
Champagne, 142
Chartres, 269
Chaudes Aigues, 364
Chicago, 99, 100, 112, 114
Clamart, 441
Cochinchine, 111
Colomb-Béchar, 243–245, 403, 461
Comores, 44, 479
Compiègne, 207
Congo, 176, 479
Constantine, 127, 210
Corbières, 444
Cordillère des Andres, 364
Corse, 557, 614, 620
Côte française des Somalis, 193, 479, 481
Côtes du Nord, 95, 276, 278, 451
Courbevoie, 236
Creil, 545, 597
Cuba, 144, 217–219

Dahomey, 111, 479
Dakar, 338, 393–395, 397, 398, 408–410, 415, 417, 424, 465, 476, 495, 502, 510, 511, 514, 516, 518, 522, 527
Danemark, 26, 74, 383, 388, 441, 457, 498, 516
Dantzig, 157
Dax, 598
Dinan, 278
Diouris (rivière), 274, 275, 277
Djibouti, 193

Écosse, 99
Égypte, 93
El-Arfiane, 506
El-Oued, 506
Épinal, 269
Erdre (rivière), 214
Erdre (rivière), 707
Ergué Gabéric, 270
Espagne, 509
États-Unis d'Amérique, 74, 87, 98–100, 102, 103, 112, 114, 120, 125, 129, 173, 175, 176, 207, 208, 219, 313, 322, 323, 325, 332, 360, 383, 388, 425, 449, 462, 516, 592, 610–614, 618–620, 638, 647, 656, 662
Évry, 596

Fernao Veloso, 397
Finistère, 184, 256, 266, 269, 270, 274, 276, 279, 285, 287, 444
Font-Romeu-Odeillo-Via, 357, 364, 424, 460, 461, 468, 504, 541, 549, 550, 611, 614
Formose, 397
Fort-Saint, 241, 242, 246

Gabon, 479
Gao, 402
Gard (département), 614
Gênes, 299
Gironde, 118, 125

Göttingen, 172, 232
Gramat, 384, 386
Grand Pa's Knob, 439, 457
Grand-Quevilly, 105
Grèce, 509
Grenoble, 401, 550, 573, 657, 665, 668
Guatémala, 397
Guelma, 185
Guinée, 111, 479
Guyane, 614

Hammam-Meskoutine, 185
Haute Dordogne, 287
Hauts plateaux oranais, 206, 455, 474, 483, 485–490, 493, 502, 504, 506, 513, 525
Havre (le), 119
Hennebont, 279
Hève (Cap de la), 95, 96, 118–121
Honduras, 397

Ille et Vilaine, 256, 261, 266, 276, 278
Indochine, 44, 242, 479
Indret, 211
Issoudun, 598
Italie, 66, 299, 505, 509

Japon, 612–614, 618, 619, 637, 639, 647, 651, 656, 662

Kerguelen (îles), 451

L'Isle d'Abeau, 596
La Rochelle, 253
Laghouat, 244
Landunvez, 444
Lattinville, 122
Le Mans, 104
Libreville, 397
Lille, 101
Lisbonne, 424
Loire (rivière), 214
Londres, 157, 299
Lorient, 184
Luret, 110
Luxeuil-les-Bains, 598
Lyon, 104, 252

Macaraïbo, 193
Madagascar, 44, 479–481, 483, 484, 491
Madison, 460
Maine, 278
Mali, 402, 470, 507
Mamaroneck, 100
Maré (île de), 669
Marne-la-Vallée, 596
Maroc, 146, 170, 190, 201, 208, 223, 224, 281, 291, 292, 313, 327, 400, 415, 419, 445, 460, 464, 472, 474, 479, 480, 482–484, 488, 491, 494, 497, 499, 505, 515–517, 519, 695, 821
Marseille, 24, 508, 510, 516, 527, 541, 550, 551, 596, 618, 620
Martinique, 397
Mauritanie, 472, 478, 479, 481, 493, 494, 507
Mazamet, 110
Melun l'Almont, 585, 595, 596
Melun-Senart, 598
Memba, 397
Mer Morte, 193
Mers-sur-Rhin, 104
Meudon-Bellevue, 146
Mexique, 325, 397
Mogador, 497–500
Molène, 436, 441
Monaco, 57, 147, 161, 170, 185, 194, 197, 201, 240, 246, 280, 294–296, 298–301, 304, 310, 696
Mont-de-Marsan, 598
Mont-Louis, 365, 419, 460, 523
Mont-Saint-Michel, 25, 270, 272, 273, 357–

360, 374, 375, 427, 429–431, 433, 434, 524, 635
Montpellier, 127
Moorea (île de), 655, 659
Moscou, 232
Mossamédès, 111
Mostaganem, 185
Mozambique, 397

Nantes, 57, 103, 211, 213, 431, 433, 434, 453, 496, 538, 634, 664
Narbonne, 105
Nevers, 104
New Delhi, 460, 464, 465
New York, 125
Niger, 111, 246, 479, 507
Nigéria, 397
Nogent-le-Roi, 444, 445, 456
Nord (département), 139
Normandie, 142, 160
Nouvelle-Calédonie, 479, 481
Nouvelle-Calédonie, 668, 669, 673
Nouvelle-Zélande, 364

Odeillo, 24
Oran, 208, 487, 490
Orgelet, 107
Orléans, 104
Oubangui-Chari, 479
Ouessant, 290, 291, 588, 599, 676, 677

Paimboeuf, 104, 207, 208, 379, 433, 434
Palestine, 192
Papeete, 650, 654–656, 658, 659
Paris, 95, 97, 102–104, 147, 154, 156, 161, 163, 164, 166, 184, 190, 205–207, 221, 229, 280, 294, 544, 554, 561, 562, 637, 668, 824
Pas-de-Calais, 139
Pays de la Loire, 556, 562, 605, 607
Pays-Bas, 99
Péchelbronn, 363
Petit Minou (pointe du), 261, 280, 289, 291, 292, 303
Philippines, 397
Planier (île du), 620
Ploumanach, 451
Polynésie française, 548, 579, 620, 621, 642, 650, 654, 658, 669, 673
Polynésie française, 696
Porquerolles, 130
Port-Étienne, 398, 472, 478, 481, 493–496, 517, 522
Port-Saint-Jean, 277
Portugal, 509
Prunes (île aux), 483
Prusse, 49
Pyrénées, 64
Pyrénées, 185
Pyrénées orientales, 471, 526

Quédillac, 453

Rabat, 208, 497
Rance (rivière), 374
Rance (rivière), 144, 255, 256, 261, 262, 264, 269, 272, 273, 276–279, 283, 338, 345, 349, 350, 352, 353, 355, 357, 358, 375, 377, 417–419, 426–428, 430, 431, 433–435, 524, 526, 690, 701
Reggane, 402
Rennes, 170
République fédérale d'Allemagne (RFA), 612, 613, 620
Rhône (département), 252
Rio de Janeiro, 220
Roanne, 232
Roquefort, 110
Rothéneuf, 169, 256, 262, 264, 272, 273, 374–376

Royaume-Uni, 64, 66, 68, 69, 74, 79, 81, 99, 100, 157, 158, 219, 325, 383, 388, 501, 516, 612, 637, 662
Russie, 383, 388

Sahara, 118, 126, 128, 192, 243–246, 325, 401–404, 424, 485, 505–508, 526, 702
Sahara occidental, 118
Saïda, 487, 489
Saint-Briac, 256
Saint-Cyr, 147, 171, 173, 201, 227, 229, 232, 248
Saint-Dominique, 397
Saint-Étienne, 269
Saint-Malo, 262, 273, 278
Saint-Maur, 242, 402, 403
Saint-Nazaire, 253, 433, 434
Saint-Pierre-et-Miquelon, 479, 481
Saint-Quentin, 205
Saint-Quentin-en-Yvelines, 596
Saint-Rémy-des-Landes, 442, 443
Saint-Servan, 277, 426, 427
Sainte-Adresse, 119
Salins-de-Giraud, 660
San Francisco, 125
Seine (rivière), 236, 237, 267, 701
Sénart, 596
Sénégal, 465, 479, 495, 502, 512, 519
Severn (embouchure de la), 169, 170
Sidi-Bel-Abbès, 210, 483, 484, 487, 488, 492
Simplon (tunnel du), 363
Somalie italienne, 397
Sophia-Antipolis, 554, 556, 561
Soudan, 191
St-Albans, 501
Stangala, 270
Strasbourg, 598
Suez (canal de), 331
Suisse, 66, 97, 360
Sumatra, 397

Tahiti, 26, 638, 641, 642, 646–648, 650, 651, 655–657, 659, 661, 669, 673, 676, 677
Talence, 245
Targassonne, 579, 677
Tchad, 479, 507
Téménès, 256
Terre-Adélie, 451
Toronto, 156
Toscane, 100
Touggourt, 177, 185, 240, 506
Toulouse, 442, 443, 823
Touraine, 278
Trézel, 487
Trignac, 279
Tunis, 111, 483
Tunisie, 111, 114, 115, 178, 193, 195, 201, 206, 239–243, 246, 247, 309, 327, 400, 415, 419, 436, 460, 472, 480, 505, 506, 515, 516, 821

Val de Reuil, 596
Vaujours, 405
Vénézuela, 193
Vermont, 360, 383, 439
Vignola, 24, 557, 614, 620, 677
Villeneuve d'Ascq, 596
Villeneuve la Garenne, 598
Villeneuve-saint-Georges, 107
Vitry-sur-Seine, 385
Voltri, 299

Washington, 157

UNIVERSITE / SOCIETES
BRETAGNE \ TEMPS
LOIRE / TERRITOIRES

UNIVERSITÉ DE NANTES

Titre : **Histoire des énergies renouvelables en France, 1880-1990**

**Mots clés :** histoire, énergies renouvelables, France, système technique, convertisseur, innovation

**Résumé :**
Cette thèse propose une histoire des projets de convertisseurs innovants exploitant les énergies renouvelables (marées, vagues et houle, vent, soleil, énergie thermique des mers, géothermie) entre 1880 et 1990 dans la France coloniale et post-coloniale. Elle étudie l'évolution de ces convertisseurs d'un point de vue technique (types de convertisseurs) et politique (acteurs, enjeux et moyens d'action). Cette approche permet d'étudier l'articulation des projets avec les systèmes techniques et énergétiques des différents territoires dans leurs dimensions politiques, techniques, économiques, sociales et environnementales. Elle met en évidence l'inertie exercée par ces systèmes sur la conception et la matérialisation des convertisseurs d'énergies renouvelables.

L'imaginaire technicien de la civilisation thermo-industrielle, qui exige d'un convertisseur régularité, puissance et délocalisation, ainsi que la construction d'un système énergétique national de plus en plus organisé, en particulier le secteur électrique, orientent les projets vers un nombre de plus en plus restreint de solutions techniques. Les convertisseurs peinent à trouver leur place dans le système énergétique en raison de leurs qualités thermo-industrielles toujours moindres que celles de leurs concurrents fossiles ou nucléaires. Ces constats sont nuancés en fonction des sources d'énergie, des territoires d'application et des périodes. Quatre périodes caractérisées par un ensemble d'acteurs et de types de convertisseurs sont proposées : (1880-1918);(1919-1939) ;(1940-1970) ; (1970-1990). Cette chronologie dicte le plan de la thèse.

Title : **History of renewable energy in France, 1880-1990**

**Keywords :** history, renewable energy, France, technological system, converter, innovation

**Abstract** :
This PhD thesis presents a history of innovating convertors using renewable energies (tidals, waves, wind, sun, ocean thermic energy, geothermy) between 1880 and 1990 in colonial and post-colonial France. The evolution of these converters is studied in a technical (types of converters) and political (stakeholders, concerns and means of action) perspective. This approach leads to the understanding of the projects' articulation with technological and energy systems in various territories, in their political, technical, economical, social and environmental dimensions. It underlines the momentum of these systems and their influence on the conception and materialisation of renewable energy converters.

The technical imagination carried by the thermo-industrial civilisation, that requires from convertors steadiness, power and delocalisation, and the construction of a national energy system, lead projets toward a declining number of technical solutions. Convertors hardly find their place in the energy system because of their thermo-industrial qualities that always remain worse than fossil and nuclear converters' ones. These assessments depend on the energy sources, the territories and the periods. Four periods, characterized by a set of stakeholders and types of converters, are proposed : (1880-1918);(1919-1939) ;(1940-1970) ; (1970-1990). The thesis' plan follows this chronology.