Le stockage de l'énergie (1850-2050). Problème de techniciens, concept de technologues, désir de technocrates

Pierre Teissier

▶ **To cite this version:**

Pierre Teissier. Le stockage de l'énergie (1850-2050). Problème de techniciens, concept de technologues, désir de technocrates. Sciences de l'Homme et Société. Université de Bourgogne Franche-Comté; Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2023. tel-04606252

HAL Id: tel-04606252
https://shs.hal.science/tel-04606252v1

Submitted on 10 Jun 2024

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.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Mémoire d'habilitation à diriger des recherches
de l'Université Bourgogne Franche-Comté

Préparé à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

École doctorale n° 594
SEPT

Domaine de recherche : Épistémologie, histoire des sciences et des techniques

Par
TEISSIER PIERRE

Le stockage de l'énergie (1850-2050). Problème de techniciens, concept de technologues, désir de technocrates

Mémoire original, présenté et soutenu à PARIS, le 26 juin 2023

Composition du Jury :

Mathieu Arnoux	Professeur, Université Paris Diderot	Rapporteur
Bernadette Bensaude-Vincent	Professeure émérite, Université Paris 1-Panthéon-Sorbonne	Examinatrice
Ronei Clecio Mocellin	Professeur, Université Fédérale du Paraná (Brésil)	Examinateur
Anne-Françoise Garçon	Professeure émérite, Université Paris 1-Panthéon-Sorbonne	Examinatrice
Xavier Guchet	Professeur, Université de Technologie de Compiègne	Rapporteur
Pierre Lamard	Professeur, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard	Garant
Charles-François Mathis	Professeur, Université Paris 1-Panthéon-Sorbonne	Rapporteur
Marie-Cécile Péra	Professeure, Université de Franche-Comté	Examinatrice

Table des matières

I Itinéraire d'un enseignant-chercheur (2010-2023) **vi**

0.1 Curriculum Vitae vii

0.2 Liste des publications scientifiques xxiii

0.3 En guise d'ego-histoire : égotisme et altérité xxvii

II Mémoire d'habilitation à diriger des recherches (2018-2023)

Le stockage de l'énergie (1850-2050).
Problème de techniciens, concept de technologues, désir de technocrates **xxxi**

1 Introduction générale **1**

1.1 Essai : technologie, modernité, humanités 1

1.1.1 Régime technicien : l'emprise de la technique sur la modernité occidentale 1

1.1.2 Structures de l'essai : périodes, sources, méthodes 2

1.1.3 Formes d'un dialogue entre ingénierie et humanités 3

1.2 Héritages pour une étude des techniques en société 5

1.2.1 Dimension sociale des techniques 6

1.2.2 Potentiels des techniques en situation 6

1.2.3 Techniques et structures : le système 9

1.2.4 Pluralisme et nomadisme épistémiques 12

1.3 Histoire-problème : questions, relations et sources 15

1.3.1 Qu'est-ce que la technique contemporaine ? 16

1.3.2 Quels effets de la technique sur la société ? 17

1.3.3 Un complexe de contraintes et de désirs : le régime technicien 22

1.3.4 Expression du régime technicien : mémoire collective et démocratie technique . . . 30

1.3.5 Une histoire intégrée et compréhensive 37

1.4 Histoire d'un problème : le stockage de l'énergie 38

1.4.1 Raisons d'un choix 38

1.4.2 Lieux, réseaux, échelles et mondes de l'énergie 44

1.4.3 Justification d'une période : 1850-2050 45

1.5 Problème d'historiens : agencer cohérences et contradictions 48

1.5.1 Cohérences : tendances, systèmes, blocs et filières de l'énergie 48

1.5.2 Contradictions : multiplicités hétérogènes des acteurs, des lieux, des fonctions . . . 52

1.5.3 Sonder la modernité technique : projets, affects et concepts 54

1.6 Problème épistémologique : faire dialoguer techniciens, technocrates et technologues 56
1.6.1 Un essai de définition des catégories 56
1.6.2 De la fragmentation des discours à la constitution d'un corpus 66
1.6.3 Assembler les fragments : enjeux et possibilités d'un espace de dialogue 69
1.6.4 Dialogues et référents communs : énergie, données-variables, schémas 73
1.7 Plan de l'essai : *Le stockage de l'énergie (1850-2050). Problème de techniciens, concept de technologues, désir de technocrates*. 81

2 Espaces, temps et gestions d'un problème, 1850-2050 83
2.1 Espaces : borner le thème, déborder du périmètre 83
2.2 Temps : durées, périodes et rythmes du stockage de l'énergie 86
2.2.1 Temps opératoire : exponentielle de l'énergie, linéarité du stockage 86
2.2.2 Tuilages des temps sociaux : superpositions, recouvrements, décalages 89
2.2.3 Cartographie temporelle du stockage de l'énergie en France, 1870-2020 90
2.3 Gestions : modes, fonctions et échelles du stockage de l'énergie 100
2.3.1 Modalités du stockage 101
2.3.2 Fonctionnalités du stockage 103
2.3.3 Échelles de temps, d'espace et de puissance des opérations de stockage 109
2.4 Conclusion : gérer l'espace et le temps de l'énergie par le stockage 112

3 L'énergie en magasin : contextes et enjeux initiaux, 1850-1900 114
3.1 Stratifications du stockage de l'énergie dans le second XIX^e siècle 116
3.1.1 Significations du stockage dans la langue française du XIX^e siècle 116
3.1.2 Réserves de charbon : prévision et anxiété en Grande-Bretagne, 1860-1900 118
3.1.3 Thermodynamique et épistémologie des réserves d'énergie 120
3.2 Modulations électriques en France, Grande-Bretagne et États-Unis, 1860-1890 125
3.2.1 Relations électriques : relater et relier les artefacts de l'électricité 126
3.2.2 Accumulations électriques : cumuler et stocker la puissance 128
3.2.3 Normalisations électriques : milieu électricien et réseaux électriques 130
3.2.4 Imagination et modulations des sociétés électriques 133
3.3 Conclusion : convertir, cumuler et convoquer l'énergie à la fin du XIX^e siècle 134
3.3.1 Conversions à l'énergie : tendances générales en Europe et Amérique 134
3.3.2 Accumulations : reclasser les effets et les réserves d'énergie 138
3.3.3 Vocations : l'énergie, archétype de la modernité technicienne 139

4 Lieux, réseaux, échelles de l'électricité : stockages et voisinages, 1880-1910 144
4.1 Lieux de la modernité : rationalité et récalcitrance des batteries, 1880-1900 146
4.1.1 Modernité industrielle : enchantement des objets, désenchantement des humanités . 146
4.1.2 Récalcitrance des batteries : marché et R&D d'un artefact hétérogène 147
4.1.3 Artefacts en situation : fonctions et raisons du stockage d'électricité 153
4.2 Stockage de l'énergie dans les réseaux électriques aux États-Unis, 1880-1910 156
4.2.1 Logistiques industrielles : flux versus stocks de matière et d'énergie 156
4.2.2 Contextes de l'industrie électrique aux États-Unis 159

4.2.3 Fonctions et contraintes de la régulation électrique aux États-Unis et en Europe . . 160
4.2.4 Gestion concrète d'un réseau électrique. Hartford, Connecticut, 1897 165
4.3 Écologie politique de la houille blanche au début du XX^e siècle en France 172
4.3.1 Micro-économie et division du travail dans les usines hydroélectriques 173
4.3.2 Droit des rivières et rôle législatif de l'État 174
4.3.3 Espaces politiques de la houille blanche dans l'aménagement rural 175
4.3.4 Espaces culturels et artificiels : éduquer et aménager la montagne 177
4.3.5 Économie morale : harmonies et solidarités entre nature et culture 181
4.4 Conclusion : querelles de voisinage et disputes cosmologiques 184
4.4.1 Promesses, récalcitrances et mythes de la technique 185
4.4.2 Mystifications et compétitions entre voisinages électriques 186
4.4.3 Du voisinage au cosmos : (dé)régulations de l'existence 187

5 Structuration des imaginaires énergétiques, 1900-1990 190
5.1 Imaginaires régulés des flux et des stocks d'énergie 192
5.1.1 Mouvement d'interconnexion en France et mixtes des Suds électriques 192
5.1.2 De l'hydraulique à l'économie, la pensée modélisatrice de Pierre Massé 199
5.2 Expériences du temps et techno-politiques du futur 203
5.2.1 Expériences et espérances en régime technicien 203
5.2.2 Rivages et horizons techniques de la modernisation industrielle, 1900-1930 205
5.2.3 Du nouveau en économie politique : prévoir et planifier le futur, 1946-1970 208
5.2.4 Techno-politique du stockage de l'électricité, 1953-1986 211
5.2.5 Mesures et démesures de la technique contemporaine 221
5.3 Partages du monde entre nature et culture 223
5.3.1 Intentionnalités : réduire les autres cultures 223
5.3.2 Sociabilités : moraliser et asservir la nature 225
5.3.3 Artificialités : le troc entre natures et cultures 227
5.3.4 Psychés : ordre et désordre énergétiques 231
5.4 Conclusion : opérativité des modèles, efficacité des mythes 235
5.4.1 Encadrer les incertitudes du présent par des modèles du futur 235
5.4.2 Mythes techniciens et cultures de la nature 237

6 Mondes hydrogène : hériter, habiter ou hasarder le contemporain 240
6.1 Spécificités de l'hydrogène à l'époque contemporaine 243
6.1.1 La pile à combustible fait de sacrées histoires et des sacs de nœuds 243
6.1.2 Variations sur les modes d'existence de l'hydrogène, 1780-2020 245
6.1.3 Pile à hydrogène, nœud d'un système de systèmes 248
6.1.4 L'économie de l'hydrogène des années 1970 : une utopie conservatrice 251
6.1.5 Hériter, habiter et hasarder les mondes hydrogène 256
6.2 Héritages de l'hydrogène : spectres et catacombes du temps présent 257
6.2.1 Les spectres de la mémoire collective 257
6.2.2 Infrastructures des mobilités et des énergies en Europe, 1980-2015 260
6.2.3 Le stockage d'énergie aujourd'hui : une solution à quels problèmes ? 264

6.2.4 Réseaux « intelligents » et « décarbonation » de l'énergie . . . 268
6.3 Habiter les mondes hydrogène ou comment *économiser* les territoires . . . 277
6.3.1 Habiter le monde : s'ancrer au terrain et encrer le territoire . . . 277
6.3.2 R&D et politiques industrielles de l'hydrogène en France, 1990-2010 . . . 278
6.3.3 Territoire de Belfort : une « symbiose industrielle » pour l'hydrogène . . . 279
6.3.4 Économie de l'hydrogène, version 2.0 . . . 283
6.4 Hasarder les mondes hydrogène : les imaginaires en chantier . . . 291
6.4.1 Viatique : prendre la route ou la clé des champs ? . . . 291
6.4.2 Les couleurs de l'hydrogène ou l'arc-en-ciel des puissances . . . 296
6.4.3 Lieux, réseaux, échelles de l'hydrogène de demain . . . 302
6.4.4 Organisation du contemporain : des savoirs sans pouvoir . . . 308
6.5 Conclusion : condition humaine et planète en partage . . . 312
6.5.1 Le sacré contemporain : croissance économique et organisationnelle . . . 312
6.5.2 Écologies mentales : relation, soustraction, suspension . . . 314

7 Conclusion générale 318
7.1 Enjeux du dialogue : humanités, complexité et (inter)disciplinarité . . . 318
7.1.1 Retour sur les formes du dialogue interdisciplinaire . . . 319
7.1.2 Dépendance et fragmentation de la recherche académique . . . 321
7.1.3 Linéarité des organisations, complexité des situations . . . 324
7.1.4 Échappées épistémologiques : entre et au-delà des disciplines . . . 326
7.1.5 Expériences d'une interdisciplinarité (in)conséquente . . . 329
7.1.6 Modes d'existence de la technique contemporaine : le régime technicien . . . 331
7.2 Cosmologie des flux et des stocks : de la matière à l'énergie . . . 332
7.2.1 L'énergie en magasin, l'écologie en magazine . . . 332
7.2.2 Mesurer et modéliser le monde par des flux et des stocks . . . 334
7.2.3 Énergétisme : diagrammes et métaphores dans les humanités . . . 336
7.2.4 Convertisseurs : épistémologie, technologie et idéologie de l'énergie . . . 339
7.2.5 Batteries : banalité de la récalcitrance, démesure de la promesse . . . 340
7.3 Temps et espaces du stockage de l'énergie, 1850-2050 . . . 341
7.3.1 Énigme contemporaine : distribuer l'énergie dans le temps et l'espace ? . . . 342
7.3.2 Temps du phénomène : équilibrage instantané et qualité de l'énergie . . . 343
7.3.3 Temps de l'imprévu : défaillances, pannes, accidents, risques, crises . . . 344
7.3.4 Temps de la croissance : étendre le réseau, optimiser la consommation . . . 346
7.3.5 Temps de la prévision entre production et consommation d'énergie . . . 349
7.3.6 Confins de l'énergie et marges du temps : le cas des îles électriques . . . 351
7.3.7 Les mondes hydrogène : synchroniser les temps, connecter les espaces . . . 353
7.3.8 Des scénarios du futur aux brèches du temps présent . . . 354
7.4 Fractures de la nature et de la culture . . . 357
7.4.1 Écologie politique : harmonies naturelles, angoisses existentielles . . . 358
7.4.2 Économie morale de la nature : synergies ou hétérogénéités du cosmos . . . 360
7.4.3 Lithium : coûts sociaux et environnementaux des régulations énergétiques . . . 363
7.4.4 Crises de culture : de l'anxiété occidentale à l'altérité humaine . . . 365

III Projet de recherche (2023-2027)

L'estuaire de la Loire comme espace énergétique (1980-présent) 369

Première partie

Itinéraire d'un enseignant-chercheur (2010-2023)

0.1 Curriculum Vitae

MAÎTRE DE CONFÉRENCES

ÉPISTÉMOLOGIE, HISTOIRE DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES (CNU 72)

NANTES UNIVERSITÉ

Formation académique : sciences de l'ingénieur, sciences de la nature et sciences de l'homme

1998-2002 : Diplôme d'ingénieur de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris (ESPCI ParisTech).

2001-2002 : DEA de Matière condensée : chimie et matière molle, université Paris 6 Pierre et Marie Curie.

2002-2003 : Agrégation de physique-chimie (option chimie) et élève de l'école normale supérieure de Cachan.

2003-2004 : DEA d'Épistémologie et d'histoire des sciences et des techniques, université Paris 7 Denis Diderot.

Formation à la recherche en épistémologie et histoire des sciences et des techniques

2004-2007 : Doctorat en épistémologie, histoire des sciences et des techniques de l'université de Paris Ouest Nanterre. Allocation de moniteur-normalien. Titre de la thèse : « Une histoire de la chimie du solide en France (1950-2000). De la formation d'une communauté à sa dispersion », sous la direction de Bernadette Bensaude-Vincent. Jury composé de Hervé Arribart (Saint-Gobain), Ernst Homburg (université de Maastricht), Terry Shinn (CNRS).

2007-2008 : Bourse Lavoisier du ministère des Affaires étrangères et européennes à la Maison française d'Oxford et University of Oxford (Royaume-Uni). Titre du post-doctorat : « Histoire de la chimie du solide et des matériaux depuis 1945. Comparaison France/Royaume-Uni »

2008-2009 : Gordon Cain Fellow in Technology, Policy and Entrepreneurship de la Chemical Heritage Foundation[1] à Philadelphie (États-Unis). Titre du post-doctorat : « Entre chimie et industrie, regards sur la science des matériaux aux États-Unis depuis 1945 ».

2009-2010 : Allocation de recherche du Max-Planck-Institut für Wissenschaftgeschichte pour un séjour de quatre mois à Berlin (Allemagne) et de la Maison des sciences de l'homme (Clemens Heller) pour un séjour de six mois à Universität Bielefeld (Carsten Reinhardt). Titre du post-doctorat : « Contribution à l'histoire des voitures électriques en Europe depuis 1950 ».

1 Désormais Science History Institute : https://www.sciencehistory.org/.

2015-2016 : Délégation CNRS de six mois à l'Institut des sciences de la communication[2] (CNRS & Sorbonne université). Titre du projet : « Chimie douce : matériaux, énergies et environnements, 1970s-2010s ».

Carrière de maître de conférences à l'université de Nantes

Sept. 2010 : Prise de fonction comme maître de conférences en épistémologie, histoire des sciences et des techniques à l'université de Nantes, UFR Sciences et techniques & Lettres et sciences humaines.

- **Responsabilités de recherche**

Depuis 2010 : Initiateur et responsable du thème de recherche « Histoire des matériaux et épistémologie de la matière depuis le XVIIIe siècle » au Centre François Viète.

2011-2019 : Initiateur et responsable du thème de recherche « Énergies, techniques et sociétés » au Centre François Viète.

2016-2018 : Co-responsable de l'un des trois axes de recherche du Centre François Viète, « Artefacts et systèmes ».

Depuis juin 2018 : Directeur du Centre François Viète d'épistémologie, d'histoire des sciences et des techniques (EA 1161) de l'université de Nantes et de l'université de Bretagne occidentale. J'assure cette direction en collaboration avec Delphine Acolat, directrice-adjointe du laboratoire pour le site brestois.

Depuis 2018 : Responsable de l'organisation du séminaire hebdomadaire du Centre François Viète.

- **Responsabilités enseignement et formation**

2011-2014 : Responsable du service pédagogique d'Histoire des sciences et des techniques, UFR sciences et techniques, université de Nantes.

2013-2018 : Responsable du master Épistémologie, histoire des sciences et des techniques (EHST) de l'université de Nantes.

Depuis 2018 : membre du comité scientifique et du comité des thèses de l'école doctorale Sociétés, Temps, Territoires : périmètre de la Comue Université Bretagne Loire puis, à partir de 2022, à la région pays de la Loire.

- **Responsabilités administratives**

Depuis 2015 : Membre du comité éditorial des *Cahiers François Viète* (dir. Jenny Boucard)

2016-2020 : Membre suppléant du Comité national des universités de la section 72 « Épistémologie et histoire des sciences et des techniques » (prés. Pierre Lamard)

Depuis 2019 : Membre du comité scientifique de la *Revue sénégalaise d'histoire* (dir. Mor Ndao)

Depuis 2020 : Membre du comité scientifique de la revue interdisciplinaire *Passerelles SHS* (direction

2 Devenu aujourd'hui Centre Internet et Société : http://cis.cnrs.fr

collégiale de doctorants)

En cours : porteur, pour le Centre François Viète, d'un projet de master Histoire des sciences et des techniques à la Faculté des lettres et sciences humaines (Idrissa Ba) de l'université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal). Cette formation, sous la responsabilité de Daouda Diop, a accueilli sa première promotion en février 2023. Elle comporte une moitié d'enseignements du master nantais d'Épistémologie, histoire des sciences et des techniques de Nantes Université (enregistrements de cours mis à la disposition des collègues sénégalais).

INVESTISSEMENT PÉDAGOGIQUE

1. Présentation synthétique de l'activité d'enseignement

En 2022-2023, mon service d'enseignement se répartit suivant quatre thématiques, par ordre d'importance : histoire des sciences et des techniques de l'Antiquité à l'époque contemporaine (55 % du service) ; épistémologie et sociologie des sciences (25 %) ; sciences et arts (10 %) ; histoire environnementale (10%).

Depuis ma nomination en 2010, j'ai effectué un service plein d'enseignant-chercheur de 192 heures équivalent TD, mis à part une période de six mois de délégation CNRS (février-juillet 2016) et une décharge de 32 heures équivalent TD en tant que directeur de laboratoire (depuis 2018-2019). J'ai créé la plupart des unités d'enseignement dont j'ai la charge depuis douze ans.

Je me suis efforcé de faire évoluer mes enseignements pour les adapter aux niveaux académiques et aux filières concernées : cours magistraux (L1-L3 en amphithéâtre dans les filières scientifiques et d'histoire) ; analyses épistémologiques (master Capes de physique-chimie) ; lecture et commentaire de textes (master Épistémologie et histoire des sciences et des techniques) ; analyse d'œuvres d'art représentant les sciences et les techniques (master physico-chimie et écoles d'ingénieurs).

En termes d'innovation pédagogique, je participe à deux initiatives récentes de Nantes Université. Dans le module Sentinelle « Sécurité énergétique et transition écologique », coordonné par Pierre Vacher (pôle Sciences et technologie) et ouvert aux étudiants en janvier 2022, j'ai élaboré une capsule intitulée « Penser la transition de demain depuis la révolution industrielle d'hier ». Dans le master « Humanités environnementales » porté par Sylvie Nail (pôle Humanités), j'ai assuré en 2022-2023 un cours intitulé « Natures, cultures et savoirs des sociétés européennes, XV^{e}-XXI^{e} siècles » (12h).

2. Présentation analytique des enseignements

La plupart de mes enseignements relèvent de l'épistémologie, histoire des sciences et des techniques (EHST). Ils prennent la forme de cours magistraux que ce soit en licence d'histoire ou de sciences ou dans le master EHST de Nantes Université. Dans cette dernière formation, des unités d'enseignement relèvent de travaux dirigés (lecture et commentaire de textes).

J'assure également des cours d'épistémologie, de sociologie et d'histoire des sciences et des techniques dans les masters professionnels préparant aux métiers de l'enseignement en physique et

chimie (MEEF PC) en sciences dans les lycées professionnels (MEEF DSI). Ces cours donnent lieu à des cours magistraux et à des travaux dirigés basés sur des lectures et commentaires de textes. J'ai également enseigné en 2016-2018 dans les filières de préparation à l'agrégation d'histoire lorsque la question d'histoire moderne était intitulée « Sciences, techniques, pouvoirs et sociétés (1500-1789) » en Europe.

J'ai créé une unité d'enseignement original intitulée « Arts et sciences au miroir des sociétés » dans un master de physico-chimie. La cahier des charges de l'UE était de sensibiliser les étudiants aux méthodes de la recherche. J'ai donc proposé que, par groupe de 3-5, ces étudiants issus des sciences de la nature s'essayent à l'analyse de films de science-fiction selon les méthodes de sciences humaines et sociales.

Par le passé, je suis également intervenu en écoles d'ingénieurs (Polytech Nantes et Centrale Nantes) pour des cours « arts et sciences » et des cours d'épistémologie.

Année	Niveau	Diplôme	Intitulé	Type de formation	Nature	Effectifs	Volume horaire annuel
1	L1	Sciences	Histoire des sciences et des techniques	Formation initiale en présentiel	Cours magistraux	250	35
2-3	L2-L3	Histoire	Histoire des sciences et des techniques	Formation initiale en présentiel	Cours magistraux	80	10
4	M1	Physico-chimie	Arts et sciences	Formation initiale en présentiel	Travaux accompagnés	10-15	10
4	M1	Capes / MEEF	Épistémologie, histoire des sciences et des techniques	Formation initiale en présentiel	Cours magistraux	20	25
4	M1	Humanités & environnement	Natures, cultures et pouvoirs depuis l'époque moderne	Formation initiale en présentiel	Cours magistraux	12	12
4	M1	EHST	Sociologie et philosophie des sciences	Formation initiale et reprise d'études ; distanciel et présentiel	Cours magistraux	15-20	10
4-5	M1-2	EHST	Histoire des sciences et des techniques	idem	Cours magistraux	15-20	30
4-5	M1-2	EHST	Histoire des sciences et des techniques	idem	Cours magistraux	15-20	30
5	M2	EHST	Sciences humaines et sociales	idem	Travaux dirigés	15-20	10
4-5	M1-2	EHST	Épistémologie, histoire des sciences et des techniques	idem	Mémoires de recherche	3-5	15-20

3. Responsabilités pédagogiques

J'ai assuré deux responsabilités pédagogiques depuis mon arrivée à l'université de Nantes : le service pédagogique d'Histoire des sciences et des techniques (2011-2014) ; master Épistémologie, histoire des sciences et des techniques (2013-2018).

La coordination du service consistait à gérer les services pédagogiques de six enseignants-chercheurs titulaires et le budget pour diverses activités : achat et catalogage d'ouvrages, financement de missions d'archives aux étudiants du master, recrutement de vacataires, etc.

Le master EHST offre quant à lui une formation à distance et en présentiel. Lorsque j'en étais responsable, le master était labellisé par l'Agence universitaire de la francophonie (AUF), ce qui occasionnait la sélection et le suivi d'étudiants étrangers, pour la plupart en Afrique et en Amérique latine. J'ai également coordonné la refonte importante des maquettes du master en 2015-2016 pour passer d'un seul master 2 à un master 1 & 2 et articuler deux parcours sur deux sites (Brest & Nantes). J'ai ainsi pu introduire l'évaluation par compétences, instituer un conseil de perfectionnement, créer 3 UE originales et mutualiser 1 UE avec le master Éthique (Département de philosophie) et le parcours CMI (UFR Sciences) de l'université de Nantes. Pour assurer la responsabilité du master (2013-2018), j'ai eu la chance de bénéficier de l'appui de deux assistantes administratives de premier ordre : Aurélie Giacomini (2011-2014) ; puis Anaïs Durand (à partir de 2015).

Je porte actuellement, pour le Centre François Viète, un projet de master Histoire des sciences et des techniques à la Faculté des lettres et sciences humaines (Idrissa Ba) de l'université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal). Cette formation, dont l'ouverture a été retardée à cause de la crise sanitaire, a ouvert en février 2023. Elle comporte une moitié d'enseignements enregistrés issus du master EHST de Nantes Université et mis à disposition des collègues sénégalais et des étudiants de l'UCAD.

4. Diffusion, rayonnement, activités internationales

Du point de vue de la diffusion, je voudrais signaler trois initiatives très différentes, mais dont chacune rend compte d'un souci pédagogique relatif à l'enseignement de l'histoire des sciences et des techniques dans des champs disciplinaires larges.

- En 2016, j'ai co-écrit avec trois autres historiens un ouvrage de préparation à l'agrégation d'histoire intitulé *Sciences, techniques, pouvoirs et sociétés à l'époque moderne (1500-1789)*, Atlande (2016).
- En 2021, président et discutant de la session « La mécanique des fluides et les interactions théorie-empirie » dans la Journée d'étude *Apprendre et penser les sciences dans l'enseignement scientifique. Vers une interdisciplinarité didactique-histoire des sciences-épistémologie*, organisée par Laurence Maurines et Christian Bracco à l'université de Paris-Orsay, 3 juin 2021.
- En 2021, j'ai animé avec Colette Le Lay, au sein du Centre François Viète, un atelier de réflexion et de rédaction de fiches ressources d'histoire des sciences à destination des professeurs de physique-chimie de l'enseignement secondaire afin de déconstruire des idées reçues.[3] La fiche que j'ai rédigée s'intitule « Lavoisier n'est pas le 'père de la chimie moderne' ».

3 La fiche peut être téléchargée ici : https://cfv.univ-nantes.fr/ressources-pour-lenseignement-secondaire-1

De telles initiatives stimulent le rayonnement de l'histoire des sciences en direction de l'histoire générale, de la didactique et de l'enseignement scientifique dans le secondaire. En outre, j'ai réalisé en 2015 deux modules de cours dans un MOOC intitulé « Méthodologie en histoire des sciences »[4], financé par l'Université ouverte des humanités, avec une collaboration entre les universités de Nantes et de Lorraine (Archives Henri Poincaré). Ces deux modules s'intitulent « Archives orales : entretien, corpus, récit » et « Les images comme sources en histoire des sciences et des techniques ».

Enfin, je voudrais rappeler quelques éléments, dont deux déjà cités, pour rendre compte de mon activité internationale en termes pédagogiques : l'association du master EHST à l'Agence universitaire de la francophonie (AUF) ; le projet en cours de création d'un master d'histoire des sciences et des techniques à l'université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD) ; trois missions d'enseignement à l'université de Lomé en 2014-2015 dans le master de Philosophie des sciences et des techniques (dir. Yaovi Akakpo). Chacune des missions au Togo comprenait quarante d'heures d'enseignement devant une douzaine d'étudiants : cours magistral, travaux dirigés et suivi de mémoires. Les intitulés des enseignements ont été successivement : « Histoire des sciences : matière et énergie » (avril 2014) ; « Histoire des sciences physiques » (février 2015) ; « Histoire des techniques » (octobre 2015).

Activités individuelles de recherche

1. Présentation synthétique des thématiques de recherche

Mon activité de recherche a pris deux directions principales depuis 2010. La première thématique concerne l'histoire des matériaux et l'épistémologie de la matière à l'époque contemporaine. À partir du cas de la chimie du solide, qui constituait l'objet de ma thèse, je travaille sur l'articulation entre la matérialité des savoirs (objets, instruments, méthodes, etc.), la forme des représentations (modèles, discours, mémoires, etc.) et l'organisation sociale des groupes impliqués (universités, laboratoires, industries, etc.). À ce titre, j'ai récemment participé à un projet collectif regroupant une grande partie des historiens et philosophes francophones de la chimie autour de Bernadette Bensaude-Vincent. La projet a abouti à la publication en 2020 d'une anthologie commentée de textes de chimistes, philosophes et chimistes, intitulée *Philosophie de la chimie*, de Boeck. J'ai assuré avec Sacha Tomic l'édition de la deuxième des quatre parties dédiée à l'épistémologie de la chimie. L'ouvrage a été salué pour sa qualité et son originalité au niveau national et international.

Ma deuxième thématique concerne l'histoire des énergies sur le long XX^{e} siècle. Mon analyse s'efforce de relier des objets techniques et machines spécifiques (piles à combustible, convertisseurs solaires, voitures électriques) aux enjeux et contraintes politiques, sociales et culturelles dans le contexte des sociétés industrielles et occidentales depuis les années 1880. Mon essai d'habilitation à diriger des recherches (HDR), intitulé *Le Stockage de l'énergie (1850-2050)*, s'inscrit dans cette thématique. Cette HDR, pour laquelle Pierre Lamard (UTBM) a accepté d'être mon garant, analyse le stockage de l'énergie comme un problème contemporain des techniciens, un enjeu de sociétés

4 Consultable à l'adresse http://www.uoh.fr/front/notice?id=a69ecb22-6f28-4c76-a7b0-73c0a6b4e2ee

pour les technocrates sur la période 1850-2050 et un terrain de réflexion pour les technologues. L'écriture du manuscrit original est achevée en mars 2023.

2. Commentaire de cinq publications caractéristiques de mon travail

Je commente ici cinq publications pour rendre compte de la diversité thématique de mes activités de recherche, de la pluralité de mes approches méthodologiques et de différentes formes de collaboration que j'affectionne. Une liste complète de mes publications est fournie dans la partie suivante.

P. Teissier (2014), *Une histoire de la chimie du solide. Synthèses, formes, identités*, Paris, Hermann. Cet ouvrage d'auteur, issu de ma thèse de doctorat, propose une histoire d'une sous-discipline de la chimie à l'époque contemporaine. Il articule une analyse épistémologique, des pratiques scientifiques, et sociologique, des structurations institutionnelles, à travers différentes époques dans le cadre de la France. Un chapitre est consacré à une comparaison internationale entre l'Europe et les États-Unis au XX^{e} siècle.

Avec C. C. M. Mody & B. Van Tiggelen (2017), eds., *From Bench to Brand and Back: The Co-Shaping of Materials and Chemists in the Twentieth Century*, *Cahiers François Viète*, Série III, n°2. Cet ouvrage collectif est issu d'une session organisée à Manchester lors du 24^{e} Congrès international d'histoire des sciences, des techniques et de la médecine (ICHSTM) en juillet 2013. Il réunit neuf contributions s'échelonnant de la fin du XIX^{e} siècle à aujourd'hui dans un même cadre conceptuel explicité par le titre. L'éditeur initial ayant fait faillite, j'ai proposé à mes deux coéditeurs de publier l'ouvrage comme un numéro spécial des *Cahiers François Viète*, selon un processus d'expertise en double aveugle.

P. Teissier (2017), "From the Birth of Fuel Cells to the Utopia of the Hydrogen World", in B. Bensaude-Vincent, S. Loeve, A. Nordmann, A. Schwarz, eds., *Research Objects in their Technological Setting*, London & New York, Routledge, p. 70-86. Cet article s'inscrit dans un collectif de recherche qui s'est focalisé sur les techno-sciences au XX^{e} siècle. Il m'a permis de caractériser la pile à combustible comme un objet à la fois récalcitrant, aux désirs et formatages des techniciens, et interconnecté, aux réseaux de matière et d'énergie des sociétés industrielles. Cet article a induit plusieurs demandes d'analyse des enjeux actuels de l'hydrogène, ce qui montre la pertinence de coupler les approches historiennes et épistémologiques pour comprendre les problèmes actuels et futurs posés par des dispositifs comme l'hydrogène et les piles à combustible en société.

Avec Anaël Marrec (2019), « Métaphores, déterminations et temporalités en histoire des techniques. De la mécanique du point à la psychologie des nénuphars ». *Artefact. Techniques, histoire et science humaine*, n°11, p. 309-340. Cet article, écrit à quatre mains avec Anaël Marrec, nous a permis d'expliciter un certain nombre d'impensés de l'historiographie des techniques. Nous avons, en particulier, critiqué l'usage courant de certaines métaphores scientifiques importées en sciences humaines et insisté sur l'importance de réfléchir au schéma explicatif associé à ces images.

P. Teissier (2020), “Modern Heating Technologies”, in Joseph D. Martin & Cyrus C. M. Mody (eds.), *Between Making and Knowing. Tools in the History of Materials Research*, Singapore, World Scientific, p. 257-272. Analyse de la place des matériaux modernes dans la société par leur dimension matérielle, instrumentale et économique. Un tel article propose une entrée dans les techno-sciences pouvant intéresser les historiens des sciences et des techniques, les épistémologues et les chercheurs sur les matériaux.

3. Diffusion et rayonnement

- *expertise nationale et internationale*

2009 Évaluateur Institut de recherche pour le développement (IRD) pour l’attribution d’un contrat doctoral en histoire de la chimie ;

2013 Évaluateur pour l’Association nationale de la recherche et de la technologie (ANRT) pour l’attribution d’un contrat doctoral CIFRE en histoire ;

2019 Évaluateur pour l’École normale de Cachan concernant l’octroi d’une allocation de thèse en histoire des sciences et des techniques

- *activités éditoriales*

Coéditeur avec S. Loeve et B. Bensaude-Vincent du site internet “Sciences : Histoire Orale” consacré aux archives orales sur la recherche matériaux et hébergé par l’ESPCI ParisTech[5].

Participation aux comités scientifiques des revues suivantes :

- depuis 2015 : *Cahiers François Viète*, rédactrice en chef : Jenny Boucard, Nantes Université ;
- depuis 2019 : *Revue sénégalaise d’histoire*, rédacteur en chef : Mor Ndao, Université Cheikh Anta Diop (Dakar) ;
- depuis 2020 : *Passerelles SHS*, revue interdisciplinaire dont l’édition collégiale est assurée par quatre doctorants de l’école doctorale Sociétés, Temps, Territoires (Université Bretagne Loire)

Référé de 14 articles pour les revues à comité de lecture suivantes :

- *Cahiers François Viète* : 2011, 2012, 2015, 2018, 2020 ;
- *Revue d’histoire des sciences* : 2016, 2017 ;
- *Traverse*, devenu *Passerelles SHS* : 2015, 2021, 2022 ;
- *Minerva* : 2012 ;
- *Science and Public Policy* : 2015 ;
- *Cahiers d’histoire du CNAM* : 2020 ;
- *Artefact. Techniques, histoire et sciences humaines* : 2022.

5 Ce site internet est consultable à l’adresse suivante: http://www.sho.espci.fr

3 analyses d'ouvrages pour les revues internationales suivantes :

- *Bulletin for the History of Chemistry* : 2014 ;
- *Revue d'histoire des sciences* : 2016 ;
- *Isis* : 2017.

- *participation jurys de thèse en France (hors encadrement)*

2013 Thèse d'Axel Petit : *Histoire du concept d'ion au dix-neuvième siècle* (dir. Guy Boistel), soutenue le 11 décembre 2013 à l'université de Nantes ;

2014 Thèse de Sophie Pehlivanian : *Histoire de l'énergie solaire en France : science, technologies et patrimoine d'une filière d'avenir* (dir. D. Varaschin, co-encadr. Y. Bouvier) soutenue le 13 décembre 2014 à l'université de Grenoble.

2018 Thèse de Nicolas Simoncini : *Historique de la recherche sur les piles à combustible en France des années soixante aux années quatre-vingt* (dir. R. Belot, co-encadr. F. Picard) soutenue le 3 décembre 2018 à l'université de Bourgogne Franche-Comté & UTBM.

- *diffusion du savoir et activités au sein de sociétés savantes*

Participation au dispositif Passeport recherche de la région Pays de la Loire avec C. Le Lay, dont l'objectif est de faire découvrir la recherche aux élèves de lycée à travers des conférences et la réalisation d'un projet en groupe, encadré par les professeurs de lycée et les intervenants universitaires :

- 2012-2013, lycée Albert Camus de Nantes, sur le thème « Le statut de l'expérience en histoire des sciences » ;
- 2013-2014, lycée Jacques Prévert de Savenay, sur le thème « Représentations et modèles scientifiques à travers les âges ».

Participation à 10 actions de culture scientifique, technique et industrielle (CSTI) se répartissant comme suit : 4 conférences CSTI et 2 cafés des sciences ; 3 participations à la Fête de la science : 2012 (Lorient), 2014 (Nantes) et 2015 (La Baule) ; 1 interview dans *UN News Business*, juin 2021 (numéro spécial : *Hydrogène*).

Depuis 2019, membre du Groupe d'histoire des sciences (dir. Christian Bracco) de la Société française de physique.

- *organisation colloques, conférences, journées d'étude, séminaires*

2008 Co-organisation de l'International workshop "Cross-Perspectives on the History of Science in France and Great-Britain", 3 July 2008, Maison française d'Oxford, Oxford, UK.

2011 Co-organisation de la Junior scholar international conference "Continuity and Discontinuity in the Physical Sciences," 27-31 June 2011, American Institute of Physics, Washington, USA.

2013 Avec B. Van Tiggelen, organisation d'une session d'une journée "Materials and Chemistry from Bench to Brand and Back" sous le patronage de la Commission on the History of Modern

Chemistry, 26 July 2013, 24th International Congress of the History of Science, Technology and Medicine (ICHSTM), Manchester, UK.

Depuis 2018, coordinateur avec D. Acolat de l'organisation annuelle des Journées scientifiques du Centre François Viète, d'une durée de 3 jours et rassemblant environ 25 participants ;

Depuis 2018, responsable du séminaire hebdomadaire de recherche du Centre François Viète (site de Nantes) ;

2023 Avec B. Auvity, organisation du colloque « Déconstruire la notion d'"innovation" par les *low-tech* : transformations économiques, sociales et culturelles du temps présent », dans le cadre des journées scientifiques de Nantes Université, 5 juin 2023, palais des congrès de Nantes.

- *participation à un réseau de recherche, invitations dans des universités étrangères :*

Réseaux de recherche :

Depuis 2019, membre du comité scientifique du Groupe d'intérêt scientifique Histoire et sciences de la mer (GIS HSM)[6], coordonné par Christophe Cérino (Université de Bretagne Sud) ;

Depuis 2020, membre du comité directeur du Groupe d'intérêt scientifique Pôle d'excellence de la recherche ligérienne en énergie (GIS PERLE)[7], dirigé par Jérôme Bellettre (Nantes Université) ;

Depuis 2021, membre du Groupement de recherche Techniques et productions dans l'histoire (GDR TPH)[8], coordonné par Liliane Hilaire Pérez.

Conférences invitées :

2015 : 2 conférences à l'université de Lomé (Togo) au Département de physique et à la Faculté des sciences ;

2016 : 1 conférence à l'université catholique du Parana (PUC, Brésil) ;

2016, 2021 : 2 sur l'histoire de la chimie et des matériaux, respectivement lors du Colloque national du GDR Oxyfun (Autrans) et des Journées annuelles du Groupe français de la céramique (GFC) (Caen).

Collaborations internationales :

Depuis 2017, porteur avec Ronei Clecio Mocellin (UFP) d'une collaboration de recherche entre l'université de Nantes et l'université fédérale du Parana (UFP, Brésil). Cette collaboration, officialisée par un accord cadre de coopération entre les deux universités, a donné lieu à deux ensembles de résultats :

- Séjours longs de chercheurs, accueillis au Centre François Viète : 1° Daniel Tozzini (2016-2018), doctorant UFP en rédaction de thèse dont j'étais le garant scientifique à l'université de Nantes ; 2° R. Clecio Mocellin (sept. 2019-fév. 2020) qui a passé la moitié d'une année sabbatique à Nantes ;
- Co-édition par R. Clecio Mocellin et moi-même d'un numéro spécial de revue, portant sur

6 Voir le site internet du GIS HSM : http://www.histoire-sciences-mer.org/
7 Voir le site internet du GIS PERLE : https://www.triapdl.fr/perle-pole-dexcellence-de-recherche-ligerienne-energie/
8 Voir le site internet du GDR TPH : https://tph.hypotheses.org/

l'un de nos thèmes de notre collaboration : *Rivages et horizons techniques des mondes atlantiques au vingtième siècle*, *Cahiers François Viète*, (2020), III-8[9]. Ce numéro spécial a aussi accueilli un article issu de la collaboration entre un membre du Centre François Viète (B. Rohou) et trois de ses collègues de l'université de Rosario (Argentine).

Depuis 2018, porteur avec Mor Ndao (UCAD) d'une collaboration de recherche et d'enseignement entre l'université de Nantes et l'université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD, Sénégal). Cette collaboration, officialisée par un accord cadre de coopération entre les deux universités, a là encore donné lieu à deux ensembles de résultats :

- Échanges de chercheurs lors de séjours courts (2 à 4 semaines)
  - accueil à Nantes de Mor Ndao (2017), Moustapha Sow (2021), Karim Tandjigora (2021) et Daouda Diop (2023) ;
  - accueil à Dakar de Pierre Teissier (2019, 2022) ;
- Construction d'un master Histoire des sciences et des techniques à l'UCAD (ouverture prévue en janvier 2023) avec le soutien du master Épistémologie, histoire des sciences et des techniques de l'université de Nantes.

ENCADREMENTS DE RECHERCHE ET RESPONSABILITÉS SCIENTIFIQUES

1. Encadrement de thèse de doctorat

Depuis 2011, je co-encadre ou ai co-encadré au Centre François Viète cinq thèses de doctorat dans le cadre de l'école doctorale Sociétés, Temps, Territoires (Université Bretagne Loire). Trois d'entre elles ont été financées, les deux autres doctorants ayant une activité professionnelle. Quatre des cinq doctorant.es ont obtenu le master Épistémologie, histoire des sciences et des techniques de l'université de Nantes avant de s'inscrire en thèse.

En l'absence d'habilitation à diriger des recherches, ces co-encadrement ont été rendus possibles par trois collègues du Centre François Viète plus avancés dans leur carrière : Martine Acerra, Frédéric Le Blay et Stéphane Tirard. Ceux-ci sont convaincus de l'apport intellectuel d'un co-encadrement doctoral d'une part et d'autre part de la nécessité d'une formation progressive à l'encadrement doctoral d'enseignants-chercheurs plus jeunes.

Ces thèses de doctorat relèvent de mes thèmes de recherche ou de mes centres d'intérêts : histoire de la chimie et de la matière (2 thèses soutenues en 2018 et 2021) ; histoire des énergies et de l'environnement (2 thèses dont 1 soutenue en 2018) ; épistémologie et historiographie (1 thèse débutée en 2021).

3 thèses encadrées jusqu'à soutenance

2011-2018, Philippe Martin : *Histoire de l'industrie des engrais dans l'estuaire de la Loire à l'époque contemporaine*, directeur S. Tirard, autre co-encadrant J.-L. Kerouanton. Soutenance 27 sept.

9 Le numéro peut être téléchargé gratuitement à l'adresse suivante : https://journals.openedition.org/cahierscfv/586

2018. Encadrement personnel à hauteur de 40 %. Le doctorant a une activité professionnelle dans le secteur bancaire durant sa thèse et depuis. Il est chercheur associé au Centre François Viète dans l'équipe de recherche « Histoire des matériaux et épistémologie de la matière depuis le XVIII[e] siècle ».

2013-2018, Anaël Marrec : *Histoire des énergies renouvelables en France, 1880-1990*, directeur officiel D. Pécaud. Soutenance 26 sept. 2018. Encadrement personnel à hauteur de 90 %. La doctorante a été financée par une allocation de thèse de la région Pays de la Loire. Elle a publié deux articles comme seule auteure et nous avons publié ensemble un chapitre d'ouvrage et un article. Elle est aujourd'hui confrontée à la difficile recherche de contrats post-doctoraux et de postes d'enseignants-chercheurs.

2013-2021, Gérard Meyer : *Un savant dans son siècle : Alexandre T. Vandermonde (1735-1796)*, directrice M. Acerra et autre co-encadrante J. Boucard. Encadrement personnel à hauteur de 30 %. Durant sa thèse, le doctorant avait une activité professionnelle dans l'enseignement secondaire. Il a effectué deux communications orales.

2 thèses en cours d'encadrement

Depuis septembre 2019, Gaëtan Levillain : *L'enrésinement des forêts et l'industrialisation du bois en France (XIXe-XXe siècles) : une histoire technologique, culturelle et environnementale de la redéfinition d'un matériau traditionnel*, directeur S. Tirard, autre co-encadrant C. Bonneuil. Encadrement personnel à hauteur de 40 %. Le doctorant est financé par une allocation de moniteur normalien (Cachan), après un master à l'EHESS et au Centre Koyré. Sa venue à Nantes est un indice de l'attractivité du laboratoire à l'échelle nationale. Un article comme seul auteur est en cours de publication.

Depuis septembre 2021, Laura Duplaquet : *Science des futurs possibles et sciences historiques, croisements épistémologiques*, directeur : F. Le Blay. Encadrement personnel à hauteur de 40 %. La doctorante a obtenu une allocation de thèse dans le cadre du concours (très sélectif) de l'école doctorale Sociétés, Temps, Territoires en juin 2021.

2. Encadrement de mémoire de master recherche

De septembre 2010 à mars 2023, j'ai encadré et mené à soutenance 19 mémoires de master 2 recherche (dont 7 ont été codirigés avec d'autres enseignants-chercheurs ou chercheurs associés) & 4 mémoires de master 1 recherche (dont 1 codirigé). À ces 23 mémoires soutenus s'ajoutent 7 mémoires de master en cours de réalisation (2022-2023). 29 de ces 30 mémoires ont été réalisés dans le cadre du master Épistémologie, histoire des sciences et des techniques de l'université de Nantes, au Centre François Viète. Ils se répartissent de la manière suivante par thèmes et par dates :

(7) Histoire des sciences chimiques et physiques : Céline Bouyer (2010-2012), Gérard Meyer (2011-2013), Gabriel Harouy (2014-2015), Thomas Guyard (2015-2016), Mathilde Lemarchand (2016-2018), Léa Lemée (2020-2021), Eve Marty (2020-2022) ;

(9) Histoire industrielle, dont chimie et métallurgie : Fabrice Bauget (2013-2015), Pierre Henriet (2014-2015), Marion Lafait-Boisson (2015-2016), Alassane Fall (2016-2018), David Legrand (2016-2018), Jeremy Roggy (2016-2017), Thomas Zabulon (2018-2020), Remi Duchesne (en cours), Dunkan Liman (en cours) ;

(8) Histoire des énergies et de l'environnement : Agathe Dupas (2012-2013), Anaël Marrec (2012-2013), Thierno Diop (2014-2016), Pauline Kolomdja (2015-2017), Essohanam Kalao (2017-2019), Frédérique Moreau (2018-2020), Tanguy Janin (en cours) ; Fabien Mahe (en cours)

(6) Sciences et sociétés, dont histoire de l'enseignement : Marie Jallais (2011-2012), Gwenaëlle Lemoine (2019-2020), Vincent Dauhut (2020-2021), Justine Durand (en cours), Guilhem Ferre (en cours), Jean-François Grosset (en cours).

3. Responsabilités scientifiques

Animation d'équipes de recherche

J'ai créé et animé deux équipes de recherche depuis mon arrivée en 2010 au Centre François Viète. Elles n'ont pas de budget dédié mais une production scientifique importante :

La première équipe s'intéresse à l'« Histoire des matériaux et épistémologie de la matière depuis le XVIII[e] siècle ». Elle réunit actuellement 4 chercheurs associés du Centre François Viète : P. Martin, G. Meyer, A. Petit, P. Teissier[10]. Le thème est également lié, à travers P. Martin, à un projet de recherche hébergé par l'Institut d'histoire de l'aluminium et intitulé « De Kuhlmann à PUK (Pechiney Ugine Kuhlmann) 1825-1982 » (coord. Erik Langlinay).

La deuxième équipe travaille sur le thème « Énergies, techniques et sociétés ». Elle réunit actuellement 7 chercheurs associés et doctorants du Centre François Viète : E. Delaire, G. Fustec, G. Levillain, A. Marrec, P. Naegel, P. Robert, P. Teissier[11]. J'ai confié la responsabilité scientifique de cette équipe en 2019 à une jeune docteur prometteuse issue du laboratoire et spécialiste d'histoire de l'énergie : Anaël Marrec.

Contrats de recherche évalués suite à appel à projet ou de gré à gré

2011 : Dépôt non retenu d'un projet ANR dont j'étais porteur, en octobre 2011, intitulé « Digital Oral History of Research on Materials » (DOHRMAT) dans le cadre d'un appel humanités numériques. Il s'agissait d'un projet de constitution, de diffusion et d'analyse quantitative et qualitative d'un corpus inédit d'archives orales (dédiées à la recherche sur les matériaux depuis 1945) pour prolonger la réalisation du site « Sciences : Archives orales » (cf. alinéa édition ci-dessus).

2013 : Obtention d'une allocation de thèse de 3 ans financée par la région Pays de la Loire. La thèse intitulée *Histoire des énergies renouvelables en France, 1880-1990*, a été soutenue par Anaël Marrec en 2018. Que ce soit pour le dépôt ou l'encadrement, j'étais le porteur principal dans les faits,

10 Voir la description du programme de recherche sur la page suivante : https://cfv.univ-nantes.fr/axe-1-concepts-et-theories

11 Voir la description du programme de recherche sur la page suivante : https://cfv.univ-nantes.fr/activites-de-recherche/axe-3-artefacts-et-systemes-1

mais de manière non officielle du fait de l'absence d'HDR.

2019 : Accueil en thèse de Gaëtan Levillain, allocataire-normalien au Centre François Viète depuis septembre 2019. Le choix de l'université de Nantes et du laboratoire comme lieu de thèse par ce doctorant disposant d'une allocation de thèse montre l'attractivité et le dynamisme de l'équipe de recherche « Énergies, techniques et sociétés ». Je suis, là encore, dans les faits mais non officiellement, le principal encadrant de la thèse de G. Levillain.

En 2020, nous avons fait émerger un projet interdisciplinaire d'étude de l'estuaire de la Loire en termes géographique, historique et sociologique autour des questions d'énergie. Y participent, outre 4 membres de l'équipe, 4 chercheurs et enseignants-chercheurs titulaires relevant de 3 laboratoires de Nantes Université : E. Meuret-Campfort et J.-B. Comby associés au Centre nantais de sociologie (CENS UMR 6025), A. Évrard, maître de conférences à Droit et changement social (DCS UMR 6297) et J.-B. Bahers, chargé de recherche CNRS à Espaces et sociétés (ESO UMR 6590). Ce groupe interdisciplinaire a obtenu un financement « amorçage » de la Maison des sciences de l'homme des pays de la Loire (2022) puis un financement ANR en juillet 2022, dont je suis porteur principal. Trois post-doctorats sont prévus sur la durée 2023-2027, respectivement en histoire des sciences et des techniques, en géographie et analyse métabolique, et en sciences politiques.

4. Autres responsabilités collectives en recherche

Membres de comités de sélection pour des postes de maître de conférences

2012 : poste n°0265, section CNU 17, université Paris 1 Sorbonne

2013 : poste n°4170, sections CNU 72 et 25, université de Nantes

2020 : poste n°2065, sections CNU 72 ou 17, université de Nantes

Responsabilités collectives et d'intérêt général

1. Présentation synthétique des responsabilités

Depuis 2011, j'ai dû accepter, de manière successive, trois responsabilités administratives importantes du fait de la petite taille de l'équipe d'historiens des sciences et des techniques à l'université de Nantes : 1° un service pédagogique (2011-2014) ; 2° un master (2013-2018) ; 3° un laboratoire (depuis 2018)

2. Responsabilités administratives

Direction de structures de recherche

Depuis juin 2018, j'assure la direction d'une unité de recherche, le Centre François Viète d'épistémologie et d'histoire des sciences et des techniques (UR 1161). Cette direction est facilitée par la très bonne entente et collaboration avec Delphine Acolat, directrice-adjointe du laboratoire pour le site brestois. Je bénéficie en outre de l'aide inestimable d'Anaïs Durand, assistante administrative du laboratoire.

Cette unité de recherche comprend 16 titulaires, répartis sur quatre sites (Nantes, Brest, Quimper et Caen) et deux universités (Nantes et Brest). 12 doctorants y travaillent actuellement. 10 chercheurs titulaires d'un autre établissement d'enseignement supérieur sont associés à cette unité de recherche. Enfin, environ 35 docteurs sont associés au laboratoire, tout en ayant une autre activité professionnelle. Le laboratoire est spécialisé en histoire des sciences et des techniques et en épistémologie et couvre l'ensemble des périodes historiques, de l'Antiquité mésopotamienne, grecque et romaine, au temps présent. Il constitue l'un des principaux laboratoires français du domaine et le seul dans le Grand Ouest.

3. Responsabilités et mandats locaux ou régionaux

Participation aux conseils de composantes, de laboratoires…

2011-2018 : membre élu du conseil de laboratoire du Centre François Viète ;

2011-2014 : membre invité du conseil de gestion de l'UFR Sciences et Techniques (Nantes Université) ;

Depuis 2018, membre du conseil scientifique de l'UFR Lettres et Langages (Nantes Université) ;

Depuis 2018, membre du comité scientifique et du comité des thèses de l'école doctorale Sociétés, Temps, Territoires de la Comue Université Bretagne Loire

4. Responsabilités et mandats nationaux et internationaux

Participations à des instances nationales

Juin 2015 : Président du jury du baccalauréat technologique STD2A (n°1400) au lycée Livet à Nantes

2016-2020 : membre suppléant du Comité national des universités de la section 72 « Épistémologie et histoire des sciences et des techniques » (prés. Pierre Lamard). Cette fonction requiert, entre autres, l'évaluation annuelle de 3 à 4 dossiers de candidature aux qualifications de maîtres de conférences en section 72.

Responsabilités exercées dans les agences nationales

2017 : Expert HCERES du comité ayant assuré la visite du laboratoire Histoire des techno-sciences en société (HT2S), CNAM en novembre 2017.

0.2 Liste des publications scientifiques

1. Ouvrages individuels et direction d'ouvrages collectifs

Pierre Teissier (2014), *Une histoire de la chimie du solide. Synthèses, formes, identités*, Paris, Hermann, 2014.

Benjamin Deruelle, Camille Blachère, Aurélien Ruellet, Pierre Teissier (2016), *Sciences, techniques, pouvoirs et sociétés, 1500-1789*, Paris, Atlande, Clefs Concours.

Pierre Teissier, Cyrus C. M. Mody & Brigitte Van Tiggelen, eds. (2017), *From Bench to Brand and Back: The Co-Shaping of Materials and Chemists in the Twentieth Century, Cahiers François Viète*, série III, n°2.

Ronei Clecio Mocellin, Pierre Teissier, eds. (2020), *Rivages et horizons techniques des mondes atlantiques au vingtième siècle*, *Cahiers François Viète*, série III, n°8.

2. Articles dans des revues à comité de lecture

M. Zhang, A.H.E. Müller, P. Teissier, M. Krekhova, V. Cabuil (2004), "Polychelates of amphiphilic cylindrical core-shell polymer brushes with iron cations," *Progress in Colloid and Polymer Science*, vol. 127, n°9, p. 35-39.

Pierre Teissier (2010), "Solid-State Chemistry in France: Structures and Dynamics of a Scientific Community since World War II," *Historical Studies in the Natural Sciences*, vol. 40, n°2, p. 225-258.

Paul Naegel, Pierre Teissier (2013), "Obtaining a Royal Privilege in France for the Watt Engine (1776-1786)", *International Journal for the History of Engineering and Technology*, vol. 83, n°1, p. 96-118.

Pierre Teissier (2013), « Le solaire passif à l'ombre de la politique énergétique française, 1945-1986 », *Annales historiques de l'électricité*, n°11, p. 11-25.

Pierre Teissier (2015), « Bonnemay, Maurice, chaire d'électrochimie », in André Grelon et Claudine Fontanon, eds., *Cahiers d'histoire du CNAM*, vol. 4, p. 41-55.

Pierre Teissier (2017), « The Exotic Glasses of Rennes (France): Local Knowledge-Making in Global Telecommunication », in *From Bench to Brand and Back: The Co-Shaping of Materials and Chemists in the Twentieth Century*, ed. by Pierre Teissier, Cyrus C. M. Mody, and Brigitte Van Tiggelen, *Cahiers François Viète*, Série III, n°2, p. 117–51

Pierre Teissier, Benjamin Hervy et Matthieu Quantin (2018), « Humanités numériques et archives orales : cartographies d'une mémoire collective sur les matériaux », *Cahiers François Viète*, série III, n°4, p. 141-177.

Pierre Teissier, Anaël Marrec (2019), « Métaphores, déterminations et temporalités en histoire des techniques. De la mécanique du point à la psychologie des nénuphars », *Artefact. Techniques,*

histoire et sciences humaines, n°11, p. 309-340.

Étienne Delaire, Pierre Teissier (2020), « Horizons, Chaînes et Rivages Frigorifiques En France, 1900-1930. Marchés Alimentaires, Modernités Techniques et Pêches Industrielles », ed. R. Clecio Mocellin et P. Teissier, *Cahiers François Viète*, série III, n°8, p. 51–90

3. Chapitres d'ouvrages collectifs

Pierre Teissier (2008), « Jacques Bénard », in Laurence Lestel, dir., *Itinéraires de chimistes, 150 de chimie en France avec les présidents de la SFC*, Paris, Société française de Chimie, 2008, p. 39-44.

Pierre Teissier, Bernadette Bensaude-Vincent (2008), "Robert Collongues," in Noretta Koertge, ed., *New Dictionary of Scientific Biography*, Detroit, Charles Scribner's Sons/Thomson Gale, vol. 2, p. 159-64.

Pierre Teissier (2015), « Fours et maisons solaires de Mont-Louis-Odeillo », in Guy Boistel et Stéphane Le Gars (eds), *Dans le champ solaire. Cartographie d'un objet scientifique*, Paris, Hermann, p. 181-219.

Pierre Teissier (2017), "From the Birth of Fuel Cells to the Utopia of the Hydrogen World", in Bernadette Bensaude-Vincent, Sacha Loeve, Alfred Nordmann et Astrid Schwarz, eds., *Research Objects in their Technological Setting*, London & New York, Routledge, 2017, p. 70-86.

Pierre Teissier (2017), "The Exotic Glasses of Rennes (France): Local Knowledge-Making in Global Telecommunication", in P. Teissier, C. C. M. Mody & B. Van Tiggelen, eds., *From Bench to Brand and Back: The Co-Shaping of Materials and Chemists in the Twentieth Century*, *Cahiers François Viète*, Série III, n°2, 2017, p. 117-151.

Benjamin Hervy, Matthieu Quantin, Pierre Teissier (2017), « Extraction et chaînage supervisés de connaissances d'un corpus d'entretiens en histoire des sciences », *Extraction et Gestion des Connaissances, EGC*, éd. Fabien Gandon et Gilles Bisson, Grenoble, éditeur : RNTI-E-33, coll. Revue des Nouvelles Technologies de l'Information, p. 437–438.

Jenny Boucard, Pierre Teissier (2018), « Physique, chimie, mathématiques : les deux premières décennies des I^{e} et II^{e} sections », éd. Patrick Henriet, *L'École pratique des hautes études. Invention, érudition, innovation, de 1868 à nos jours*, Paris, Somogy, Éditions d'art, p. 141-152.

Anaël Marrec, Pierre Teissier (2020), « Les énergies alternatives aux prises avec les politiques conservatrices », in *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, éd. François Jarrige et Alexis Vrignon Paris, La Découverte, p. 238–248.

Pierre Teissier (2020), « Modern Heating Technologies », in *Between Making and Knowing. Tools in the History of Materials Research*, ed. by Joseph D. Martin and Cyrus C. M. Mody, Singapore: World Scientific, p. 257–272.

Pierre Teissier, Sacha Tomic (2020), « Questions d'épistémologie », in *Philosophie de la chimie*, éd.

Bernadette Bensaude-Vincent and Richard-Emmanuel Eastes, Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur, p. 103–110.

Richard-Emmanuel Eastes, Pierre Teissier (2020), « Les trois “parenthèses enchantées” de la chimie sur Terre », in *Philosophie de la chimie*, éd. Bernadette Bensaude-Vincent and Richard-Emmanuel Eastes, Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur, p. 97–99.

Pierre Teissier (2022), « Lithium », in B. Bensaude-Vincent (éd.), *Biography of Materials*, Singapore, World Scientific Publishing, p. 219–234.

4. Autres productions liées à la recherche

Sacha Loeve, Pierre Teissier et Bernadette Bensaude-Vincent (2011), éds., “Sciences : Histoire Orale”, Paris, ESPCI ParisTech, *http://www.sho.espci.fr*

Paul Naegel, Anaël Marrec, Pierre Teissier (2015), « Le profit à court terme est préféré aux problèmes à long terme », *Terra Eco*, 2 décembre 2015.

Pierre Teissier, coord. (2020), « Rapport d’autoévaluation HCERES du Centre François Viète (2015-2020) », 161 pages, Université de Nantes.

Pierre Teissier, « L’hydrogène, une énergie récalcitrante », *UN News Business*. Numéro thématique : Hydrogène, juin 2021, université de Nantes, p. 14-15.

0.3 En guise d'ego-histoire : égotisme et altérité

À l'aube de la société industrielle, Henri Beyle forgeait, par ses *Souvenirs d'égotisme* (1832), un nom commun pour désigner la pratique littéraire d'écriture réfléchie de soi. Par l'ironie du destin, cet auteur qui usait de multiples pseudonymes finit par perdre son patronyme de naissance pour devenir son nom de plume, Stendhal pour la postérité. De manière analogue, il est d'usage chez les historiens d'écrire une analyse réflexive de leurs propres positionnements conceptuels, historiographiques et méthodologiques au moment de la soutenance d'habilitation à diriger des recherches. Ce rite égotique, appelé « ego-histoire » dans le jargon académique, sélectionne, ordonne et interprète les souvenirs personnels comme le suggéraient les *Souvenirs d'égotisme* de Stendhal. Or, la mémoire est une alliée complaisante et une ennemie implacable lorsqu'il s'agit de dessiner un itinéraire individuel. Alliée complaisante, elle prête sans scrupule des outils pour gommer les singulières incohérences et réduire les doutes lancinants. Dilettante, elle remplace le chaos existentiel par un cheminement en étapes successives. À l'inverse, ennemie implacable, la mémoire jette sur les bords du chemin les plastiques huileux des souvenirs inconfortables et les cartons défoncés des expériences fugaces. Éboueuse des formes intérieures, elle délaisse le fugitif et amoncelle les récurrences et les obsessions de nos existences passées.

La coexistence de ces deux faces de la mémoire m'a convaincu de ne pas entreprendre un classique récit d'ego-histoire. Trois éléments liminaires suffiront à situer ma démarche. Premièrement, une circulation indisciplinée : scientifique de formation, ingénieur défroqué, accroché par l'histoire des sciences et des techniques, séduit par les sciences humaines et sociales, apaisé, enfin, entre ces multiples identités. Deuxièmement, une composition intellectuelle : méfiant vis-à-vis des crispations disciplinaires, inquiet de l'influence des gardiens de temples universitaires, opposant aux puretés identitaires, captivé par l'épistémologie comme prisme d'analyse comparative et révélatrice des savoirs sur la nature et la société, dans leurs spécificités, leurs homologies et leurs relations. Troisièmement, un désir de dialogue contradictoire et un souhait d'écoute réciproque : techniciens, technocrates et technologues sont des identités qui sont mêlées en moi, des catégories qui définissent certains de mes proches, ami.es, collègues, des réalités transversales des sociétés industrielles. Dans un effort de compréhension, il me fallait d'abord faire dialoguer ces entrepreneurs de la technique, quitte, ensuite, à reconnaître certaines impossibilités et impasses d'un dialogue entre des composantes trop hétérogènes de la société contemporaine.

Convaincu, à titre existentiel, que la technique façonne les humains et transforme les sociétés, j'ai voulu explorer les formes les plus intimes et les moins sensibles de contraintes techniques avec un regard anthropologique, mais sans la panoplie d'un enquêteur de terrains. Prendre le stockage de l'énergie comme un fait social transversal pour dire quelque chose des sociétés contemporaines, occidentales et occidentalisées. L'introduction générale de l'habilitation à diriger des recherches explicite mes principaux parti-pris à travers des héritages, des digestions et des propositions. Elle fait donc office d'ego-histoire appliquée. Tout en montrant une pensée personnelle dans la fragilité de sa construction et de ses échafaudages intellectuels, cette introduction générale acte les résultats d'un cheminement. Dans les notes de bas de page de l'introduction et des chapitres suivants, j'ai placé des réflexions dues aux interactions avec les autres, au cours de mon parcours personnel, mes travaux professionnels, de recherche et d'enseignant, et les rencontres que j'ai faites avec des personnes physiques, morales ou de papier. Cet essai porte leurs empreintes et la mienne, mêlées. Je suis reconnaissant à toutes les personnes qui ont provoqué ces rencontres et qui se reconnaîtront de manière explicite ou implicite entre les lignes et les feuillets de cet essai.

J'aimerais également remercier un certain nombre de collègues ayant marqué mon expérience d'écriture. La formulation de remerciements est un rite académique, qui, comme celui de l'ego-histoire, peut paraître

étrange aux regards extérieurs à l'université mais, outre le plaisir égoïste qu'elle procure, renseigne aussi sur la nature collective d'une pensée personnelle. On ne devient soi-même qu'en rencontrant les autres. Remercier, c'est reconnaître et souligner l'importance de cette altérité. Je voudrais d'abord remercier Pierre Lamard sans la confiance duquel je n'aurais pas soutenu mon habilitation à diriger des recherches sous cette forme. Lorsque j'étais tenté par des envolées trop métaphysiques, il a su remettre mes pieds sur terre par un humanisme bienveillant et une pertinence historienne. Le chapitre sur l'hydrogène, qui dit le temps présent et les mondes futurs, doit beaucoup à ses conseils d'approcher le terrain par des entretiens avec des professionnels de l'hydrogène de l'université de technologie de Belfort-Montbéliard. C'est à cette occasion que j'ai rencontré Marie-Cécile Péra, dont les formules incisives et la mise à distance de son objet d'étude par l'humour ou la critique m'ont immédiatement séduit. À travers elle, ce sont les professionnels de l'hydrogène qui ont bien voulu partager leurs témoignages que je remercie également. Ces témoins du temps présent, techniciens de métier, produisent une parole riche et subtile sur la technologie comme matérialité et ensemble d'artefacts, qui glisse parfois vers la technologie comme discours sur les sociétés humaines. Mathieu Arnoux, Anne-Françoise Garçon, Xavier Guchet et Charles-François Mathis ont fait l'expérience de la technologie par un cheminement inverse. Chacune ou chacun à leur façon explore les sociétés humaines en prenant la technique et l'énergie comme pivot, comme geste ou comme perspective de l'histoire pour appréhender le fait social, ancien ou moderne. Je tiens à les remercier sincèrement pour avoir montré un intérêt pour cet essai indiscipliné et hétéroclite et pour avoir accepté de l'évaluer dans le cadre académique. Bernadette Bensaude-Vincent et Ronei Clecio Mocellin occupent, quant à eux, une place particulière car ils m'accompagnent depuis les débuts de ma navigation entre les sciences de l'ingénieur et les sciences de l'homme, Bernadette comme mentor, Ronei comme compagnon d'odyssée. Je leur sais gré de ce compagnonnage intellectuel et amical depuis deux décennies.

Si le jury est un nœud de rencontres intellectuelles pour une habilitation à diriger des recherches, le long processus de réflexion, d'enquête et d'écriture qui le précède a bénéficié de multiples échanges interpersonnels. Depuis 2010, lors mon recrutement à l'université de Nantes, et depuis 2018, lorsque j'ai débuté cet essai d'*épistémologie des techniques* comme je pensais alors l'appeler, le Centre François Viète fut le lieu principal de mon travail universitaire d'enseignant, de chercheur et de coordinateur de la recherche. Ses joyeux habitants ont été mes principaux interlocuteurs académiques si l'on excepte les dialogues de papier avec les archives, sources primaires et secondaires. Au premier chef, je suis reconnaissant envers celles et ceux avec qui j'ai publié des articles ou des chapitres d'ouvrages et qui seront cités de manière explicite dans la catégorie « Travaux personnels et collaboratifs cités dans l'essai » de la bibliographie. J'aimerais remercier plus spécifiquement certains collègues qui ont partagé leurs idées et leurs références, qui m'ont suggéré des méthodes ou qui m'ont soutenu avec simplicité et chaleur durant cette succession de 55 mois depuis septembre 2018, durant lesquels j'ai pu consacrer mes heures perdues à l'investigation, la réflexion et l'écriture de ce mémoire original. Pour elles et eux, mes remerciements ressembleront à la formulation d'un « caractère » en littérature selon la théorie de Natsume Sōseki. Dans *Le mineur*, cet écrivain japonais de l'ère Meiji, marqué par la transition du Japon médiéval vers la modernité occidentale, défend une vision originale d'un caractère littéraire. Si les « romanciers prétendent créer tel ou tel type de "caractère" [et] s'en glorifient », le « caractère » comme type significatif de la nature humaine n'existe pas en littérature, défend Sōseki (1908, p. 14-15). Car, il « est étonnamment difficile de donner forme aux êtres humains réels ». Les personnages du *Mineur* sont ainsi désignés par leurs enveloppes vestimentaires, « l'homme à mi-chemin entre le *hanten* (veste courte) et le *dotéra* (kimono long) » (p. 6) et « Couverture Rouge » (p. 77), ou par des signes matériels distinctifs, « la marchande de beignets », « le jeune garçon », « Œil-Rouge » (p. 168). Ils sont informes au sens littéral dans la mesure où

un être humain n'a pas de forme précise et permanente : « la tête et les pieds demeurent enfouis dans l'inconnu et [...] seule [la] partie centrale flotte devant nos yeux » (1908, p. 140-141). Natsume Sōseki crayonne ainsi ses personnages de papier comme des « corps médians » sans pied, ni tête, sans les figer dans une forme définitive. Les remerciements sincères que j'adresse aux membres du Centre François Viète seront autant de tentatives maladroites de crayonnage de ces « corps médians » sans pied, ni tête, qui me sont apparus de manière située et fragmentée.

Depuis 2018, les doctorantes et doctorants ont su animer et renouveler la vie de laboratoire par d'espiègles et d'ingénieuses contributions, que ce soit par la renaissance des communs dans un château médiéval de la Bretagne contemporaine par Gaëtan Fustec, l'invitation anarchiste de Black Nath à la piraterie atlantique, le bateau ivre des sommets, arêtes et surfaces de la côte nazairienne selon Carène Guillet ou encore l'affection infralunaire que voue Angélique Lemarchand aux rivières, aux nuages et aux météores du monde aristotélicien. Je ne peux oublier nos trois charismatiques *stars* du petit écran : Georgette Lemire, mathématicienne spirite qui fait tourner les guéridons de l'entre-deux-guerres ; Larry Smith, ce gros cigare d'économiste replet et satisfait des Trente Glorieuses ; et Greta Thunderboard, égérie de l'écologie profonde du monde d'après. Inclassable, Anaïs Durand est un bourgeon d'humanité qui rend l'arbre de la connaissance si exotique à Nantes. Chef d'orchestre aux journées de Quiberon, elle mène avec douceur, mais à la baguette, la fanfare dissipée, joyeuse et créatrice des collègues et ami.es du Centre François Viète : Marie-Morgane Abiven, authentique humaniste numéricienne animant les longs compas de l'arsenal de Venise ; Delphine Acolat, dont le verbe photographique fait rêver des ruines antiques échappées du Vésuve ; Giulia Anichini, pince-sans-rire de l'anthropologie qui nous invite sur les rives méditerranéennes, du palais des Doges aux pieds de la Bonne Mère ; Françoise Dreyer, adepte sereine des limites géologiques et de la transformation des cadres de pensée catastrophiste ; Hervé Ferrière, cet Hercule au grand cœur qui m'ouvre la voie en démystifiant un treizième travail de Romains ; Océane Fiant, décortiqueuse de la pensée algorithmique des médecins contemporains et pourfendeuse de l'introuvable éthique du temps présent ; Clément Guiraud, philosophe de la médecine à Nantes et esthète de l'ovalie à Toulouse ; Loïc Jeanson, humaniste numéricien germanophone et africaniste, ayant construit un deuxième observatoire sur le pic du Midi ; Jean-Louis Kérouanton, artiste aux chemises fleuries qui lit aussi bien les images urbaines qu'il décrypte les traces industrielles du passé ; Mathilde Lancelot, animatrice et philosophe de terrain en passe de réussir le tour de force de convertir les médecins à la grève générale ; Frédéric Le Blay, trappeur implacable et conteur optimiste de toutes les fins du monde ; Colette Le Lay, alternativement *dealeuse* de sablés bretons savoureux et enchanteresse des imaginaires de science-fiction ; Jean-Luc Le Cam, incroyable caméléon musical entre le chant baroque des universités germaniques du XVII^e^ siècle et la gratte électrique des *sixties* ; Karine Le Jeune, exploratrice attentive et attentionnée des tréfonds de l'âme humaine, de la dictature sanitaire aux apocalypses zombies ; Philippe Martin, aventurier infatigable de l'estuaire ligérien et ogre insatiable des archives départementales ; Gérard Meyer, dernier rousseauiste de l'histoire des techniques et premier pédagogue des polymaths modernes ; Cristiana Oghina-Pavie, herboriste politique du régime soviétique et cartographe de la culture des rosiers historiquement modifiés ; Matthieu Quantin, honnête homme du XXI^e^ siècle aussi habile avec ses mains pour manutentionner un vélocipède que curieux avec sa tête pour politiser l'anthropologie inversée des modernes ; Paul Naegel, figure nantaise haute en couleur de l'histoire des techniques et mémoire passionnée de la décolonisation algérienne ; Lisa Rougetet, intrépide cavalière nordiste ayant fait son trou dans le Far West grâce à des dispositifs ludiques et énigmatiques ; Fabrice Roux, naturaliste des marges sociologiques et sociologue des jungles guyanaises ; Pierre Savaton, historien équipé d'un marteau fouillant les strates archéologiques du temps profond et sautant dans les cônes esthétiques des

volcans endormis ; Frédéric Soulu, *globe-trotter* singulier des mondes académiques, des bibliothèques algéroises aux ermitages montagneux du pays basque en passant par la sphère des étoiles fixes.

Mais, j'aurais une pensée particulière pour trois esprits vifs aux bras robustes du Centre François Viète, qui ont accompagné et encouragé mon travail tout au long de ma résidence ligérienne : Jenny Boucard, Anaël Marrec et Stéphane Tirard. Avant et après m'avoir convaincu de taper ce manuscrit avec l'éditeur de texte LaTeX dont la pureté esthétique inégalée à ce jour sautera aux yeux des lecteurs et lectrices non averties à partir de la page xxxi, Jenny n'a cessé d'en nourrir le contenu par des suggestions de lecture (Carolyn Merchant, James Scott, Lester Ward), des propositions de concept (échelle, matérialité, ordre) et des pauses cinématographiques salutaires (quasiment tous les films de Ken Loach et Sidse Babett Knudsen). De son côté, Anaël m'a convaincu par la conduite et l'écriture de sa thèse puis nos collaborations ultérieures de l'intérêt d'approfondir l'archéologie des sociétés contemporaines par les techniques de l'énergie (convertisseurs, sacs de nœuds et nains énergétiques), m'a fait glisser à mon insu (fourbement épaulée par Gaëtan Levillain) vers l'histoire environnementale, et m'a soutenu de manière très professionnelle pour réanimer mon attrait des fêtes kerlouanaises lorsque je me laissais séduire trop longtemps par la vie monacale. Enfin, Stéphane m'a soutenu sans faillir depuis treize ans lors des tempêtes académiques, des naufrages collectifs ou des écœurements personnels vis-à-vis de la bureaucratisation de notre monde. Son approche compréhensive offre un précieux antidote contre l'espérance folle de vouloir changer les êtres humains tandis que sa bibliothèque et sa médiathèque personnelles sont une douce pharmacopée dans l'ambiance crépusculaire de fin du monde qui est la nôtre.

Pour mes ami.es de longue date, il sera plus facile de les remercier en les dissimulant derrière des sobriquets éponymes à la manière du *Mineur* de Sōseki. Ces expressions singulières n'auront qu'une signification vague pour des regards extérieurs alors qu'elles portent le souvenir des expériences partagées pour celles et ceux qui les ont vécues : *l'Amstellodamois*, *Bacchus*, *DJ Cholestérol*, *Hugh Grant*, *Jean-Claude Dusse*, *le-Texan*, Jean-Noël, Sébastien, mais aussi *l'Anti-Moine* et *la-Pianiste-au-chasuble*, *Rico della Plata*, *l'Écologue-collapsologue* et *le-Philosophe-qui-ramassait-des-tomates*, ou *Natalite*, Marx et *Locita*, enfin *Le-Cycliste-du-Limousin* et *L'Ermite-du-Vercors*. Chères et chers amis, soyez remerciées d'être là, généreux, ouverts et conviviaux, lorsque je parviens à sauver quelques graines du temps présent. Enfin, comment dire simplement mes sentiments forts et tendres à la tribu familiale s'égayant dans la pinède provençale ? Aux trois adorables filous, Agathe, Anaïs et Raphaël, à leurs parents solidaires, Fabienne, Karine, Olivier et Richard, et à leurs grands-parents bienveillants, je dédie cet essai d'habilitation à diriger des recherches, qui n'en finissait plus de se dilater en épongeant mon temps libre.

Nantes-Quimper-Lille-Belfort-Marseille-Dakar
Septembre 2018 – Mars 2023

Deuxième partie

Mémoire d'habilitation à diriger des recherches (2018-2023)

Le stockage de l'énergie (1850-2050). Problème de techniciens, concept de technologues, désir de technocrates

Chapitre 1

Introduction générale

> « Qu'était-ce ici que sa vie en dehors de ses rapports avec le Château ? Jamais encore K. n'avait vu son existence et son service aussi intimement mêlés ; ils l'étaient si bien que parfois K. pouvait croire que l'existence était devenu service et le service existence. »
> Franz Kafka, *Le château*, 1922.

1.1 Essai : technologie, modernité, humanités

Mon habilitation à diriger des recherches s'intitule *Le stockage de l'énergie, 1850-2050. Problème de techniciens, question de technologues, désir de technocrates*. Elle revisite la question de la modernité dans les sociétés occidentales depuis le milieu du XIX^e^ siècle jusqu'au milieu du XXI^e^ siècle. Elle prend la technique comme prisme d'analyse en raison de sa centralité et de l'importance de ses effets sur l'organisation sociale et sur l'imaginaire à l'âge industriel.

1.1.1 Régime technicien : l'emprise de la technique sur la modernité occidentale

Plus que la construction sociale des techniques, je m'attache aux effets de la technique à long terme et à longue distance. Car, la technique inscrit dans le social des ensembles de valeurs et des règles de vie, des échappées existentielles et des contraintes collectives. Je m'intéresse, à la manière des anthropologues, au « rapport matériel et symbolique à l'énergie dont les incidences portent autant sur les représentations que sur les usages de l'énergie et dont les effets sont également sociaux » (Ortar et Subrémon 2016, p. 8). Plus que sur les usages en général, cet essai portera sur les milieux professionnels de la technique dans leurs discours, leurs pratiques et leurs imaginaires. Ce n'est pas l'étude d'un corporatisme qui m'intéresse mais la manière dont ce corporatisme transforme le monde. En effet, la mainmise des experts sur le capitalisme industriel fait que *leur monde devient notre monde* à travers le quadrillage de la société par des infrastructures matérielles mais aussi à travers l'organisation des groupes sociaux, la structuration des imaginaires ou encore la modification des sensibilités. Dans cette perspective, la modernité occidentale est caractérisée par une triple tendance : philosophique par la rationalisation de la nature par la science et la technique ; sociopolitique par la mise en réseau des sociétés humaines par des systèmes sociotechniques ; historique par l'accélération des changements des modes de vie et d'expériences collectives du monde. Je propose de nommer *régime technicien* cet ensemble d'emprises techniques structurant les mondes contemporains en termes culturels, économiques, politiques et

sociaux par la contrainte et le désir. Ce concept exprime une forme d'empire de la technique sur les mondes industriels et une forme d'aliénation des populations contemporaines par la technique. L'essai se focalise sur l'Europe de l'Ouest et l'Amérique du Nord pendant la période 1850-2020 et s'intéresse à la manière dont les structurations du temps présent organisent aussi en partie la période 2020-2050.

Les interactions sociotechniques sont subtiles. Le régime technicien n'est ni monolithique, ni stabilisé. Il se recompose en fonction de strates temporelles (époques), d'échelles spatiales (territoires) et d'agrégats socio-culturels (administrations, disciplines). Étudier le régime technicien relève d'une forme d'archéologie des contraintes et nécessite une méthode d'exploration appropriée. Trois choix forts ont été réalisés. Premièrement, je me suis focalisé sur un phénomène bien identifiable sur la période malgré ses évolutions : le stockage de l'énergie. Ses atouts sont nombreux : 1° s'attacher à une méthode de la culture contemporaine dans l'aptitude à poser et à résoudre des problèmes ; 2° rendre visibles les incertitudes et les contradictions entre acteurs lorsque les problèmes sont ouverts (ouverture de la boîte noire) ; 3° suivre un indicateur central de l'économie mondiale, la production d'énergie ayant crû dix fois plus que la population mondiale durant l'époque contemporaine (Kander et al. 2014, p. 1). Le deuxième choix tient à la constitution d'une sonde différentielle de la modernité technique basée sur les professionnels de la technique. J'ai sélectionné trois catégories – techniciens, technocrates, technologues – en raison de leurs modes différenciés d'appréhension du monde : opération, gestion, spéculation. Ces manières d'agir, de sentir et de penser sont relayées dans la société par des institutions politiques et économiques. Elles en viennent ainsi à structurer en profondeur le social, le politique et le culturel. Elles façonnent, en première approximation, le régime technicien, même si les citoyens, les usagers et les consommateurs gardent des marges de manœvre individuelles et collectives : rejet, révolte, renversement, réappropriation, etc. Les sources secondaires issues des sciences humaines et sociales seront utiles pour souder les aspects professionnels et citoyens du régime technicien. Troisièmement, j'ai limité l'essai à deux terrains du monde : l'Europe de l'Ouest et l'Amérique du Nord. Ce choix est justifié par des rapports de force hégémoniques et des contraintes organisationnelle de l'occident sur le reste du monde à l'époque contemporaine. Georges Balandier parle d'une « généralisation » du régime occidental ; Serge Latouche d'une « occidentalisation du monde ». Là encore, les autres régions du globe et leurs populations disposent de marges de manœuvre : rejet, révolte, renversement, réappropriation, etc. Mais, je regarde plutôt du côté de la puissance technicienne pour voir, en première approximation, ses effets à long terme et à large échelle sur la régulation des peuples contemporains. Le phénomène dépasse le seul occident industriel contemporain, mais c'est ce dernier qui recevra la plus grande attention en raison de son rôle moteur dans la constitution et l'extension des ramifications du régime technicien à l'échelle de la planète.

1.1.2 Structures de l'essai : périodes, sources, méthodes

L'énergie est la colonne vertébrale du capitalisme industriel. Le milieu du XIX^e^ siècle est choisi comme début de la période par la formulation du concept d'énergie dans le cadre de la thermodynamique au cours de la décennie 1840. Ce contexte économique et cette rupture intellectuelle sont complétés par la mise en place de larges réseaux industriels de l'énergie (électricité, gaz, pétrole) au cours la deuxième moitié du siècle dont les conséquences sont encore bien sensibles au XXI^e^ siècle dans les sociétés occidentales et occidentalisées. Alain Gras prend d'ailleurs la construction et de l'extension des macro-systèmes techniques comme le premier indicateur de la modernité industrielle. Dans le cas de l'énergie, la construction de larges réseaux électriques industriels à partir de la décennie 1880 renouvelle la force, la forme et la fonction du stockage de l'énergie à l'époque. Elle aura là encore des conséquences durant tout le XX^e^ siècle dans les sociétés industrielles. Le regard

historique constitue un atout pour dégager des tendances du temps long venant télescoper les enjeux politiques actuels autour de la « transition énergétique » annoncée au XXIe siècle. Considérer deux territoires hégémoniques à l'échelle de la planète permet de tracer des structurations d'ensemble de la modernité industrielle tout en soulignant des différences sociotechniques significatives entre l'Europe de l'Ouest et l'Amérique du Nord en fonction des lieux, des acteurs et des situations.

Ces choix méthodologiques s'appuient sur un corpus hétérogène par construction mais sensible aux strates socio-professionnelles dans leurs diversités de discours et de pratiques. Le corpus dépend de mon itinéraire particulier (carrière en France, séjours en Angleterre, États-Unis et Allemagne) et de facilités d'accès à deux langues principales (français et anglais). Il est composé, du côté des sciences de l'ingénieur, de discours publiés (projets et retours d'expérience dans les revues professionnelles) et de témoignages recueillis auprès de chercheurs, de techniciens et d'industriels, de textes administratifs et de visions politiques (rapport Clémentel, *Journal officiel de la République française*, institutions de planification). Les archives n'ont pas été recherchées au premier chef. Elles apparaissent lorsque sont convoqués les cas d'étude liés à mes travaux personnels et collaboratifs : articles personnels, travaux d'étudiants de master et de doctorants, collaborations de recherche, etc. Ici, il faut souligner avec force l'importance des collectifs et des coopérations de recherche qui nous nourrissent beaucoup plus que nous l'indiquons en général en note de bas de page de nos articles individuels. Suivant la proposition de Georges Haudricourt (1964), j'ai voulu faire de la « technologie [une] science humaine » et sociale. J'ai pris beaucoup de plaisir à mélanger les genres et les domaines des sciences humaines et sociales : anthropologie, économie, épistémologie, géographie, histoire, littérature, philosophie, sociologie. Un tel métissage permet de rapprocher des idées et des références qui, quoique proches, peuvent s'ignorer du fait des cartels disciplinaires.

Une manière de compenser les restrictions induites par les choix de sources, de méthodes, de périodes et de territoires, est l'attention portée simultanément aux tendances profondes et à leurs variations sociales, spatiales et temporelles ainsi qu'aux disjonctions nouées autour des points de controverse, des rapports de force, des révoltes contre la domination, des singularités irréductibles. J'articule conjonctions et disjonctions en instruisant un dialogue soutenu dans la durée entre techniciens, technocrates et technologues, malgré des barrières de territoires, de langues et de cultures. Ceci encourage les comparaisons entre des sphères *a priori* éloignées. Je m'efforcerai, en divers endroits de l'essai, de rapprocher le stockage d'énergie d'autres formes de stockage. Qu'est-ce qui rend le stockage d'énergie spécifique par rapport à celui de nourriture et d'eau, d'information et de données, d'argent et de valeurs ? Y a-t-il un geste commun avec le stockage d'armes ou de déchets ? Ces diverses formes de stockage disent quelque chose des expériences humaines des mondes et des sociétés.

1.1.3 Formes d'un dialogue entre ingénierie et humanités

Je m'efforce de formuler des questionnements généraux sur les sociétés humaines à partir des problèmes concrets et localisés des savants et techniciens sur le modèle de la philosophie de terrain développée par Bernadette Bensaude-Vincent. Les deux pôles du local et du général sont déjà incarnés dans l'université médiévale. Car, *universitas* désigne simultanément une aspiration à la « totalité » du savoir et une « communauté » singulière de vie et de travail.

L'enjeu épistémique de cet essai est de créer des espaces de dialogue au sens intellectuel du terme dans lesquels le monde n'est plus confisqué par certains, mais construit en partage entre toutes et tous. Une manière d'ouvrir un espace de dialogue est de partir de référents épistémiques communs. Ces référents sont de

plusieurs types : notions, méthodes, représentations, etc. J'évoquerai successivement une notion, l'énergie [1] ; une méthode, le choix de ce qui est considéré comme donné et comme variable dans une recherche ; et un transfert de représentations, l'analogie. Chacun de ces référents est une invitation au dialogue entre sciences de l'homme et sciences de l'ingénieur. S'il se construit sur un effort attentif d'écoute réciproque et sur un échange contradictoire d'idées, un dialogue transdisciplinaire peut ébranler certaines certitudes, modifier certaines visions du monde ou révéler certains impensés. La possibilité d'un tel échange en profondeur fait l'hypothèse d'une commensurabilité des régimes de pratiques et de pensées des techniciens, des technocrates et des technologues. La mise à l'épreuve de cette hypothèse constitue le fondement épistémologique de mon habilitation à diriger des recherches.

Les interactions entre régime technicien et société capitaliste ouvrent vers une anthropologie des pratiques et des imaginaires techniciens de l'occident contemporain. Cet essai s'intéresse aux tendances profondes, aux structurations d'ensemble et aux évolutions de l'ordre social et culturel, qui ont sédimenté dans l'indifférence du temps profond et des espaces larges. Dans *L'idéel et le matériel. Pensées, économies, sociétés*, Maurice Godelier (1984, p. 10) pose cette hypothèse fondamentale pour les sciences de l'homme et de l'ingénieur : « l'homme a une histoire parce qu'il transforme la nature ». Plus précisément, « c'est même la nature propre de l'homme que d'avoir cette capacité. L'idée est que, de toutes les forces qui mettent l'homme en mouvement et lui font inventer de nouvelles formes de société, la plus profonde est sa capacité de transformer ses relations avec la nature en transformant la nature elle-même. » De manière lente, invisible et imperceptible, l'humain se transforme par les objets qu'il pose dans le cosmos et qu'il interpose entre lui et les autres. Cette idée, développée par Gilbert Simondon, est reprise et reformulée dans les termes suivants par Xavier Guchet :

> Alors que les animaux peuvent avoir la capacité de développer des structures sociales élaborées, les humains semblent être les seuls êtres vivants qui ont multiplié, enrichi et compliqué les formes de leur organisation sociale dans la même mesure qu'ils ont multiplié, enrichi et compliqué leur engagement vis-à-vis de la matérialité. (Guchet 2012, p. 91)

C'est à l'exploration de l'humain dans sa structuration socio-culturelle et dans son évolution historique que nous convie l'étude du régime technicien en Europe de l'Ouest et Amérique du Nord sur près de deux siècles de 1850 à 2050. Un tel parcours part de présupposés intellectuels et méthodologiques qu'il est important d'expliciter en recherche, et, plus encore, dans une habilitation à diriger des recherches. Le chapitre 1 joue ce rôle sans suivre pour autant le rite classique de l'égo-histoire. J'ai décalé l'exercice : les éléments épars de mon histoire personnelle servent à formuler le cadre méthodologique et intellectuel de l'essai et à ébaucher une réflexion personnelle sur la technique. La réflexivité par rapport à mon parcours professionnel, d'enseignant, de chercheur et d'administrateur, apparaît aux marges de l'essai, en notes de bas de page.

Le chapitre 1 contient cinq sections. La section 1.2 est construite, sans surprise, sur les héritages académiques que j'utilise pour appréhender les techniques en société. Elle renvoie à un héritage majeur, l'histoire-problème, que je développe dans la section 1.3, pour expliciter la manière dont je relie les questionnements de l'essai aux sources convoquées. Cette méthode générale dans les humanités permet de déconstruire une question spécifique comme le stockage de l'énergie pour en faire l'histoire d'un problème dans la section 1.4. Elle pose un certain nombre de problèmes aux historiens. La section 1.5 détaille l'un des plus insolubles d'entre eux :

1. J'ai aussi parlé de « concept » d'énergie précédemment, en évoquant la thermodynamique des années 1840. Ici, le terme de « notion » est plus adapté pour qualifier un référent circulant entre plusieurs domaines. J'utiliserai cette distinction, par la suite, dans cet essai : concept sera réservé à des emplois spécifiques dans le cadre d'une théorie ou d'une discipline ; notion sera appliquée à des contextes plus larges impliquant une circulation à travers la société.

l'équilibre à trouver au sein d'un même essai entre l'expression des cohérences d'un sujet comme le stockage de l'énergie, qui donne accès à une signification intelligible, et la prise en compte des contradictions inhérentes au chaos empirique des sociétés humaines. La solution que j'ai adoptée est la mise en œuvre dans la section 1.6 d'un dialogue entre ingénierie et humanités, à travers des acteurs qui se distinguent par leurs imaginaires et leurs pratiques mais convergent vers un objet commun, la technique. L'enjeu est d'ordre méthodologique pour appréhender les sociétés techniciennes que sont les mondes contemporains et d'ordre programmatique pour construire des mondes futurs moins asymétriques en termes collectifs entre ceux qui agissent et ceux qui subissent.

1.2 Héritages pour une étude des techniques en société

L'objectif de cette section n'est pas d'établir une historiographie des techniques. Je m'efforce plutôt d'expliciter les enjeux historiographiques dont je me suis saisi durant le glissement qui m'a conduit de l'histoire des sciences à l'époque de mon doctorant (2004-2007) à l'histoire des techniques aujourd'hui. Les historiens des techniques ont largement renouvelé leurs méthodes et leurs objets depuis plusieurs décennies. Aux œuvres monumentales dont l'*Histoire générale des techniques* de Maurice Daumas (1962), essais interprétatifs ambitieux dont *Technics and Civilization* de Lewis Mumford (1934) et les nombreuses monographies spécialisées sur un inventeur, une machine, une entreprise ou un procédé sont venues se greffer de nouvelles approches portant l'attention vers d'autres acteurs que les techniciens, qu'ils soient minorités, usagers, travailleurs ou militaires (Edgerton 1998), et vers d'autres objets tels que l'innovation (Griset et Bouvier 2012), l'environnement (Jarrige 2012) ou l'énergie (Massard-Guilbaud 2018).

Ce renouvellement a été stimulé par des influences multiples. J'en retiens trois principales pour le cas français [2]. Premièrement, depuis l'étranger, les travaux anglais et états-uniens ont été déterminants à travers « les études sur la science et la technologie » (Science and Technology Studies). Deuxièmement, depuis l'anthropologie, les sciences humaines et sociales ont été reconfigurées par l'analyse structuraliste : « D'une discipline à l'autre, l'idée a pris corps qu'il n'y avait pas dans le champ des sciences humaines de message ponctuel. Les phénomènes observables, les sources disponibles ne sont pas les produits d'une volonté mais les fragments émergés d'un système sous-jacent. » (Burguière 1971, p. 2) Troisièmement, au sein de l'histoire, l'historiographie des techniques s'est nourrie des apports de « l'école des Annales ». Fernand Braudel (1985), en particulier, place les techniques au cœur de son projet d'histoire totale des sociétés : « Tout est technique depuis toujours, l'effort violent, mais aussi l'effort patient et monotone des hommes, modelant une pierre, un morceau de bois ou de fer pour en faire un outil ou une arme ». Son analyse du capitalisme, publiée en 1979 et intitulée *Civilisation matérielle, économie et capitalisme*, propose une interprétation générale des mondes européens depuis l'époque moderne comme la superposition de trois niveaux couplant les activités techniques, sociales et économiques : les « structures du quotidien » ou vie matérielle ; les « jeux de l'échange » ou économie de marché ; le « temps du monde » ou économie capitaliste.

De ces renouvellements historiographiques, je retiendrai ici quatre héritages pouvant être résumés en quatre adjectifs : sociotechnique, potentiel, systémique et pluraliste. Une clarification est nécessaire.

2. Ce paragraphe est adapté d'un passage de Deruelle et al. 2016, p. 32-34, que j'avais rédigé.

1.2.1 Dimension sociale des techniques

Le premier héritage concerne la dimension sociale des techniques. L'idée est désormais courante : « la technique est un puissant opérateur social qui tend à s'affranchir des limites symboliques » (Cérézuelle 2011, p. 222). Ce résultat a été façonné par une approche « constructiviste » en réaction aux approches technicistes et au déterminisme technologique : les machines ne font pas l'histoire mais la machine participe de l'histoire (Misa 1988, p. 320-322). Wiebe Bijker (1997, p. 6) identifie trois lignes principales au sein de ce programme hétéroclite : « la construction sociale de la technologie » qu'il a contribué à formaliser avec Thomas Hughes et Trevor Pinch (1987) ; la théorie de l'acteur-réseau autour de Michel Callon, Bruno Latour et John Law ; l'approche systémique.

Au-delà de leurs différences, parfois très marquées, ces trois lignes de recherche conçoivent les techniques comme des « ensembles sociotechniques » intégrant le social et le technique grâce à un « tissu sans couture ». Elles expliquent la stabilisation des techniques par des processus sociaux impliquant des contingences, des conflits et des stratégies portés par des groupes sociaux concernés (Bijker et Law 1992, p. 7-10). Elles posent, en retour, la question de la manière dont le changement technique influence le changement social. Déployer une technique fonctionnelle revient à reconfigurer le social. C'est une idée que l'on retrouve également dans l'analyse des controverses scientifiques. Gagner une controverse, c'est forger et imposer de nouvelles procédures, nouvelles institutions, nouvelles questions ou nouvelles éducations (Boudia 2007, p. 157-161). Ordonner le réel, c'est reconfigurer le social.

1.2.2 Potentiels des techniques en situation

Dans cette perspective, les deux premières lignes de recherche appliquent une symétrie d'analyse entre succès et échecs de la technique. Elles imitent le principe de symétrie introduit par David Bloor pour traiter vérité et fausseté en histoire et sociologie des sciences (Bijker 1997, p. 275). Elles attirent l'attention sur l'importance de considérer l'action conjointe des humains et des objets. Selon la théorie de l'acteur-réseau, innover revient à enrôler « un collectif hybride » d'acteurs humains et non-humains (quasi-objets). Innover revient à former un réseau d'« actants » qui dure dans le temps et s'étend dans l'espace. La technique mise en réseau agit ainsi dans le social et fait le processus historique. Elle doit, pour cela, être pensée à travers une symétrie entre humains et non-humains. Parfois trop systématique, la sociologie des techniques de Bruno Latour peut ignorer certaines spécificités de la technique contemporaine et tend à neutraliser les rapports de domination (Cérézuelle 2011, p. 311-336).

Les Science & Technology Studies, de leur côté, avancent deux concepts intéressants pour caractériser l'activité des artefacts. D'une part, elles parlent d'« agentivité » (*agency*) pour rendre compte de la capacité des objets à agir sur le monde social. Les interprétations de l'agentivité oscillent entre un sens fort, anthropomorphique, d'« intentionnalité des objets », et un sens faible, habituel, d'« aptitude [des objets] à faire une différence » par leur présence (Sayes 2014, p. 141). Toutes les nuances d'action sont possibles entre ces deux extrêmes : autoriser, bloquer, encourager, influencer, interdire, (se) permettre, rendre possible, suggérer, etc. (Latour cité par Sayes 2014, p. 141). L'agentivité est couplée au concept d'*affordance*. Difficile à traduire en français, l'affordance exprime la latitude d'action des phénomènes, ce que permettent les dispositifs techniques, etc. Par exemple, l'électricité permet, ou « se permet », des flux, des impulsions, des piles, des réseaux, des transformateurs, etc. L'*affordance* a aussi une connotation économique que l'on retrouve dans le verbe *to afford* : « avoir les moyens de » s'offrir. Elle exprime quelque chose de la puissance, de la forme et de la limite des phénomènes sensibles domestiqués par les artefacts. La théorie de l'acteur-réseau et les Science & Technology

Studies s'accordent sur l'importance d'appréhender le social à travers les multiples associations d'humains et de non-humains.

Issu d'une autre tradition, de philosophie du langage, Gilbert Hottois exprime une idée proche. Il parle d'une « créativité cosmique » (Hottois, 1984, 148) à laquelle le technicien est confronté lorsqu'il s'essaie à « maîtriser » la nature sans pour autant en devenir le « maître ». Car, contre les désirs de Descartes, la nature exprime des « récalcitrances » (Latour 1999). Les objets sont « récalcitrants par rapport aux attentes humaines » parce que leurs comportements expriment une « indifférence aux enjeux qui s'agencent à leur sujet » (Stengers et Bensaude-Vincent 2003, p. 334-338). Cette tradition est marquée par l'essai méconnu d'Étienne Souriau (1943) : *Les différents modes d'existence*. Les êtres au monde, qu'ils soient vivants ou non, y sont appréhendés par leurs modes d'existence. Ils sont caractérisés par plusieurs modes d'existence de manière simultanée. Souriau détaille cinq modes d'être au monde, relevant du phénomène, de la chose, de l'âme, de la fiction et de dieu. Il évoque en passant la morale – le bien et mal –, l'esthétique – le beau et le laid – et l'épistémologie – le vrai et faux – mais laisse de côté le technique, l'économique, le juridique et le politique (Latour 2011, p. 330). Souriau (1943, p. 145) s'intéresse particulièrement au « passage [...] d'un mode d'existence à un autre » et à « l'enchaînement » des modes d'existence entre eux. Un être, qui peut accéder à plusieurs modes d'existence, résulte d'une composition de tous ces modes. Par exemple, « une personnalité humaine transposée successivement dans une existence physique, à titre de corps présent dans le monde des corps, puis dans une existence psychique, à titre d'âme parmi les âmes, puis dans une existence toute spirituelle hors des temps et du monde » (Souriau 1943, p. 151). Ce pluralisme existentiel est dynamique. Chaque composition de modes d'existence traverse des « modulations d'existence », qui sont plus fondamentales pour Souriau que les modes d'existence eux-mêmes. L'homme, qui a trop souvent été ce « fameux homme-dans-le-monde » est aussi « l'homme devant le monde, et même l'homme contre le monde » (Souriau 1943, p. 156). « Et inversement il y a aussi le monde dans l'homme, le monde devant l'homme, le monde contre l'homme. » Les relations entre modes comptent plus dans la caractérisation d'un être que la nature de ses modes : « l'existence dans toutes ces modulations s'investit, non dans l'homme ou dans le monde, ni même dans leur ensemble, mais dans ce pour, dans ce contre, où réside le fait d'un genre d'être ».

Le concept de « modes d'existence » est repris par certains technologues, de Gilbert Simondon (1958) à Isabelle Stengers et Bruno Latour (2015), pour souligner la pluri-modalité d'existence des êtres, l'hétérogénéité des êtres concernés et leurs assemblages en société. Un tel concept conduit à parler d'« existants » pour désigner des êtres ayant un ou plusieurs modes d'existence, ce qui permet de s'affranchir de formulations trop polarisées comme la notion de « non-humain » qui s'oppose sémantique à l'être humain. Philippe Descola (2005) recourt à la notion d'existants par exemple, dans *Par-delà nature et culture*, pour atténuer l'emprise du naturalisme sur l'anthropologie contemporaine. Mais, le concept de modes d'existence permet aussi d'octroyer une forme d'autonomie au fait technique sans tomber dans le déterminisme technologique. Comme le souligne Anne-Françoise Garçon (2012, p. 11-12), l'autonomie de la technique est « relative certes, mais réelle » : elle « se traduit par l'existence de modalités structurantes distinctes des modalités économiques, politiques, religieuses ou juridiques ». Il y a bien, au sein du social mais par-delà l'humain, un « parti pris des choses », comme le souligne François Dagognet (1989, p. 10) dans l'*Éloge de l'objet. Pour une philosophie de la marchandise*. L'autonomie relative de la technique et l'interdépendance entre objets conduisent même aujourd'hui à écrire des biographies d'objets. Dans le *Carbone. Ses vies, ses œuvres*, Sacha Loeve et Bernadette Bensaude-Vincent montrent comment « la *vita activa* du carbone » peut être saisie à travers ses multiples « manières d'être » dans le temps et dans l'espace. L'inscription des objets dans des situations concrètes ouvre une perspective pluraliste

en métaphysique. « La vieille ontologie » peut alors être contestée par une nouvelle « *ontographie* [qui, plutôt qu'à ordonner des êtres universels, s'attache] à mettre en récit les façons d'êtres des choses singulières » (Loeve et Bensaude-Vincent 2018, p. 14). Dans un registre anthropologique, Alain Gras (1979, p. 192) ramène la « coupure » sujet-objet à son cadre culturel étroit, celui de « la pensée scientifique moderne », et plaide, en sciences humaines et sociales, pour une approche « animiste » du monde social, qui distribue l'« intention en acte » bien au-delà des seuls sujets supposés.

Que ce soit dans la tradition anglophone par l'agentivité (*agency*) et la capacité (*affordance*) ou la tradition francophone par la « récalcitrance », le « mode d'existence » ou « l'animisme », les phénomènes et les artefacts s'émancipent des sujets humains auto-proclamés. Ils expriment une phénoménologie spécifique qui résiste aux êtres humains. La phénoménologie d'une technique a ainsi une forme sensible et un pouvoir structurant qui agissent sur le social. Ils incarnent ainsi des « potentiels » d'action, de résistance et d'organisation dont l'histoire des sciences et des techniques ne peut faire l'économie. Le terme de potentiel est choisi par analogie avec la mécanique : le potentiel en un point du champ gravitationnel indique la force d'attraction qui s'exercerait sur un corps s'il était en ce point. La potentialité sociotechnique désigne ainsi des marges d'action, de résistance, d'organisation que des phénomènes ou des artefacts peuvent avoir dans une situation sociale donnée. De ce point de vue, l'électricité a un potentiel spécifique par son aptitude à transmettre de multiples façons des phénomènes à distance : signaux d'information par fils de cuivre (télégraphe), signaux d'information dans l'air (télégraphie sans fil), vecteurs de puissance par fils de cuivre (réseaux électriques), signes de modernité par l'éclairage, porteuse symbolique d'utopies, etc. Par peur de basculer dans le déterminisme technologique, les sciences humaines et sociales se risquent rarement à prendre au sérieux les spécificités des phénomènes sensibles. Or, cette sensibilité et cette matérialité du cosmos ne sont pas neutres pour l'épaisseur sociotechnique. Par exemple, l'électricité façonne profondément les usagers et les techniciens du XX^e^ siècle par son « caractère de modernité, de fluidité, de divisibilité qui a attiré les esprits un peu philosophiques » (Beltran et Bungener 1987, p. 60). Tout n'est pas de l'ordre du culturel dans cette composition. La phénoménologie de l'électricité y joue aussi sa partition.

Dans un Que-sais-je ? dédié aux *Macro-Systèmes techniques*, Alain Gras explique la finesse de l'approche sociotechnique. D'une part, l'« infrastructure technique [... est bel et bien un] fait social [... où] la marge de liberté qu'exige toute technique, pour s'adapter au monde réel, ne peut être couvert que par l'homme » (Gras 1997, p. 40-41). D'autre part, le déploiement de l'électricité « n'est pas la conséquence – loin s'en faut – d'une efficience technique supérieure, mais la suite logique de cette compétence subtile de l'électricité de répondre à n'importe quelle demande » (Gras 1997, p. 72-73). L'approche sociotechnique renvoie ainsi dos à dos idéalisme et matérialisme, déterminisme technique et constructivisme radical.

Ce deuxième héritage conduit à ne pas négliger les spécificités techniques et scientifiques dans la construction des sociétés modernes : l'aspect épistémique des phénomènes et la dimension technologique des artefacts. Il faut « apprendre à traduire les morphologies » sociales des objets et à décrypter « leur raison d'être ainsi » (Dagognet 1989, p. 40). François Dagognet (1989, p. 21) établit une première série culturelle de la matérialité. « Telle serait la série : les substances naturelles (l'écorce, le cuir, etc.), les choses, les objets, les produits ou les marchandises, enfin les leurres, les plagiats et les trucs divers ». Ce processus d'artificialisation du monde sensible est réanalysé et enrichi par Krzysztof Pomian un quart de siècle après Dagognet, sans mention explicite de son travail antérieur. Pomian distingue les artefacts en tant que production matérielle de l'homme et les corps naturels, sans intervention humaine. Il construit une typologie des artefacts selon six catégories : des choses comme un couteau, qui ont une action sur d'autres artefacts ; des sémiophores comme un tableau,

c'est-à-dire des porteurs de signes ; des médias, qui permettent de communiquer dans le temps ou dans l'espace ; des mesureurs, révélant le monde par les nombres ; des corps vivants artificialisés (plantes cultivées, animaux d'élevage, corps humains actuels), issus de processus de sélection ; des déchets, qui, après avoir eu une fonction, n'en ont plus (Pomian 2014, p. 33-36). Chaque type d'artefact ne prolonge pas la précédente mais s'inscrit en « rupture » par « une innovation radicale » de fonction (Pomian 2014, p. 40). Néanmoins, tous ces artefacts sont en interaction au sein d'une société donnée et composent des collectifs d'artefacts, qui ont souvent été considérés comme des systèmes.

1.2.3 Techniques et structures : le système

La troisième ligne de recherche identifiée par Bijker (1997), l'approche systémique, est un troisième héritage qui influence ma réflexion. Elle place la notion de « système technique » au cœur de l'analyse des formes contemporaines de la technique [3]. La notion de système incorpore la technique au collectif humain. Dans *La technique ou l'enjeu du siècle*, Jacques Ellul (1954, p. 83) l'écrit de manière lapidaire. « L'organisation, c'est précisément la technique elle-même. » Ainsi, la technique, qu'elle soit geste, objet ou machine, n'opère jamais seule ; elle fait toujours partie d'un ensemble structuré sans lequel elle ne fonctionne plus. Dans *Le système technicien*, Ellul (1977, p. 88) précise cinq caractéristiques d'un système technique : un réseau d'interrelations de nature et d'intensité différentes ; une préférence des éléments du système à se combiner en interne ; une aptitude pour le mouvement (dynamique et innovation) ; des boucles de *feed-back* ou « structures de renvoi » au sein du système ; une mise en relation avec d'autres systèmes. La notion de système permet d'assembler les critères identifiés par Ellul, d'intégrer le social et le technique, de coupler des effets contraignants (structures) et des effets innovants (créativité). Il rappelle que si des techniques sont en compétition, telles les automobiles à essence, à vapeur et électriques vers 1900, celle qui l'emporte le fait, non comme un artefact discret, mais comme un système de transport intégrant des pratiques, des valeurs et des représentations de consommateurs, de producteurs et de pouvoirs publics (Kirsch 2000, p. 12).

La notion de système est utile pour analyser les sociétés industrielles. Il y a d'abord une raison historique. L'industrialisation est caractérisée par l'essor de nombreux systèmes techniques sous forme de réseaux industriels depuis le dix-neuvième siècle : réseaux de transport (ferroviaire, automobile, aéronautique), réseaux de télécommunication (télégraphique avec puis sans fil, téléphonique avec puis sans fil, électronique), réseaux d'énergie (charbon, gaz, pétrole). La forme en réseau est dictée par la fonction : les réseaux « transportent des personnes et des signes en mobilisant de l'énergie en tous lieux de leur espace artificiel » (Gras 1997, p. 33). La forme ne suffit pas pour définir un système : le réseau fait système parce qu'il est organisé par un jeu politique basé sur le contrôle de l'information. Cette triple dimension – morphologique, politique et d'information – caractérise selon Alain Gras un « macro-système technique ». L'industrie électrique, à l'intersection de logiques de transport, d'information et d'énergie, constitue un macro-système technique par excellence. Ceci justifie l'utilisation de la notion de système pour étudier les réseaux électriques. La notion a largement débordé les milieux techniciens et technologiques pour structurer la pensée technocratique. Ainsi, le traité fondateur de l'Union européenne, ou Traité de Maastricht, place au cœur de son action politique « l'établissement et [le] développement de réseaux trans-européens (*Trans-European Networks*) dans les secteurs des infrastructures du transport, des télécommunications et de l'énergie » pour favoriser la libre circulation des citoyens et réduire les inégalités régionales (Union européenne 1992, art. 129b).

3. Les paragraphes suivants sur la notion de « système » reprennnent partiellement un article coécrit avec Anaël Marrec sur certains impensés de l'histoire des techniques résultant de transferts métaphoriques depuis les sciences de la nature et de l'ingénieur (Teissier et Marrec 2019)

L'usage du système en histoire des techniques a aussi une raison heuristique. Il rend compte simultanément de l'interrelation entre les objets et de leurs effets structurant sur les sociétés et arrime ensemble les processus de novation et de conservation. Comme Braudel, Bertrand Gille (1978, p. viii) souligne l'interdépendance des techniques à l'égard des autres activités humaines en société : économique, linguistique, sociologique, politique, juridique, scientifique ou philosophique. Ces interactions entre sphères d'activité sont à la fois « coordination des activités humaines » et disjonctions entre des domaines aux logiques spécifiques. Le système permet ainsi de proposer « une histoire en quelque sorte enchaînée par le monde matériel [... où] la liberté de l'inventeur est étroitement circonscrite, étroitement limitée par les exigences auxquelles doit répondre l'invention [... par les] éléments les plus contraignants du progrès technique »(Gille 1978, p. 45-48). La dynamique des systèmes se comprend comme une tension entre des « déséquilibres internes à la technique, [des] cohérences nécessaires entre les diverses techniques [et des] compatibilités avec les autres systèmes » (Gille 1978, p. x). Poursuivant cette réflexion, Thomas Hughes (1998, p. 857) parle de « tissu sans couture de composants en interaction » pour souligner l'imbrication contraignante des acteurs institutionnels et des réseaux techniques. Si Gille (1978, p. ix) s'attache à comprendre la succession des systèmes sociotechniques, de l'artisanal vers l'industriel, Hughes (1983, p. 15-16) forge un modèle de construction des systèmes industriels en six étapes : création, transfert, croissance, compétition, contingence, inscription. La métaphore du système articule ainsi les effets déterminants et innovants d'« artefacts culturels en évolution » et des interactions hommes-machines (Hughes 1983, p. 465).

À la suite de Hughes, des historiens tels Patrick McGuire, Mark Granovetter et Michael Schwartz (1993, p. 215) affinent le programme de construction sociale de l'énergie. Ils recherchent un équilibre entre l'agentivité humaine (*human agency*) et la « structure sociale » dans la façon dont les groupes d'acteurs s'associent pour former une industrie et « définir la portée et la structure de la collectivité qui en résulte ». Ils récusent le fonctionnalisme qui explique le succès en terme d'optimisation économique (pas assez d'agentivité humaine) et réduisent le rôle des grands inventeurs comme Edison ou Tesla, ce qu'ils reprochent à Hughes (pas assez de structure sociale). Ils rendent compte des succès par des effets structurels et contingents : « la structure qui en a résulté [...] est apparue parce qu'un ensemble d'acteurs puissants ont eu accès à certaines techniques et les ont appliquées d'une façon bien visible et rentable. Ces techniques résultaient de compréhensions individuelles, spécifiques et partagées, de connexions sociales, de conditions organisationnelles et d'opportunités historiques accessibles à ces acteurs. » (McGuire et al. 1993, p. 215-216) Ces succès, par leur extension et leur implantation, contribuent à « verrouiller » la situation par la suite en bloquant « des technologies et formes organisationnelles alternatives, viables et possiblement plus efficaces, existantes ou potentielles ». Une même référence au verrouillage historique est utilisé dans l'historiographie française des techniques. C'est le cas par exemple de l'étude doctorale de Denis Varaschin sur l'histoire de *La Société lyonnaise des forces motrices du Rhône (1892-1946)*. En opposition à une survalorisation des déterminismes de réseaux, Varaschin (1996, p. 66) insiste sur la manière dont l'interaction entre quatre facteurs (évolution technique, besoins sociaux, choix économiques, volontés politiques) compose un « jeu des possibles » qui conduit, à travers le processus historique, à un « verrouillage organisationnel » qui aurait pu être différent.

Le mécanisme d'extension-verrouillage souligne l'irréversibilité du processus historique. Il y a ici, comme dans le cas du système, un transfert métaphorique intéressant dans la perspective d'une analyse technologique. Le mécanisme d'extension-verrouillage présente une analogie avec la théorie de la réaction chimique : les produits d'une réaction chimique résultent d'une compétition entre des facteurs thermodynamiques et cinétiques s'exprimant différemment suivant les conditions expérimentales. Un produit dit « cinétique » parce qu'il est

rapidement synthétisé peut être beaucoup plus abondant en fin de réaction qu'un produit plus stable, dit « thermodynamique », qui n'a pas eu le temps d'être synthétisé avant la disparition des réactifs : par son extension rapide, le produit « cinétique » verrouille ainsi la synthèse du produit « thermodynamique » (plus optimal en terme de stabilité). Des solutions plus rapidement établies « verrouillent » le tissu social vis-à-vis des formes sociotechniques alternatives, qui auraient pu être plus optimales en terme économique, plus plaisantes en terme culturel ou plus légères en terme écologique. Cette idée d'irréversibilité et du poids de choix antérieurs a été formalisée par l'expression de « dépendance au sentier » (*path dependence*) : les acteurs qui font les premiers choix (*prime movers*) dans la construction d'un nouveau système technique pèsent lourdement sur les choix postérieurs (Kirsch 2000, p. 12).

La notion de système domine tellement l'historiographie des techniques que l'on hésite entre deux attitudes : se réjouir d'un cas de science cumulative en histoire puisque les artefacts sont désormais étudiés comme des ensembles ; se méfier d'un usage routinier d'une notion trop large, qui empêche d'approfondir la réflexion technologique grâce à d'autres concepts. La notion de système résulte du transfert d'une image de la biologie vers la technologie. La métaphore attribue deux qualités du vivant aux techniques : un aspect holiste des interactions entre l'organisme et le milieu ; un critère fonctionnel des organes qui assurent l'existence de l'organisme. Ceci est d'autant plus important que les métaphores sont constitutives de la manière dont les êtres humains font l'expérience du monde (Lakoff et Johnson 1980, p. 126-138). Forger une métaphore peut être heuristique si le rapprochement entre les domaines source et cible permet de de formuler des analogies pertinentes, qu'elles soient méthodologiques ou conceptuelles. Cela peut, à l'inverse, lisser les hétérogénéités entre domaines source et cible et gommer les spécificités du domaine cible si la métaphore devient « conventionnelle ». Le recours fréquent en technologie à la notion de système surestime certains traits des ensembles techniques : puissance, intégration, cohérence, logique, etc. (Teissier et Marrec 2019, p. 322-325).

Le « système technicien » de Jacques Ellul et le « technocosme » de Gilbert Hottois dessinent des modèles totalisants selon une vue surplombante. Ils négligent ou réfutent la possibilité d'un en-dehors du système, auquel il relie, plus ou moins lâchement, toutes les entités socio-culturelles. L'humain, dans ses indéterminations, ses hésitations, ses conflits, semble en avoir complètement disparu. Les autres formes de médiation avec le monde (théorique, artistique, religieuse, politique, etc.) paraissent écrasées par la force opératoire des techniques. De ce point de vue, *Le rêve des machines* de Günther Anders, écrit en 1960 mais non publié, introduit une vision plus nuancée de la technique comme morphologie sociale.

> S'il existait une « *sociologie des choses* », son axiome serait : « *Il n'y a pas d'appareil isolé.* » Au contraire, chaque appareil est plutôt un « *zoon politicon* » [animal politique] : en dehors de sa « société », chaque appareil resterait inapte, tel un simple instrument Robinson. Le mot « société » désigne non seulement ses semblables et la somme des millions d'instruments fonctionnant simultanément, mais aussi ce qui est morphologiquement en corrélation avec lui, s'y accommodant, s'y encastrant, le nourrissant, le nettoyant, un logis composé de matières premières, de producteurs, de consommateurs, d'appareils frères et sœurs, d'égouts – bref : un *milieu*. (Anders 1960, p. 56)

La « sociologie des choses » ne débute donc pas avec la symétrie latourienne des humains et des non-humains ni avec les « macro-systèmes techniques » de Hughes et Gras. Chez Anders, elle prend le double sens d'« appareil » comme ensemble de machines et comme enrôlement institutionnel. Le milieu technicien renverse les rapports de domination à son profit. Il prend même le dessus sur la nature humaine. « À ce monde, nous sommes étrangers », écrit-il, au sujet de ses contemporains, parce que le monde-appareil « nous *traite*

comme “étrangers” ». Anders souligne la spécificité des règles sociales imposées par l'appareil mécanique aux êtres humains tout en rappelant l'irréductibilité des comportements humains.

À l'inverse, la notion de système peut avoir tendance à rendre la technique très cohérente et fonctionnelle à partir d'une analogie organiciste à partir des sciences du vivant. Elle peut ainsi sur-estimer l'autonomie de la technique ou, au contraire, sous-estimer le surgissement créatif. Ellul et Hottois ont eu tendance à lisser les hétérogénéités sociotechniques : numérique-analogique, artificiel-vivant, culture-nature, harmonie-conflit, nécessité-liberté, etc. Il peut s'en dégager une vision monolithique du système technique, affranchie des relations passionnées et désordonnées des êtres humains dans l'espace social. Anders rappelle que, si la technique fait corps, c'est toujours par des assemblages locaux, que les êtres humains peuvent refuser ou se réapproprier.

1.2.4 Pluralisme et nomadisme épistémiques

Le quatrième et dernier héritage que je retiens du renouvellement historiographique récent est l'intérêt du pluralisme méthodologique. Il me semble légitime et important de faire des incursions ponctuelles ou régulières dans différents domaines des sciences humaines et sociales pour saisir les mondes contemporains sans être pour autant spécialiste. J'ai ainsi diversement emprunté, de manière plus ou moins approfondie, à des auteurs issus de l'anthropologie, l'économie, l'épistémologie, la géographie, l'histoire, la littérature, la philosophie, la sociologie et la technologie. En termes de réflexivité dans l'exercice de l'habilitation à diriger des recherches, j'identifie trois raisons principales à ce nomadisme disciplinaire.

Premièrement, mon itinéraire universitaire m'a habitué aux passages de frontières épistémiques : des sciences de la nature aux sciences de l'ingénieur ; des exercices livresques aux opérations de paillasse et aux stages en usine ; des sciences mathématiques et expérimentales aux sciences historiques et sociales ; de l'histoire des sciences et l'épistémologie à l'histoire des techniques et la technologie ; des archives institutionnelles aux témoignages oraux ; de la collecte de mémoires collectives à la constitution de récits historiens. Ces pérégrinations académiques, en me faisant toucher de près certaines réalités de terrain hétérogènes et mixtes, m'ont vacciné contre les germes de la pureté disciplinaire, sensibilisé à la pluralité de systèmes de valeurs et fourni une pharmacopée méthodologique hétéroclite.

La deuxième raison tient à l'histoire et à la philosophie de la chimie et à la manière dont elles m'ont été transmises [4]. Dans *Faut-il avoir peur de la chimie ?*, Bernadette Bensaude-Vincent (2005) souligne justement l'aptitude de la chimie à transgresser les partages philosophiques habituels : entre science et technique, entre constructivisme et réalisme, entre nature et culture. La chimie est traversée par un « pluralisme épistémique » qui tranche par rapport à un réductionnisme si courant en physique (Teissier et Tomic 2020). Hasok Chang (2012, p. 268-269) identifie deux avantages au pluralisme en sciences : la tolérance, qui stimule « l'épanouissement de multiples systèmes de pratiques » ; l'interaction, qui favorise leur interfécondation. L'histoire de la chimie montre comment les chimistes eux-mêmes utilisent le pluralisme épistémique en recherche. Pour ne donner qu'un seul exemple issu de ma thèse de doctorat, les premiers chimistes du solide français à être élus membres de l'Académie des sciences le sont dans les années 1980 pour des contributions « hétérodoxes » par rapport à la matrice disciplinaire des années 1960 (Teissier 2014, p. 442). La déviance peut être une vertu en recherche.

La troisième raison tient à mon expérience contrastée de l'étude historique et sociale des sociétés industrielles.

4. L'exemple par la pratique et les conseils de Bernadette Bensaude-Vincent, qui m'a (dé)formé aux sciences humaines et sociales au cours de mon mémoire de master et thèse de doctorat, ont été déterminants. Elle a stimulé la recherche et l'imagination de tout un groupe de doctorants au cours des années 2000 (auquel j'appartenais) par sa façon si originale de faire dialoguer Aristote avec les chimistes du XVIII^{e} siècle et les ingénieurs du XX^{e} siècle tout en s'appuyant sur un mixte d'argumentation philosophique et d'études historiques précises.

Je me souviens de deux situations m'ayant fait prendre conscience d'une incursion vers l'histoire des techniques en 2011-2012, un peu plus d'une année après mon recrutement à l'université de Nantes. La première est une proposition amicale de Paul Naegel, chercheur associé au Centre François Viète, à l'automne 2011. Il me proposait de co-écrire avec lui le récit d'un épisode méconnu (qu'il connaissait très bien) d'un transfert technologique raté : l'importation en 1779 à Paris de deux machines de Watt et de Boulton par les frères Périer (Naegel et Teissier 2013). Deux mondes s'entrouvraient pour moi grâce à ce dialogue avec Paul, celui des techniques en société et celui de l'époque moderne. La seconde situation est la présentation de deux conférences en 2012 sur l'histoire de l'énergie depuis le XVI^e^ siècle, la première dans le cadre des Journées scientifiques de l'université de Nantes (Teissier 2012a), la seconde dans le cadre de la Fête de la science au Centre de culture scientifique, technique et industrielle de Lorient (Teissier 2012b). Je rencontrai donc l'histoire des techniques comme un amateur tâtonnant à partir d'occasions concrètes offertes par la sociabilité universitaire. J'ai abandonné par la suite ma naïveté au contact parfois rugueux d'un champ de recherche très fragmenté en termes idéologiques et méthodologiques.

La technique suscite, en effet, de multiples cadres d'interprétation : constructivisme, cybernétisme, économisme, écologisme, fonctionnalisme, technologisme, etc. Un tel pluralisme n'est pas propre à la technique mais aux sciences sociales. Dans *L'intelligence du social. Le pluralisme explicatif en sociologie*, Jean-Michel Berthelot montre, de manière convaincante, la pluralité des cadres d'intelligibilité. Il identifie trois cadres principaux, chacun divisés en deux schèmes : un cadre de dépendance, divisé en schèmes causal et fonctionnel ; un cadre de signification, divisé en schèmes sémiologique et symbolique ; un cadre de composition, divisé en schèmes agrégatif et dialectique (Berthelot 1990, p. 61). Il conclut ainsi : « Des associations deux à deux [des schèmes] apparaissent ainsi possibles selon une perspective commune de *qualification* du réel : comme structures, comme sens, comme procès (ou pour utiliser un concept plus parlant, comme histoire). » Une telle typologie dédramatise la question des facteurs de causalité. Elle suggère l'idée d'une coexistence de plusieurs schèmes d'intelligibilité dans une situation donnée. L'étude socio-historique ne présuppose alors ni une unicité, ni une hiérarchie des schèmes d'intelligibilité. Cet essai recourt de manière souple aux différents schèmes d'intelligibilité de Berthelot comme des perspectives de compréhension [5]. Comme pour la chimie, le pluralisme épistémique me semble être un des atouts de l'histoire [6].

Néanmoins, comme le suggère le faible écho de la pensée de Berthelot en sciences humaines et sociales, le pluralisme épistémique ne paraît pas à la mode. Dans le milieu académique, l'œcuménisme cède plus souvent le pas aux querelles de chapelles. Les farouches gardiens de temples préfèrent alors rompre le dialogue avec celles et ceux qui ne partagent pas leur interprétation étroite des héritages académiques. En cela, l'histoire des techniques ressemble à l'histoire des religions. Dans un ouvrage iconoclaste intitulé *La pensée arabe*, Mohammed Arkoun (1975, p. 23-24) déplorait une « opposition trop rigide longtemps maintenue entre une histoire positiviste attentive aux seuls faits attestés par des documents "authentiques" et une histoire pieuse qui transgresse les limites concrètes de l'espace et du temps ». Il proposait alors « une histoire compréhensive » utilisant des archives écrites et des héritages légendaires de la tradition orale, plus diffus. Comme le « mythe est

5. J'ai découvert le travail de J.-M. Berthelot récemment, grâce aux ateliers de lecture des doctorants du Centre François Viète. Gaëtan Levillain y a proposé le 4 janvier 2022 le commentaire d'une partie de *L'intelligence du social. Le pluralisme explicatif en sociologie*. Avec plus de temps, j'aurais pu essayer de relier les différents schèmes d'intelligibilité de Berthelot aux différentes situations analysées dans cet essai.

6. À ce propos, j'ai remarqué des habitudes disciplinaires significativement différentes en siégeant depuis quatre ans au jury d'allocation de thèses de l'école doctorale Sociétés, temps, territoires (STT) de l'université Bretagne Loire (UBL). Cette école doctorale (qui a existé de septembre 2017 à août 2022) réunit des laboratoires d'archéologie, de géographie, d'épistémologie, d'histoire et de sociologie. Si les historiens comme les sociologues étaient particulièrement sensibles à l'exposé des méthodes de recherche, seuls ces derniers demandaient de manière systématique aux candidats le cadre conceptuel dans lequel ils se plaçaient.

un des modes d'expression de vérités vécues par des collectivités », il doit être intégré à une histoire exhaustive de manière critique. Cette proposition en histoire des religions rejoint l'analyse de la technique par Daniel Cérézuelle (2011). Son essai, *La technique et la chair*, montre de manière convaincante comment la puissance de la technique contemporaine se joue à la jointure de son fonctionnement matériel, de sa transgression existentielle et de son « potentiel mythogène ». C'est l'un des atouts de la démarche compréhensive et inclusive d'assembler des aspects hétérogènes et donc de tracer une perspective plus large.

Elle se démarque de pratiques de recherche aux choix plus tranchés. L'opposition entre déterminisme technologique et histoire sociale a longtemps scindé l'histoire des techniques dans la deuxième moitié du XX^e^ siècle. Aujourd'hui, une rivalité oppose l'histoire économique et l'histoire environnementale sur la scène universitaire. La dissension est idéologique car économie et écologie reflètent « deux manières opposées d'habiter le monde » comme l'explique François Ost :

> si [l'économie] entendra l'habitat au sens domestique et développera une science des échanges de biens et de services, généralement sous le signe de la monnaie, [l'écologie], en revanche, focalisée sur l'habitat naturel, la niche écologique, étudiera les échanges physicochimiques entre animaux, plantes, gaz, eaux et matières. À l'une les flux monétaires, à l'autre les flux énergétiques ; d'un côté, les stocks de marchandises, de l'autre la biomasse ; par ici l'offre et la demande s'équilibrant sur le marché, par là les cycles de reproduction et de détérioration en équilibre homéostatique dans le cadre des écosystèmes. (Ost 1993, p. 27)

L'opposition entre économie et écologie conduit parfois à des positions irréconciliables en politique. Elle tient pourtant à un malentendu historique. L'économie de la nature, montre Alain Deneault (2019), est une notion qui, au XVIII^e^ siècle, inclut les dimensions économiques, écologiques et sociales des rapports au monde sensible et psychique. Les sciences économiques ont contribué à vider de sa diversité la notion d'économie de la nature pour la réduire à une pure comptabilité d'une part et à une logique commerciale d'autre part. Mais, l'économie prise dans son acception large du XVIII^e^ siècle impliquait aussi des rapports non mesurables au monde incorporant valeurs, sensations et sentiments. L'économie de la nature procède ainsi d'un double regard porté à la fois sur les « relations bonnes entre éléments, entre gens, entre sèmes, entre choses » dans le monde sensible et sur les « relations escomptées, au sens des finalités, au sens de délibérations sur les fins » dans le monde psychique (Deneault 2019, p. 9). Une fois l'approche « impérialiste » et réductionniste des sciences économiques déconstruite dans leur approche comptable et marchande, l'expression « économie de la nature » peut à nouveau embrasser l'ensemble des relations du monde sensible et psychique dans ses multiples valeurs et finalités sans octroyer une relation privilégiée aux mesures marchandes (Deneault 2019, p. 11, 45). Une telle approche inclusive me semble plus intéressante en recherche que les postures partisanes et réductrices.

Certes, « [la] volonté de comprendre n'implique pas le refus de juger » explique Raymond Aron à ses étudiants de sociologie de la Sorbonne lors de la première des *Dix-huit leçons sur la société industrielle* en 1955-1956. Mais, « [ce] qui est essentiel, c'est de comprendre que la science ne peut jamais indiquer quelles doivent être les décisions politiques, parce que chacune comporte *un coût* » (Aron 1962, p. 29-30). Si le terme de « coût » est sans doute trop connoté en termes économiques, Aron a le mérite de distinguer deux registres d'action : l'estimation des coûts, qui relève de la recherche ; le choix entre des coûts, qui revient au politique. Une autre démarche inclusive intéressante est celle de François Ost. Celui-ci couple les deux manières d'habiter le monde que sont l'économie et l'écologie. Il définit le concept de « juste milieu » comme l'« usage raisonnable et équitable de ce "milieu" » (Ost 1993, p. 21). Il défend ainsi que l'histoire des techniques gagne

en complexité et en intérêt à appréhender ensemble « les flux monétaires » et « les flux énergétiques », « les stocks de marchandises [... et de] biomasse ». Ceci permet de mieux articuler les facteurs économiques et les facteurs environnementaux du processus historique. L'histoire de l'énergie peut s'affiner en articulant l'histoire de la puissance (Caron et F. Cardot 1991) et l'histoire des alternatives à la puissance (Jarrige et Vrignon 2020). L'analyse, mieux « enchaînée par le monde matériel » selon les mots de Bertrand Gille, est ainsi moins soumise aux fractures idéologiques. Dans la rivalité entre histoire économique et histoire environnementale, le risque est de ne pas vouloir « reconnaître qu'il y a des faits inconfortables, [...] des faits qui sont désagréables à l'opinion personnelle d'un individu » comme le faisait remarquer Max Weber (1919, p. 20) à propos du type idéal du savant. Relisant Weber, Aron formulait l'idée de manière plus incisive encore pour conclure sa première leçon sur la société industrielle. « Aussi bien ce cours ne tend pas à vous enseigner ce que vous devez penser, mais j'aimerais qu'il vous enseignât deux vertus intellectuelles, dont la première serait le respect des faits et la deuxième le respect des autres. » (Aron 1962, p. 31).

C'est avec cet état d'esprit que j'ai conçu cet essai depuis septembre 2018 : respecter les postures des auteurs dans leur diversité, lire avec attention un certain nombre de travaux et prendre au sérieux leurs résultats malgré les contradictions intellectuelles et les inconforts psychologiques qu'ils pourraient me procurer. Écrire un essai revient à déplier les auteurs les uns vers les autres afin de les faire correspondre au double sens d'une mise en rapport et en communication. « L'histoire est un objet fractal » lancent Pierre Dockès et Bernard Rosier (1991, p. 207) en une très belle formule croisant humanités et mathématiques. L'attitude compréhensive et critique peut paraître évidente à l'ethos de la recherche. Pourtant, en ce début de XXI^{e} siècle, le calme nécessaire à l'appréhension laborieuse d'un monde complexe est en permanence tourmenté par les soubresauts académiques : bureaucratisation et contrôle des activités, impératifs de quantité plutôt que de qualité, injonctions de réponse à et d'obtention d' appels à projets, eux-mêmes justifiés par la précarisation des jeunes générations, etc. Le recadrage fort imposé au milieu académique par la recherche sur projets produit des effets de mode aussi éphémères et délétères que l'actualité médiatique et la personnalisation politique. La frénésie de l'instantanéité hache le temps de la compréhension tandis que la contrainte administrative anesthésie le temps de la critique. De l'idéal type du savant à la réalité universitaire, il y a un abîme.

1.3 Histoire-problème : questions, relations et sources

Cet essai s'inspire de l'histoire-problème forgée par l'école des Annales. Dans *L'atelier de l'histoire*, François Furet (1982, p. 76-77) résume le passage de l'histoire-récit à l'histoire-problème en quatre points. Premièrement, l'histoire, renonçant à « raconter ce qui s'est passé », élabore « le phénomène étudié » à partir de « questions sélectives ». Ceci délimite « non seulement la période, l'ensemble des événements, mais aussi les problèmes posés par cette période et ces événements, et qu'il faudra résoudre ». Deuxièmement, l'« événement unique » est remplacé par un « ensemble d'objets comparables » et « permutables », pouvant être soumis à l'analyse quantitative. L'organisation de ces objets sériels non seulement relève d'hypothèses de travail mais nécessite aussi, et c'est le troisième point, d'« inventer » de nouvelles sources et de « trouver les matériaux pertinents » pour « décrire et interpréter le phénomène étudié ». Enfin, quatrièmement, l'histoire-problème se renforce par « des procédures de vérification » dont « l'analyse quantitative et les procédures statistique […] sont parmi les méthodes les plus rigoureuses du "testage" des données ». De quelles façons le stockage de l'énergie s'inscrit-il dans une histoire-problème ? Voyons comment les points évoqués par Furet conduisent à en préciser la méthode et la problématique. Deux questions générales sur les techniques servent de base à cet essai.

1.3.1 Qu'est-ce que la technique contemporaine ?

La première question a été formulée par Martin Heidegger (1954) lors d'une conférence célèbre justement intitulée « La question de la technique ». « Qu'est-ce que la technique moderne ? » demande le philosophe allemand. Cette question s'inscrit dans un cadre de réflexion plus large sur la « modernité occidentale ». La pensée de Max Weber (1919, p. 26) est ici déterminante : « Le destin de notre époque [est] caractérisée par la rationalisation, par l'intellectualisation et surtout par le désenchantement du monde ». Weber (1919, p. 13) entend, par intellectualisation et rationalisation, la conviction « qu'à chaque instant nous *pourrions*, pourvu *seulement que nous le voulions*, nous prouver qu'il n'existe en principe aucune puissance mystérieuse et imprévisible qui interfère dans le cours de la vie ». Cette « *maîtrise* [de] toute chose par la *prévision* [...] revient à désenchanter le monde. » Heidegger retient surtout de Weber les deux premiers points : rationalisation et intellectualisation du monde. Ce qui caractérise alors l'essence de la technique moderne, c'est son « arraisonnement de la nature ». Arraisonner la nature signifie deux choses : soumettre la nature à la raison, c'est-à-dire la transformer en « un complexe calculable et prévisible de forces » ; mais également, prendre la nature de force, comme un navire arraisonné en piraterie, pour la transformer en un réservoir de choses à extraire et à accumuler, c'est-à-dire en « un fonds » (Heidegger 1954, p. 18, 28). Le premier arraisonnement est issu de la « révolution scientifique » du XVII^e^ siècle ; le second de l'industrialisation de l'Europe à partir de la deuxième moitié du XVIII^e^ siècle. C'est ce double arraisonnement qui spécifie, selon Heidegger, la technique de l'époque contemporaine. Cet enrôlement des savoirs contemporains à la transformation du monde a été identifié par le concept de « technoscience ». Gilbert Hottois (1984, p. 60) la définit par « deux caractères : l'*indissolubilité* des deux pôles théorique et technique-opératoire ; le *primat ultime* de la technique sur la theoria ». Cette première caractérisation d'ordre philosophique doit être poursuivie dans le registre sociopolitique.

Dans *Sens et puissance*, Georges Balandier définit la modernité du XX^e^ siècle selon deux « dynamiques sociales ». Il appelle « généralisation » une première tendance des mondes contemporains : « la diffusion des valeurs, des normes, ou des conquêtes de la modernité aux pays du Tiers Monde » (Balandier 2004, p. 168). Cette généralisation planétaire s'explique selon deux mécanismes : des contraintes matérielles, imposées par une dépendance économique et politique ; la force symbolique de l'évolutionnisme avec un unique parcours – celui de l'occident – dont les étapes seraient répétées avec un « retard » dans le temps par les autres régions du monde. Or, Reinhardt Koselleck (2000) a montré la faiblesse épistémique du couple avance-retard à partir de l'histoire politique. Ainsi, le fédéralisme du Saint Empire romain germanique a souvent été interprété comme un retard par rapport à la formation d'États-nations en Europe. La métaphore du retard se nourrit d'une téléologie de l'histoire comme s'il y avait un horaire à respecter et qu'il fallait arriver quelque part. Or, « nulle part il est écrit que la nation est un but de l'histoire et que l'atteindre est un devoir temporel qui ne tolère point de retard » (Koselleck 2000, p. 159). Néanmoins, une expression telle que « nation attardée » est reprise dans le cadre politique pour imposer un « point de vue moral et normatif ». La banalisation de son usage montre comme l'impérialisme occidental impose sa lecture univoque de l'histoire dans le champ des idées jusqu'aux limites de l'inconscient collectif.

La technique contemporaine marque donc les sociétés humaines de manière matérielle et idéelle[7]. Elle concrétise trois « fonctions de la pensée » : « représenter, organiser et légitimer les rapports des hommes entre eux et avec la nature » (Godelier 1984, p. 21). Cette double empreinte, idéelle et matérielle, rejoint une autre tendance profonde de la technique : la « systématisation » du monde moderne. Lewis Mumford et Serge

7. Mon usage de la symétrie idéel-matériel doit beaucoup à la lecture de l'essai *L'idéel et le matériel. Pensées, économies, sociétés*. Maurice Godelier (1984, p. 21) y souligne que « nulle action matérielle de l'homme sur la nature [...] ne peut s'accomplir sans mettre en œuvre dès son commencement dans l'intention des réalités "idéelles", des représentations, des jugements, des principes de la pensée ».

Latouche ont relié « la volonté de puissance sur l'environnement naturel [... de] l'Occident moderne » à sa capacité de « gérer des ressources humaines » d'une ampleur croissante par l'extension de macro-systèmes techniques (Gras 1997, p. 22-24). Latouche (1989, p. 11) souligne ainsi que, pour lui, « les deux aspects les plus remarquables de la singularité occidentale [résident] dans son idéologie et dans son caractère de mégamachine techno-économique ». À la suite de Mumford et Latouche, Alain Gras caractérise la volonté de puissance par « un accroissement gigantesque de la taille des organisations » et par « une redéfinition de l'espace temps ». La généralisation des macro-systèmes techniques « en vient [ainsi] à incarner la logique du progrès » à l'époque contemporaine. En résumé, le macro-système technique constitue l'« infrastructure de la modernité » (Gras 1997, p. 120). Cette caractérisation de la modernité technique est, non plus d'ordre philosophique comme chez Heidegger, mais d'ordre sociopolitique. Elle rend compte d'une systématisation des sociétés occidentales et d'une généralisation du modèle occidental vers les autres régions du monde.

La modernité européenne a aussi été définie par un rapport spécifique au temps du monde. Dans les années 1970, Reinhardt Koselleck (1997, p. 109-111) caractérise la modernité comme l'« ouverture d'un abîme entre l'expérience et l'attente » des populations européennes depuis la fin du XVIII^e siècle. Cette distance entre « le champ d'expérience » et « l'horizon d'attente » induit des déséquilibres grandissants dans les sociétés contemporaines à mesure que se réduit l'expérience et que s'accroît l'attente (Koselleck 1997, p. 271-280). La fin de la modernité impliquerait un énoncé du type : « Plus grande est l'expérience, plus prudente et ouverte l'attente » (Koselleck cité par Hartog 2003, p. 40). Balandier (2004, p. 168) caractérise aussi la modernité en termes de dynamique et de quantité, comme l'« accroissement continu des changements » depuis l'époque moderne. L'idée n'est pas nouvelle. Elle a été exprimée à travers la notion de progrès au XVIII^e siècle puis d'accumulation au XIX^e siècle. S'inspirant des travaux de Georges Gurvitch, Balandier (2004, p. 168) examine l'idée à son tour : « on est passé d'un temps au ralenti, où la continuité domine la discontinuité, à un temps sans cesse en avance sur lui-même, tendu vers le futur plus que vers le passé. » Cette obsession permanente du changement et de la projection vers le futur des sociétés modernes a été formalisée par Harmut Rosa, à travers le concept d'accélération. Ce philosophe critique identifie trois niveaux d'accélération : l'accélération technique, d'abord, modifie les *habitus* et le milieu de vie ; l'accélération des rythmes de vie, ensuite, suscite l'angoisse, l'exclusion et l'aliénation ; l'accélération sociale, enfin, favorise une expérience de crise permanente par l'instabilité sociale et culturelle (Rosa 2005).

Pour résumer, le prisme technique caractérise la modernité selon une triple tendance : philosophique à travers la rationalisation de la nature par la science et la technique ; sociopolitique par la mise en réseau des sociétés humaines par des systèmes sociotechniques ; historique à travers l'accélération des changements des modes de vie et d'expériences collectives du monde. Elle porte l'attention sur l'aptitude des techniques à forger des valeurs – la nature comme fonds –, à déployer des morphologies – la société comme réseau – et à imposer des rythmes – l'existence comme accélération. Ceci conduit à la seconde question à la base de cet essai : l'articulation entre effets et causes dans l'ordre social et dans le processus historique.

1.3.2 Quels effets de la technique sur la société ?

L'influence des sphères d'activité humaine les unes sur les autres est une question transversale des sciences humaines et sociales. Comment un facteur social ou culturel donné – l'éthique protestante – a-t-il un impact sur d'autres phénomènes – l'esprit du capitalisme ? Ceci renvoie au concept de « détermination sociale », qui relie des faisceaux de facteurs à des ensembles d'effets. Une détermination a une causalité plus souple, moins mécanique qu'un déterminisme strict. Elle requiert plusieurs facteurs d'explication, et non un seul comme

le déterminisme, pour rendre compte d'effets sociaux. Elle est également multiple par le degré de contrainte (pression) et de surgissement (création) qu'elle rend possible. Si l'on accepte l'idée d'une forme d'autonomie de la technique en société, la question de la détermination technique se pose, non pas au sens fort d'un déterminisme technologique, mais au sens faible de contraintes et de surgissements sociotechniques. Krzysztof Pomian (2014, p. 39) fait de l'adaptation sociale des artefacts une réalité anthropologique aussi vieille que l'*homo habilis* et ses millions d'années d'activités : « S'ensuit que l'homme ne saurait être compris si on l'isole des artéfacts. Il en est l'auteur, certes, ce qui fait d'eux les projections de sa physiologie et de sa psychologie sur l'environnement, mais il doit néanmoins en apprendre l'emploi car ils ouvrent toujours des possibilités insoupçonnées à l'origine, et il doit constamment s'y adapter. »

Culture technique, technicité et schème technicien

Selon quelles morphologies et quelles modalités les techniques se déploient-elles en société ? Une façon d'aborder cette vaste question réside dans la notion de culture technique. Une première définition canonique provient de l'anthropologie évolutionniste. Au début de *Primitive Culture* (1871), Edward Tylor définit la culture comme un « ensemble complexe incluant les savoirs, les croyances, l'art, les mœurs, le droit, les coutumes, ainsi que toute disposition ou usage acquis par l'homme vivant en société » (Galaty et Leavitt 2010, p. 190). Cette définition devenue canonique appréhende la culture comme l'accumulation d'activités spécifiques. Pour avoir accès aux modes d'existence de la culture, j'adopte l'approche fonctionnaliste de la sociologie d'Émile Durkheim. Une culture renvoie à un ensemble de manières d'agir, de penser et de sentir le monde, qui sont partagées et transmises par un groupe social donné [8]. L'idée de partage reflète un sentiment d'appartenance et le processus de transmission renforce le degré de stabilité. Mais, une culture porte aussi une sensibilité et un goût qui s'expriment des objectifs, des méthodes, des images mis en commun. La culture prend alors une signification forte comme une « forme de vie » chez Ludwig Wittgenstein. Certains anthropologues parlent d'« univers culturels » pour désigner des ensembles « cohérents mais provisoires » de représentations, de pratiques et de goûts à la base de « sentiments d'appartenance » (Guy 2000, p. 18-19).

Qu'appelle-t-on dans ce cadre anthropologique une culture technique ? Par technique, Marcel Mauss (1936, p. 9) entend un « acte traditionnel efficace ». Ainsi, une technique est une opération, apprise et transmise par des êtres humains, dont l'effet sur le monde est jugé par un écart entre ce qui est attendu et obtenu. À la suite de Mauss, Anne-Françoise Garçon (2012, p. 32) souligne l'importance de la technique pour l'homme dans son milieu. La technique est « cette particularité qu'a l'homme d'inventer des outils et des procédés pour agir de manière durable et reproductible sur son environnement ». Mauss et Garçon inscrivent la technique dans la culture humaine : un acte (manière d'agir) transmis parce qu'il donne satisfaction (manière de sentir) en référence à des valeurs (manière de penser). L'expression « culture technique » est donc redondante, toute technique étant forcément acculturée, mais elle souligne « la qualité d'agrégat du geste technique » entre matière, action et intention (Garçon 2015, p. 84).

L'entrée par la culture repose la question irrésolue de la notion d'« efficacité ». En histoire et anthropologie des techniques, l'efficacité n'est « jamais explicitée » par les technologues, regrette Alain Gras (2003, p. 223), alors qu'elle est « omniprésente dans [leurs] argumentaires ». Elle rend compte d'un écart entre l'objectif qui est désiré et le résultat qui est obtenu. Formuler un objectif et juger de l'écart entre le produit (effet) et le projet (intention) relèvent simultanément d'évaluations empiriques et de jugements esthétiques. Par les valeurs

8. Cette définition de la culture est très générale car elle est dérivée du concept de « fait social » de Durkheim (1894, p. 37) : « Voilà donc un ordre de faits qui présentent des caractères très spéciaux : ils consistent en des manières d'agir, de penser et de sentir, extérieures à l'individu, et qui sont douées d'un pouvoir de coercition en vertu duquel ils s'imposent à lui. »

qu'elle suppose, l'efficacité introduit des affects dans la balance technologique puisque « rien n'a de valeur, pour l'homme en tant qu'homme, qu'il ne peut faire avec passion » (Weber 1919, p. 10). Elle renvoie autant à une maîtrise de l'environnement qu'à une morale de l'action. Comme le souligne Yves Schwartz, la réussite d'une opération technique renvoie à un « usage de soi » pour le technicien, c'est-à-dire à un « accomplissement de soi » (cité par Garçon (2015, p. 89)). Saisir la notion d'efficacité implique d'inscrire les techniques dans des situations historiques où se croisent des enjeux affectifs, moraux, esthétiques et épistémiques. Un tel mécanisme a déjà été analysé de manière convaincante par la sociologie relativiste des sciences. Harry Collins (1985, p. 2) montre dans *Changing Order. Replication and Induction in Scientific Practice* la manière dont les concepts scientifiques et les conventions sociales sont « conjointement ancrés » dans des « formes de vie ». L'ordre épistémique et l'ordre social se renforcent ainsi mutuellement de manière réticulaire. Concepts, affects et percepts forment des complexes constitutifs des manières collectives d'appréhender le monde.

« L'histoire de l'intelligence technique constitue un acquis majeur de la recherche » depuis quelques décennies (A. de Beaune et al. 2017, p. 33, 12). En effet, la « projection mentale de l'invention [précède] son exécution » matérielle et son déploiement social. L'intrication du matériel, du psychique et du social dans l'opération technique souligne l'importance des imaginaires pour comprendre les sociétés industrielles. Dans le *Dictionnaire de l'Académie française*[9], un imaginaire renvoie soit à l'« ensemble de représentations collectives », soit à l'esthétique d'un artiste (individuel). Il a une dimension structurante au cours du temps de mise en relation de « valeurs, idées et symboles ». Les imaginaires, qui agrègent des aspects épistémiques, esthétiques, éthiques et affectifs, offrent un cadre conceptuel approprié pour saisir la notion d'efficacité. À travers eux, il est possible d'identifier certains impensés de la culture contemporaine sous la forme d'impératifs grossiers – la croissance comme objectif – ou de manières plus fines de penser – la schématisation du monde comme flux et stocks de matière et d'énergie.

La notion de « schème » permet d'explorer les imaginaires contemporains dans une perspective d'archéologie des contraintes et des désirs. Elle émerge dans l'œuvre d'Emmanuel Kant comme une faculté d'appréhension du monde médiatrice entre perception et intelligibilité (Chareix 2013, p. 734). Dans la section des héritages (cf. 1.2.4), Jean-Michel Berthelot (1990) montrait l'intérêt de recourir aux schèmes d'intelligibilité en sciences humaines et sociales. Il défend une pluralité cohérente et une interdépendance de ces schèmes pour comprendre les sociétés humaines. L'expression « Plaidoyer pour un pluralisme sous contraintes », qu'il utilise dans un autre contexte (Berthelot 2003), rend bien compte de sa démarche intellectuelle. Ici, j'envisage la notion de schème dans un sens plus général. Un schème a certes une dimension spéculative d'intelligibilité du monde mais elle contient aussi des aspects opératoires et sensibles. La notion recouvre deux concepts célèbres en sociologie : l'habitus de Pierre Bourdieu et le structurel d'Anthony Giddens. En effet, l'habitus renvoie à un « ensemble de dispositions durables, acquises, qui consiste en catégories d'appréciation et de jugement et engendre des pratiques sociales ajustées aux positions sociales » (Wagner 2010, p. 70). De même, le structurel forme un tissu « de *règles* et de *ressources* que l'acteur utilise dans la production et la reproduction de la vie sociale » (Nizet 2007, p. 19). Ces schèmes sont acquis durant les expériences sociales des individus mais demeurent souvent impensés. Pourtant, ils sont au cœur des mécanismes socio-historiques de reproduction et de création. En effet, d'une part, ils contraignent les individus dans leurs représentations, jugements et affects, d'autre part, ils leur permettent d'agir, y compris parfois en transgressant certaines routines incorporées. En bref, les schèmes sont institués et instituant, structurés et structurant. Ils constituent une double extension du concept de schème d'intelligibilité. D'une part, ce sont aussi des schèmes pratiques d'action et des schèmes affectifs

9. Le dictionnaire est accessible sur internet à l'adresse suivante : https://dictionnaire-academie.fr/

d'identification. D'autre part, ils ne sont pas réservés aux savants mais interviennent en permanence chez tous les acteurs d'une société.

La technologie en tant que discours sur les techniques est un prisme intéressant pour approfondir la notion de schème. Elle montre, en effet, que les outils, les instruments et les machines ont une capacité à matérialiser, et peut-être à multiplier, des schèmes d'appréhension du monde. L'influence de ces *schèmes techniciens* est d'autant plus forte que les artefacts technoscientifiques imprègnent le milieu social. Les sociétés industrielles en constituent l'archétype. L'énergie donne lieu à plusieurs schèmes techniciens après la formalisation de la thermodynamique au milieu du XIXe siècle. L'un des enjeux de cet essai est d'identifier certains schèmes énergétiques de l'époque contemporaine, d'analyser leurs formes et leurs fonctions dans les sociétés occidentales et de suivre leurs transformations durant deux siècles. Le temps long de l'essai, 1850-2050, est un atout car les schèmes sont souvent impensés. Or, un impensé collectif est masqué par « des systèmes symboliques » qui ont la force de l'habitude et produit un « effet de puissance » dans le champ des pratiques et des discours (Gras 2003, p. 142). Une belle illustration est l'ouvrage de Charles-François Mathis sur *La Civilisation du charbon en Angleterre, du règne de Victoria à la Seconde Guerre mondiale*. En faisant une archéologie des représentations culturelles de l'Angleterre du XIXe siècle, Mathis (2021, p. 16) montre que la première économie industrielle au monde s'empêche de penser des alternatives au charbon alors que la proportion de charbon dans la consommation énergétique totale augmente de 75 % à 95 % en Angleterre au cours du XIXe siècle. La société victorienne se convertit à une civilisation « carbonifère » en orientant ses imaginaires collectifs autour du charbon comme horizon indépassable. Elle sélectionne, de manière inconsciente, des schèmes énergétiques qui imposent l'extractivisme fossile dans l'arène politique et économique. La contestation économique et politique qui résulte de « la famine de charbon » de l'année 1873 exprime une « économie morale » au sens d'une « réflexion sur ce que *pourrait être* l'économie du pays » (Mathis 2021, p. 153).

Une culture technique est un phénomène difficile à saisir. Une variation d'échelle spatiale, une superposition de rythmes temporels et une circulation entre strates sociales sont autant d'écarts sapant l'évidence d'un schème énergétique. La recomposition des schèmes techniciens entre sensibilité, morale et intelligibilité permet d'explorer et d'interroger les jugements d'efficacité. Les effets de la culture technicien structurent en profondeur la société qui la porte et la rend possible. Pour rendre compte du social dans la technique, Anne-Françoise Garçon parle de « technicité » comme d'une médiation culturelle entre les objets et les hommes. La technicité « est ce par quoi la technique advient, un moyen, un outil plus ou moins maîtrisé, comme l'est le geste qu'elle précède et qu'elle accompagne. Elle est cet environnement d'idées, d'imaginaires et de mots, dans lequel les gestes, les procédés et les objets sont naturellement enchâssés. » (Garçon 2012, p. 12). À la technicité de Garçon dans le champ des imaginaires répond le « cadre technologique » (*technological frame*) de Wiebe Bijker dans le champ des pratiques. Le cadre technologique rend compte du partage spécifique au sein d'une communauté d'acteurs (pas seulement des techniciens) de connaissances théoriques et tacites, de pratiques d'ingénierie et de valeurs culturelles, de machines et de procédures (Bijker et Law 1992, p. 301). La technicité se distingue d'une culture professionnelle. Elle la prolonge par la réappropriation par les usagers d'objets, machines et procédés fabriqués par d'autres, qui ont la technique comme profession : les techniciens. Mais, culture technique et technicité sont caractérisées par des logiques distinctes. En sociologie du travail, Nicolas Dodier (1995) distingue « la solidarité technique », caractérisée par des exigences de fonctionnement et des considérations futures, et « la solidarité de société », caractérisée par des exigences morales et des considérations présentes.

Effets du technocosme sur les humanités

Culture technique, technicité, schème technicien offrent trois modalités du déploiement des techniques en société. Chacune est portée à un certain degré de radicalité dans les sociétés industrielles, ce qui justifie l'emploi de l'adjectif « technicien » pour insister sur la densité technique des sociétés occidentales contemporaines. Comme le souligne Georges Balandier (2001, p. 9), « [les] contemporains, les surmodernes habitent de moins en moins des pays, des espaces physiques, et de plus en plus des univers issus des savoirs nouveaux, de la créativité, des entreprises transformatrices et génératrices de milieux et de cadres artificiels où l'existence humaine ne cesse de se techniciser. » L'industrialisation étend l'artificialisation par la multiplication des objets et des machines comme médiateurs des relations sociales. Elle induit une forme radicale de technicité de l'expérience humaine.

Dans *Les conséquences de la modernité*, Anthony Giddens analyse deux mécanismes de dé-localisation des rapports sociaux à l'échelle de la planète durant l'époque contemporaine. Le premier est la multiplication des « gages symboliques » tels que l'argent qui circulent et sont adoptés « quelles que soient les caractéristiques spécifiques des individus ou des groupes qui les manient » (Giddens 1990, p. 30). Le second touche directement la technologie puisqu'il s'agit des « systèmes experts ». Ceux-ci rendent les « un grand nombre de nos actions coutumières » et provoquent un « "étirement" des systèmes sociaux [...] par l'impersonnalité des tests d'évaluation du savoir technologique, et par la critique publique » (Giddens 1990, p. 33). La technicisation du social par des dispositifs symboliques et matériels est appelée « technocosme » par Gilbert Hottois. Dans la société moderne, même « l'accès à l'autre univers, celui de la nature [...] est entièrement médiatisé par des relais techniques » (Hottois 1984, p. 61). Ce faisant, Hottois identifie une rupture anthropologique induite par la formation du technocosme : alors que l'homme ancien habitait un univers peuplé de mystères, qu'il pouvait interpréter selon plusieurs ensembles symboliques (religieux, poétiques, ludiques, etc.), l'homme contemporain, soumis à la technique comme seule médiatrice du monde, n'a plus accès qu'à un unique langage, univoque et transparent, celui de la science, qui s'impose comme le seul légitime.

Ce présupposé d'une transparence des technosciences est discutable. Il ramène à l'idée exprimée par François Furet d'une « transparence » des sciences de la nature grâce aux « testages » mathématiques. Une telle confiance dans les approches mathématiques et expérimentales rend compte du prestige technicien au sein des humanités. N'y aurait-il pas là une surestimation de la valeur des sciences de la nature et de l'ingénieur ? Certes, les analyses quantitatives et statistiques renforcent l'argumentaire des sciences de l'homme et de la société. Mais, elles s'appuient souvent sur des représentations déformées des mathématiques, conçues comme des savoirs désincarnés et immatériels. Jenny Boucard montre par exemple que, lors de la fondation de l'École pratique des hautes études à la fin des années 1860, le ministre de l'Instruction publique, Victor Duruy, pensait qu'il suffirait d'« une salle avec un tableau noir et de la craie » pour soutenir les recherches des géomètres (Boucard et Teissier 2018, p. 143). Une telle représentation « éthérée » des mathématiques est largement partagée par les sociétés contemporaines. Elle accrédite l'idée d'une « transparence » mathématique adoptée par François Furet.

Or, la réduction calculatoire s'accorde mal avec la complexité des univers sociaux. Elle n'est d'ailleurs pas dénuée d'équivoques dans l'étude de la nature. Harry Collins (1985) montre ainsi que la « flexibilité interprétative des données expérimentales » au sein d'une communauté scientifique provoque l'ouverture de nombreuses controverses. Si, pour reprendre une formule célèbre d'Emmanuel Kant (1787, p. 43), « la raison se présente à la nature […] comme un juge en fonction qui force les témoins à répondre aux questions qu'il leur pose », les témoignages de l'expérience sont multiples et soumis à diverses interprétations. Cette multiplicité herméneutique constitue justement l'un des ressorts de la dynamique des sciences de la nature

depuis le XVII[e] siècle. Comment vouloir faire du quantitatif un juge suprême d'analyse des sociétés alors qu'il introduit des voix dissonantes au tribunal de la nature ?

L'approche quantitative produit des outils argumentatifs et heuristiques certes, mais reste hétérogène à la dimension interprétative des sciences de l'homme et de la société. L'analyse statistique d'un corpus, fût-elle produite par les derniers algorithmes d'apprentissage sémantique, est impuissante à générer un début de signification sans une connaissance qualitative préalable et indépendante (Teissier, Quantin et al. 2018). Tout l'intérêt des humanités numériques réside dans cette articulation entre qualitatif et quantitatif. Le traitement quantitatif d'un corpus fait apparaître des représentations nouvelles ayant une valeur heuristique. En suivant Alfred Whitehead parlant des instruments de laboratoire, on peut dire que les outils numériques stimulent l'imagination des chercheurs en humanités car ils « montre[nt] les choses selon des combinaisons inhabituelles ». La « transformation » de l'objet d'étude, par la surprise qu'elle induit, pousse à renouveler des interprétations qui, à force d'être habituelles, sont devenues routinières.

L'analyse quantitative, malgré les vertus des humanités numériques, ne doit donc pas être surévaluée dans sa « transparence » et dans sa capacité à clore des controverses en sciences humaines et sociales. La valorisation du quantitatif constitue, au même titre que l'importation courante de métaphores scientifiques et techniques dans le champ des humanités, une trace évidente de l'effet des techniques sur les idées d'une part et sur les actions d'autre part.

1.3.3 Un complexe de contraintes et de désirs : le régime technicien

Cette habilitation à diriger des recherches poursuit l'exploration des rapports entre savant et politique à la croisée de Max Weber et de Michel Foucault. La référence à ces deux auteurs doit plus à mon expérience d'enseignant à l'université de Nantes qu'à une pratique de recherche [10] Grâce à Weber, je distingue le registre épistémique de la construction des savoirs et savoir-faire et le registre politique de la construction organisationnelle des rapports de pouvoir. Grâce à Foucault, je m'intéresse à l'entremêlement des rapports de savoirs et de pouvoirs dans la structuration des sociétés. Or, à travers l'industrialisation et l'organisation scientifique du travail, l'intensification technique a fait du savoir technicien une contrainte structurante des sociétés contemporaines.

L'hégémonie culturelle d'Antonio Gramsci fournit un concept intéressant pour comprendre la manière dont la technique influence et modèle toutes les strates sociales dans les sociétés industrielles [11]. Dans ses *Cahiers de prison* (1929-1935), Gramsci développe la notion d'« État intégral » pour rendre compte de la porosité des sphères publiques et privées dans le capitalisme contemporain et de l'intégration des sociétés sous la domination de l'idéologie bourgeoise. Cette hégémonie est assurée par « l'organisation d'une proximité "capillaire" des gouvernants et des gouvernés », ce qui la rend difficile à percevoir par les acteurs eux-mêmes (Frosini 2016, p. 407). Les forces « d'organisation et de connexion » sont, en effet, portées par de multiples relais de la bourgeoisie dont les « intellectuels » au sens large, c'est-à-dire ceux dont le travail est « non manuel ». Cet ensemble hétéroclite regroupe « des figures apparemment éloignées telles que le philosophie professionnel,

10. Plus précisément, j'ai lu et discuté ces deux auteurs dans le cadre d'ateliers de lecture de textes : *Le Savant et le Politique* (Weber 1919) avec les étudiants du master Épistémologie, histoire des sciences et des techniques de l'université de Nantes depuis 2017 ; *L'Archéologie du savoir* (Foucault 1969) avec les doctorants du Centre François Viète en 2014-2015, notamment grâce à Matthieu Quantin et Anaël Marrec. Plus récemment, Gaëtan Levillain, en proposant un cours intitulé « "Savoir, c'est pouvoir" : du relativisme méthodologique de Michel Foucault aux STS » en novembre 2020, a relancé mon intérêt pour la question des contraintes en lien avec les sciences et les techniques.

11. Je me suis intéressé au concept d'hégémonie grâce à deux collègues en sociologie et sciences de la communication, Delphine Saurier et Marie-Julie Catoir-Brisson (Audencia Nantes). Les échanges ont pris place dans un groupe de réflexion interdisciplinaire sur la basse technologie (*low-tech*) à l'initiative d'un chercheur en sciences de l'ingénieur intéressé par les questions sociales, Bruno Auvity.

le prêtre, l'entraîneur sportif, le journaliste, le policier, l'ingénieur, l'économiste, l'instituteur, le médecin, etc. » (Frosini 2016, p. 404). Une même emprise des schèmes techniciens se déploie par capillarité dans le cas des sociétés industrielles. Elle s'exprime notamment par des contraintes juridiques et des régulations publiques (Pestre 2014, p. 20) mais aussi par des manières de penser et de faire propres au corps social. Dans *La voix et le regard*, Alain Touraine qualifie de « société programmée » la société des années 1970, succédant à la société industrielle. Il lui associe trois caractéristiques : prédominance de la gestion, impératif de changement permanent (et dévaluation des héritages), diffusion des rapports de pouvoir au-delà des États-nations (Touraine 1978, p. 15).

Proposition d'un concept nouveau : le régime technicien

Les considérations sociologiques, anthropologiques et philosophiques de la section 1.3.2 ont souligné la spécificité de la culture technique et de la technicité des sociétés industrielles. La multiplication des artefacts, l'intensification de l'usage des dispositifs techniques et le déploiement des infrastructures matérielles à toutes les échelles du monde contemporain contribuent à réguler des comportements sociaux et culturels et à gouverner des communautés. Cette administration des populations par la technique n'est pas forcément synchrone avec un régime politique. Anne-Françoise Garçon (2015, p. 86) le dit clairement : « le geste technique ne s'inscrit pas d'abord dans une "période" historique ; il s'inscrit d'abord dans un régime de pensée et d'agir ». À l'inverse, la technique n'a pas forcément les mêmes rythmes que le corps social. Le cas de l'accélération technique des mondes contemporains est un cas emblématique (Rosa 2005). Daniel Cérézuelle explicite ainsi le décalage entre les temps de la technique et du social :

> Le changement rapide de l'infrastructure technique et économique rend inopérantes et disqualifie les ressources symboliques qui organisent la vie sociale. En effet, le rythme de la production sociale de cadres symboliques informels est [...] au moins la génération, et il est douteux que cela puisse changer, comme en atteste l'échec des révolutions modernes à créer un « homme nouveau ». (Cérézuelle 2011, p. 222)

Par ses rythmes, la technique est un phénomène spécifique du corps politique et du corps social. Son analyse nécessite donc des prismes spécifiques. C'est la raison pour laquelle je propose le concept de *régime technique* par extension de la notion de « régime de pensée et d'agir » utilisé par Anne-François Garçon (2015). Le régime technique correspond à l'ensemble des régulations, des contraintes et des imaginaires qui s'exercent sur des populations et figurent des relations sociales en lien avec le déploiement et l'usage d'artefacts, de dispositifs et d'infrastructures techniques. Il est donc à la fois institué et instituant. Comme la notion de « structurel » dans la sociologie d'Anthony Giddens, le régime technique « est donc à la fois contraignant et habilitant ; il est fait de *règles* et de *ressources* que l'acteur utilise dans la production et la reproduction de la vie sociale » (Nizet 2007, p. 19). Un régime technique se présente aussi comme hétérogène et interconnecté. Ainsi, un régime technique relie des infrastructures et des espaces artificialisés à des cultures techniques, des technicités, des modes d'existence d'êtres et des schèmes d'appréhension du monde. Il traverse les milieux professionnels et les connecte aux autres espaces sociaux.

Le concept se décline en *régime technicien* dans le cas des sociétés capitalistes et industrielles occidentales dans lesquelles la technique joue un rôle spécifique (cf. 1.3.1). Le régime technicien est structuré par les trois tendances de la modernité occidentale – rationalisation de la nature, mise en réseau des sociétés et accélération des modes de vie – auxquelles j'ajoute trois spécificités de la technique contemporaine : puissance des machines,

concentration des puissances et croissance industrielle. L'articulation entre réseaux, puissances et croissances peut être appréhendée par le concept de « macro-systèmes techniques ». Leur généralisation est, pour Alain Gras (1997, p. 22-24), la principale spécificité de l'époque contemporaine depuis « la révolution industrielle ». Elle s'appuie sur une forte coopération entre les domaines techniques, économiques et moraux : « le progrès technique favorise le progrès économique et le progrès moral » (Gras 1997, p. 101).

Le concept de régime technicien dit une intimité plus grande encore du social et du technique que le macro-système d'Alain Gras et la société programmée d'Alain Touraine. Mais, il est aussi plus concret que le « système technicien » de Jacques Ellul et le « technocosme » de Gilbert Hottois. Il rassemble, dans un même cadre théorique, un ensemble de situations de l'époque contemporaine, qui, toutes, expriment « l'emprise croissante des techniques sur nos vies », pour reprendre l'expression de François Jarrige (2014, p. 348). Ce cadre applique à la technique la notion de capillarité sociale développée par Antonio Gramsci à propos de l'idéologie de la bourgeoisie. Le concept défend, avec Gilbert Hottois et Günther Anders, que la banalisation des techniques taille un nouveau costume existentiel à l'humanité occidentalisée. Anders (1960, p. 95, 48) dénonce la manière dont l'intensification contemporaine du mécanique, « monde=appareil », aliène l'humanité dans son ensemble quelle que soit l'appartenance sociale ou territoriale. « Si j'emploie le singulier "l'homme", c'est pour [... souligner que] le monde des appareils, empêche aussi bien l'élite au pouvoir que ses victimes de vivre comme des hommes et de se comporter comme des hommes – bref : il *les dépouille tous deux de leur nature*. » [12] L'organisation politique et économique d'une société est un facteur déterminant mais pas suffisant d'analyse. Daniel Cérézuelle (2011, p. 364) résume l'enjeu anthropologique de la modernité occidentale d'une manière lapidaire : « nous sommes en train de devenir des-hommes-de-la-technique ». Il poursuit, en utilisant le même qualificatif que Touraine, « programmé », pour dire l'aliénation que provoque la technicisation du monde contemporain. « [N]ous [, habitants du XXIe siècle occidentalisé, avons tendance] à surévaluer certaines possibilités techniques, et nous n'en voyons même pas d'autres, parce que notre imaginaire est fasciné par tout ce qui correspond aux valeurs de puissance, de nouveauté, de rapidité » (Cérézuelle 2011, p. 364).

L'enjeu anthropologique se double d'un problème politique. Dans *Aux bords du politique*, Jacques Rancière (1998, p. 240-241) oppose deux logiques dans le « partage du sensible ». La première logique, qualifiée de « police » ou « gouvernement », appréhende la société par l'« identification » des entités sociales. Elle maintient un partage du sensible « dont le principe est l'absence de vide et de supplément ». À l'inverse, la seconde logique, qualifiée d'« émancipation », affirme la « subjectivation » des manières d'être. Elle cherche à « perturber cet arrangement en le supplémentant d'une part des sans-part », en redéfinissant et en transgressant les catégories existantes. Alors que la logique de gouvernement défend le consensus dans l'espace public, la logique d'émancipation manifeste le dissensus par « intervention sur le visible et l'énonçable » du monde social. Cette grille d'analyse peut être appliquée à la technique. Les sociétés industrielles réalisent une incorporation sociale de la technique comme contrainte et comme désir. Ce qui masque la dimension politique de l'incorporation sociale de la technique est sa nature routinière : routine administrative de la contrainte, routine inconsciente du désir. Pourtant, la double routine administrative de la contrainte et inconsciente du désir relève bien d'une logique de gouvernement, dans le cadre d'analyse de Rancière, un gouvernement qui ne dit pas son nom mais produit des effets sociaux de manière continue et durable. Pour le dire avec les *Technocritiques* de François Jarrige (2014, p. 344), le « capitalisme industriel a triomphé en construisant un accord généralisé sur la question des machines, c'est-à-dire en l'excluant du champ politique et de l'espace démocratique ». La technicisation des sociétés industrielles camoufle la nature politique de la technique.

12. Il s'agit de « l'homme » en tant qu'être humain, *das Mensch*, en allemand, étant neutre.

Ce camouflage a été dénoncé il y a plus de 60 ans par Anders. Son essai, *Le rêve des machines*, montre comment la technique transforme la société en appareil matériel et organisationnel. Il a été rédigé à partir d'un épisode de la guerre froide. En août 1960, Anders envoie une lettre à un militaire états-unien, Francis G. Powers, prisonnier en Union soviétique, après que son avion espion U-2 a été abattu en territoire soviétique. Dans cette lettre également publiée dans la presse allemande, Anders (1960, p. 18) cherche à faire prendre conscience à Powers, ainsi qu'« à tous les Powers du monde et aux gens instruits parmi leurs complices », de la manière dont il a été conditionné pour que ses soi-disant « "principes moraux" fonctionn[ent] comme des rouages parfaitement huilés ». « Car, en réalité, la chose qui fonctionnait était l'ensemble des attitudes que ses employeurs et instructeurs lui avaient imposé et dont ils avaient fait sa "seconde nature". » Ses désirs individuels avaient quant à eux été supprimés. Contre le conditionnement sociotechnique, Anders politise le débat. Si l'appareil est puissant, il n'est pas tout-puissant. Le devoir moral de chaque être humain est de résister dans chaque situation où l'appareil cherche à le faire participer. « [N]ous ne nous laissons jamais transformer en honnêtes rouages » de l'appareil, continuant avec obstination « à nous encombrer de notre densité corporelle, de nos états d'âme et de nos propres ressources » (Anders 1960, p. 115-116).

La résistance à l'enrôlement est d'autant plus difficile que les routines sont très souvent inconscientes. Paradoxalement, le conservatisme politique s'appuie en régime technicien sur la capacité des technosciences à coloniser les imaginaires. La technologie comme appareil *fonctionnel* renforce la technologie comme discours *progressif* à l'époque contemporaine. L'un des ressorts les plus puissants du statu quo social des sociétés industrielles est la formulation de mythes technoscientifiques qui dessinent des mondes « transgressifs », en apparence du moins. Jean Brun a ouvert une voie originale d'exploration des imaginaires contemporains par l'analyse des désirs inconscients générés par la technique. Dans *Les masques du désir*, ce penseur protestant, spécialiste de philosophie de l'Antiquité grecque et latine, interprète la modernité occidentale comme l'incarnation progressive des mythes antiques dans les dispositifs techniques des sociétés industrielles. Il met en parallèle la puissance des mythes politiques et scientifiques depuis le XIX^e^ siècle. « Dans cette marche en avant, que l'on se contente de baptiser progrès [...] Histoire et Science sont devenues les deux puissants facteurs mythogènes de notre époque alors qu'elle prétendent ouvertement nous affranchir de toute forme de pensée mythique. » (Brun 1981, p. 15) Brun a été peu suivi dans sa déconstruction de la force mystificatrice de la technique contemporaine [13]. Dans une autre tradition, moins critique sans doute, Anthony Giddens souligne également la force quasi-religieuse incarnée par la technique contemporaine. « Dans la confiance des profanes envers les systèmes experts, il y a très souvent un peu de ce "savoir induit" énoncé par [Georg] Simmel, une espèce de "foi" pragmatique, fondée sur notre expérience du bon fonctionnement de ces systèmes, en général. » (Giddens 1990, p. 37)

La démystification de la puissance matérielle et symbolique de la technique revêt une importance politique d'autant plus cruciale que l'hégémonie technicienne impose les cadres intellectuels et organisationnels des sociétés contemporaines. L'expression même de « démocratie technique » est un mot-valise qui « passe son contraire en contrebande » (Bihr 2007, p. 225). La technique contemporaine structure si profondément la société occidentale (et mondiale) qu'elle enfouit le politique et les possibilités de choix collectifs sous des routines existentielles de désir et des procédures administratives de contrainte. Mettre à distance la rhétorique de la domination, c'est déjà percevoir l'aliénation. Déconstruire la domination nécessite de se déprendre des

13. Deux de ses postures intellectuelles peuvent expliquer le peu d'intérêt suscité par Brun : son mysticisme religieux et son conservatisme politique. Il a néanmoins inspiré Daniel Cérézuelle pour l'écriture de *La technique et la chair*. Celui-ci y développe une pensée critique et originale de la technique en s'appuyant sur une lecture croisée et attentive de trois auteurs principaux, tous marqués par le protestantisme : Jean Brun, Jacques Ellul et Bernard Charbonneau.

mots et des schèmes dominants qu'ils soient culturels, politiques ou économiques.

La prolifération des objets hybrides est si prononcée à l'époque contemporaine que, selon Hottois (1984, p. 97-98), le « technocosme se substitue au milieu naturel et l'intègre en même temps [...] devenant le nouvel *universum*, le nouvel englobant ». Sans adhérer à cette interprétation totale du technocosme contemporain, la notion de régime technicien caractérise la technique contemporaine par sa capacité à créer des mondes nouveaux, dont la cohérence en fait de possibles lieux d'habitation, souvent inhabitables, parfois habités. Elle se place donc en concurrence avec la littérature qui, elle aussi, excelle à créer des univers habités. Ce qui distingue la technique contemporaine est sa capacité à jouer sur plus de registres que la seule fiction. Les univers techniciens sont imaginés certes, mais peuvent également être matérialisés et organisés. C'est cette multiplicité de registres qui rend les univers techniciens si fascinants à l'époque contemporaine. Il n'est pas anodin que deux littératures technologiques émergent simultanément au début du XIX^e^ siècle au moment où la technoscience marque plus profondément le social de son empreinte matérielle, idéelle et organisationnelle : la science-fiction d'une part, qu'on pourrait appeler technoscience-fiction, avec *Frankenstein ou le Prométhée moderne* de Mary Shelley (1818) ; l'utopie technologique d'autre part, initiée par le comte de Saint-Simon et amplifiée par les saint-simoniens (Picon 2002).

Exploration des mondes imaginés et habités par la technique

L'exploration du régime technicien pose problème dans la mesure où, comme le pouvoir de Michel Foucault, il est partout et nulle part. « Par pouvoir, il me semble qu'il faut comprendre d'abord la multiplicité des rapports de force qui sont immanents au domaine où ils s'exercent, et sont constitutifs de leur organisation. » (Foucault 1976, p. 121-122) Ceci implique de chercher le pouvoir dans ses plus extrêmes ramifications, « là où il devient capillaire ». Mais, la contrainte n'est pas la seule figure en scène. La technique joue aussi, derrière *Les masques du désir*, une partition sensible et intime. Jean Brun (1981, p. 14) a mis l'accent sur la manière dont « l'intentionnalité latente qui préside au développement de la technique » amplifie le désir de la technique. Le mécanisme est itératif : chaque problème de société peut être « résolu » par la technique, ce qui affiche la technique comme un bien, désirable ; mais, la « solution » a engendré de nouveaux problèmes de société ; ceux-ci peuvent à nouveau être « résolus » par la technique ; etc. La répétition de ce désir itératif de techniques produit l'expansion technicienne à l'époque contemporaine.

Le régime technicien embrasse donc autant la technique comme pouvoir (Michel Foucault) que la technique comme désir (Jean Brun). Ce croisement donne la problématique générale de cet essai : tracer *une archéologie des contraintes et des désirs de la technique* à l'époque contemporaine. Entre contraintes et désirs se niche le sentiment du sacré. Cet essai tient donc aussi d'une « spéléologie de l'âme » contemporaine pour reprendre l'expression d'Henri Desroche à propos de l'anthropologie du sacré de Roger Bastide. Selon Bastide (1975, p. 8-9), « le sacré [est] comme [une] "religion vivante" envisagée dans sa contestation des religions "en conserve". [...] Ainsi écartelé, le sacré demeure une énigme. » La technique serait devenue, à l'époque contemporaine, un flux vivace de sacré s'essayant à la mise en conserve des formes traditionnelles du sacré (églises). Par sa puissance issue de la modernité industrielle, la technique constituerait l'une des énigmes les plus profondes de notre époque. Au même moment, Jacques Ellul dénonce également la fétichisation de la technique. « Ce n'est pas la technique qui nous asservit mais le sacré transféré à la technique. » (*Les nouveaux possédés*, 1973, cité par Jarrige 2014, p. 13). Ce « fétichisme de la machine » s'apparente à « croyance dans le pouvoir démiurgique des techniques censées résoudre tous [les] problèmes » (Jarrige 2014, p. 352).

Le régime technicien caractérise la technique contemporaine par des paires signifiantes et contrastées :

contraintes et désirs, sciences et fictions, puissances et sacrés, flux et conserves, etc. Autant dire que le régime technicien n'attend pas sagement qu'on vienne le chercher dans une institution donnée. Il faut l'extraire de tout « ce champ où se manifestent, se croisent, s'enchevêtrent, et se spécifient les questions de l'être humain, de la conscience, de l'origine, et du sujet » (Foucault 1969, p. 26). Le régime technicien intègre la discipline au sens de Michel Foucault et le contrôle au sens de Gilles Deleuze (Ottaviani 2014). La discipline s'exerce par un dressage local, à l'école, à l'usine ou à l'asile au XIX^e^ siècle tandis que le contrôle s'exerce par une régulation générale à travers la consommation, l'entreprise ou la médication au XX^e^ siècle. « Dans une société de contrôle, l'entreprise a remplacé l'usine, et l'entreprise est une âme, un gaz. [...] On nous apprend que les entreprises ont une âme, ce qui est bien la nouvelle la plus terrifiante du monde » (Deleuze cité dans Ottaviani 2014, §27).

Le régime technicien n'est pas non plus porté par une génération donnée parce qu'il les traverse toutes. Il peut néanmoins influencer chaque génération de manière spécifique. Son impact peut être appréhendé par le concept de « champ d'expérience » de Reinhardt Koselleck (1997, p. 271-280). Un champ d'expérience est composé de gains et de pertes d'expériences individuelles et collectives. Plus précisément, Koselleck identifie « trois types de gain d'expérience » : 1° l'« expérience originelle », si surprenante et singulière qu'elle ne peut être répétée ; 2° l'« accumulation » d'expériences, non seulement « répétables » mais encore « recueillies » par un individu, un groupe social ou une génération ; 3° la « mutation systémique », si profonde par son ampleur et si longue par sa durée, qu'elle transforme radicalement « tout le capital d'expérience antérieur acquis à court ou moyen terme ». Le régime technicien transforme le « champ d'expérience » par des effets de deuxième type qui sédimentent pour induire des reconfigurations de troisième type. Ainsi, le gain et la perte d'expériences provoquées par la multiplication des *computers* et des *smart-phones* sont perçus et recueillis par les générations ayant vécu la phase de transition mais sont intégrés aux manières d'être des générations suivantes jusqu'à parvenir à une étrangeté irréductible du champ d'expérience précédant leur essor.

Walter Benjamin (1935) décrypte un cas concret de l'effet du régime technicien dans la sphère artistique. Dans « L'œuvre d'art à l'heure de sa reproductibilité technique », il montre comment la reproduction des œuvres d'art à l'infini par les techniques modernes et leur intensité de circulation ont transformé les « modes d'existence des œuvres d'art » (cinéma, peinture, théâtre) ainsi que la façon de percevoir l'art par les « communautés humaines » de son époque par rapport aux siècles antérieurs. L'« innervation technique » a été telle depuis les années 1930 que, moins d'un siècle plus tard, nous, contemporains du XXI^e^ siècle, sommes déjà placés en altérité par rapport à cette réflexion-ci de Benjamin.

À l'exception de tels phénomènes spectaculaires et rares, les gains et les pertes d'expérience induits par le régime technicien sont lents et difficiles à percevoir en l'espace d'une génération. Ils viennent sédimenter de manière discrète, par dépôts imperceptibles, dans les articles des dictionnaires, entre les lignes des livres d'écoles, parmis les nuées des imaginaires collectifs. C'est pourquoi il faut allonger le temps d'observation pour voir se former les excroissances du régime technicien. Ceci conduit à ne pas privilégier l'étude des situations concrètes d'usages comme le suggère David Edgerton (1998). Je ne chercherai pas non plus à hiérarchiser les mécanismes sociaux pour expliquer les déploiements de la technique, succès, détournements ou échecs des dispostifs, à la manière de la construction sociale des techniques (Bijker, Hughes et al. 1987). C'est encore moins une histoire de l'innovation qu'on trouvera ici (Griset et Bouvier 2012). Au fond, l'innovation n'est qu'un visage de la technique, à la forme étriquée et conservatrice, fascinée par les « grands hommes » et les « grandes entreprises ». L'historiographie des techniques récentes montre, au contraire, l'importance d'« enquêter sur la banalité (au cœur de l'invention), sur la répétition, la pensée commune et partagée, les processus de reproduction, de transmission et d'apprentissage » (A. de Beaune et al. 2017, p. 26). Elle caractérise justement « l'invention

comme acte relationnel et “communicable” ».

À l’inverse, l’histoire de l’innovation surestime la nouveauté de certains « événements » qu’elle rend singuliers. Or, l’innovation contemporaine est incrémentale par construction. La recherche technoscientifique procède de proche en proche, à proximité du même et de l’identique. Pour le dire avec le sociologue des organisations, Norbert Alter, il faut distinguer la « logique d’innovation » et la « logique de changement » (cité par Bouvier 2014, p. 632). La logique d’innovation ne change presque rien alors que la logique de changement réagence « les formes de la vie sociale » en profondeur. L’innovation technoscientifique ressemble dans le champ économique à l’actualité médiatique dans le champ politique. Elle génère un foisonnement de micro-événements qui détourne d’une compréhension plus approfondie des phénomènes socio-historiques. Innovation et actualité s’apparente à l’« agitation de surface [...] à oscillations brèves, rapides, nerveuses » de l’histoire événementielle (Braudel 1949, p. 17). Or, la technologie se donne pour objectif ambitieux d’articuler l’ensemble des formes et des rythmes de la technique. La hiérarchisation des facteurs explicatifs et la prédominance des rapports sociaux de production à la manière marxiste n’est pas non plus au centre de l’attention. L’approche holiste des facteurs explicatifs développée par Paul Veyne dans *Comment on écrit l’histoire* me semble encore pertinente, cinq décennies après sa publication :

> l’explication historique pousse plus ou moins loin l’explicitation des facteurs [de causalité... en histoire, ils] sont de trois espèces. L’un est le hasard, qu’on appelle aussi causes superficielles, incident, génie ou occasion. L’autre s’appelle causes, ou conditions, ou données objectives : nous l’appellerons causes matérielles. Le dernier est la liberté, la délibération, que nous appellerons causes finales. Le moindre « fait » historique comporte ces trois éléments. (Veyne 1971, p. 134)

« Hasard, matière et liberté » forment un bon antidote au positivisme et au mécanisme. L’approche holiste de l’histoire de p. Veyne rejoint, me semble-t-il, la coexistence des schèmes d’intelligibilité dans la sociologie de J.-M. Berthelot. Reprenant une formulation stimulante d’Annie Petit (1990, p. 75), je voudrais « repérer des convergences et similitudes signifiantes » plutôt que hiérarchiser des causes socio-historiques. Je m’intéresse aux effets à long terme, à la manière dont le régime technicien verrouille des comportements qui, au fil des générations, deviennent des conventions sociales, des normes juridiques, des gestes spontanés. Dans *La France contre les robots*, Georges Bernanos (1947) insiste sur la formation d’habitudes de pensée et de comportement due à ce qu’il nomme « la Civilisation des Machines ». Au-delà de la virulente critique des sociétés industrielles de son époque, qu’elles soient fascistes, capitalistes ou communistes, stimulante en soi [14], Bernanos est percutant en tant que technologue. Il souligne l’influence de l’expansion techniciste sur les sociétés contemporaines et la manière dont la technique discipline le social. Depuis les premiers « robots » que sont les machines à tisser des années 1760, l’« invasion de la Machinerie [...] prépare un type d’homme » dont l’hypertrophie de vitesse engendre l’hypotrophie de « vie intérieure » (Bernanos 1947, p. 134-138).

Avant Jean Brun, Bernanos s’inquiète d’un « nombre sans cesse croissant d’hommes habitués, dès leur enfance, à ne désirer que ce que les machines peuvent donner ». Il suggère ainsi deux modes d’action de l’« État technique » : la contrainte administrative et le désir inconscient. Bernadette Bensaude-Vincent (2020, p. 47) concrétise cette idée en montrant comment, à propos du cas de la balance d’Antoine-Laurent de Lavoisier à la

14. Sur la quatrième de couverture de l’ouvrage, on peut lire ces mots de Georges Bernanos (1947) : « Le danger n’est pas dans les machines, sinon nous devrions faire ce rêve absurde de les détruire par la force, à la manière des iconoclastes qui, en brisant les images, se flattaient d’anéantir aussi les croyances. Le danger n’est pas dans la multiplication des machines, mais dans le nombre sans cesse croissant d’hommes habitués, dès leur enfance, à ne désirer que ce que les machines peuvent donner. » Cette citation a suscité l’intérêt passionné de certains étudiants de l’université de Nantes et de l’école centrale de Nantes avec lesquels j’en ai discuté depuis plusieurs années dans le cadre d’une réflexion sur la place des techniques dans les sociétés contemporaines.

fin du XVIII[e] siècle, un artefact ou une machine peut laisser son empreinte sur une société. Elle pose alors deux questions fondamentales pour comprendre la modernité technicienne : « dans quelle mesure une machine façonne-t-elle les mentalités ? Dans quelle mesure peut-elle symboliser et résumer une époque ? » La balance devient au tournant du XIX[e] siècle un objet porteur de signes et de significations, c'est-à-dire un sémiophore dans le sens de K. Pomian (cf. 1.2.2). La proposition de Bensaude-Vincent qu'un sémiophore comme la balance caractérise une époque peut être interprétée comme la matérialisation de la notion d'épistémè. Dans *Les mots et les choses*, Michel Foucault définit l'épistémè d'une époque comme une « structure de connaissances réglées ». La transformation de machines en sémiophores collectifs et leur incorporation aux structures cognitives caractérisent ainsi les sociétés industrielles.

Par son ubiquité, le concept de régime technicien pose la pertinence en sciences humaines et sociales de concepts inobservables. Par construction, le structuralisme se consacre à la recherche des « éléments inconscients de la vie sociale » et se dirige vers « toujours plus d'inconscient » dans un au-delà de l'horizon des acteurs eux-mêmes (Lévi-Strauss 1958, p. 37-38). En lien et en écart par rapport au structuralisme, Anthony Giddens fait appel à la notion de « structurel », qui, « hors du temps et de l'espace », ne peut être soumise à une observation directe (Nizet 2007, p. 19). Le régime technicien s'apparente au concept d'« individu historique » de Max Weber. Un individu historique est défini par Weber (1905, p. 43) comme un « complexe de relations présentes dans la réalité historique, [... réuni] en vertu de leur signification culturelle, en un tout conceptuel ». La puissance du régime technicien tient à un paradoxe des techniques dans les sociétés industrielles : leur centralité dans l'organisation sociale, leur image de neutralité politique et morale. Or, le déploiement des dispositifs et des cultures techniques contraint et régule l'ordre social. Maurice Halbwachs soulignait déjà la subtilité des modernes pour (s')imposer des contraintes et, paradoxalement, l'enfouissement psycho-sociologique de ces contraintes. « Nos sociétés modernes imposent à l'homme beaucoup de contraintes. Sans exercer sur lui, avec la même force, la même pression unilatérale que les tribus primitives sur leurs membres, elles pénètrent cependant et s'insinuent plus au fond de lui-même, par la multiplicité et la complexité des rapports de toute nature où elles l'enveloppent. » (Halbwachs 1925, p. 84) La technique fait partie des dispositifs contraignants. Plus encore, l'énergie peut être perçue comme la forme « la plus contraignante, mais non la seule » de « médiation » entre la nature et la société (Debeir et al. 1986, p. 14). Les effets de la technique sont d'autant plus contraignants qu'elle offre l'impression de neutralité. Elle crée simultanément un monde matériel et un monde idéel.

Elle masque les rapports de domination sous des reflets brillants. Il y a, de ce fait, un parallèle à tracer entre les régimes capitaliste et technicien : « Privilège du petit nombre, le capitalisme est impensable sans la complicité active de la société. Il est forcément une réalité de l'ordre social, même une réalité de l'ordre politique, même une réalité de civilisation. Car il faut que, d'une certaine manière, la société toute entière en accepte plus ou moins consciemment les valeurs. » (Braudel 1985, p. 67) Fernand Braudel suggère des contributions différenciées au capitalisme en fonction des groupes sociaux mais souligne l'influence d'ensemble du régime capitaliste sur les rapports sociaux. La même analyse convient au régime technicien : une empreinte sur l'ensemble de la société en terme social, politique et culturel ; des rôles différenciés des groupes d'acteurs sur la structuration du régime. Mais, le régime technicien n'est pas l'apanage du capitalisme. Les *Dix-huit leçons sur la société industrielle* indiquent bien la similitude des structures industrielles des régimes capitaliste et communiste. Raymond Aron (1962, p. 47) défend ainsi que « le fait majeur, celui que nous retrouvons aussi bien dans les sociétés industrielles du type soviétique que dans les sociétés industrielles dites occidentales, c'est le progrès de la productivité ou encore l'augmentation de la valeur produite par l'ensemble de la collectivité et par chaque individu à l'intérieur de celle-ci. » Un autre point commun entre les régimes capitaliste et communiste

est leur « camouflage » sémantique de la réalité matérielle. Dans une approche marxienne, le sociologue Alain Bihr analyse deux renversements sémantiques limites pratiqués par les institutions soviétiques et néolibérales. D'une part, le « mot-valise [...] passe son contraire en contrebande », d'autre part « le mot-écran [...] fait obstacle à l'usage de son contraire » (Bihr 2007, p. 225)

Il me semble que le fait technologique, matériel et discursif, n'est pas suffisamment pris en compte par les sciences humaines et sociales. Le régime technicien est soit ignoré, soit considéré comme un simple moyen du capitalisme. L'innovation technique est considérée en économie comme une simple variable d'ajustement du modèle économique général. Or, la part d'autonomie de la technique nécessite une attention plus précise et plus fine si l'on veut mener une analyse anthropologique de la technique contemporaine. La technique n'est qu'en partie organisée par l'économie. Car, elle a également un impact, en retour, sur l'économie et influence les sphères d'activité humaine en termes sociaux, politiques et culturels. Récemment, j'ai trouvé avec plaisir l'empreinte du régime technicien à la lecture de *La technique et la chair* de Daniel Cérézuelle :

> Lorsqu'on réfléchit sur la modernité, il ne faut pas négliger le fait que la technique recèle un potentiel mythogène qui fait obstacle à notre capacité de choisir entre nos possibilités techniques, de les intégrer dans une stratégie maîtrisée de développement et d'inventer des voies nouvelles. C'est ce potentiel mythogène qui entretient une insouciance des limites à prescrire à l'usage de nos outils et une indifférence au contrôle concret de leurs effets ; il favorise la surdité et la cécité aux coûts du progrès, et il entretient ce que Jean Brun appelait un « optimisme sous-critique ». (Cérézuelle 2011, p. 365)

Ainsi, la technique structure, de manière plus ou moins consciente, l'organisation matérielle et idéelle des sociétés industrielles. Mais, comment étudier le régime technicien si seuls ses effets sont visibles ? La transversalité sociale, territoriale et temporelle du phénomène pose un problème d'observation. Si le régime technicien n'est ni l'apanage d'une classe ou d'une institution, d'un territoire ou d'une génération, où et comment l'étudier ? C'est l'un des enjeux de ce premier chapitre d'expliciter les possibilités et les choix d'une méthode d'exploration. La principale sonde du régime technicien est formée par l'articulation entre trois catégories socio-professionnelles – techniciens, technologues et technocrates – sur lesquelles je reviendrai (1.5.3). Mais, montrons, dès à présent, deux espaces où s'exprime le régime technicien dans les sociétés contemporaines et où, donc, il peut être observé.

1.3.4 Expression du régime technicien : mémoire collective et démocratie technique

La notion d'hégémonie culturelle peut être convoquée à nouveau. Gramsci identifiait l'école et le tribunal comme deux lieux emblématiques d'expression du « contrôle » social au sens de « la direction dans une situation de proximité » (Frosini 2016, p. 407). Le premier espace d'expression du régime technicien, la mémoire collective, est influencé par l'école. Le second espace, la « démocratie technique », est dépendant du cadre juridique et institutionnel. Ces deux espaces sont techno-politiques dans le sens où ils abritent des « pratiques stratégiques qui consistent à concevoir ou à utiliser la technique afin de mettre en place des objectifs politiques, de leur donner forme et de les réaliser » (Hecht 2004, p. 24).

Technique et mémoire collective

Dans la mémoire collective sédimentent des représentations transmises par de multiples groupes sociaux : chapelles, classes, cliques, écoles, familles, partis, patries, etc. C'est là, à la croisée de traditions enseignées et

de conventions vécues, que les sociétés forgent les « cadres sociaux de [leur] mémoire » (Halbwachs 1925, p. 210-211). Prenons deux illustrations pour suggérer l'ampleur du phénomène.

La première illustration concerne les écoles d'ingénieurs par lesquelles sont transmises des représentations technologiques durant la formation. L'École polytechnique est emblématique en France par la position de ses diplômés dans la haute fonction publique. Les « polytechniciens, très nombreux dans les ministères techniques, par exemple à l'Industrie et aux Travaux publics, et dans beaucoup d'entreprises nationalisées, avaient toujours manifesté un esprit saint-simonien » (Kuisel 1981, p. 421-422). Il n'est pas anodin que ce soit une vision saint-simonienne plutôt que marxiste par exemple qui soit transmise à l'École polytechnique depuis le XIX^e^ siècle. Alors que Saint-Simon regarde les réseaux bancaires et ferroviaires, Marx se focalise sur les manufactures. Cette différence de regard est déterminante dans le rôle attribué au capital dans l'économie : les saint-simoniens l'interprètent « comme un ensemble de flux qui irriguent et vivifient la société sur le modèle de la circulation sanguine » alors que les marxistes le voient sous les traits d'une « gigantesque machine dévorant les forces de l'ouvrier pour lui arracher de la plus-value » qu'il entasse localement (Picon 2002, p. 214). Ces héritages ont des répercussions sur la manière dont les futurs diplômés pensent l'économie une fois en situation de décision : comme un réseau de flux traversant les mondes industriels, à la manière des saint-simoniens ; comme l'accumulation de richesses par certaines classes sociales, à la manière des marxistes. Ces différences de morphologie sociotechnique influencent « des actions qui visent le maintien ou la modification de l'ordre établi », c'est-à-dire le politique (Balandier 1967, p. ix). La construction de mémoires collectives spécifiques au sein des écoles d'ingénieurs pose donc un problème techno-politique plus large. En façonnant les imaginaires techniciens, elle influence la construction de l'ordre social à travers le pouvoir exercé par les ingénieurs dans les administrations publiques et les grandes industries.

La seconde illustration de l'importance de la mémoire collective concerne le domaine de l'énergie à travers ce que l'historien des sciences George Basalla nomme « l'équation énergie-civilisation ». À la suite des crises énergétiques des années 1970, Basalla (1982) milite en faveur d'une économie d'énergie en critiquant l'idée courante selon laquelle la consommation d'énergie par habitant mesurerait le degré de civilisation. Il déconstruit cette équivalence énergie-civilisation qui s'est construite au cours du XIX^e^ siècle avec l'expansion de la consommation de charbon en Europe et le principe de conservation de l'énergie en thermodynamique. Ce schème énergétique circule parmi les scientifiques comme le physico-chimiste allemand Wilhelm Ostwald ou le radio-chimiste anglais Frederick Soddy mais aussi parmi les inventeurs et entrepreneurs comme Thomas Edison ou Henry Ford aux États-Unis. Le schème circule au-delà des milieux scientifiques et techniciens à partir des années 1860. Il séduit l'économiste William Stanley Jevons, l'historien et journaliste Henry Brooks Adams ainsi que l'éditeur et journaliste Edward L. Youmans. Celui-ci suggère que chaque époque est caractérisé par « une quantité fixe de morale et de liberté » (Hiebert 1966, p. 1058-1059). En 1865, il qualifie « la transformation de l'eau, de la vapeur et de la force électrique en activités sociales [de] la réalisation la plus importante du siècle » (Basalla 1982, p. 174).

L'équation énergie-civilisation est encore plus répandue que ne le suggère Basalla. Sa version la plus radicale, identifiée par Karin Zachmann (2012) a été formulée au sein de l'anthropologie évolutionniste états-unienne par Leslie A. White. Elle prend alors la forme d'une « loi évolutionniste » en anthropologie, dite « loi de White ». L'anthropologue états-unien Leslie White (1943) propose d'égaler la culture d'une société avec le produit de la quantité d'énergie consommée par habitant et du rendement d'utilisation de cette énergie. L'énergie devient un indicateur quantitatif justifiant l'histoire évolutionniste. Raymond Aron fait aussi de l'énergie une mesure du progrès de civilisation. « [Il] y a une mesure simple du développement de la technique :

le degré dans lequel l'homme est capable d'utiliser à son profit les forces naturelles, ou encore la quantité d'énergie dont chaque individu d'une société peut disposer » (Aron 1962, p. 80). L'énergie est pensée comme le principal facteur causal de l'économie. Un état des lieux historique datant du milieu des années 1980 souligne que l'énergie n'est pas prise comme objet d'étude par les sciences sociales sauf « du point de vue de la croissance économique » (cité par Massard-Guilbaud 2018, p. 17). Beaucoup plus récemment, un groupe de recherche interdisciplinaire réunissant sciences de l'ingénieur et de l'homme débute ainsi un article portant sur « l'économie de l'hydrogène » : « L'énergie, moteur principal de la croissance économique, est vitale pour soutenir un développement économique et social moderne. » (Becherif et al. 2015, p. 372) De l'économique, on glisse au social. C'est la version actuelle de l'équation énergie-civilisation. White et Aron, ainsi que les auteurs cités par Basalla et leurs continuateurs, ont contribué à faire de cette équation un lieu commun de la mémoire collective. L'équation énergie-civilisation est ainsi devenue un impensé du régime technicien. Or, elle a, comme l'héritage saint-simonien pour les polytechniciens, un impact techno-politique fort sur les sociétés industrielles car elle sous-tend les politiques énergétiques. Elle circule, sous une forme implicite, dans les nombreux graphiques liant l'énergie à la richesse par habitant des États contemporains.

Technique et démocratie

Le second espace est plus clairement encore techno-politique que la mémoire collective. Il s'apparente à la « démocratie technique ». Michel Callon, Pierre Lascoumes et Yannick Barthe (2003) ont popularisé cette notion dans un ouvrage devenu classique : *Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique*. Ils montrent comment la gestion technique des sociétés façonne en partie l'ordre social. Contrairement à la mémoire collective qui est le plus souvent inconsciente, la « démocratie technique » se donne explicitement comme un moyen « moderne » de réguler le social et d'organiser ses évolutions. Ses mécanismes font intervenir des rapports de force entre des experts et spécialistes, qui sont censés maîtriser les risques et les incertitudes techniques, des profanes et publics, qui sont concernés par ces enjeux et leurs conséquences sur leurs existences, et des politiques et représentants, qui ont été élus pour prendre des décisions engageant l'ensemble des populations d'un territoire donné. Le rapport de forces entre ces groupes, même s'il a évolué sur un siècle et demi, est constitutif de la modernité technicienne.

La « démocratie technique » peut être saisie à travers le prisme des politiques publiques. Classiquement, une « politique publique se présente sous la forme d'un programme d'action gouvernementale dans un secteur de la société ou un espace géographique » (Mény et Thoenig 1989, p. 130). Elle peut être élargie en considérant qu'elle relève de « tout ce que les gouvernements décident de faire ou de ne pas faire » (Dye 1969, p. 1). L'absence de mise en œuvre d'une politique peut être due au fait qu'elle n'est pas considérée comme prioritaire ou faisable, ou plus fondamentalement encore, parce qu'elle relève d'une invisibilité ou d'un impensé des acteurs dans leur « rapport au monde » (Pierre Muller). La première option relève de courants de sociologie centrés sur les institutions tandis que la seconde intéresse plus les courants marqués par une approche compréhensive, plus proche des acteurs et de la disponibilité de leurs imaginaires. Les deux options impliquent la considération d'une « myriade d'acteurs, individuels ou collectifs » : administrations, associations, citoyens, experts, élus, entreprises, fonctionnaires, groupes d'intérêts (économiques, idéologiques), industriels, opinions publiques, organisations transnationales, usagers, etc. (Evrard et al. 2019)

En restreignant l'analyse au « milieu décisionnel central » (Catherine Grémion), Pierre Muller (2018, p. 30-49), propose une analyse concentrique de la décision publique. Il articule « quatre cercles de la décision » dont l'autorité décroît à partir d'un pouvoir central. Pour la France, le premier cercle se compose du président

de la République, du Premier ministre et des proches influents dont le ministre des Finances. Il prend les décisions considérées comme les plus importantes. Le deuxième cercle est formé par les administrations centrales, organisées par secteurs économiques. Le troisième cercle amalgame les acteurs extérieurs à l'État : associations, entreprises, médias, organisations professionnelles, syndicats, etc. Le quatrième et dernier cercle rassemble les chambres parlementaires et les organes juridictionnels. La souplesse d'un tel schéma en fait aussi sa force car le poids relatif des quatre cercles de la décision peut être ajusté en fonction du cas empirique étudié.

Ce schéma concentrique situe les registres d'action publique des techniciens, technocrates et industriels dans les deuxième et troisième cercles de la décision. Même s'ils ne prennent pas les décisions jugées les plus importantes par le premier cercle, ces deux cercles intermédiaires sont cruciaux dans une « démocratie technique » parce qu'il posent les cadres de la pensée sociotechnique et, ce faisant, formalisent des imaginaires et des méthodes qui structurent les politiques publiques. La notion de « démocratie technique » ne désigne donc ni un idéal démocratique de la modernité technicienne, ni un geste démocratique d'appropriation de la technique. Elle s'apparente plutôt à un mode d'administration des sociétés contemporaines, caractérisé par un pouvoir donné aux experts et techniciens au sens large, incluant les techniques d'organisation et de gestion. Par administration, je veux dire que des procédures techniques, des schèmes conceptuels, des outils de gestion se déploient dans ces sociétés selon des voies hiérarchiques et bureaucratiques sans contrôle, ni même souvent conscience, par les populations organisées de la sorte. Il s'agit de politique puisque ce sont des formes de contraintes organisationnelles qui s'exercent sur les populations et sur les individus. Mais, cette politique n'est en aucun cas démocratique parce qu'elle échappe deux fois à la décision collective : d'une part, les procédures sont imposées par des hiérarchies institutionnelles (publiques ou privées peu importe) ; d'autre part, la dimension politique de toute procédure est masquée par des routines quotidiennes (impératif moral, défi organisationnel, urgence pratique, indifférence blasée, etc.).

Cette bureaucratisation à tous les étages de la vie moderne m'est progressivement apparue comme une évidence. Un caractère disposé à la révolte sociale et un commerce quotidien avec les institutions du temps présent qu'elles soient professionnelles ou associatives ont sédimenté depuis une dizaine d'années avant que je puisse formuler cette idée de dépossession moderne de nos comportements individuels et collectifs. Lisant pour la première fois *Le Château* au printemps 2022, cent ans après sa rédaction par Franz Kafka, je ne pouvais ressentir toute l'étrangeté de cet univers littéraire qui avait dû tant inquiéter les lecteurs contemporains de l'auteur. La citation placée en épigraphe du chapitre dit bien cette inquiétante étrangeté du monde bureaucratique prenant possession de la vie même de l'arpenteur K. « [Q]u'était-ce ici que sa vie en dehors de ses rapports avec le Château ? Jamais encore K. n'avait vu son existence et son service aussi intimement mêlés ; ils l'étaient si bien que parfois K. pouvait croire que l'existence était devenu service et le service existence. » (Kafka 1926, p. 90-91) Comme l'expert K. vis-à-vis d'une inaccessible, mais omniprésente, administration du sensible, notre existence la plus intime est prise dans les rets du régime technicien. Nos imaginaires sont canalisés par les flux administratifs, nos rêves sont formatés et distribués sur des réseaux marchands. Nous sommes entrés dans ce monde effrayant, décrit par Bernanos (1947), dans lequel un « nombre sans cesse croissant d'hommes [et de femmes sont] habitués, dès leur enfance, à ne désirer que ce que les machines peuvent donner ».

D'une manière plus analytique et moins dramatique – plus mesurée et moins passionnée penserait-on en régime technicien –, Jean-Claude Thoenig (1987, p. 310-313) expose une idée analogue dans *L'Ère des technocrates. Le cas des Ponts et Chaussées*. Il montre comment la pensée, la pratique et l'organisation d'un corps technique de l'État imposent « un lieu de passage obligé » à la politique contemporaine, c'est-à-dire à la vie des

sociétés humaines du temps présent. Il identifie trois « registres d'action » technocratique d'un corps technique comme celui des Ponts et Chaussées : les modes d'organisation et de gestion des services publics au sein l'administration et des ministères ; les mécanismes sociaux de tri par cooptation et exclusion, y compris dans les grands groupes industriels ; la canalisation des modalités de décision politique par les savoir-faire contrôlés par le corps (Thoenig 1987, p. 36-37). Le dernier registre d'action, par sa dimension épistémique et technologique, est crucial dans la constitution du régime technicien. « Les Grands Corps transforment les problèmes *a priori* difficiles en modes opératoires réalistes. Voilà pourquoi les décideurs, politiques et économiques, les cooptent et leur accordent tant d'espace pour agir. » Les rapports sectoriels des ministères ou des agences d'État sont emblématiques de la manière dont les corps techniques traduisent des problèmes sociaux complexes en analyses opérationnelles de type technico-économique. Les mises en forme, les prescriptions et les prévisions de tels rapports constituent une base pour définir et conduire les politiques publiques. Sans être décisionnaires, les cercles intermédiaires des techniciens, technocrates et industriels posent le cadre de l'imaginaire technique en politique. Ils encadrent le pensable dans l'État et sculptent le régime technicien dans la société. Leur influence est d'autant plus forte sur les premier et quatrième cercles de la décision que le milieu politique a connu en France une « technocratisation », à partir des années 1960, par l'accession à des responsabilités politiques de hauts fonctionnaires (Mathiot 2019, p. 223).

Benoît Godin explicite une belle expression du régime technicien dans ses études sur la recherche et le développement (R&D) des sociétés industrielles depuis le milieu du XX^e^ siècle. Son propos porte sur le « modèle linéaire d'innovation » qui schématise le processus d'innovation comme la succession de trois composantes : recherche fondamentale, recherche appliquée, développement technologique (auxquelles est parfois ajoutée la diffusion commerciale) (Godin 2005, p. 4). Il analyse la construction du modèle sur la période 1920-1950 aux États-Unis puis s'interroge sur sa persistance dans les milieux techniciens et politiques jusqu'au XXI^e^ siècle alors que plusieurs technologues (dont lui-même) ont invalidé la pertinence du modèle par des analyses empiriques et quantitatives. Il explique la persistance de cette « fiction » de linéarité par deux raisons relevant respectivement d'un imaginaire technicien de simplicité et d'une administration des statistiques, qui, en nourrissant les bases de données selon le modèle tripartite, le confortent.

> En un sens, nous devons cette continuité à la simplicité même du modèle. Le modèle est une entité rhétorique. C'est une figure de pensée qui simplifie et donne aux administrateurs et aux agences une idée d'orientation lorsqu'il s'agit de réfléchir à l'allocation de fonds à la R&D. Cependant, les statistiques officielles sont en fait plus importantes pour expliquer l'utilisation continue du modèle linéaire. En recueillant des chiffres sur la recherche telle que définie par les trois composantes, puis en les présentant et en les discutant les unes après les autres dans un cadre linéaire, les statistiques officielles ont contribué à cristalliser le modèle dès les années 1950. En fait, les statistiques sur les trois composantes de la recherche ont été pendant longtemps (et le sont encore pour encore pour beaucoup) les seules statistiques disponibles permettant de « comprendre » l'organisation interne de la recherche, notamment dans les entreprises. De plus, à mesure que l'innovation est devenue politique de la science dans l'agenda, les statistiques sur la R&D ont été vues comme mandataire légitime pour mesurer l'innovation technologique car elles incluaient le développement (de nouveaux produits et processus). S'étant ancré dans les discours et dans les politiques à l'aide de statistiques et de règles méthodologiques, le modèle est devenu un « fait social ». (ma traduction littérale de Godin 2005, p. 35)

Un modèle linéaire d'innovation, reconnu comme erroné, administre ainsi les sociétés industrielles. Il

forme un « fait social » en démocratie technique. Les experts, parce qu'ils sont sensés maîtriser le faisable et l'opératoire au présent, sont fortement impliqués dans la construction de l'ordre social à venir. Leur centralité est une caractéristique de la modernité technicienne du XIX^e^ au XXI^e^ siècle. La science-fiction contribue à renforcer cette préséance technicienne. Par exemple, dans sa trilogie martienne, Kim Stanley Robinson met en scène la colonisation humaine et la terraformation de *Mars la Rouge* qui devient *la Verte* puis *la Bleue*. Alors qu'il s'agit de faire société sur Mars, les « Cent Premiers » colons sélectionnés sont « des experts dans les domaines [jugés] utiles dès le débarquement : médecine, informatique, robotique, conception de systèmes, architecte, géologie, conception de biosphères, ingénierie génétique, biologie, plus toutes sortes d'autres ingénieries et tout ce qui concernait la construction » (Robinson 1993, p. 43-44). Étrange tableau de la société dont sont exclus artistes, chercheurs en sciences sociales, humanistes, oisifs, ouvriers, paysans, philosophes, politiciens, sceptiques, syndicalistes, etc. Une telle sélection professionnelle ne paraît pas bizarre ni radicale aux lecteurs contemporains de cette trilogie martienne si l'on en croit son succès international depuis trois décennies. Pourtant, les acteurs du drame eux-mêmes (et Robinson lui-même) sont bien conscients de la recomposition sociale à laquelle ils devront faire face pour s'installer sur Mars : « parmi toutes les choses que nous allons transformer sur Mars, il faudra compter avec nous-mêmes et notre réalité sociale. Ce n'est pas seulement Mars que nous devrons terrafransformer, mais nous aussi. » (Robinson 1993, p. 118) Or, ce sont bien des experts des technosciences que les pouvoirs politiques et économiques ont envoyés depuis la Terre pour concrétiser un nouvel ordre social sur Mars. Cette utopie martienne, comme la majorité des œuvres de science-fiction, qu'elles soient littéraires ou cinématographiques, légitiment l'hégémonie culturelle des milieux techniciens et renforcent la structuration asymétrique des sociétés contemporaines en donnant aux professionnels de la technique une fonction sociale d'organisation collective. Ce levier culturel du régime technicien traverse aussi toute l'éducation contemporaine, des bacs à sable de la maternelle aux amphithéâtres de l'université.

À partir du cas des universités de technologie de Compiègne, Belfort-Montbéliard et Troyes, Pierre Lamard et Yves-Claude Lequin interrogent le rôle de la technologie dans les sociétés du temps présent. Ils montrent l'originalité de ce modèle éducatif acclimaté en France à partir du Massachusetts Institute of Technology (MIT) aux États-Unis. L'université de technologie de Compiègne couple, à partir de sa création en 1972, « des activités de recherche aux frontières des sciences fondamentales [... pour] apporter des réponses à des verrous d'ordre technologique auxquels se heurte l'industrie » à un schéma pédagogique cherchant à « connecter la connaissance à l'action, [à] approcher l'objet technique de manière transdisciplinaire évitant une spécialisation étroite » (Lamard et Lequin 2017, p. 94-95). Des professionnels de l'industrie apportent également aux ingénieurs en formation « leur expérience [du] "savoir-faire et du faire-faire". » Ce savoir par le faire est également introduit à la création de l'université de technologie de Belfort-Montbéliard à la fin des années 1980. Les enseignants et enseignants-chercheurs du département Humanités font passer les étudiants « d'une pédagogie de certitudes inhérentes à l'enseignement des sciences dures à une pédagogie de questionnement » (Lamard et Lequin 2005, p. 289). Une telle épistémologie de la technique, basée sur la mise en question du monde socio-technique, construit la technologie comme « un antidote à la technocratie » selon Lamard et Lequin (2017, p. 177-179). Ceux-ci défendent l'intégration des humanités à l'enseignement des sciences et des techniques à la manière des universités de technologie pour dépasser la dualisme universitaire français, clivé entre l'université généraliste et les écoles d'ingénieurs (Lamard et Lequin 2005, p. 51-68). Une expansion de l'enseignement de la technologie aurait pour conséquence, d'une part, de sensibiliser les professionnels de la technique aux limites et aux critiques d'une approche technicienne trop spécialisée et, d'autre part, de fournit à l'ensemble des citoyens une culture technologique afin qu'ils puissent mieux se réapproprier les enjeux politiques de la technique. Une telle réforme

scolaire offrirait, selon Lamard et Lequin (2017), une opportunité démocratique pour introduire plus de débats sociotechniques et recomposer la frontière entre experts et profanes afin de renverser le pouvoir des premiers sur les seconds. Ceci ouvre une voie de démocratisation de la « démocratie technique » par une approche humaniste, pluraliste et critique de la technique, avancée par Lamard et Lequin. Les premiers « cercles de la décision » (P. Muller) cesseraient peut-être d'en appeler, par réflexe et sans réflexion, au « solutionnisme technologique » (E. Morozov) pour résoudre les problèmes de société qui sont par nature sociaux et politiques. La technologie comme réflexion sur les hommes et les techniques en société et la place de la technologie dans l'enseignement scolaire et universitaire posent donc un enjeu politique fondamental dans la perspective d'une réappropriation populaire du temps présent. Faire émerger des agoras contradictoires, où les arguments psychologiques, sociaux et culturels soient entendues par les milieux techniciens et technocratiques, permettrait de renouveler les modalités du politique et de redistribuer les processus collectifs de décision sociale et culturelle au XXI^{e} siècle. Une telle réorganisation politique modifierait le statut social et épistémique des experts vis-à-vis des citoyens.

Une telle reconfiguration des rapports de force entre experts et citoyens ouvrirait une brèche radicale dans l'histoire des sociétés occidentales. Sur la période 1850-2020, en effet, la technocratie a maintenu un statut élevé de responsabilité, de décision et de reconnaissance en dépit de modalités changeantes de son action en fonction des époques. Elle pèse plus lourd en temps de crises car les parlementaires et les peuples sont écartés du pouvoir au nom d'une urgence réelle ou fabriquée. Les conflits militaires en sont un bon exemple. Durant la Première Guerre mondiale, alors que le Parlement français transfère ses pouvoirs au gouvernement, les ministères des Affaires étrangères et du Commerce organisent les importations de vivres, de munitions et de matériels depuis la Grande-Bretagne (Dethan 1984, p. 158). Suite à la Deuxième Guerre mondiale, la reconstruction des pays européens, en particulier de la France, est portée par une génération qui se voit comme « modernisatrice » (Kuisel 1981, p. 19-21). La modernisation de la France apparaît comme une forme spécifique et comme un moment particulier de la modernité technicienne. Les élites françaises sont convaincues de la « nécessité de rattraper les pays capitalistes les plus avancés [... et d'] adopter une psychologie américaine ». La modernisation induit une rupture épistémologique entre passé et futur. Jean Monnet le dit de manière lapidaire : « Vous ne pouvez pas penser à l'avenir sous la forme du passé. » (cité par Kuisel 1981, p. 402). Une nouvelle philosophie politique émerge basée sur les pratiques de planification, la nécessité d'une expansion continue et l'amélioration de la productivité.

La modernisation comme rupture entre passés et futurs

La planification, qui s'intensifie en période de guerre, se généralise ensuite en temps de paix. Cet outil de gestion techno-politique met justement en évidence la tension entre experts et politiques dans la prise de décision. Trois personnages majeurs de la planification française permettent d'expliciter quelques mécanismes de sa gestion techno-politique.

Le premier, Gaston Berger, est philosophe de formation et haut fonctionnaire de métier. Il pense la planification selon une division claire du travail (Durance 2008, p. 15-16). En théorie, les politiques doivent choisir les finalités, les techniciens établir les moyens d'y parvenir. En pratique, il y a, selon Berger, confusion des genres car les techniciens se méfiant des politiques « pour lesquels la passion l'emporte souvent sur la raison et qui défendent [… leurs] intérêts de catégories particulières de la société » ont tendance à s'approprier aussi les fins. Ceci est facilité par l'attitude des politiques, qui, « lorsque les situations deviennent graves […] abdiquent au profit des techniciens pour une gestion de et dans l'urgence. »

Ce pouvoir grandissant de la technocratie coïncide avec le parcours du second personnage : Pierre Massé. Polytechnicien du corps des Ponts et Chaussées (X-Ponts), Massé mène une carrière dans l'industrie électrique tout en publiant des recherches originales en économie avant d'être nommé commissaire général du Plan (1959-1966). Il incarne, selon les mots du président Charles de Gaulle, la figure d'« un expert dont la spécialité est… "tout" » (Beltran et Bungener 1987, p. 68). Mais, il est aussi caractéristique de la manière dont les experts avancent masqués dans les démocraties techniques. Alors que leurs méthodes se donnent l'apparence de la *neutralité* sous couvert de *rationalité*, elles expriment un projet techno-politique qui façonne l'imaginaire contemporain. Ainsi, l'idée qu'il existe une *meilleure et unique solution* à un problème de société et qu'elle serait *accessible par la raison* n'abandonnera jamais Pierre Massé. En 1981, à 83 ans, « même avec le recul, l'espoir ne l'a pas quitté d'une sorte de magistrature économique qui parviendrait à définir à force de patience, de sagesse et de neutralité, le meilleur compromis social possible, – transposition limpide de l'*optimum* des économistes. L'idée d'une expertise chargée de présenter au choix politique des variantes, des alternatives, lui demeure visiblement étrangère : l'optimum, comme la vérité, ne saurait être qu'unique. » (Puiseux 1984) Massé est emblématique de cette influence (poly)technicienne au sommet de l'État. Plus généralement, le pouvoir octroyé à l'expertise en démocratie technique déploie un imaginaire technicien de la politique. Dans le cas du nucléaire par exemple, Gabrielle Hecht (2004) montre comment l'État déploie une géopolitique du « rayonnement de la France » dans la guerre froide en liant les ressorts technologiques (des radiations nucléaires) aux logiques civilisatrices (de l'aura du pays).

Cette géopolitique, qui peut être menée aux niveaux administratifs, économiques et militaires, présente des similitudes avec la planification de la deuxième moitié du XX^e^ siècle. C'est ce que suggère l'itinéraire d'un troisième personnage : Jean Monnet. Son parcours hétérodoxe est résumé en une phrase saisissante par Richard Kuisel. « Monnet commença sa carrière au tournant du siècle en vendant du cognac aux Canadiens, et la termina soixante ans plus tard en vendant aux Européens de l'Ouest l'idée de l'intégration européenne. » (Kuisel 1981, p. 363) Du commerce à la politique, Monnet passe par la planification, en tant que premier commissaire général au Plan (1946-1952) visant l'organisation économique de la France après la Deuxième guerre mondiale. Ni haut fonctionnaire, ni politicien, il construit sa méthode sur « la persuasion [plutôt] que l'autorité » et sur la résolution de problèmes (comme les techniciens) au « service du pays » (Kuisel 1981, p. 363-364). Aux fonctionnaires, ils reprochent le maintien du statu quo corporatiste, aux politiques, la conquête du pouvoir personnel.

Les figures de Gaston Berger, Pierre Massé et Jean Monnet, malgré leurs différences d'itinéraires et de formations, montrent l'interpénétration des enjeux techniques, technologiques et technocratiques dans la mise en forme politique de la société française après 1945. Ils appartiennent à une même génération de techniciens au pouvoir sur la période 1945-1965. L'administration technocratique est, pour la société industrielle, le pendant institutionnel de l'imaginaire technicien structurant la mémoire collective contemporaine. Elle exerce directement des pouvoirs jusqu'aux plus hautes sphères de l'État. L'imaginaire technicien se déploie ainsi dans la société de manière sous-jacente à travers filières d'enseignement et lieux communs de la culture technologique. Il agit à la manière de ce qui est rendu par l'expression de *soft power*, aujourd'hui à la mode.

1.3.5 Une histoire intégrée et compréhensive

On voit ici à l'œuvre l'intérêt de l'histoire-problème : poser des questions à l'histoire impose, comme le suggère François Furet, de sélectionner des acteurs, des territoires et des périodes. Le régime technicien qui sous-tend la modernité industrielle n'est pas unique ni univoque. Je m'efforcerai de le saisir en considérant

les deux sous-régions dominant le processus d'industrialisation du monde depuis le XIXe siècle : l'Europe de l'Ouest et l'Amérique du Nord. Je ne procéderai pas à une comparaison terme à terme de ces deux régions mais relierai certains « objets comparables » et « permutables », selon les mots de Furet, par des analyses quantitatives. Je mettrai également en correspondance des objets analogues, de manière qualitative, pour souligner des différences sociotechniques en fonction des lieux et des situations.

Ce qui se dessine ainsi, par la composition d'outils hétéroclites, c'est une histoire intégrée où des problèmes généraux sont interprétés à partir d'études de cas localisés. Elle se construit par la mise en relation de questions, de concepts et de modèles, et par des allers-retours entre des cas empiriques, parfois éloignés dans le temps et dans l'espace, et des formes empruntées à une diversité de champs disciplinaires et artistiques. Il ne s'agit pas d'une recherche interdisciplinaire, qui nécessiterait la mise en œuvre de méthodes parfois trop contraignantes, mais d'un « mélange des genres » [15]. Ce concept, « issu de l'histoire de l'art ou de la littérature » implique un « métissage de styles ou conventions » adapté à chaque objet de recherche (Bensaude-Vincent 2020, p. 38). Un tel processus est stimulant sans être « ni stable, ni répétable, ni codifié ». Ceci ouvre des horizons intellectuels de manière singulière sans cimenter de chapelles idéologiques.

Ce n'est pas tant la recherche de sources nouvelles qui guide l'essai comme le suggérait Furet dans son troisième point que la mise en relation d'objets comparables ou analogues par des hypothèses de travail. Une hypothèse générale de cet essai est que le concept de problème structure de manière transversale les sociétés industrielles contemporaines. Le problème intervient au niveau des deux moyens d'appréhension de l'environnement par l'humain – les signes et les techniques – pour reprendre l'approche duale de Gilbert Hottois (1984). Pour chaque moyen, le problème ouvre une voie d'exploration stimulante des réalités sociotechniques. Pour les signes, l'histoire-problème en témoigne par l'approche interprétative et compréhensive des humains en société. Pour les techniques, le problème et ses résolutions sont au cœur de la culture technique contemporaine.

1.4 Histoire d'un problème : le stockage de l'énergie

Thomas Hughes fait de la résolution de « problèmes critiques » l'un des mécanismes majeurs de la construction de l'industrie électrique à la fin du XIXe siècle. Il forge une métaphore en basculant l'image militaire de « saillants rentrants » du champ de bataille vers le champ des techniques (Hughes 1998, p. 840-846). Des inventeurs-entrepreneurs comme Elmer Sperry ou Thomas Edison identifient un « rentrant » (poche reculée) entre des « saillants » (poches avancées) du front de la technologie et le traite comme le point le plus faible à renforcer. La métaphore fonctionne parce qu'elle inscrit l'innovation dans un ensemble sociotechnique (saillants rentrants de la ligne de front et logistiques des lignes arrières) et qu'elle suggère une dynamique plus souple que les métaphores usuelles du « goulot d'étranglement » et de la « trajectoire », trop rigides, trop linéaires et trop matérialistes. Résoudre un problème peut provoquer des effets systémiques, « en cascade », et reconfigurer le système technique de manière profonde comme la prise d'une poche reculée stratégique peut décider de l'issue d'une bataille.

1.4.1 Raisons d'un choix

J'identifie cinq raisons justifiant le choix du stockage de l'énergie pour appréhender les sociétés industrielles à l'époque contemporaine.

15. J'ai mis un nom sur cette démarche en janvier 2019 seulement, lors d'un séminaire sur l'interdisciplinarité organisé à Nantes par la Maison des sciences de l'homme des pays de la Loire sous la responsabilité de Stéphane Tirard. Mais, j'en avais déjà fait l'expérience depuis ma thèse de doctorat à travers les avis et les pratiques de Bernadette Bensaude-Vincent.

De l'histoire des matériaux à l'histoire de l'énergie

Premièrement, à titre personnel, j'ai croisé ce thème depuis plus de quinze ans dans mes travaux de recherche entre histoire des sciences et histoire des techniques. Le thème apparaît déjà dans ma thèse de doctorat, intitulée *L'émergence de la chimie du solide en France (1950-2000). De la formation d'une communauté à sa dispersion* (Teissier 2007). Il concerne alors les recherches sur les batteries électriques destinées à la traction électrique et les piles à combustible pour applications stationnaires [16].

Je l'ai approfondi ensuite en post-doctorat (2008-2009) comme Gordon Cain Fellow in Technology, Policy and Entrepreneurship à la Chemical Heritage Foundation de Philadelphie [17]. Plusieurs années après, je suis revenu de manière plus spécifique sur la philosophie et l'histoire de la pile à combustible. Celle-ci est perçue dans les années 1960 et 1970 comme une alternative possible aux hydrocarbures pour le marché de masse des automobiles et comme une solution stationnaire pour le marché de niche de l'industrie spatiale (Teissier 2015, 2017a).

Ce cheminement m'a mené de l'histoire de la chimie (2003-2009) à l'histoire des matériaux (2008-2014) puis à l'histoire des énergies (2011-2023). Un tel itinéraire a une part de contingence mais il témoigne aussi d'un intérêt particulier des chimistes contemporains pour le champ de l'énergie, dont le problème irrésolu du stockage.

L'énergie comme médiation entre la société et le monde

La deuxième raison du choix du stockage de l'énergie tient à la place de l'énergie à l'époque contemporaine. L'énergie est la colonne vertébrale du capitalisme industriel. Mais, elle sous-tend déjà aussi, même si c'est dans une moindre mesure, l'organisation des sociétés médiévales et modernes. Geneviève Massard-Guilbaud (2018, p. 17-18) rappelle l'importance d'« une réflexion sur les relations que les humains ont eu à différentes époques avec l'énergie disponible autour d'eux ». Une telle démarche interroge les permanences aussi bien que les évolutions des sociétés, qu'on appelle aujourd'hui, dans un contexte de projection vers le futur, des « transitions ». L'énergie présente une phénoménologie particulière dans le sens où les phénomènes énergétiques ont des modes d'existence spécifiques. Elle se présente notamment comme un nœud cosmique où s'entremêlent la force des hommes et la puissance des machines. Son aptitude à être convertie, par transformation d'un type de force de la nature en un autre type, fait de l'énergie un puissance médiatrice. Elle prend la forme de « convertisseurs » dans le jargon technicien (Debeir et al. 1986, §1). Une machine à vapeur par exemple est un convertisseur de chaleur issue de la combustion de charbon ou de bois en travail mécanique. À l'inverse, un radiateur électrique convertit du travail électrique – on dit plus couramment puissance électrique – en chaleur pour le chauffage.

Les convertisseurs sont des « objets médiateurs » entre science, économie et politique pour reprendre le concept que Norton Wise a forgé pour caractériser l'œuvre hétéroclite de William Thomson servant l'empire britannique (Smith et N. Wise 1989, §13-14). Or, le XIX^e^ siècle est, à n'en pas douter, le siècle qui a su fabriquer ou déployer de manière intensive le plus grand nombre de convertisseurs énergétiques : machines à vapeur certes, mais également piles de Volta, batteries électro-chimiques, cellules photo-voltaïques, machines magnéto-

16. Ces deux thèmes sont portés par les deux principaux laboratoires de chimie du solide en France dans les années 1960. Le laboratoire de Robert Collongues à Paris est impliqué dans les batteries solides pour automobiles à travers un matériau prometteur : l'alumine bêta (Bensaude-Vincent et Teissier 2008 ; Teissier 2006). Le laboratoire de Paul Hagenmuller est quant à lui moteur sur les piles à combustible et les matériaux pour l'hydrogène (Teissier 2008)

17. La Chemical Heritage Foundation est devenue le Science History Institute suite à sa fusion avec la Life Sciences Foundation en février 2018 : https://www.sciencehistory.org/. Le sujet de mon post-doctorat était le suivant : « Entre chimie et industrie, regards sur la science des matériaux aux États-Unis depuis 1945. Cas des matériaux pour batteries solides et application aux véhicules électriques. Analyse de publications (journaux scientifiques et techniques, quotidiens) et archives industrielles ».

électriques, moteurs à explosion, etc. L'appellation de ces artefacts indique les phénomènes hétérogènes dont ils changent la forme, c'est-à-dire littéralement qu'ils *trans-forment*. Les convertisseurs ont joué un rôle central dans la matérialisation du principe de conservation de l'énergie, base de la thermodynamique à partir des années 1840 (Stengers 1997, p. 167-251). Ils ont également été convoqués dans une controverse sur la nature des affinités chimiques et des courants électriques qui divise la communauté européenne des physiciens et des chimistes au XIXe siècle (Kragh 2000). Parmi eux, William Grove (1846, p. 8), s'interrogeant sur la corrélation entre « les principaux objets de la physique expérimentale, à savoir la chaleur, la lumière, l'électricité, le magnétisme, l'affinité chimique et le mouvement », fabrique en 1842 un nouveau type de pile électro-chimique qu'il nomme « batterie voltaïque gazeuse ». Cet artefact, qui corrèle les fluides chimiques et les forces électriques à travers des interfaces matérielles, ne résout pas l'énigme métaphysique de la « circularité » des forces de la nature (Teissier 2017a). Il y a là une ambiguïté ontologique relevée par Isabelle Stengers (1997, p. 188). La matérialisation, l'opération et l'expansion des convertisseurs énergétiques consacrent la thermodynamique dans la deuxième moitié du XIXe siècle sans donner accès aux jointures du réel. Le succès des convertisseurs énergétiques a contribué à la formulation de schèmes énergétiques. Ces schèmes techniciens relèvent simultanément de l'intelligibilité – ils comprennent la nature et la société dans un principe d'équivalence unique – de l'opérativité – en convertissant entre eux des phénomènes hétérogènes grâce à des machines convertisseurs – et de la sensibilité – en consentant l'environnement selon des préférences affectives et morales. En somme, comme pour toute technoscience, il y a une épistémologie, une technologie et une idéologie de l'énergie.

Dans l'historiographie, ce sont en priorité les aspects de croissance énergétique et de pollutions des hydrocarbures fossiles qui ont retenu l'attention des chercheurs. Le rôle du stockage de l'énergie est complètement passé inaperçu en sciences humaines et sociales. Au hasard de mes lectures, je passe en revue quatre études historiques focalisées sur l'énergie, qui, malgré leur variété d'objets et d'écoles de pensée, ignorent le stockage de l'énergie. Premièrement, ceci est vrai en histoire des sciences. La minutieuse comparaison des travaux de Lazare et Sadi Carnot sur les puissances hydraulique, mécanique et thermique par Charles C. Gillispie et Raffaele Pisano (2013) est organisée par la mise en relation de la chaleur et de la circulation des fluides sans mention des problèmes d'emmagasinement calorique. Ainsi, les *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (1824) de Sadi Carnot, qui sont parfois considérées comme le début de la thermodynamique, ont orienté l'historiographie vers l'étude des flux plutôt que des stocks d'énergie. Deuxièmement, le stockage d'énergie est aussi absent de l'histoire des techniques. Un intéressant état des lieux dû à Geneviève Massard-Guilbaud (2018) montre que l'historiographie s'est d'abord focalisée sur les sources d'énergie et les filières économiques avant de glisser vers les systèmes et les transitions énergétiques. Mais, nulle mention n'est faite de la compréhension de l'énergie comme problème. Troisièmement, dans un registre économique, *Les grandes représentations du monde et de l'économie à travers l'histoire* de René Passet (2010) ne disent rien ou presque des stocks et des réserves dans la pensée économique du XIXe siècle.

Enfin, quatrièmement, le stockage de l'énergie est tout aussi inexistant dans la monumentale *Histoire de l'électricité en France* en trois tomes couvrant la période 1881-1987. Il n'apparaît dans aucun des titres et intertitres des chapitres des deux premiers tomes, 1881-1918 (Caron et F. Cardot 1991) et 1919-1946 (Lévy-Leboyer et Morsel 1994). Le troisième tome, centré sur la période 1946-1987 (Morsel 1996), mentionne le problème du stockage d'électricité à trois brefs moments de ses 1 200 pages. Il fait référence à la gestion des réservoirs (p. 382-384) dans le cadre de la planification, aux batteries (p. 837-842) comme facteurs techniques favorisant l'électricité et à la voiture électrique (p. 904) comme échec, puisque « la difficulté majeure du "réservoir d'énergie" n'est toujours pas résolu ». La quasi-absence du stockage de l'énergie dans cette somme de

3 600 pages est d'autant plus étonnante que le collectif d'auteurs rassemble des historiens et des technologues certes, mais aussi des techniciens et des technocrates d'Électricité de France (EDF). Jacques Lacoste par exemple, contrôleur général adjoint à EDF, analyse l'interconnexion des réseaux en France durant la première moitié du XX^e^ siècle. Loin d'attirer l'attention sur le stockage d'énergie, il efface au contraire le phénomène dans le cas de l'électricité. Ce qui rend l'industrie électrique si particulière, écrit-il, c'est que l'électricité est un vecteur énergétique « sans transport de matières » et « non stockable » (Lacoste 1986, p. 108-109).

Massard-Guilbaud (2018, p. 14) souligne combien la collusion des historiens de métier avec les technocrates d'EDF pose un « problème épistémologique majeur » dans ce projet éditorial. Elle mentionne le présupposé productiviste du groupe considérant la « nature inévitable de la croissance permanente de la consommation d'électricité » au XX^e^ siècle. Cette critique historiographique me semble pertinente. J'en rajouterais une seconde. La facture classique de l'ouvrage, focalisée sur l'histoire économique et culturelle et influencée par la technostructure d'EDF, ignore des problèmes transversaux comme le stockage de l'énergie. Au contraire, une approche technologique permet d'identifier des problèmes transversaux sur le temps long qui n'apparaîtraient ni dans les catégories administratives des gestionnaires de l'énergie, ni dans les séries classificatoires des archives nationales. En prenant le stockage d'énergie comme problème, deux situations apparaissent comme comparables à un siècle de distance : le déploiement des réseaux électriques au tournant du XX^e^ siècle (chapitre 4), la construction des mondes hydrogène au XXI^e^ siècle (chapitre 6). Dans un cas comme dans l'autre, le vecteur d'énergie – électricité ou hydrogène – pose des problèmes de stockage d'énergie en termes de régulations sociales, spatiales et temporelles.

Stocks et organisation des sociétés industrielles

La troisième raison du choix du stockage de l'énergie est son rôle particulier depuis la révolution industrielle. Le stockage, ou constitution de stocks, est un geste caractéristique des sociétés à États qui se forment à partir de la révolution néolithique il y a près de dix mille ans. C'est ce que souligne Pierre Clastres dans sa préface de l'*Âge de pierre, âge d'abondance*, analyse iconoclaste des sociétés primitives par Marshall Sahlins (1972). L'abondance qui caractérise les sociétés primitives tient justement à leur refus de constituer des stocks. « [Si] en des temps courts à intensité faible, la machine de production primitive assure la satisfaction des besoins matériels des gens, c'est, comme l'écrit Sahlins, qu'elle fonctionne en deçà de ses possibilités objectives, c'est qu'elle pourrait, si elle le voulait, fonctionner plus longtemps et plus vite, produire des surplus, constituer des stocks. » (Clastres 1975, p. 15) Le stockage est refusé collectivement parce que le stock constitue une entrave à la liberté de circulation. Sahlins (1972, p. 60) précise le cadre socio-culturel des civilisations nomades : « Comme écrit Owen Lattimore dans un contexte assez semblable, "le nomade pur est le nomade pauvre". Entre propriété et mobilité, il y a contradiction. » Enquêtant sur trois continents différents – Asie, Océanie et Amérique – Lattimore, Sahlins et Clastres montrent tous les trois la profonde implication économique et sociale d'un refus ou d'un désir de stocker des choses.

Ce « fait social total » (Marcel Mauss) découpe les sociétés humaines dans leurs tensions entre organisations internes et milieux environnants. « Pourquoi des nomades [Australiens et Bochinans] s'épuiseraient-ils à transporter inutilement d'un point à un autre de pesantes provisions puisque, dit Sahlins, "les stocks sont dans la nature elle-même" ? » (Clastres 1975, p. 16). Le garde-manger, le grenier de fourrage, la réserve de bois sont constitutifs des sociétés sédentaires depuis plusieurs milliers d'années en termes de division du travail et de répartition des produits aussi bien que des pratiques de déplacement et de rythmes de vie. Rapport aux autres, rapport aux milieux et rapport aux temps, le stockage traverse le social, l'écologique et

l'historique. Le stockage de l'énergie joue un rôle accru depuis deux siècles car il apparaît comme un moyen de maîtriser les surplus énergétiques qui ne cessent d'augmenter depuis l'industrialisation. Il permet de repenser la géopolitique de l'énergie. En effet, « l'enjeu des conflits autour des systèmes énergétiques est, sans aucun doute, l'appropriation des surplus, le libre accès aux sources d'énergie – donc une certaine maîtrise de l'espace – et, plus profondément encore, pour chaque communauté humaine, la maîtrise de sa propre énergie endosomatique [organes biologiques], le libre choix de l'organisation et des fins de son travail – dès lors une certaine maîtrise du temps » (Debeir et al. 1986, p. 28). Alors que les sociétés de l'âge de pierre puisent de manière extensive dans le milieu naturel en refusant la constitution de stocks qui entraveraient leurs libertés, les sociétés de croissance de l'âge industriel épuisent de manière intensive les territoires environnants pour accroître sans fin leur stocks matériels et idéels. Ces deux logiques de civilisation définissent deux types d'abondance. La première conçoit l'abondance en termes de qualité d'existence, à travers la disponibilité individuelle et la liberté collective, tandis que la seconde perçoit plutôt l'abondance comme une quantité d'artefacts, mis en réserve à des fins de prévoyance ou de satisfaction de l'existence.

La logique industrielle de thésaurisation peut prendre des formes variées en fonction des époques. Ainsi, dans l'Angleterre victorienne, une tradition « malthusienne », inquiète de l'épuisement des réserves naturelles, s'oppose à une tradition « cornucopienne », convaincue que la providence divine et « l'ingéniosité humaine » renouvelleront les ressources disponibles (Mathis 2020, p. 6). Au XX^e^ siècle, la politique énergétique des États-Unis est résolument orientée par le contrôle du « surplus d'énergie » sur le marché mondial alors que les pays ouest-européens et le Japon ont des velléités de réduction de leur consommation d'énergie pour améliorer leur autonomie énergétique (Gonzalez 2013, p. 6). Dans la France d'après 1945 néanmoins, les choix productivistes l'emportent systématiquement sur les choix autonomistes que ce soit pour le charbon, le pétrole, le nucléaire (Puiseux 1982), ou aujourd'hui, pour les énergies renouvelables.

Cet essai explore la logique d'abondance de la civilisation industrielle à travers le prisme de l'énergie. La perspective est spécifique dans la mesure où l'énergie n'est pas une simple quantité matérielle mais une médiation de flux et de stocks. Quelles sont les fonctions du stockage de l'énergie à l'époque contemporaine ? Quelles implications a-t-il sur l'organisation culturelle, écologique, économique et sociale des sociétés modernes ? Cet essai propose de répondre à ces deux questions.

Ce qui est intéressant en premier lieu est que le stockage de l'énergie est un problème concret que se posent les sociétés industrielles. C'est donc une forme que l'on peut identifier et suivre à travers l'espace et le temps contemporains. Son deuxième intérêt est que sa morphologie n'est pas immuable car ce problème n'est pas résolu. Le problème va et revient selon des modalités différentes d'existence sociale. Élément visible, nomade et déformable du régime technicien, le stockage de l'énergie est convoqué de manière récurrente pour fournir des solutions à des situations qui diffèrent par leurs composantes culturelles, économiques, écologiques, sociales, spirituelles, etc. La triple aptitude du problème à façonner le contemporain, à traverser les milieux et à se transformer fait du stockage de l'énergie une sonde adaptée à l'étude des sociétés humaines de l'âge industriel. Elle offre la possibilité d'étudier une culture technique contemporaine de manière incarnée et située, en action et variation. La succession des opérations, que le problème soit posé, résolu une fois, qu'il revienne transformé, reposé, résolu à nouveau, puis reformé encore, rapproche la technique de *L'Art poétique* défini par Nicolas Boileau en 1674 :

> Hâtez-vous lentement ; et, sans perdre courage,
> Vingt fois sur le métier remettez votre ouvrage,
> Polissez-le sans cesse et le repolissez.

La métaphore rapproche les arts du poète et du tisserand pour la similitude des efforts, patients, répétitifs et inachevés. L'image peut être reprise pour le stockage d'énergie à l'époque contemporaine. Le retour répété d'un problème, rectifié sans cesse et porté au niveau d'un art délicat, nous garde contre le tracé rétrospectif d'une ligne qui irait, en ligne droite, du XIXe au XXIe siècle. Au contraire, il superpose chaque nouvelle reconfiguration du problème à des héritages antérieurs et l'articule aux contextes de son époque. Il encre ainsi les spécificités du stockage d'énergie aux significations d'une époque et l'ancre aux pratiques techniciennes sur le temps long de la société industrielle. Malgré tout l'intérêt de ces subtilités, le problème du stockage de l'énergie n'a pas fait l'objet d'une étude spécifique d'histoire contemporaine.

Techniques, temporalités et sociétés contemporaines

La quatrième raison du choix du stockage de l'énergie touche à la diversité des temporalités impliquées. Par « temporalité », j'entends à la fois un processus temporel et une conscience du temps. Le stockage d'énergie permet de distinguer deux types de temporalité.

Le premier type relève de l'historicité. Il conçoit le temps comme une articulation entre des temporalités distinctes. François Hartog (2003, p. 37-38), partant des « articulations du passé, du présent et du futur », opposent ainsi des périodes où le temps est en « crise » et des périodes où le temps est en « régime ». Dans le premier cas, l'articulation entre passé, présent et futur n'offre plus que le doute, dans le second cas, elle est évidente sous la forme cohérente et figée d'un régime d'historicité. Une telle grille d'analyse est assez classique. Elle s'apparente à ce qu'a formalisé Thomas Kuhn (1962) par exemple en histoire des sciences : de longues périodes de développement routinier de « sciences normales » entrecoupées de brèves et contradictoires « révolutions scientifiques ». Pour l'époque contemporaine, Hartog distingue ainsi un « régime moderne » d'historicité et un « régime présentiste ». Le régime moderne s'ouvre avec la Révolution française et se ferme après la Deuxième Guerre mondiale. Il se caractérise par une « clé d'intelligibilité du monde [... où] l'avenir [...] éclaire le passé et le chemin de l'action » (Hartog 2013, p. 228). Dans le régime présentiste, en revanche, l'affaiblissement de la projection vers le futur met l'accent sur un présent fermé sur lui-même, où mémoire et patrimoine sont les deux principaux enjeux temporels de l'arène médiatique. Il me semble que le régime technicien complique ce bel agencement de régimes successifs. La science-fiction par exemple tend à imposer un triple jugement sur les temps de l'histoire : la péremption du passé, la nouveauté du présent, la transgression du futur. Une telle conception contribue à faire accepter un statu quo social [18].

Le second type de temporalité que permet d'appréhender le stockage de l'énergie relève, au contraire, d'un rythme social. L'expérience sociotechnique induit des rapports contraints et collectifs au temps. C'est ainsi que Lewis Mumford décrit la vie monastique du Moyen Âge qui a des conséquences sociales sur la vie contemporaine :

> Le monastère était le siège d'une vie parfaitement réglée. Un instrument permettant de marquer les heures à intervalles réguliers ou de rappeler au sonneur qu'il est temps de sonner était le produit

18. Je n'ai pas étayé de manière empirique une telle affirmation mais je m'inspire une nouvelle fois de mon métier d'enseignant. Je propose dans un master de physico-chimie de Nantes Université une unité d'enseignement intitulée « Arts et sciences au miroir des sociétés ». Chaque groupe d'étudiantes et d'étudiants analyse un film de science-fiction ou d'animation en dégageant les représentations de la société portées par ces univers artistiques. Chaque analyse doit développer plusieurs niveaux de structuration des relations humaines : rapports de pouvoir, relations au sacré et au religieux, questions de genre, divisions du travail, réflexions sur l'individu vis-à-vis du collectif, spécificités de l'humain vis-à-vis de la machine ou du cyborg, etc. La dimension transgressive de certains aspects technoscientifiques révèlent, par contraste, des invariants civilisationnels sur la famille, la mobilité (automobile et individuelle), la hiérarchie, etc. Le temps du futur est ainsi l'occasion de réaffirmer la structuration sociale du présent tout en dénonçant quelques archaïsmes en lien avec l'actualité médiatique du moment.

> inéluctable de cette vie. [... La] discipline [des Bénédictins] a mis fin à une forme de dilettante de travail et leurs grands travaux de génie civil ont peut-être surpassé les gloires guerrières. On n'altère donc pas les faits en suggérant que les monastères – qui, au nombre de 40 000, furent régis en même temps par l'ordre des bénédictins – contribuèrent à donner aux entreprises humaines le rythme régulier et collectif de la machine. La pendule ne marque pas seulement les heures, elle synchronise les actions humaines. (Mumford 1934, p. 37)

Ces rythmes collectifs sont incorporés à la vie sociale. Ils peuvent varier en fonction des époques, des groupes sociaux, etc. Ils sont aussi réappropriés et réinterprétés par les individus. Cette conscience individuelle du temps se construit en relation mais aussi en écart par rapport aux rythmes collectifs. Plus de treize siècles après la formulation de la stricte règle de Saint Benoît, une bourgeoise londonienne à l'intense vie intérieure, Clarissa Dalloway, dérègle ainsi la marche circulaire du temps et repeuple le décompte de la durée d'infimes miettes d'existence personnelle :

> [V]oici que l'autre horloge, l'horloge qui sonne toujours deux minutes après Big Ben, sonna en traînant et déversa plein de petits riens comme si Big Ben était parfaite dans sa majesté pour établir la loi, si solennelle, si juste, mais qu'elle devait se souvenir de quantité d'autres petites choses – Mrs Marsham, Ellie Henderson, des coupes pour les glaces – toutes sortes de petites choses entraient en flots, clapotaient et dansaient dans le sillage de ce coup solennel qui s'étalait comme une barre d'or sur la mer. [...] Volubile, agitée, l'horloge tardive retentit dans le sillage de Big Ben, déversant plein de petits riens. Battus, brisés par les assauts des charrettes, la brutalité des camions, l'avide progression de myriades d'hommes anguleux, de femmes se pavanant, les dômes et les flèches des bureaux et des hôpitaux (Woolf 1925, p. 147-149)

1.4.2 Lieux, réseaux, échelles et mondes de l'énergie

La cinquième et dernière raison du choix du sujet concerne la multiplicité des territoires impliqués et interconnectés. Le problème du stockage de l'énergie peut se poser dans un lieu isolé, maison, phare ou satellite, dans une usine de production d'électricité, au sein d'un territoire national ou à travers un réseau régional ou international d'énergie. Le concept d'« espace énergétique » est utile pour articuler ces différentes spatialités. Les géographes Gavin Bridge et Ludger Gailing (2020, p. 1040-1043) conçoivent un « espace énergétique » à partir de trois catégories d'espace – lieux, réseaux, échelles – qui introduisent des façons d'appréhender un territoire. Ces modes d'appréhension de l'espace sont complétés par des facteurs temporels : des contextes mêlant l'ancien et le nouveau et pouvant conduire à des effets d'accumulation dans un espace donné ; un processus de fabrication de l'espace par lui-même qui place le territoire dans un devenir. Un espace énergétique peut ainsi être défini comme la composition de systèmes énergétiques et de relations sociales à travers l'espace. Il dessine ainsi un monde habité et habitable. Mais, à travers la catégorie d'échelle, le concept d'espace énergétique attire également l'attention sur les rapports de force et de domination qui constituent n territoire. Le problème du stockage d'énergie ne fait pas exception. Il est travaillé par des relations interrégionales et internationales à l'époque contemporaine. Interrégionales pour l'essentiel au XIX^e^ siècle, les relations territoriales du stockage de l'énergie deviennent internationales au XX^e^ siècle : bilatérales entre pays voisins d'abord, puis de manière plus réticulaire par la suite jusqu'à former des ensembles planétaires aujourd'hui.

Je porterai une attention particulière à l'Europe de l'Ouest et à l'Amérique du Nord parce qu'elles exercent une hégémonie mondiale entendue comme une « domestication du changement social » à l'échelle de la planète

(Taylor 1996). Selon Immanuel Wallerstein (1974), ces deux sous-régions organisent le « système-monde moderne » selon une division inter-régionale et transnationale du travail plutôt qu'une logique internationale entre États souverains. Elles dominent par conséquent la consommation d'énergie mondiale même si leur poids relatif est en constante diminution depuis un siècle : 83 % en 1925, 68 % en 1950, 61 % en 1973, 51 % en 2003 (Lanthier 2012, p. 13), 34 % en 2019 (British Petroleum 2021, p. 11). Finalement, lorsque le poids relatif de l'occident diminue, c'est parce que leur modèle de société s'est imposé ailleurs. Ainsi, écrit Anthony Giddens (1990, p. 58), le « déclin de l'emprise occidentale sur le reste du monde ne résulte pas de l'amoindrissement de l'impact des institutions qui y ont fleuri, mais au contraire de leur généralisation ».

L'Europe de l'Ouest et l'Amérique du Nord donnent donc à voir des structurations et tendances profondes de la modernité industrielle à l'échelle planétaire. Elles construisent et défendent un monde « quadrillé » par les entreprises « de l'inventaire et de la conquête » des territoires et des populations (Pessis et al. 2013, p. 18). Elles s'imposent au reste du monde par un effet de « généralisation » hégémonique, analysé par Giddens (1990) et critiqué par Balandier (2004). Serge Latouche (1989, p. 8) parle quant à lui d'« occidentalisation du monde » pour rendre compte du « processus d'homogénéisation planétaire » à travers le « "rouleau compresseur" de l'uniformisation sous l'égide de l'Occident ». Balandier et Latouche insistent, en outre, sur les limites du processus de mondialisation en soulignant les résistances politiques, les crises économiques et les obstacles moraux à cette généralisation planétaire.

Considérer l'Europe de l'Ouest et l'Amérique du Nord permet également de distinguer les deux sous-régions et d'analyser leurs interdépendances économiques et culturelles. Par exemple, la France est traversée par une « américanomanie » à la fin du XIX^e^ siècle qui influence la manière dont elle construit son industrie électrique (Garçon 2003b, p. 41). À l'inverse, plus nous naviguons vers le temps présent, plus l'influence des territoires européens et américains se réduit à l'échelle de la planète au profit des économies asiatiques notamment.

1.4.3 Justification d'une période : 1850-2050

Liée aux temporalités de l'objet se pose, pour tout historien, la question des limites de la période d'étude. Où commencer ? La question est épineuse car tout phénomène historique est enchâssé dans des processus antérieurs. La fascination pour le pouvoir explicatif des origines, « cette idole de la tribu des historiens » à l'époque de Sainte-Beuve, Renan et Taine, s'est muée en « hantise des origines » avec l'école des Annales (Bloch 1949, p. 19-20). Le choix du début, pourtant, doit être justifié.

Les États-modernes se dotent d'un appareil administratif de type comptable au cours du XVIII^e^ siècle. Le siècle des Lumières constitue un pivot dans le temps long des sociétés humaines pour l'appréhension du qualitatif et du quantitatif. Dans « les sociétés médiévales, l'expression de la quantité [par les historiens] prend place dans un processus qui appréhende le réel sous l'angle de la qualité et des relations ». Si l'on renverse cette proposition générale de Mathieu Arnoux (2019, p. 4), on parvient a l'exact opposé pour caractériser les mondes contemporains : l'expression de la qualité (par les technologues) prend place dans un processus qui appréhende le réel sous l'angle de la quantité et de l'équation. Au contraire du Moyen Âge, la statistique et la prospective se sont imposées comme deux schèmes d'intelligibilité et d'opérativité centraux du régime technicien. La circulation et la généralisation de ces schèmes quantitatifs a une cause et une conséquence. La cause est la formation par les États européens d'une technocratie autonome dotée d'un rôle politique d'administration du social au cours de l'époque moderne (Belhoste et Chatzis 2007). La conséquence est la formation du régime technicien caractérisant les sociétés industrielles.

François Jarrige (2014, p. 14) identifie justement l'émergence de la notion de « modernité » au milieu du XIXe siècle. Il la « caractérise par l'aspiration au dépassement de toutes les limites, par l'agrandissement incessant de l'espace des possibles à travers l'appropriation croissante du monde par la technique ». Le domaine de l'énergie pointe également vers le milieu du XIXe siècle comme moment charnière. Durant la première moitié du siècle, le concept d'énergie est formalisé de manière mathématique et expérimentale (Balibar 1999). Selon la thermodynamique alors en construction, chaleur et travail sont deux variétés d'énergie. De la chaleur peut être convertie en travail, c'est le principe d'une machine à vapeur, et du travail en chaleur, lorsque une machine-outil s'échauffe en fonctionnant. Mais, la somme de chaleur et de travail se conserve lors des processus matériels. La conservation de l'énergie devient le premier principe de la thermodynamique. Ceci reconfigure complètement le domaine de l'énergie et le problème de son stockage. Le principe de conservation de l'énergie précise les possibilités de stockage de l'énergie sous forme de chaleur ou de travail. Un savant célèbre et éclectique de l'époque, William Thomson (1881, p. 376), affirme que nulle part « l'avancement des sciences [...] n'a été plus marqué que [pour] "la science de l'énergie" » sur la période 1831-1881 lors de la célébration des 50 ans de l'Association britannique pour l'avancement des sciences. La formalisation mathématique et expérimentale de l'énergie autour de 1850 offre une première porte d'entrée au problème du stockage de l'énergie.

La seconde justification touche au développement d'un moyen inédit de stockage d'énergie électrique – « les batteries secondaires » – à partir des travaux de Gustave Planté vers 1860. Elles sont « secondaires » par rapport aux batteries « primaires » de type Volta. Les batteries primaires, largement utilisées dans les réseaux télégraphiques depuis les années 1820, ne peuvent être rechargées alors que les secondaires permettent de stocker et déstocker de l'électricité. Les batteries secondaires seront intégrées par les ingénieurs-entrepreneurs à la construction des premiers réseaux électriques à partir des années 1870. L'intersection de ces deux séries causales – scientifique pour l'énergie et économique pour le stockage de l'électricité – justifie la période 1850-1880 comme début d'étude.

Cette justification relative à l'énergie rencontre des contextes politiques et économiques pointant vers les années 1870. Au niveau politique, l'année 1870 marque le début de la IIIe République en France. Ceci rend pertinentes de possibles comparaisons techno-politiques avec les États-Unis qui incarnent un modèle opposé de république : gouvernement centralisé en France ; gouvernement fédéral aux États-Unis. Au niveau économique, la décennie 1870 coïncide avec les débuts de ce que l'on nomme parfois la « deuxième révolution industrielle » (1870-1930), coincée entre une « première révolution industrielle » (1750-1850), caractérisée par la mécanisation du travail et l'usage croissant du charbon, et une « troisième révolution industrielle » (1940-1980), faisant des services le principal moteur de la richesse économique. Cette tripartition est bien acceptée en histoire économique (Caron 1997 ; Kander et al. 2014). Mais, elle présente plusieurs limites. Trop tranchée, la scansion en « révolutions » surestime l'importance des ruptures dans un processus continu d'industrialisation et de croissance durant le XIXe siècle. Elle fait se succéder des filières économiques qui sont parfois contemporaines et superposées ou, au contraire, rend synchrones des divisions sociales n'ayant pas les mêmes rythmes d'évolution. Son cadre d'étude se focalise sur l'Europe occidentale, couplée par la suite à l'Amérique du Nord.

Parler de « seconde industrialisation » permet de s'affranchir de ces conceptions trop tranchées tout en signalant trois mutations technico-économiques de la période 1870-1930. Premièrement, l'extension de trois nouvelles industries modifie l'ordre international : la chimie et la métallurgie renouvellent la production de matériaux et, de ce fait, reconfigurent le commerce mondial de matières premières ; l'automobile draine des réseaux intercontinentaux d'approvisionnement en hydrocarbures et transforme la géopolitique du système-

monde ; l'électricité modifie en profondeur les sociétés états-unienne (Hughes 1983) et européenne (Lagendijk 2008) aux niveaux culturels, économiques et sociaux. Deuxièmement, ces trois secteurs industriels – chimie, automobile, électricité – mettent en oeuvre de nouvelles organisations rationnelles de la production industrielle, respectivement : le génie chimique, le Fordisme et la construction de trusts financiers. Troisièmement, le milieu industriel promeut une nouvelle méthode d'investigation au sein des firmes industrielles : la recherche et le développement (R&D). Ce faisant, il fait émerger, avec l'appui d'États occidentaux de plus en plus interventionnistes, un nouveau régime de production de savoirs appelé « technosciences ». La R&D incarne, sur un long XX^e^ siècle, le couplage accru du théorique et du pratique et le primat de l'opératoire. Elle s'appuie sur des politiques d'enseignement et de recherche rapprochant les aspects théoriques et pratiques des sciences de la nature dans la deuxième moitié du XIX^e^ siècle. Deux fondations d'école marquent ce mouvement en France : l'École pratique des hautes études (EPHE), établie en 1868, sous l'impulsion du ministre de l'Instruction publique, Victor Duruy (Henriet 2018) [19] ; l'École municipale de physique et de chimie industrielle de la ville de Paris, fondée en 1882, par des savants alsaciens par imitation de l'enseignement supérieur germanique suite à la défaite française de 1870. Ce rapprochement des sciences de la nature et de l'ingénieur stimule l'augmentation de productivité. Les innovations scientifiques et techniques auraient induit selon les économistes une part prépondérante des gains de productivité au XX^e^ siècle, jusqu'à deux tiers des gains de productivité aux États-Unis sur la période 1900-1973 (Stiglitz 1999, p. 451).

Par ces trois mutations, la période 1870-1930 forme « un moment charnière » par la constitution de normes, de pratiques et d'institutions ayant des effets à long terme (Elster 1978, p. 180). Elle génère des phénomènes de « dépendance au sentier » du processus historique. Dans le cas de l'électricité par exemple, plusieurs groupes industriels formés sur la période 1870-1900 se perpétuent, à des reconfigurations financières près, jusqu'au XXI^e^ siècle : General Electric et Westinghouse aux États-Unis ; Siemens et RWE en Allemagne ; Schneider et Compagnie générale d'électricité en France. De même, les normes industrielles qui sont alors établies demeurent en vigueur aujourd'hui de part et d'autre de l'océan Atlantique : une tension de 110 volts et une fréquence de 60 hertz en Amérique du Nord ; entre 220 et 230 volts et 50 hertz en Europe de l'Ouest. La construction des systèmes électriques enchevêtre tellement d'intérêts sociotechniques que les nouveaux arrivants doivent se plier aux règles imposées par les firmes en place, chaque arrivant renforçant la robustesse de l'enchevêtrement. Plus généralement, la période 1880-1900 coïncide avec une mutation systémique de l'économie occidentale (Caron et F. Cardot 1991, p. 127).

Où clore la période d'étude ? Là non plus, il n'y pas d'évidence. Remarquons toutefois l'importance politique, économique et médiatique prise par le stockage de l'énergie dans le contexte actuel annonçant une « transition énergétique » au XXI^e^ siècle (Bouvier 2012a). L'écume du temps présent, à travers l'agitation incessante des actualités médiatiques, m'a influencé dans le choix du sujet. Les historiens n'échappent pas aux présents qu'ils habitent où ils puisent de nouveaux centres d'intérêt dont ils meublent les mondes passés. L'histoire demeure cette « science des hommes dans le temps et qui sans cesse a besoin d'unir l'étude des morts à celle des vivants » selon la belle formule de Marc Bloch (1949, p. 28). Intégrer le temps présent à cet essai est d'autant plus intéressant que la géopolitique de l'énergie est profondément modifiée depuis le dernier tiers du XX^e^ siècle : crises énergétiques et économiques des années 1970 ; fin de la guerre froide des années 1980 ; essor économique et politique des pays asiatiques, Japon, Corée et Chine notamment. Ceci redistribue les modalités de régulation internationale en direction de l'Asie depuis une cinquantaine d'années et remet en question certains rapports de domination autrefois favorables à l'Amérique et à l'Europe. Dans certains cas,

19. La deuxième section de l'EPHE en particulier, celle de physique et chimie, contribue à former des industriels en poste aux connaissances pratiques et théoriques de la recherche de l'époque (Boucard et Teissier 2018, p. 149-150).

le barycentre géopolitique traverse même le Pacifique, quitte Washington pour rejoindre Pékin comme dans le cas de la géopolitique du lithium ou des terres rares, considérés comme des « matériaux critiques » sur le marché international (Hache et al. 2019).

Le temps présent forme ainsi classiquement cet intervalle temporel où la mémoire et l'histoire d'une génération se confrontent. Néanmoins, notre temps présent possède une épaisseur singulière qui le fait glisser en permanence vers le futur. L'analyse des mondes hydrogène du chapitre 6 montre que l'horizon 2050 est devenu, au cours des années 2000, un ressort majeur des politiques énergétiques et environnementales des pays industrialisés. Les projections vers 2050 font déjà partie de nos motivations en acte et habitent littéralement nos imaginaires actuels (cf. 6.4). Ceci justifie d'élargir l'exploration du problème du stockage de l'énergie de trois décennies en direction des futurs possibles. Cette première justification, conjoncturelle, recouvre une deuxième justification, structurelle. Par les mécanismes de « dépendance au sentier », les choix d'aujourd'hui déterminent déjà en partie les mondes de demain que les acteurs en soient conscients (comme c'est souvent le cas aujourd'hui) ou non. En cela, les sciences humaines et sociales sont légitimes pour prendre part aux débats politiques de notre temps.

1.5 Problème d'historiens : agencer cohérences et contradictions

La période retenue couvre deux siècles, du milieu du XIX^e^ siècle au milieu du XXI^e^ siècle. Le temps long permet de saisir des permanences structurelles, des tendances lourdes, des évolutions lentes de la modernité industrielle. Mais, il s'agit également de ne pas trop lisser les singularités, les incohérences et les contradictions du processus historique. Réussir à agencer cohérences et contradictions dans le récit historique est un problème historiographique majeur.

1.5.1 Cohérences : tendances, systèmes, blocs et filières de l'énergie

Raymond Aron débute sa réflexion sur la société industrielle par une question posée par Alexis de Tocqueville et Karl Marx : Quelles conséquences du développement industriel sur l'évolution des inégalités économiques et sociales ? Leurs réponses diffèrent. Si « le fait majeur [est pour Tocqueville] l'effacement des distinctions [et] pour Marx le conflit entre les prolétaires et les entrepreneurs », il est, pour Aron, « le progrès de la productivité » (Aron 1962, p. 47-50). En effet, le phénomène est commun aux « deux modalités [du] genre » industriel : soviétique et occidentale. Il s'exprime également comme « la croissance des ressources pour la collectivité toute entière et par tête de la population ». Cette tendance à la croissance est un trait majeur de l'histoire de l'énergie en Europe et Amérique du Nord depuis le XIX^e^ siècle. Ce n'est pas un option téléologique *a priori* mais un bilan quantitatif *a posteriori*. En d'autres termes, la croissance de la production et de la consommation d'énergie est portée et organisée par les sociétés européennes et états-uniennes.

Jean-Claude Debeir, Jean-Paul Deléage et Daniel Hémery ont écrit *Une Histoire de l'énergie* pour saisir un phénomène dans le temps long, depuis l'Antiquité, à travers la considération de moments et territoires spécifiques. Ils cherchent à dépasser l'opposition entre histoire économique et histoire écologique de l'énergie en incluant « d'une part, les caractéristiques écologiques et technologiques des filières (évolution des sources, des convertisseurs et de leurs rendements) et, d'autre part, les structures sociales d'appropriation et de gestion de ces sources et convertisseurs » (Debeir et al. 1986, p. 25). Ils construisent leur problématique autour d'un concept intéressant, dérivé du système technique de Bertrand Gille : le « système énergétique ». Ils le définissent comme « la combinaison originale de diverses filières de convertisseurs qui se caractérisent par la mise en œuvre

des sources d'énergie déterminées et par leur interdépendance, à l'initiative et sous le contrôle de classes ou groupes sociaux, lesquels se développent et se renforcent sur la base de ce contrôle » (Debeir et al. 1986, p. 25).

Ce modèle est pratique pour saisir des tendances globales à travers la succession de systèmes énergétiques identifiables. Il facilite également les comparaisons entre territoires par l'identification d'éléments marquants : filières, convertisseurs, sources d'énergie, institutions de contrôle, etc. Sa simplicité fait sa force car il permet de réunir l'ensemble des acteurs de l'énergie selon un ensemble relativement cohérent et interdépendant. Il peut être subdivisée en sous-systèmes appelés « blocs de développement » (*develoment blocks*). Un bloc de développement est formé, selon les économistes, par une innovation majeure réorganisant en profondeur l'articulation entre administrations, entreprises, consommateurs et infrastructures (matérielles et financières). Il est utilisé par Astrid Kander, Paolo Malanima et Paul Warde (2014) pour structurer une histoire longue de l'énergie en Europe depuis le XVI^e^ siècle. Ces historiens économistes couplent les trois révolutions industrielles de l'époque contemporaine à l'essor de blocs de développement : un bloc vapeur-charbon-fer pour la première ; un bloc moteur à explosion-pétrole et un bloc électricité pour la deuxième ; un bloc technologie de l'information et de la communication pour la troisième (Kander et al. 2014, p. 13-16).

La simplicité du concept de système énergétique et sa subdivision en blocs de développement est également une source de faiblesse. Ce modèle tend à faire de l'énergie un donné universel des sociétés humaines en présupposant son existence dans le champ social, ses significations dans le champ culturel et ses usages dans le champ économique, d'une manière cohérente et identifiable. Or, la prise conscience d'un « système énergétique mondial » par les techniciens de l'énergie est récente. Elle se produit dans la deuxième moitié du XX^e^ siècle alors que le pétrole puis le gaz rejoignent le charbon comme principales sources d'énergie dans le monde (Haefele et Sassin 1970). Un technologue comme Samuel Klausner situe la structuration d'un premier système énergétique mondial dans les années 1970. Il montre que l'agrégation d'une variété de filières énergétiques (pétrole, gaz, charbon, matières fissiles, biomasse et matériaux) fait émerger un « système social de l'énergie » dans lequel les rapports politiques, notamment diplomatiques, prédominent sur les rapports économiques (Klausner 1979).

Un autre inconvénient de l'approche par les systèmes énergétiques est qu'elle surestime la cohérence de chaque société en isolant une logique spécifique à chaque système. La thèse d'Anaël Marrec sur l'*Histoire des énergies renouvelables en France (1880-1990)* montre les limites d'une approche centrée sur les systèmes énergétiques pour écrire l'histoire de l'énergie. D'une part, elle a analysé des hétérogénéités de la société industrielle du XX^e^ siècle en montrant l'émergence de filières inabouties et de sources d'énergie discrètes qui n'apparaissaient pas dans les bilans officiels. D'autre part, elle souligne l'importance des processus d'innovation et d'imagination, les essais et erreurs des projets techno-politiques (Marrec 2018a, p. 21). A. Marrec a été la première historienne à avoir mentionné et étudié le projet d'exploitation des forces naturelles durant les années 1920-1940. Son analyse montre la « complémentarité spatiale » des forces naturelles dans la politique de « mise en valeur » des territoires en France métropolitaine, et, entre la métropole et l'empire colonial (Marrec 2018a, p. 148). Une approche par les systèmes aurait ignoré la plupart de ces phénomènes puisque, jusqu'à la décennie 1970, les énergies renouvelables sont trop hétéroclites et trop volatiles pour faire système.

La notion de système énergétique est, de fait, très influencée par l'épisode des « chocs pétroliers ». La pensée par systèmes découpe le temps de l'énergie par des évolutions lentes séparées par des « crises » structurelles. Elle s'apparente à ce qu'a formalisé Thomas Kuhn (1962) en histoire des sciences : de longues périodes de développement lent de « sciences normales » séparées par des « révolutions scientifiques ». Ce schéma n'est valable ni dans le temps, ni dans l'espace. Ainsi, les historiens de l'énergie ont montré que, depuis l'époque moderne en Europe au moins, les sources d'énergie s'ajoutent plutôt qu'elles ne substituent les unes aux autres

au cours du temps. Yves Bouvier (2012b, p. 34-35) souligne deux tendances lourdes : l'« accumulation des énergies » sans que « pratiquement aucune énergie [ne connaisse] de déclin » à l'époque contemporaine ; la « sédimentation des enjeux » énergétiques par superposition, sans disparition, des structures anciennes. Dans le même esprit, Gérard Dubey et Pierre de Jouvancourt (2018, p. 50) présentent la succession d'âges énergétiques au cours de l'histoire comme un impensé contemporain alors que « les types de techniques et de structures sociales s'accumulent en s'articulant les unes aux autres, plutôt qu'elles ne se remplacent ou ne se substituent de manière linéaire et irréversible les unes aux autres ». L'articulation et l'accumulation d'ensembles énergétiques se jouent aussi à différentes échelles d'espace. Les économistes ont montré l'importance des structurations industrielles à l'échelle intermédiaire dite « méso ». D'une part, ils parlent de « symbioses industrielles » pour rendre compte de coopérations économiques entre filières industrielles au sein d'un territoire de taille intermédiaire organisé en termes politiques (Diemer 2016, p. 81-83). D'autre part, ils définissent le « district industriel » comme un territoire régulé, « centré sur une ou plusieurs grandes villes », spécialisé sur une filière industrielle, dont l'activité économique s'appuie sur une intense division du travail entre petites, moyennes et grosses entreprises et sur une « accumulation de savoir-faire » entre ces différentes instances (Lescure 2002, p. 8). L'échelle méso-économique d'une région énergétique prend place entre la micro-économie de la centrale électrique et la macro-économie des réseaux planétaires des énergies fossiles et nucléaires.

Une fois posées les forces et limites du concept de système énergétique, comment saisir les tendances lourdes du champ de l'énergie ? Cheminons du simple au complexe. Un politiste états-unien, George Gonzalez (2013, p. 13-27) base son analyse de la politique énergétique des États-Unis sur l'opposition binaire entre deux théories d'économie politique : 1°« la théorie de l'autonomie de l'État », dans laquelle administrateurs et fonctionnaires (*officials within government*) façonnent la politique de l'énergie ; 2°« la théorie des élites économiques », dans laquelle la formation de réseaux économiques – clubs, publications orientées, programmes d'éducation – influence la formulation de la politique énergétique du pays. La théorie des acteurs économiques a la faveur de Gonzalez pour expliquer la politique fédérale de l'énergie aux États-Unis de la deuxième moitié du XX^e^ siècle. À l'inverse, le « modèle français » de l'énergie est défini, selon Jean-Pierre Williot (2009, p. 38-39), par trois caractères en faveur d'une théorie de l'autonomie de l'État : son rôle centralisateur ; le souci d'une politique territoriale ; la place spécifique des entreprises nationales. Ces deux théories d'économie politique renvoient aux deuxième et troisième cercles de la décision de Pierre Muller. Il convient donc de les considérer comme des types idéaux dont les situations réelles sont composées à des degrés variables et dont les rapports de force varient en fonction des territoires et des époques.

Le mouvement général depuis 1850 montre une « emprise croissante de l'État sur l'économie », comme le souligne Jean-Noël Jeanneney (1984, p. 8), même si c'est « avec bien des sinusoïdes dans le rythme ». Dans ce mouvement d'ensemble, les filières économiques à réseaux, qu'ils soient de transport, de communication ou d'énergie, se caractérisent par une plus forte régulation de l'État par rapport à d'autres filières sans infrastructures lourdes. Ceci favorise une plus forte concentration économique sur un territoire donné. Ainsi, les économistes John Vickers et George Yarrow (1991, p. 111-112) identifient trois types de compagnies par rapport au processus de privatisation suivant des situations de compétition, monopole ou service public. Les auteurs distinguent, dans le deuxième type, des « monopoles naturels » comme la distribution électrique ou le transport, où le réseau joue un rôle central, et des « monopoles artificiels », entretenus par des décisions nationales comme les politiques douanières. Dans le cas d'un « monopole naturel », les coûts importants associés aux infrastructures de réseau requièrent un encadrement public des tarifs et des investissements mais n'imposent pas forcément une gestion publique (Marty 2007, p. 92). Dans le cas d'un « monopole artificiel », des situations

d'oligopoles sont possible comme pour les télécommunications ou les autoroutes. Le type monopolistique est, dans tous les cas, caractérisé par le fait que les États « gardent fréquemment des droits de contrôle, sous la forme de régulation » des territoires sur lesquels sont bâtis les réseaux (Vickers et Yarrow 1991, p. 112). Il s'agit d'une situation typique des « macro-systèmes techniques » (Gras 1997).

Les exemples sont nombreux. Ainsi, dans le contexte libéral des années 1900, « l'économie française [connaît] un mouvement d'étatisation, notamment dans les industries de réseaux [… afin] d'assumer les grands investissements nécessaires au développement économique. Il en était particulièrement ainsi dans le domaine électrique » (Didry et Marty 2016, p. 27). De même, le cas de la construction européenne illustre la même emprise du politique. Alors que, depuis les années 1950, le projet européen soutient une économie libérale, il intervient régulièrement dans le domaine énergétique que ce soit par la fondation d'une Communauté économique du charbon et de l'acier d'abord (1952-2002) ou, depuis le Traité de Maastricht (1992), par la mise en place de « réseaux trans-européens » de l'énergie. L'articulation permanente entre facteurs politiques et économiques dans le domaine de l'énergie s'incarne par le développement d'entreprises mixtes entre secteurs public et privé (société d'économie mixte, *consortium*) et entre acteurs privés (*joint venture*).

La formalisation d'un système énergétique mondial à partir des années 1970 conduit à identifier, au sein du système, plusieurs filières énergétiques : hydraulique, charbon, pétrole, gaz, nucléaire, éolien, solaire, marine, etc. Chaque filière énergétique est bientôt conçue en terme de « chaîne de valeur », c'est-à-dire, selon la théorie de l'économiste Michael Porter (1985), comme la suite de segments d'activité reliant les producteurs aux consommateurs et dont chaque segment augmente la valeur économique du produit par palier. Cette représentation linéaire est largement reprise, du fait de sa simplicité, par les techniciens et les technocrates de l'énergie. Ainsi, la filière électrique peut être décomposée en quatre ou cinq chaînons de valeur suivant les études qu'elles soient d'ordre administratif – production, transmission, distribution et fourniture (Ademe, Consultants et al. 2017, p. 40) – ou issues des sciences de l'ingénieur – combustible, génération, transmission, distribution et services (Chen et al. 2009, p. 293). Cette perspective technico-administrative fait du stockage de l'énergie un énième maillon de la chaîne de valeur. Or, le problème du stockage de l'énergie est transversal à l'ensemble des filières énergétiques déjà mentionnées. Il réfute donc le schéma linéaire et segmenté d'une chaîne de valeur par filière énergétique. Un tel schéma est également trop simple pour saisir la finesse des processus historiques au sein d'une seule filière. Durant la période 1880-1900 par exemple, l'industrie électrique est si mouvante et les acteurs si rapides à redéployer leurs activités qu'il est difficile de penser la filière comme une unique « chaîne de valeur » avec des maillons bien identifiables.

> En Allemagne, en Suisse, aux États-Unis, ce sont les producteurs des gros appareils électriques qui impulsent la formation d'un marché. [... En France] les acteurs principaux de la pièce ne furent pas toujours les mêmes. Dans un premier temps, les entreprises productrices et distributrices d'électricité s'organisèrent sur une base locale, quasi artisanale. Un système dispersé et éclaté fut mis en place, cette dispersion et cet éclatement étant d'ailleurs favorisés par la politique méfiante des autorités concédantes. Dans un second temps, sous la pression de contraintes techniques et financières de rentabilisation, un long processus de formation de réseaux locaux, puis régionaux, de concentration et de regroupement des entreprises autour de systèmes de production à plus grande échelle, à partir des dernières années du siècle. (Caron et F. Cardot 1991, p. 954).

1.5.2 Contradictions : multiplicités hétérogènes des acteurs, des lieux, des fonctions

Ce que montre la description précédente est la nécessité de considérer les acteurs dans leur diversité de tailles, de formes et d'intérêts. À l'heure actuelle, ces acteurs sont nommés, de manière générique, « opérateurs » de l'énergie. Un rapport administratif récent intitulé *Étude sur le potentiel du stockage d'énergies* en identifie plusieurs types : producteurs (conventionnels et intermittents), gestionnaires de réseaux de transport (tel le Réseau de transport d'électricité, RTE, filiale d'Électricité de France), gestionnaires de distribution (tel Électricité réseau distribution France, ERDF, créé en 2002, remplacé par Enedis depuis 2016, elle aussi filiale d'EDF), entreprises locales de distribution (ELD, qui comptent pour 5 % de l'électricité du territoire français, environ 150 ELD, restées indépendantes lors de la nationalisation d'EDF de 1946), consommateurs d'énergie (individuel, collectif, tertiaire, industriel), stockeurs indépendants. Nommer les acteurs de l'énergie masque déjà des choix politiques. Cela pose aussi une question historiographique. Une telle liste est-elle suffisante aux technologues, même pour une histoire immédiate ? Elle révèle la manière dont la pensée technocratique limite et oriente le champ de l'énergie pour l'administrer.

En a disparu l'État, pourtant acteur central du processus tout au long du XX^e^ siècle selon l'histoire économique de l'énergie en France (Beltran, Bouneau et al. 2009). Or, l'État agit via les systèmes législatifs et juridiques. Il mène une politique publique via ses ministères. Ses administrations techniques, telles la Commission de la houille bleue dans les années 1920 ou l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie aujourd'hui, évaluent le champ et, ce faisant, disent (et restreignent) les options politiques. Il encadre également la formation technicienne à travers des écoles d'ingénieurs dont les diplômés forment, par la suite, les corps de hauts fonctionnaires de l'État : Polytechnique, Mines, Centrale, etc. Ceci transfère, dans l'administration, des cultures techniques d'écoles. En outre, l'État articule différents organes de régulation dont la Commission technique des ententes sur la période 1953-1977, puis Autorité des ententes, et enfin Commission de régulation de l'énergie (CRE) joue un rôle central pour l'organisation énergétique nationale. À l'échelon inférieur, interviennent les collectivités territoriales sur la période 1850-2020 : municipalités, départements, régions. À l'échelon supérieur, l'Union européenne devient décisive et décisionnaire, à partir des années 1990, sur un nombre croissant de questions énergétiques : mise en concurrence, géopolitique, politique industrielle, intégration des réseaux de l'énergie (6.2.2).

François Caron (1991a, p. 113) organise l'ensemble de ces acteurs selon trois niveaux d'observation et d'analyse : « celui des établissements, niveau des techniques proprement dites, celui des entreprises, niveau de l'organisation, celui des réseaux d'entreprises enfin, qui est celui des pouvoirs ». Mais, la clarté de l'« analyse structurelle » ne doit pas faire illusion comme il le souligne lui-même. Chaque structure fait l'expérience d'« équilibres […] fragiles et éphémères » face au surgissement imprévus d'acteurs nouveaux, de produits inédits, d'aspirations incontrôlés, de dysfonctionnements systémiques, etc. (Caron 1991a, p. 127). Il y a « une dynamique de l'incertitude » dans le processus historique, qui doit être intégrée à l'histoire des techniques. Patrick Fridenson (2012, p. 13-16) distingue l'« opacité délibérée de certains dispositifs techniques », dans la stratégie de conservation des rapports de domination entre technocrates (dirigeants, ingénieurs) et techniciens (ouvriers qualifiés), d'une incertitude non voulue par les acteurs eux-mêmes. Il montre comment ce dernier cas multiplie les sociabilités en jeu : quartier, presse locale, presse spécialisée, sites internet, blogs, réseaux sociaux, conversations de bar doivent être décryptés pour écrire une histoire des technologies de l'information et de la communication. Porter l'attention sur les incertitudes renouvelle ainsi l'historiographie des techniques en soulignant la tension entre floraison (créativités) et normalisation (institutions et droit), la diversité de fonction des objets (des usages aux déchets par exemple) et le degré de proximité aux techniques (d'une consommation

passive à un détournement ou une maîtrise).

L'historiographie des techniques se renouvelle aussi grâce à l'histoire environnementale depuis plusieurs décennies. Céline Pessis, Sezin Topçu et Christophe Bonneuil (2013) attirent ainsi l'attention sur les « signaux faibles » pour écrire une *Autre histoire des « Trente Glorieuses »*. Ils montrent l'importance du recul historique pour déconstruire les visions dominantes et les rhétoriques de la nouveauté des luttes environnementales. « Rompant avec une histoire portant encore les vieilles œillères de la vision du monde des "modernisateurs/trices" comme avec un discours qui affirme la nouveauté de la réflexivité sur les risques et les limites de notre modèle de développement, ce livre propose une nouvelle histoire des décennies d'après-guerre en portant son attention sur les alertes et luttes environnementales, et plus généralement sur les signaux faibles de la critique des "dégâts du progrès" avant 1968. » (Pessis et al. 2013, p. 6). De quelques décennies à quelques siècles, Thomas Le Roux et Michel Letté (2013) remontent jusqu'au XVIII^e^ siècle pour souligner comment les « débordements industriels » posent problème aux sociétés industrialisées depuis trois siècles. Plus focalisé sur l'énergie, un ouvrage récent, *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, avance un programme de réhabilitation des incertitudes et des contestations contre la puissance. Les éditeurs du volume, François Jarrige et Alexis Vrignon (2020, p. 10), écrivent : « Au lieu d'une conquête et d'une domestication progressive de la puissance *via* des innovations technologiques merveilleuses, l'histoire de l'énergie fut aussi en permanence une histoire sociale et culturelle faite d'incertitudes, de doutes et de conflits à l'égard d'un processus qui n'eut rien de linéaire et d'inéluctable. » Ces publications collectives rendent compte d'une belle dynamique, et peut-être aussi d'une mode, en direction de l'histoire de l'énergie par les contestations sociales et politiques.

Mon approche est moins marquée par les signaux faibles des contestations de l'aménagement industriel et des luttes de l'énergie que ces ouvrages d'histoire environnementale. Ma sonde d'observation est plutôt située au cœur de la culture dominante. S'inscrit-elle pour autant dans la lignée de l'entreprise collective récente de l'*Histoire des sciences et des savoirs* publiée au Seuil sous la direction de Dominique Pestre ? Je ne le crois pas non plus. J'ai été frappé par deux différences à la lecture de l'introduction du tome 3, intitulé *Le siècle des technosciences (depuis 1914)*. Premièrement, cette introduction, coécrite par les deux directeurs de l'ouvrage, Christophe Bonneuil et Dominique Pestre fourmille d'éléments historiques et de concepts sociologiques constitutifs de mon habilitation à diriger des recherches. Elle identifie notamment dix « grands traits du siècle », que je trouve pertinents : guerres, États-nations, États-Unis, expansion industrielle, rêves technologiques, dégâts du progrès, espaces de savoirs, régulations croissantes, administration des populations, monde quadrillé (Bonneuil et Pestre 2015, p. 11-18). Les deux auteurs ont choisi d'accumuler ces tendances générales plutôt que de les entremêler. Ils gagnent en clarté ce qu'ils perdent en approche compréhensive et holiste. Les dix tendances ne fonctionnent, en effet, ni comme des situations précises (ce qui est en revanche le cas des chapitres de l'ouvrage collectif), ni comme un ensemble signifiant sur le temps long (à la manière du régime technicien). La deuxième différence avec mon travail tient à un moindre intérêt pour les technosciences elles-mêmes, qui sont prises comme un donné historiographique, non comme une variable à appréhender par la technologie, science humaine.

Avec ma sonde d'observation tripartite, je m'efforce de substituer, à l'opposition classique des récits (dominants) de la puissance et des récits (plus discrets) des contestations, une étude intégrée des versants industriels et sociaux de l'énergie. Pour agencer cohérences et contradictions dans le récit historique, je multiplie les niveaux d'analyse. Je contrebalance des formulations générales sur la modernité ou sur les sociétés industrielles capitalistes par des études de cas empiriques impliquant un petit nombre de personnages, des situations locales ou des textes méconnus. Ceci permet de contraster les tendances lourdes par des hétérogénéités

singulières mais aussi de montrer la construction du régime technicien par empilement de couches idéelles et matérielles depuis deux siècles. Je ne suis pas sûr d'argumenter de manière toujours juste et équilibrée par ce va-et-vient exploratoire. Mais, je suis convaincu de la pertinence d'un couplage nécessaire entre l'archéologie culturelle des imaginaires et l'économie matérielle des infrastructures pour saisir l'histoire et la sociologie des mondes contemporains et, éventuellement, réussir à se déprendre des fétiches industriel et capitaliste du temps présent.

1.5.3 Sonder la modernité technique : projets, affects et concepts

Le choix des acteurs, des lieux et des fonctions est essentiel pour insérer des hétérogénéités, des incertitudes, des contradictions et des disjonctions dans les strates cohérentes des tendances, des systèmes, des blocs et des filières de l'énergie. Je fais l'hypothèse (restrictive) que, dans la division contemporaine du travail, les professionnels de la technique, les experts, jouent un rôle déterminant dans la construction de la modernité technique. Même si évidemment ils ne sont pas les seuls, ils sont décisifs pour forger et pousser « un modèle qui se répand » dans le monde contemporain (Dockès et Rosier 1991, p. 204). Cette propension des experts à former et formuler le monde contemporain est sous-tendue par la problématique générale de Jean-Claude Thoenig (1987, p. 43) dans *L'Ère des technocrates* : « comment des techniciens se transforment en technocrates, réapproprient des enjeux urbains et organisationnels à la mesure d'une logique corporative, au point que leur ville devient notre ville et que la gestion de nos affaires se moule à travers les exigences de leur emprise ». À la manière du corps des Ponts et Chaussées donnant forme à la ville du XX^e^ siècle, la mainmise des experts à l'ère industrielle fait que *leur monde devient notre monde*. L'emprise de l'administration technique est d'autant plus forte que les sociétés contemporaines font société à travers l'État-nation (Giddens 1990, p. 65).

Une analogie peut être avancée entre les techniciens de l'époque contemporaine et les puritains de l'époque moderne. En important dans le monde séculier, l'ascétisme religieux du monde régulier des monastères médiévaux, les calvinistes ont contribué à forger « un système de vie » sanctifié par la poursuite du « travail sans relâche dans un métier » et l'augmentation indéfinie de capital (Weber 1905, p. 47, 128-130). Les effets de leur éthique sur la société moderne dépassent largement le périmètre des cercles calvinistes de l'époque. « Ordre lié aux conditions techniques et économiques de la production mécanique et machiniste qui détermine, avec une force irrésistible, le style de vie de l'ensemble des individus nés dans ce mécanisme – et pas seulement de ceux que concerne directement l'acquisition économique. » (Weber 1905, p. 223-224) Les professionnels de la technique, en raison de leur maîtrise technique, de leur fonction sociale et de leur situation professionnelle, ont de puissants effets sur le régime technicien. Leurs cultures professionnelles structurent si profondément les sociétés occidentales contemporaines que leurs schèmes d'intelligibilité, d'opérativité et de sensibilité sur le monde peuvent devenir conventionnel au fil des générations. La *culture technicienne* influence les façons de voir, d'habiter et de sentir les mondes contemporains.

Le suivi des professionnels de la technique fournit une sonde de la modernité industrielle. Cette perspective rejoint la méthode de Gabrielle Hecht pour analyser le programme nucléaire français. Avec le concept de « design technologique », elle entend « utiliser les artefacts technologiques comme des lentilles permettant de voir des questions historiques plus larges et de comprendre comment le processus de mise en forme de la technologie peut être également le processus de mise en forme de la politique, de la société et de la culture » (Hecht 1994, p. 657). La singularité de la politique nucléaire de la France parmi les États occidentaux, qui enregistre 80 % d'électricité nucléaire aujourd'hui, ne peut ainsi s'expliquer sans l'action technocratique déterminante du premier corps technique de France, celui des Mines (Thoenig 1987, p. 37).

La sonde tripartite des techniciens, technocrates et technologues joue un rôle similaire pour explorer la modernité technique. Elle rencontre la remarque faite par Cornelius Castoriadis que « La société n'est ni chose, ni sujet, ni idée » mais qu'elle articule ces trois dimensions (cité par Dominique Pécaud). En rassemblant les choses techniciennes, les sujets politiques et les idées technologiques, la sonde tripartite traverse l'ensemble de la société industrielle, des présidents de multinationales et chefs d'États aux ouvriers opérateurs et techniciens spécialisés, et d'appréhender les cohérences et les contradictions du processus historique. Pour la cohérence, j'ai choisi de suivre des acteurs dont la technique est le métier. Cette approche introduit un décalage du regard par rapport à la société. Dans le contexte actuel, un chercheur en sciences de l'ingénieur oppose ainsi deux imaginaires de l'hydrogène, l'un partagé par le « grand public », l'autre par la communauté technoscientifique : « pour un peu caricaturer, vis-à-vis du grand public, il y a effectivement cette promesse de la molécule d'eau [...] donc, c'est propre. [... l'hydrogène] est un mot qui ouvre des horizons d'un futur plutôt enviable. [...] et puis il y a un autre imaginaire [...] dans la communauté technique, scientifique, de l'ingénieur, qui est : "Qu'est-ce que c'est compliqué, quand même!" » (Auvity 2022, p. 8). À l'affichage politique d'un lissage « écologique » correspondent les tensions d'une écologie des pratiques « récalcitrante » (Teissier 2017a).

L'originalité de la sonde consiste à substituer à un dualisme classique une articulation tripartite où chacune des catégories socio-professionnelles a un rapport différencié à la technique. Les catégories de techniciens, technocrates et technologues traversent et travaillent les sociétés industrielles depuis le XIX^e^ siècle. Chacune est constitutive de la modernité technique à sa façon. Le sous-titre de l'essai, *Problème de techniciens, concept de technologues et désir de technocrates*, suggère que les techniciens s'efforcent de résoudre des problèmes techniques (manières d'agir), que les technologues se focalisent plutôt sur la définition de concepts de la sphère technique (manières de penser) et les technocrates développent des désirs de réorganisation des sphères industrielles notamment (manières de sentir).

La formulation se veut provocatrice. Elle est moins simple qu'elle n'y paraît. D'une part, chacune des trois catégories socio-professionnelles – techniciens, technologues, technocrates – est perméable aux deux autres. Chacune est mouvante, poreuse et relative aux deux autres catégories. Une même personne peut d'ailleurs fréquenter diverses catégories. Elle peut même trahir ce qui est communément attendu d'elle par son propre milieu professionnel [20]. D'autre part, chacune des trois manières – opération, conceptualisation, aspiration – requiert les deux autres. Cette interaction rappelle le concept d'« ingénieurs hétérogènes » utilisé par John Law (1987) pour dire que les ingénieurs combinent des éléments disparates d'ordre technique, social et économique pour bricoler des « réseaux embrouillés » (*messy networks*). Ainsi, la machine cesse d'être un donné technique pour devenir un construit social. La porosité et l'interpénétration constitueraient un problème historiographique si je prenais les trois catégories comme objets d'étude. Elles sont un avantage pour former une sonde exploratoire de la société contemporaine. Elles apportent trois manières d'entrer dans la modernité par référence à trois manières d'être vis-à-vis de la technique contemporaine : agir, penser et sentir. Cela fait apparaître des tendances générales, des cohérences spécifiques et des contradictions entre acteurs. Le nombre de catégories, trois, permet de dépasser les oppositions binaires tout en donnant une place aux singularités et

20. Les nombreux échanges que j'ai eus depuis 25 ans avec des techniciens et des technocrates (études universitaires, interviews de recherche, réunions de travail, relations personnelles, etc.) m'ont convaincu que nombre d'eux ne participent pas d'une manière enthousiaste au projet ponctuel ou au métier général pour lequel ils sont rémunérés. Tout en faisant leur travail de manière consciencieuse, certains ne peuvent s'empêcher – et ne s'empêchent pas – de mettre à distance critique le projet qui les emploie. Ils deviennent alors de remarquables technologues. À l'inverse, certains technologues endossant un esprit de corps, d'école ou de chapelle, défendent une approche normative ou techniciste des humanités. Je serais curieux de savoir si une analyse sociologique montre des corrélations significatives entre les critères socio-professionnels habituels et cette attitude que je trouve singulière à se démarquer de l'enrôlement institutionnel et collectif. Le hasard et la recherche ont, sans doute, encore à nous apprendre sur les psychologies individuelles des comportements sociaux.

aux divergences d'interprétation des processus historiques.

Les aspects psychologiques ne doivent pas être sous-estimés dans le régime technicien [21]. L'affection portée aux objets est à la base de la société de consommation, comme l'a montré Jean Baudrillard (1968) dans *Le Système des objets*, à propos de l'ameublement des classes moyennes des années 1950 et 1960. Mais, on peut aller plus loin encore que Baudrillard, en suivant François Dagognet. Dans *Éloge de l'objet : pour une philosophie de la marchandise*, il souligne que l'« objet est "un fait social total" » qui nécessite un décryptage en profondeur par le « philosophe-sémiologue » (Dagognet 1989, p. 40). Raisons et sentiments s'affrontent également chez les professionnels de la technique. Dans *Aramis ou l'amour des techniques*, Bruno Latour (1992) interprète l'abandon d'un projet de métro automatique dans le sud parisien par un revirement affectif de ses promoteurs, de l'enthousiasme des années 1970 au désamour des années 1980. Il présente ainsi avec humour son enquête sociologique comme « l'histoire amoureuse d'une machine ». C'est justement cet attachement quasi-amoureux d'ingénieurs et de techniciens à une innovation aéronautique que raconte Sophie Poirot-Delpech dans la *Biographie du CAUTRA*. Elle montre que ce système de régulation de la circulation aérienne (Coordinateur AUtomatique du conTRôle Aérien) « a résisté aux épreuves, non pas malgré la charge affective dont il a été périodiquement l'objet, mais grâce à cette charge » (Poirot-Delpech 1995, p. 17). Ces passions envers les techniques sont constitutives de l'histoire des techniques contemporaines car, même à l'heure de la concentration de puissance du XX^e^ siècle, technocrates et politiques restent animés par des émotions et des jugements de valeur dépendants d'affects. Leurs directions, formes et intensités changent en fonction de la position professionnelle et du rapport quotidien à la technique. Mais, quels que soient les acteurs historiques, le désir demeure. Il est enchâssé, agencé selon Gilles Deleuze, dans un tissu de percepts, affects et concepts. L'articulation entre les cultures professionnelles des techniciens, des technocrates et des technologues fournit ainsi une sonde adéquate pour appréhender l'enchevêtrement de ces trois aspects du social : le sensible, le moral et l'intelligible.

1.6 Problème épistémologique : faire dialoguer techniciens, technocrates et technologues

Les sciences humaines et sociales sont en permanence confrontées à la question de la pertinence de leurs catégories conceptuelles pour saisir la réalité sociale. Apprécier la robustesse de la sonde tripartite que j'ai défini implique de pouvoir s'assurer que les trois catégories – technicien, technocrate et technologue – résistent au temps long depuis le milieu du XIX^e^ siècle. C'est Pierre Lamard qui, une nouvelle fois, m'aidait à préciser ma pensée. Au fond, demandait-il, les ingénieurs du XIX^e^ siècle sont-ils les mêmes que ceux du XX^e^ siècle par leurs formations professionnelles, leurs identités sociales et leurs aspirations culturelles ? Malgré des ruptures et des approximations, il me semble qu'une certaine cohérence socio-professionnelle des techniciens, des technocrates et des technologues peut se défendre sur la période 1850-2020.

1.6.1 Un essai de définition des catégories

L'approche la plus assurée aurait été de s'arrimer aux entités institutionnalisées par les acteurs eux-mêmes : entité juridique, entreprise économique, catégorie professionnelle, institution officielle, etc. C'est ce qui se fait le plus souvent, parfois de manière inconsciente. Une méthode plus aventureuse consiste à saisir « un complexe

21. Pierre Lamard a attiré mon attention sur l'importance des aspects psychologiques et affectifs dans la construction sociale des techniques. Il soulignait, dans le même temps, la force des entreprises puissantes qui disposent des pouvoirs politiques et techniques (technocratiques) dans la construction sociale des techniques telles que la SNCF pour le TGV ou EDF pour la centralisation électrique.

de relations présentes dans la réalité historique » (Weber 1905, p. 43). C'est ce qui est fait en définissant le régime technicien comme « individu historique ». Entre ces deux voies s'intercalent d'autres façons de définir une catégorie socio-historique en sélectionnant des critères qualitatifs et quantitatifs. C'est dans cet espace qu'on trouve les notions lâches de techniciens, technocrates et technologues. Est-il possible de les définir de manière plus précise ? Si c'est le cas, ces définitions seront-elles suffisamment cohérentes sur la période 1850-2020 et sur les deux sous-régions concernées, Europe de l'Ouest et Amérique du Nord ? Regardons comment chaque notion passe l'épreuve de la catégorisation et résiste aux élargissements temporels et spatiaux.

Techniciens : opérations et manières d'agir

La notion de « technicien » recoupe les savoirs et savoir-faire des sciences de l'ingénieur et de la nature. Elle rassemble des professions comme technicien justement mais aussi ouvrier ou ingénieur en situation de production qu'elle soit artisanale ou industrielle. Les critères que je retiendrai pour qualifier un technicien sont au nombre de trois : sa formation technoscientifique, sa spécialisation professionnelle et un travail tourné vers l'opération. Il ne s'agit donc pas d'un groupe homogène mais d'une catégorie socio-professionnelle large.

Présente-t-elle une cohérence suffisante depuis 1850 ? Testons-la en suivant la filière électrique, qui présente un rôle central par rapport au problème du stockage de l'énergie. Le dernier tiers du XIX^e^ siècle correspond justement au moment de la professionnalisation d'« un milieu électricien ». Ceci prend la forme, aux États-Unis, d'une « culture de l'atelier machine » (*machine shop culture*) tournée vers l'invention d'objets et de machines électriques, à partir des années 1870, par des inventeurs-entrepreneurs comme Charles Williams, Thomas Edison, Graham Bell ou Moses Farmer (Millard 1990, §2). Le mouvement est similaire en Europe. En 1881, l'Exposition internationale de l'électricité de Paris révèle la spécialisation de la profession d'électricien et son importance économique et culturelle dans la société. Elle réunit près de 1 800 exposants et attire 900 000 visiteurs pendant les cent jours d'ouverture de l'exposition à l'été 1881. Elle est financée à hauteur de 200 000 francs par le ministère des Postes et Télégraphes et de 700 000 francs par 56 souscripteurs privés (Beltran et Carré 2016, §3).

La décennie 1880 est marquée par le déploiement des réseaux électriques pour les consommateurs des zones urbaines suite aux « premières » réussies de la technologie Siemens à Goldaming en Angleterre (1881) et d'Edison à New York (1882). En Angleterre, science et ingénierie de l'électricité se différencient durant la période 1870-1930. Christine MacLeod y a bien analysé l'essor des professions d'électriciens (entrepreneurs, inventeurs) de manière simultanée à l'implantation des filiales des grandes firmes industrielles allemandes et états-uniennes : Siemens, British Westinghouse, British Thomson-Houston (MacLeod 2012, p. 334). C'est en 1900-1901 que la General Electric établit un laboratoire de recherche qui donne un « nouveau rôle » professionnel aux scientifiques employés comme « chercheurs industriels » et non plus comme calculateurs, ingénieurs, inventeurs ou testeurs (G. Wise 1980, p. 408-409). C'est le début de la recherche et du développement (R&D) dans le secteur industriel. Dans le même temps, les États accompagnent les acteurs économiques par des subventions et par les premières régulations juridiques et professionnelles.

La formation d'un milieu électricien en Europe de l'Ouest et Amérique du Nord sur la période 1870-1900, puis son maintien au XX^e^ siècle par un effet de dépendance au sentier, témoignent d'une certaine cohérence de la catégorie « technicien » sur la période étudiée. La discussion précédente conduit à préciser ce qui distingue techniciens et technocrates. Quand le technicien prend le visage d'un ingénieur dimensionnant l'installation d'une usine hydroélectrique, le technocrate est l'administrateur de cette même centrale. Si le premier était dans un registre opératoire, le second agit en gestionnaire. Il décide des effectifs de la centrale, organise la

division du travail, planifie la maintenance des installations et du matériel et contrôle les bilans financiers et énergétiques. Henri Morsel (1991b, p. 774) interprète la structuration de l'électricité industrielle en France par des techniciens d'abord puis par des technocrates. Il distingue ainsi une première génération de techniciens, qu'il qualifie de « pionniers », sur la période 1880-1900, suivie d'une deuxième génération de « technocrates » sur la période 1900-1920. Les seconds « se distinguent surtout des précédents par leur formation, leurs traditions de corps, leur carrière passée de haut fonctionnaire et leurs qualités de gestionnaires ». Mais, le technocrate, s'il organise le travail et gère la production, n'est pas un marchand : il « prise moins l'argent que le pouvoir de décider ». C'est ce qui le distingue d'un commercial ou d'un financier.

Technocrates : gestions et manières de sentir

La « technocratie » est une réalité sociale en Amérique du Nord et en Europe de l'Ouest mais elle n'y a pas le même rythme, la même signification, les mêmes structures. Le mot, forgé aux États-Unis au début du XX^e^ siècle, n'est utilisé en Europe qu'après la Deuxième Guerre mondiale. Détaillons successivement les caractéristiques de la technocratie en France puis aux États-Unis.

En France, « la technocratie » se confond volontiers avec « les grands corps de l'État » fonctionnant comme des castes au sein de la République. C'est un milieu hautement hiérarchisé. Tout en haut se trouvent les hauts fonctionnaires en poste au Conseil d'État, à l'Inspection des Finances et à la Cour des Comptes, suivis de près par ceux du corps diplomatique, du corps préfectoral et du ministère des Finances (Thoenig 1987, p. 15). Cette élite de l'élite, plus administratrice que technicienne, domine les grands corps techniques, dans l'ordre symbolique : Mines, Ponts et Chaussées, Télécommunications, Armement, Génie rural, Eaux et Forêts. Ce corporatisme « à la française » fonde son assise sur quatre facteurs constitutifs : l'écrémage pour en faire partie ; l'essaimage dans les positions de pouvoir ; la distinction par le capital symbolique et social ; et, enfin, l'imitation comme figure de l'élite républicaine pour les tiers exclus de ces corps (Thoenig 1987, p. 14-25). Des passerelles relient cette technocratie d'administration à la bureaucratie des milieux économiques. Ainsi, dans les années 1970, environ « 40 % des patrons des 100 plus grandes entreprises françaises sont des cadres de la fonction publique et 1/8 est passé par l'Inspection des Finances et la Cour des Comptes » (Thoenig 1987, p. 31). Suivre les technocrates permet donc de circuler entre les champs du politique et de l'économique.

Les hiérarchies de classes peuvent évoluer au cours du temps. Ainsi, les normaliens perdent leur influence à la fin de la III^e^ République, les polytechniciens occupent une position dominante durant la première moitié du XX^e^ siècle tandis que les énarques prennent le pouvoir dans la deuxième moitié du XX^e^ siècle (Thoenig 1987, p. 14). Richard Kuisel (1981, p. 144-145), analysant le processus de modernisation de la France sur la période 1900-1960, définit les technocrates selon trois critères. Ils ont d'abord « une conception de la décision [selon laquelle] il y a toujours une "bonne solution", et une seule [qui se trouve à la portée des] experts ». Ils posent ensuite, « par une démarche très semblable à celle des libéraux dans leur célébration de la liberté économique [...] l'efficacité en tant que valeur ». Enfin, ils défendent que « le potentiel productif de la technologie contient la promesse d'une société d'abondance ». L'analyse de Kuisel peut être prolongée vers deux autres comportements fréquents des technocrates. La recherche de *la meilleure solution* est un geste récurrent des technocrates au XX^e^ siècle, conforme à leur désir d'optimiser les systèmes sociotechniques dont ils ont la charge.

Cette confiance dans l'optimisation favorise un optimisme collectif. C'est sans doute un trait partagé avec les techniciens tout au long de la période 1850-2050. Thomas Hughes (1989) parle d'un « enthousiasme technologique » pour caractériser les inventeurs, ingénieurs et industriels des États-Unis de la deuxième moitié du XIX^e^ siècle. Leur attitude est là encore marquée par une proximité avec le sacré. « Il est intéressant de noter

qu'étymologiquement, le mot "enthousiasme" signifie "inspiration par un dieu", qualité qui était reconnue à la pythie et aux prophètes dictant aux hommes leur destin. » (Durance 2008, p. 21-22). La remarque de Philippe Durance est d'autant plus pertinente qu'elle est formulée à propos de l'une des « six vertus fondamentales » de la prospective selon Gaston Berger dans les années 1950. À la même époque, les milieux mécaniciens construisant des éoliennes en Amérique du Nord et en Europe de l'Ouest adhèrent, selon Matthias Heymann (1998, p. 666-670), à un style technologique marqué par « un excès d'ambition et de confiance dans les sciences et les techniques » favorisant une « démesure technologique ». Jean Brun parlait quant à lui d'un « optimisme sous-critique » des sociétés contemporaines (Cérézuelle 2011, p. 365). L'optimisme et la confiance dans les technosciences sont de puissants ressorts politiques pour construire l'économie de la promesse depuis XIXe siècle. Lors de sa soutenance d'habilitation à diriger des recherches au Centre François Viète en juin 2022, Hervé Ferrière (2022) rappelait la maxime célèbre selon laquelle « Nous ne croyons pas ce que nous savons » pour expliquer le refus général de voir comme un problème écologique les pollutions marines générées par l'industrialisation de la planète, pourtant bien connues des savants et dénoncées par des militants depuis deux siècles. Il me semble qu'une telle apathie collective rend compte d'une part d'une colonisation des imaginaires par la culture technicienne (optimiste) et d'autre part d'une régulation des oppositions politiques par des décisions administratives. Ce sont les versants idéel et matériel de l'emprise du régime technicien sur les mondes contemporains.

Une telle économie de la promesse se renforce sans doute avec la mondialisation néo-libérale depuis les années 1990. Evgeny Morozov (2014) a forgé l'expression « solutionnisme technologique » pour nommer la manière quasi-obsessionnelle par laquelle les contemporains de l'internet en appellent aux systèmes électroniques pour résoudre tous les problèmes de société. En France, le premier cercle de la décision semble particulièrement marqué par l'optimisme technoscientifique, à travers la figures de présidents de la République comme Nicolas Sarkozy ou Emmanuel Macron. En octobre 2021, le journaliste Stéphane Foucart (2021) résumait bien cette posture technocratique dans une chronique du quotidien national *Le Monde* : « Pour Emmanuel Macron, la transition écologique est avant tout une transition technologique ». En d'autres termes, l'actuel président de la République française « mise, lui aussi, face au défi climatique, sur d'hypothétiques révolutions technologiques plutôt que sur des évolutions sociales et culturelles ». Le journaliste du *Monde*, spécialiste des questions écologiques, a choisi le bon verbe : « miser ». Le jeu politique de l'écologie ressemble à une roulette russe où la balle ne tue jamais symboliquement le joueur, mais affecte matériellement et durablement le milieu environnant. La confiance dans la technologie matérielle fait écho à un autre trait caractéristique des technocrates : un sentiment de légitimité à pouvoir parler de ce qui dépasse le cadre de leur expertise. Cette absence de besoin de se justifier est caractéristique d'un groupe dominant en société [22]. La transmission au reste de la société de la confiance des experts dans la technologie

La catégorie « technocrate » est-elle justifiée pour la France sur la période 1850-2050 ? Bruno Belhoste et Konstantinos Chatzis (2007, p. 211) couple l'essor de la technocratie en France à la Révolution. Ils montrent la structuration de cette élite savante durant la première moitié du XIXe siècle autour de l'École polytechnique. La technocratie prend la forme d'un « univers professionnel » relativement autonome et cohérent. En lien avec la doctrine saint-simonienne, elle est caractérisée par une logique hiérarchique, un idéal de rationalisation et la prédominance des savoirs mathématisés, dont la mécanique est l'idéal-type (Belhoste et Chatzis 2007,

22. Je voudrais rendre à César ce qui est à Hercule. L'idée qu'un « dominant » n'a pas besoin de se justifier en société a été exprimée de manière limpide par mon camarade de laboratoire et compagnon d'habilitation à diriger des recherches, Hervé Ferrière, lors de sa soutenance d'habilitation, à Nantes Université, le 7 juin 2022. Il évoquait alors les savants et ingénieurs effectuant *Le treizième travail d'Hercule. Pour une histoire pointilliste des savoirs sur la mer et les pollutions pétrolières (1816-1907)* (Ferrière 2022).

p. 216-219). Ces trois caractéristiques sont supposées réduire l'incertitude dans la résolution des problèmes d'ingénierie. L'élite technocratique participe alors aussi à la construction des savoirs sur la nature au moment de l'essor de la physique mathématique autour de Pierre-Simon de Laplace à l'École polytechnique (Kuhn 1975, p. 992-995). L'étude de la chaleur est tout à fait significative de la porosité entre les milieux des administrateurs et des savants. Deux ouvrages majeurs sur la chaleur sont écrits par deux anciens polytechniciens au début des années 1820 : la *Théorie analytique de la chaleur* (1822) de Joseph Fourier, disciple de Laplace ; les *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (1824) de Sadi Carnot, fils de Lazare, directeur de l'École polytechnique. Le milieu du XIX^e^ siècle constitue un moment charnière pour la technocratie française, qui abandonne ses prétentions scientifiques pour se focaliser sur la seule gestion des affaires publiques (Belhoste et Chatzis 2007, p. 221-222).

Cette première forme de technocratie n'est pas très éloignée de la caractérisation qu'en fait Richard Kuisel pour la période 1900-1960. La technocratie forme un milieu autonome, gestionnaire et dominant. Elle partage un certain nombre de valeurs : il existe une meilleure solution à un problème sociotechnique ; cette bonne solution est à chercher du côté de l'efficacité technologique ; elle favorise une société d'abondance. Certes, cette deuxième forme de technocratie, à un siècle de distance, est plus transversale que le milieu polytechnicien. C'est ce que suggèrent la carrière des trois principaux ministres qui conduisent la politique industrielle de la France durant la Première Guerre mondiale : Albert Thomas, normalien en histoire, et Louis Loucheur, polytechnicien, sont successivement ministres de la Reconstruction industrielle tandis qu'Étienne Clémentel, licencié en droit, est ministre du Commerce et de l'Industrie de 1915 à 1919 (Kuisel 1981, p. 71-76). Qu'en est-il de la période 1850-1900 entre ces deux moments ? Le poids des grandes écoles d'ingénieurs s'accroît dans la technocratie aux dépens des diplômés des universités et des humanités. C'est une tendance de la filière électrique française sur la période 1880-1920. Sur la période 1880-1900 d'essor industriel, les inventeurs et les entrepreneurs forment l'élite du milieu technicien alors qu'à la génération suivante, 1900-1920, ce sont des diplômés de l'École polytechnique et des Ponts et Chaussées qui fournissent les cadres des principaux groupes électriciens français (Morsel 1991b, p. 774). Que dire, enfin, de la période suivant la modernisation de la France depuis le milieu du XX^e^ siècle ?L'influence technocratique est renforcée dans le secteur électrique par la nationalisation du marché et la formation d'Électricité de France en 1946. Les ingénieurs des grands corps de l'État sont ensuite rejoints, à partir des années 1950, par les diplômés de la nouvelle École nationale d'administration (ENA). Le contexte français est ainsi soumis à une *technostructure* qui impose sa culture technicienne aux processus politiques et économiques de la décision. « La caste des élites [...] arrive à créer un espace d'action qu'elle s'approprie, à la tête de plusieurs secteurs, et qu'elle gère de manière autonome, substituant ses critères, ses modes de fonctionnement, ses normes aux processus de décision, aux milieux, aux principes qui, du suffrage universel en politique aux actionnaires dans l'entreprise, sont censés en théorie la contrôler. » (Thoenig 1987, p. 25-26).

Aux États-Unis, l'économiste hétérodoxe, John Kenneth Galbraith, forge le concept de « technostructure » pour décrire la formation d'un *Nouvel État industriel* après la Seconde Guerre mondiale. La technostructure, force dirigeante et structurante de l'économie contemporaine, n'est plus « l'entrepreneur » individuel mais « une entité collective et imparfaitement définie [... qui] englobe » les directions au cœur des entreprises ainsi que « tous ceux qui apportent des connaissances spécialisées, du talent, ou de l'expérience aux groupes de prise de décision » (Galbraith 1967, p. 82). Le transfert partiel de pouvoir des financiers aux techniciens s'opère suite au krach boursier de 1929 (Kuisel 1981, p. 144-145). Il est amplifié par l'intervention grandissante de l'État fédéral comme régulateur de l'économie nationale. Le principal levier réside dans les budgets militaires, qui sont multipliés par 50 entre 1930 et 1965, de un à cinquante milliards (Galbraith 1967, p. 235-236). La

reconfiguration du « système économique américain » assoit l'hégémonie des grands groupes privés soutenue par les subventions et les politiques de l'État fédéral. Durant les années 1960, « [les] cinq cents plus grandes sociétés produisent plus de la moitié de tous les biens et services disponibles chaque année aux États-Unis » (Galbraith 1967, p. 14). Ceci a pour cause et pour conséquence la mise en œuvre de « la technologie et la planification modernes ». En effet, la taille critique des grandes sociétés leur assure « le contrôle des approvisionnements et de la demande, la libre disposition d'un capital abondant et la minimisation des risques » (Galbraith 1967, p. 87). Le même effet d'échelle joue pour l'État fédéral. La technostructure désigne, pour Galbraith, une nouvelle élite technicienne qui domine autant les ministères et les administrations fédérales que les grandes entreprises industrielles et de service.

L'étude de Pap Ndiaye (2001) sur les relations entre industries, universités et État fédéral à travers l'histoire de la société Du Pont de Nemours montre une même emprise croissante des ingénieurs sur la société états-unienne au cours de l'époque contemporaine [23]. Cette entreprise chimique a été créée en 1802 à Wilmington, dans l'état du Delaware, par Éleuthère Irénée du Pont de Nemours. Huguenot français, émigré aux États-Unis parce que régicide, du Pont de Nemours a été formé à la chimie par Antoine-Laurent de Lavoisier et l'a pratiquée pour contribuer à l'effort de guerre de la France durant la période révolutionnaire. Il oriente son entreprise vers la production empirique de poudre en essayant de prévenir au maximum les accidents et explosions lors de la production. L'entreprise prospère au XIX^e^ siècle grâce aux commandes militaires de l'État, qui mène une succession de « guerres interminables » impérialistes pour étendre le territoire fédéral au détriment du Mexique, de la Californie et des peuples indiens (Zinn 2002, 16, §8). Elle diversifie ses productions et rationalise son organisation durant la période 1880-1930 par le recrutement d'ingénieurs formés au « génie chimique » (*chemical engineering*) dans un établissement technologique alors en plein essor : le Massachusetts Institute of Technology (MIT) de Boston. Le génie chimique s'avère si efficace pour améliorer les rendements et les cadences de la production des industries chimiques qu'il contribue, sur la période 1920-1960, à l'extension des productions militaires de poudres, d'explosifs et de nouvelles armes (gaz de combat, bombes atomiques) et à la création d'une filière plastique destinée à la société de consommation. Ainsi, 20 % des ingénieurs formés aux États-Unis sont des ingénieurs chimistes durant les années 1930, le plus fort contingent. Ce que suggère également, l'étude de Pap Ndiaye, est que l'essor d'une nouvelle filière industrielle induit la valorisation d'un nouveau type d'ingénieur sur la période 1880-1960 : génie mécanique d'abord, puis électrique, puis chimique et enfin aéronautique. Malgré ces fluctuations, les ingénieurs s'imposent (comme technocrates) dans la gestion et l'organisation des sociétés industrielles au cours du XX^e^ siècle à travers leur expertise en R&D notamment.

La prédominance des ingénieurs est infléchie en Europe de l'Ouest et Amérique du Nord, à partir des années 1960, par plusieurs phénomènes culturels, politiques et économiques : remise en cause de l'expertise et mouvements écologistes ; financiarisation de l'économie, à partir des années 1970 (Pestre 2003, p. 77-118) ; disparition du bloc soviétique à la fin des années 1980 ; crises financières des années 2000. Ceci induit une perte relative de pouvoir des élites techniciennes au profit des élites financières et un renforcement du pouvoir managérial dans le domaine industriel [24]. La technostructure se transforme en incorporant plus de

23. Le paragraphe qui suit est basé sur l'ouvrage issu de la thèse de doctorat de Pap Ndiaye (2001) : *Du nylon et des bombes : Du Pont de Nemours, le marché et l'Etat américain, 1900-1970*. Cet ouvrage est un modèle du genre : précis dans ses sources, clair dans ses méthodes et présupposés et convaincant dans ses conclusions. Je l'ai adapté en séance de cours que j'enseigne depuis une dizaine d'années à l'université de Nantes à des étudiants de licence et de master.

24. Pour l'industrie des télécommunications, ce transfert de pouvoir du milieu technicien vers les milieux financier et managérial se produit au moment de l'éclatement de la bulle spéculative d'internet en mars 2000. Des transnationales comme AT&T ferment (ou réduisent fortement) leurs centres de R&D aux États-Unis et une partie des chercheurs licenciés rejoignent les universités (Lucas 2005, p. 14-15). J'ai rencontré ce phénomène dans le domaine de la science des matériaux à travers un cas de créativité sous contrainte à l'université de Rennes : le laboratoire de chimie du solide de Jacques Lucas à Rennes a fabriqué des « verres exotiques » pour le marché

capitalisation boursière et de management des entreprises. Alors que les sociétés industrielles deviennent des sociétés « programmées » pour Alain Touraine, la technostructure enrôle les sciences humaines et sociales pour construire toute une « ingénierie du social » au service du projet libéral et managérial. Daniel Cérézuelle (2011, p. 232) souligne la diversité des domaines d'activité concernés par ces transformations : « les sciences de l'éducation, le travail social, le marketing, jusqu'au droit, aux sciences du management, la macroéconomie normative, la stratégie militaire et la diplomatie ». Toutes néanmoins adhèrent à « l'une des conditions de la bonne gouvernance : l'efficacité ». Les institutions de l'Union européenne notamment donnent une place réduite au Parlement dans la gestion de l'Union et structurent, au contraire, les cercles de la décision par une multitude de rouages technocratiques.

L'analyse précédente atteste d'une forme technocratique de gestion politique aux États-Unis et en France sur la période 1850-2020 (et sans doute sur la période 2020-2050). Elle accrédite la pertinence de la catégorie « technocrate » comme sonde d'observation des sociétés industrielles. Elle montre néanmoins que la « technocratie » peut varier d'une institution à l'autre. L'Ademe, marquée par une orientation écologique, ne partage pas les choix extractivistes et nucléaires d'Électricité de France. Les différences opèrent également d'un territoire à l'autre. Le corporatisme « à la française » est plus administratif et moins industriel que celui de la « technostructure » des 500 plus grandes entreprises aux États-Unis. La technocratie varie aussi dans le temps en fonction de contextes économiques et sociaux. Le cas de la France suggère que les rapports entre les grands corps de fonctionnaires et l'État ne cessent de se reconfigurer sur l'ensemble de la période, de l'ordre libéral de la fin du XIX^e^ siècle à l'État-providence du premier XX^e^ siècle puis au néo-libéralisme à la fin du XX^e^ siècle. Ainsi, si c'est en permanence que la technocratie « irradie le corps social à partir des cadres dirigeants et supérieurs des appareils administratifs », ses caractéristiques d'écrémage, d'essaimage, de distinction et d'élitisme peuvent varier durant la période 1850-2020 (Thoenig 1987, p. 312).

L'un des moments de la période, appelé « post-modernité », place justement la science et la technique sous les feux de la rampe et les experts sous les tirs de la critique pour l'importance de leur rôle politique en démocratie. La post-modernité, qui coïncide avec une remise en cause des certitudes scientifiques et du progrès technologique à partir des années 1970, suscite de multiples interprétations. À Bath (Harry Collins), Édimbourg (David Bloor, Barry Barnes) et Cornell (Trevor Pinch), un groupe de sociologues relativise le savoir des experts scientifiques et milite en faveur d'une restriction de leurs pouvoirs dans la démocratie technique. À Paris, le philosophe Jean-François Lyotard (1979) conceptualise, quant à lui, « la condition postmoderne » comme la fin des récits englobant et totalisant l'histoire humaine et, par là-même, la perte de sens dans les sociétés postmodernes. À Londres, le sociologue Anthony Giddens explique que les espoirs de la modernité portés par les Lumières et leur foi dans la rationalité ont été contredits pour quatre raisons : « les défauts de conception » des systèmes sociaux et naturels ; « l'erreur humaine » ; « les conséquences imprévues » du processus historique ; « la réflexivité ou la circularité du savoir social » (Giddens 1990, p. 157-159).

Ainsi, les promesses d'« une société d'abondance » défendues par les technocrates héritiers de la confiance des Lumières dans la rationalité sont remises en question. Une telle déconstruction des valeurs techniciennes fait passer la technique entre les mains des technologues.

Technologues : questions et manières de penser

La notion de technologie est ambiguë. Dérivée de l'anglais *technology* au XX^e^ siècle, elle peut désigner un ensemble d'objets et de machines reliés entre eux en vue d'opérations concrètes. Ce premier sens, critiqué

international des fibres optiques pour le réseau internet (Teissier 2017b, p. 140-141).

par Leo Marx, retire l'humain de la technique et dénie à la technique sa capacité de médiatrice des relations humaines (Loeve et Deldicque 2018, p. 224-225). En d'autre termes, il gomme la technicité de la technique. Qualifions ce premier sens de *technologie matérielle*.

Un deuxième sens, plus ancien, conçoit la technologie comme un discours sur les techniques. À travers une archéologie des « commencements de la technologie », Jacques Guillerme et Jan Sebestik (1966, p. 1) exhument « la constitution d'un discours sur les opérations techniques » dans l'Allemagne du XVIII^e siècle. Ils identifient trois grandes orientations du discours technologique : scientifique, par la formulation de classifications et nomenclatures techniques ; politique, par le « règlement de l'activité technique dans la société » ; social, par la valeur symbolique octroyée aux techniques selon les groupes concernés (Guillerme et Sebestik 1966, p. 69). Pierre Lamard et Yves-Claude Lequin soulignent très justement la dimension épistémologique de la technologie. « Longtemps confondu avec la démarche technique, la réflexion technologique mérite d'abord un cheminement épistémologique, avant d'aborder ses rapports [sociaux] avec l'enseignement universitaire français » écrivent-ils en introduction de *La technologie entre à l'université* (Lamard et Lequin 2005, p. 21). Ils montrent ainsi que la technologie peut être transmise au corps social de manière spécifique à travers des universités de technologie par exemple. Mais, la circulation de la technologie peut être plus diffuse. Le Conservatoire national des arts et métiers, fondé la même année que l'École polytechnique, « conçoit [et transmet] un "science industrielle" à l'intention des entrepreneurs, qu'il nomme "technonomie" » (Lamard et Lequin 2005, p. 32). Lamard et Lequin (2017, p. 173) insistent la dimension politique, voire idéologique, de la technologie discursive. Ils la voient, quant à eux, comme un projet émancipateur au sein du régime technicien. La technologie est alors « moins un procédé ou un objet qu'un objectif et une représentation » .

Guillerme et Sebestik (1966, p. 2) soutiennent que la *technologie discursive* se disperserait au milieu du XIX^e siècle par une multiplication de « savoirs techniques spécialisés et parcellaires » répondant à la notion vague de « science appliquée » promue par les positivistes. Elle réapparaîtrait ensuite au début du XX^e siècle en anthropologie autour de Marcel Mauss pour la France. Une telle périodisation mériterait d'être nuancée aujourd'hui par une nouvelle étude prenant la suite des travaux de Guillerme et Sebestik. En effet, il est singulier, compte-tenu de leur conclusion, de voir publiée à Paris, de 1839 à 1897, un mensuel professionnel intitulé *Le Technologiste ou Archives des progrès de l'industrie française et étrangère*[25]. Georges Haudricourt (1987, p. 5) reconnaît à Mauss, qu'il considère comme son mentor (avec Marc Bloch), d'avoir « donné sa place à la technologie dans les sciences humaines ». On lui doit, résume-t-il en 1973 :

> la distinction, dans les sciences ethnologiques, d'une discipline nommée « technologie », qui est l'étude de l'activité matérielle des populations, c'est-à-dire leur façon de chasser, de pêcher, de cultiver, de s'habiller, de se loger, de se nourrir [ainsi que les] « techniques du corps » toutes les habitudes musculaires socialement acquises : façons de marcher, de s'asseoir, de dormir, de nager, de courir... (Haudricourt 1987, p. 307)

Haudricourt, formé aux sciences biologiques, pousse plus loin que son mentor l'ambition naturaliste. Dans *La Technologie science humaine*, il propose de prendre l'histoire naturelle comme modèle pour établir des lois de la technologie. « La classification naturelle des objets que tente d'établir le technologue sera de la même sorte

25. La revue publiée par la Librairie encyclopédique de Roret a été numérisée et mise en ligne en 2019 par le Conservatoire numérique des Arts et Métiers. Elle est mensuelle sauf durant une courte période (1876-1880) durant laquelle elle devient hebdomadaire. Elle s'adresse « aux manufacturiers, aux fabricants, aux chefs d'ateliers, aux ingénieurs, aux mécaniciens, aux artistes, aux ouvriers, et à toutes les personnes qui s'occupent d'arts industriels ». Elle a été dirigée successivement par François Malepeyre puis Louis Lockert. *Le Technologiste* pourrait servir de corpus de base à un mémoire original d'histoire et d'anthropologie des techniques dans la France du XIX^e siècle.

que la classification naturelle que tente d'établir le biologiste, c'est une classification généalogique qui doit rendre compte de la parenté réelle historique. » (Haudricourt 1964, p. 31) Le transfert disciplinaire est justifié par Haudricourt par la similitude des aspects nomologique et historique de la biologie et de la technologie.

L'approche généalogique des techniques est retravaillée par André Leroi-Gourhan et Gilbert Simondon. Leur concept de « lignée technique » favorise une conception diachronique des techniques. Il peut conduire à une approche « évolutionniste » en anthropologie et une approche « mémorielle » en histoire à travers la construction d'un cheminement *a posteriori* vers le présent. La forme de la mémoire collective peut changer en fonction des domaines. On voit se dessiner des lignées de « grands hommes » dans la mémoire de l'énergie solaire, des miroirs ardents d'Antoine Lavoisier aux murs solaires de Félix Trombe, et des lignées de « grandes machines » dans la mémoire collective de l'énergie éolienne, des moulins à vent « hollandais » du XVIII^e^ siècle aux aérogénérateurs danois et états-uniens du début du XX^e^ siècle jusqu'aux « champs éoliens » terrestres et *off-shore* du XXI^e^ siècle (Teissier 2019, p. 319-322). Ces lignées mémorielles détournent le regard de la synchronicité technique. Or, dans le domaine de la production artisanale et industrielle, les « modes d'assemblage » des artefacts peuvent prendre des morphologies très différentes : « chaînes de montage » tayloristes, fordistes ou toyotistes ; opérations de réparation, recyclage ou réappropriation ; formes de bricolage, simples, sobres ou singulières ; « Low Tech, High Tech, Wild Tech » (Grimaud et al. 2017, p. 15-17).

Néanmoins, le recours à la lignée technique et l'ambition de rationaliser la technologie ne sont pas, chez Haudricourt, synonymes de réductionnisme ou de purisme. Il emprunte les méthodes et les concepts à de nombreuses disciplines : biologie, démographie, ethnographie, histoire, iconographie et linguistique. Haudricourt (1964, p. 29) base néanmoins son approche sur la revendication d'« un point de vue plus essentiel que les autres [qui] pour un objet fabriqué [est] le point de vue humain, de sa fabrication et de son utilisation par les hommes, qui est essentiel, et que si la technologie doit être une science, c'est en tant que science des activités humaines ». Sacha Loeve et Timothée Deldicque (2018, p. 232-233) interprètent cette posture comme la revendication d'« un pré carré des sciences humaines » pour la technologie à l'exclusion des autres sciences. J'y verrais, pour ma part, plutôt l'expression d'un dialogue engagé par un technologue éclectique avec la culture technicienne dominante qu'il fréquente depuis ses études d'ingénieur agronome à la fin des années 1920. L'insistance d'Haudricourt sur les dimensions humaine et opératoire peut être interprétée comme une envie de concilier, malgré leurs contradictions, les significations matérielles et discursives de la technologie. Elle joue aussi contre les hiérarchies en place qui favorisent la technologie matérielle de la technologie sur la période 1930-1960.

Quel contenu donner alors à la catégorie de « technologue » ? Plutôt qu'un introuvable groupe cohérent, ce que je retiens pour repérer les technologues sur la période 1850-2020, c'est leur double aptitude à comprendre la technique en société et à s'en déprendre. Un technologue façonne une *analyse méta-technique* par un double mouvement, d'approfondissement et de recul, vis-à-vis de la technique. Il chemine à la manière d'un philosophe. « Questionner, écrit Heidegger (1954, 9), c'est travailler à un chemin, le construire. [...] Nous questionnons au sujet de la *technique* et voudrions ainsi préparer un libre rapport à elle. » Cette image de la pensée errante est également utilisée par Bruno Latour et Isabelle Stengers dans leur analyse des *Différents modes d'existence*. Ils opposent la simplicité du projet annoncé par Étienne Souriau – « *compter* les modes d'existence » – au « décentrage » subtil qu'il effectue vers un pluralisme existentiel (Stengers et Latour 2015, p. 31-32). Il y a quelque chose de libre et singulier dans le regard des technologues sur la technique. C'est un trait distinctif. En effet, techniciens et technocrates sont solidaires d'une « entreprise » à travers « le fait d'agir collectivement » selon les mots d' Oswald Spengler dans *L'Homme et la technique*. Ils sont aussi collectivement formés par des

éducations de type technoscientifique. Au contraire, le technologue est solitaire dans le cheminement qu'il construit vers la technologie et dans l'étonnement, voire le doute, qu'il éprouve face à la technique [26].

Les attitudes des techniciens, des technocrates et des technologues pourtant se complètent. « *Parler et entreprendre* s'impliquent mutuellement, au même titre que *la main et l'outil* » (Spengler 1931, p. 45). Il est ainsi possible de considérer Karl Marx comme un technologue par la place qu'il accorde aux techniques dans son analyse de la société, comme un technicien par sa connaissance des machines et des usines et comme un technocrate par l'entreprise d'économie politique qu'il monte, avec Friedrich Engels, à travers leurs engagements politiques. Il y aurait d'ailleurs quelque chose d'arbitraire à reléguer, *a priori*, un auteur du corpus dans une seule catégorie. L'activité et la pensée d'une personne ne sont jamais segmentées, malgré les tentations d'une analyse fragmentée. Vitorino Magalhães Godinho le disait avec simplicité et clarté il y a cinq décennies : « Une personne réelle n'est pas un acteur interprétant séparément une histoire politique, puis une histoire économique, etc. Il ou elle intervient intégralement dans une histoire, qui est l'histoire de son activité à multiples facettes mais singulière. » (cité par Wallerstein 2005, p. 357)

Que conclure de ces discussions ? Chaque catégorie est caractérisée par des critères différents : éducatifs, professionnels et opératoires pour les techniciens ; gestionnaires, décisionnels et moraux pour les technocrates ; relationnels, discursifs et réflexifs pour les technologues. Les deux premières catégories sont inscrites dans une entreprise collective, marquée par une certaine idée de l'efficacité, alors que la troisième résulte d'une démarche plus individuelle, marquée par une interrogation existentielle vis-à-vis de la technique.

Les trois catégories présentent des délimitations mouvantes. Pour Patrick Fridenson (2012, p. 11), « le mot "technologie" [implique aussi] ergonomie, ingénierie organisationnelle voire ingénierie culturelle et technique de pouvoir ». Son acception de la technologie induit un recouvrement de mes catégories de techniciens et technocrates. Les frontières entre catégories sont, en outre, poreuses. Elles peuvent être traversées par des individus comme Marx ou Saint-Simon, et enjambées par certaines institutions comme le Centre international de prospective. Celui-ci, créé en mai 1957 par Gaston Berger et André Gros, réunit un aréopage de techniciens, technocrates et technologues. Le projet prospectif est en lui-même opérationnel, organisationnel et réflexif. Mais, cette intersection est aussi inscrite dans les statuts de l'association dont les six vice-présidents doivent être « représentatifs » de trois milieux sociotechniques : « la Recherche et notamment de l'Université », « la Production et notamment de l'Industrie, de l'Agriculture et du Commerce », « l'Action publique, notamment de l'État et des Collectivités publiques » (Durance 2008, p. 19).

Ceci assoit l'idée que ces trois catégories sont relatives et complémentaires. Si chaque action (opération, gestion, conceptualisation) est plus associée à une catégorie d'acteurs (techniciens, technocrates et technologues), elle requiert les deux autres. Il est impossible pour les technologues de saisir la technique sans un degré de familiarité avec les opérations des ouvriers dans l'usine ou la gestion des trusts financiers par les administrateurs.

26. Dans la perspective de l'habilitation à diriger des recherches, un détour réflexif est ici nécessaire. Je voudrais souligner ce que mon parcours a eu de singulier et de contingent par les bifurcations qui m'ont conduit d'une classe préparatoire scientifique, en 1995, à un poste d'enseignant-chercheur en épistémologie et technologie, en 2010. J'ai intégré, sans choix préétabli, une école d'ingénieurs orientée vers la recherche expérimentale : l'École supérieure de physique et de chimie industrielle de la ville de Paris (ESPCI). La statistique approximative d'une promotion ESPCI de 70 diplômés était à l'époque : 60 % en doctorat, une majorité en physique ou chimie, une minorité en biologie ; 30 % directement recrutés dans l'industrie, la moitié des docteurs rejoignant l'industrie après leur thèse ; 5 % en formation complémentaire (banques, management) ; et 5 % en agrégation de physique ou chimie, dont j'étais. Passer l'agrégation a constitué une première bifurcation concernant 5 % de la promotion. Une deuxième bifurcation a été de m'inscrire à un diplôme d'études approfondies en histoire des sciences et des techniques, puis de poursuivre en thèse de sciences humaines. Ces deux bifurcations étaient motivées, en partie par un mal-être et de faibles aptitudes en laboratoire, en partie par un besoin de réflexion sur les sciences et les techniques (qui s'exprimait alors comme un manque, difficile à définir), en partie par une révolte personnelle. Une troisième bifurcation m'a conduit à l'étranger pendant trois années (Angleterre, États-Unis, Allemagne). Avec le temps, l'histoire, l'épistémologie et la technologie m'ont réconcilié avec les sciences et les techniques et avec moi-même. C'est ce que je suppose, en tout cas, puisque je propose une conversation constructive entre techniciens, technocrates et technologues.

Pourtant, il n'y a pas dissolution des catégories entre elles car chacune est porteuse de perspectives hétérogènes. Dans une version radicale, Saint-Simon va jusqu'à distinguer des univers disjoints. Il oppose ainsi une « une société militaire », qui serait celle des administrateurs, généraux et diplomates, et une « une société essentiellement économique ou industrielle », qui serait celle des industriels, savants, ingénieurs et techniciens (Aron 1962, p. 34). Sans être aussi tranchée, l'hétérogénéité des trois catégories fournit des possibilités de circulation au sein des sociétés industrielles selon des modalités différenciées. Peuvent ainsi être traversés de multiples milieux professionnels et frontières sociales. La réunion de ces trois cultures techniques, loin de produire un consensus monochrome, dessine un paysage de contrastes et de permanences sociotechniques. La visualisation des contrastes et des similitudes est ce qui est attendu d'une bonne sonde en sciences expérimentales.

Le croisement interculturel est d'autant plus intéressant qu'il interdit toute position de surplomb. Les sciences humaines et sociales, à travers la catégorie des technologues, se trouvent inscrites dans un tissu de discours (culturels, économiques, sociaux, techniques), de stratifications sociales (observateurs, financiers, ouvriers, techniciens, ingénieurs, dirigeants) et de manières d'êtres au monde (agir, penser, sentir). Elles induisent et collectent des éclats de société. Car, un problème technique est fragmenté entre des acteurs, des temps, des lieux et des imaginaires. Le stockage de l'énergie enchevêtre une pluralité de modes d'existence sociotechnique, auxquels font écho les discours des techniciens, des technocrates et des technologues.

1.6.2 De la fragmentation des discours à la constitution d'un corpus

La « littérature technique de toutes les époques, si l'on sait la lire attentivement, exprime un projet sociétal cohérent et précis » écrivait François Caron (1991b, p. 10). Trente ans plus tard, la certitude d'une cohérence n'est plus aussi assurée mais demeure la centralité des discours techniques pour comprendre les sociétés industrielles. La publication d'écrits scientifiques et techniques a crû plus vite que les autres types de publication. En occident, la population doublait tous les cinquante ans à l'époque contemporaine alors que le nombre de revues scientifiques doublait tous les quinze ans et celui d'ingénieurs formés (aux États-Unis) tous les dix ans (Solla Price 1964, p. 135-154). La démocratie technique n'a pas ralenti cette dynamique au xx^{e} siècle.

Aborder les cultures techniques par les publications techniques et scientifiques nécessite donc une sélection drastique. Mon corpus d'étude est biaisé par la sur-représentation des langues française et anglaise pour des raisons personnelles d'aptitude linguistique et collectives d'hégémonie états-unienne au xx^{e} siècle (Krige 2006). Ceci s'explique aussi par mes positions institutionnelles en recherche : seize ans en France (2003-2007, 2010-2022) et trois séjours d'un année chacun, successivement en Angleterre, États-Unis et Allemagne (2007-2010). J'essaie de contrebalancer cet effet d'hégémonie territoriale et culturelle par une influence (trop ténue encore) issue de séjours et d'échanges avec l'Afrique de l'Ouest et l'Amérique du Sud depuis 2014. Ainsi, malgré leurs positions économiques et politiques dominantes, je considère l'Europe de l'Ouest et l'Amérique du Nord comme deux « sous-régions » du monde habité. Ce terme administratif, sans doute hérité de la période coloniale, est couramment utilisé par des collègues et amis togolais et sénégalais pour désigner l'Afrique de l'Ouest alors qu'il surprend pour désigner l'Europe de l'Ouest ou l'Amérique du Nord. L'une des raisons est que les rapports sociaux de domination favorisent l'imaginaire de l'autonomie pour caractériser les groupes dominants et l'imaginaire de la dépendance pour les groupes dominés alors qu'ils sont également (mais asymétriquement) reliés par des interdépendances idéelles et matérielles. Mon corpus présente donc un surpoids évident des « sous-régions » européennes et américaines dans l'étude des mondes contemporains. C'est un biais bien trop courant.

La bibliographie s'appuie sur les trois types de sources classiques en histoire des sciences et des techniques : archives, sources primaires (publiées et imprimées) et littérature secondaire. Son organisation est moins classique. Elle est classée selon trois ensembles principaux. Premièrement, les archives sur lesquelles je m'appuie en priorité sont issues de mes recherches antérieures, de l'encadrement de mémoires de master et du co-encadrement de thèses de doctorat à l'université de Nantes ainsi que des projets collaboratifs que j'ai mené depuis une quinzaine d'années. Elles sont complétées par des archives orales. En effet, durant et depuis ma thèse, j'ai interviewé plusieurs dizaines de chercheurs, ingénieurs ou décideurs, dont certains ont travaillé ou réfléchi au stockage de l'énergie. Malgré le contexte actuel d'une fragmentation et d'une urgence imposées par la recherche par projets, j'ai pu collecter et retranscrire une quinzaine d'entretiens présentant une certaine cohérence autour de la mobilité électrique et de la filière hydrogène : 3 entretiens sur les voitures électriques en France (2009) ; 5 entretiens sur les voitures électriques en Allemagne (2010) ; 7 entretiens sur l'hydrogène (2 en 2012, 1 en 2017, 6 en 2022). Enfin, conscient de l'importance du partage en sciences humaines et sociales, je réutilise plusieurs entretiens menés sur des terrains proches par des collègues proches, qui ont accepté de partager leurs entretiens avec moi : Thierno Diop (solaire au Sénégal), Denis Guthleben (solaire en France), Anaël Marrec (énergies renouvelables en France), Nicolas Simoncini (hydrogène en France) et Axel Villareal (voiture électrique en France). Tous ces entretiens ainsi que les publications issues de mon travail universitaire, individuel et collectif, et dues à des chercheurs avec qui j'ai collaborés de manière étroite, sont regroupés dans un premier ensemble de la bibliographie intitulé « I. Travaux personnels et collaboratifs cités dans le mémoire original ».

Le deuxième ensemble de la bibliographie forme le corpus proprement dit. Organisé par la problématique de l'essai, le corpus est constitué des publications et productions des professionnels de la technique, classées selon trois sous-corpus : techniciens, technocrates, technologues. Ce n'est pas le statut professionnel de l'auteur qui justifie l'emplacement au sein d'une catégorie, mais l'orientation épistémique du texte. Un même auteur pourra ainsi circuler entre plusieurs catégories si l'orientation générale de ses publications est plus opératoire (techniciens), prescriptive et gestionnaire (technocrates) ou discursive, réflexive et analytique (technologues). L'écrit d'un technicien pourra apparaître dans la catégorie « technologues » s'il est réflexif sur ses propres pratiques ou parmi ceux des « technocrates » s'il porte la parole d'une institution dominante comme Électricité de France. Ces trois catégories correspondent à trois sous-corpus de l'essai. Aucun sous-corpus n'a été bâti de manière systématique. Certains choix néanmoins peuvent être explicités. Ce second ensemble, intitulé « II. Corpus : technocrates, techniciens, technologues », est donc divisé en trois sous-corpus.

Le sous-corpus « techniciens » contient 74 éléments, essentiellement sur la période 1840-1910 et 1970-2020. Il est basé sur des références accumulées depuis une quinzaine d'années à partir de mes objets d'étude : énergie solaire, piles à combustible et voitures électriques. Cet amas hétéroclite issu de l'histoire des techniques et de l'énergie a été complété par des recherches systématiques à partir de mots-clés tels que « stockage », « énergie », « électricité » dans diverses bases de données : archives.org, gallica.bnf, Bodleian Library (Oxford), Nantilus (Nantes). Plusieurs dictionnaires spécialisés et encyclopédies ont également été explorés à travers ces mots-clés en remontant à l'époque moderne. Enfin, j'ai eu recours, de manière systématique, à des revues spécialisées et professionnelles telles que, en France, *La Houille blanche*, *La Nature*, *Le Génie civil*, aux États-Unis, *Journal of the Franklin Institute*, *Science* et *Scientific American*, en Angleterre, *Transactions of the Royal Society of London*. Parmi ces articles, certains ont été écrits par des techniciens ayant des responsabilités dans la gestion des affaires publiques ou privées, ce qui les qualifie pour apparaître dans la catégorie « technocrates ».

Le sous-corpus « technocrates » contient 68 éléments des années 1870 à aujourd'hui, dont la majorité sont extraits des mêmes bases de données que le sous-corpus « techniciens ». Il comprend, en outre, des textes

législatifs qui, pour la France, proviennent du *Journal officiel de la République française*. Mentionnons deux textes législatifs d'importance aux limites de la période considérée : le décret du 15 mai 1888, premier texte officiel sur les usages de l'électricité (Beltran et Carré 2016, p. 123) ; la loi du 17 août 2015 « relative à la transition énergétique pour la croissance verte » (Assemblée nationale 2015). À côté des textes législatifs, le sous-corpus contient des rapports administratifs émanant, à l'échelon national, de ministères, de municipalités, d'institutions spécialisées tels que l'Ademe ou le Commissariat général du Plan. Au niveau transnational, plusieurs institutions produisent des rapports à valeur normative et politique : Expositions universelles (depuis 1851), World Power Conferences (depuis 1924), Unesco (depuis 1945), Organisation européenne de coopération économique (depuis 1948), etc. À ces couches profondes d'administration technique fait écho l'actualité relatée par la presse généraliste trahissant certains traits du régime technicien. Ainsi, le *New York Times*, dont la parution commence en 1851 et dont les archives numérisées sont accessibles à un faible coût, fournit un outil d'analyse pratique de la modernité technique [27]. Là encore, une recherche systématique aurait nécessité un temps de travail en expansion continuelle.

Le sous-corpus « technologues » est, de loin, le plus volumineux. Il compte 236 éléments, dont 90 % ont été publiés à partir des années 1970. Comme les deux sous-corpus précédents, il est marqué par une certaine hétérogénéité justifiée par le pluralisme épistémique de l'essai. Plutôt que labourer un seul sillon disciplinaire, j'ai préféré glaner dans plusieurs domaines des sciences de l'homme et de la société. Certains puristes de l'académisme pourraient s'en offusquer. Mais, la mise en relation interdisciplinaire et la transgression disciplinaire ont également des vertus intellectuelles. Le sous-corpus « technologues » contient un assortiment de textes d'analyse des techniques selon des points de vue très variés : sociologie et anthropologie, philosophie et histoire, géographie et économie, préhistoire et archéologie. Il couvre la même époque que les deux autres sous-corpus, du milieu du XIX^e^ siècle au début du XXI^e^ siècle.

Le troisième ensemble de la bibliographie s'intitule « III. Littérature secondaire : sciences humaines et sociales ». Il est constitué de 172 éléments, dont 80 % ont été publiés à partir des années 1970. Il donne une large part à l'épistémologie et à l'histoire des sciences du fait de mon parcours antérieur et de la distinction entre sciences et techniques dans l'essai. Là encore, l'idée est de ne pas s'arrêter aux frontières disciplinaires mais de mettre en relation des domaines différents et connexes de l'étude des sociétés humaines : sociologie et anthropologie, philosophie et histoire, géographie et économie, préhistoire et archéologie, littérature et science-fiction.

Tous ces écrits m'ont confronté à de fortes oppositions idéologiques dans la manière dont certains auteurs conçoivent les techniques en société. Plutôt que me ranger derrière une bannière, j'ai voulu, dans la mesure du possible, accueillir la diversité des perspectives technologiques, prêter attention aux présupposés et aux méthodes et prendre au sérieux les résultats des auteurs. Cela peut donner l'impression, dans certaines parties de cet essai, de fortes disjonctions intellectuelles et d'hétérogénéités théoriques irréconciliables. Cela occasionne aussi des inconforts psychologiques et de grand écarts intellectuels. Mais, ces écarts d'énoncés me semblent justement être révélateurs, au sens photographique du terme, de la technique en société. Relier les discours pour les distinguer dans une démarche rationnelle : c'est l'étymologie même du mot « dialogue », composé du préfixe grec *dia*, à la fois liaison « à travers » et séparation, et de la racine *logos*, désignant un discours raisonné, que je prendrai dans un sens plus large que la seule raison mathématique et expérimentale. La technologie

27. Je n'ai pas fait de recherche systématique sur le stockage de l'énergie dans le New York Times. Mais sa continuité chronologique, sa parution quotidienne et son accessibilité numérique seraient adaptées au suivi quantitatif et qualitatif d'un phénomène social depuis 1851. Je pense en particulier à un sujet de doctorat en histoire des techniques. Le journal présente deux autres avantages : la taille réduite de ses articles lui permet de couvrir de nombreux thèmes ; sa position éditoriale n'est pas seulement nationale, mais aussi internationale.

invite au dialogue. C'est la dernière pièce de la méthode qui sous-tend cet essai : rapprocher les discours des technologues, des technocrates et des techniciens et tester les possibilités d'un dialogue commun.

1.6.3 Assembler les fragments : enjeux et possibilités d'un espace de dialogue

Des espaces de rencontre sociotechnique existent dans la société contemporaine. J'ai mentionné la mémoire collective et la « démocratie technique » en régime technicien. Mais, ils sont traversés par des rapports de domination politique et symbolique. Xavier Guchet (2017, p. 151-152) rappelle que, dans le cas des nanotechnologies, la prise en compte des enjeux « éthiques et sociétaux » à partir des années 2000 aux États-Unis puis en Europe était motivée par une stratégie technocratique. Il s'agissait surtout, après le relatif échec des organismes génétiquement modifiés (OGM), d'« éviter le rejet par les opinions publiques » des nanotechnologies. La démarche d'« acceptabilité sociale » introduit également un croisement des sciences de l'ingénieur et de la société. Mais, elle consiste plus à « organiser une suite de décisions rationnelle considérée comme désirable » qu'à faire émerger des espaces de contradiction et de création collective (Pécaud 2021, p. 4). Comme le résume Dominique Pécaud d'une manière tranchée, cela revient à faire de « la domestication » des populations contemporaines un « programme politique ».

Or, un dialogue nécessite un effort réciproque pour écouter et essayer de comprendre les autres. Il induit un partage durant lequel les échanges sont faits de similitudes, d'incompréhensions, de contradictions et de surgissements. Cet essai part de l'idée qu'un dialogue entre techniciens, technocrates et technologues est une façon stimulante d'appréhender les relations entre l'humain et la technique. Mais, il ne sous-estime pas les difficultés d'un tel dialogue tant le dressage culturel nous habitue à ordonner les valeurs selon nos échelles habituelles, à maltraiter le pluralisme de discours divergents et à dévaloriser les voies hérétiques [28]. Cette partie interroge les enjeux épistémiques d'un dialogue autour de la technique et certaines possibilités de dialogue dans le cadre de l'énergie.

Enjeux du dialogue

L'appel au dialogue entre sciences de la nature et sciences de l'homme n'est pas nouveau. L'histoire des sciences en est un exemple. L'historiographie francophone de la chimie contribue à de tels échanges [29]. L'étude du temps présent m'a également permis d'engager des échanges avec les chimistes contemporains. La conduite d'une trentaine d'entretiens avec des universitaires et des industriels pour constituer une mémoire collective de la chimie contemporaine forme déjà un embryon de dialogue. La collecte d'une mémoire collective de la chimie du solide que j'ai effectuée pour la France (2003-2006) s'inscrivait dans un projet plus vaste concernant la recherche sur les matériaux (Europe, États-Unis). Ceci aboutit à une réflexion sur les relations entre histoire et mémoire des sciences contemporaines (Bensaude-Vincent et Teissier 2015). La constitution d'archives orales constitue un premier type de dialogue intéressant entre les humanités, les sciences de la nature et les sciences de l'ingénieur. J'en fais l'expérience depuis deux décennies.

Un autre domaine engagé dans un dialogue constructif et heuristique entre sciences de la société et sciences de l'ingénieur est celui de la sociologie des organisations, des techniques et des politiques publiques. Pour ne

28. Cette démarche résulte de plusieurs échanges inaboutis, voire ratés, avec des professionnels de la technique. Mais, l'incompréhension culturelle joue aussi au sein des sciences humaines entre approches écologique et économique par exemple.

29. Une anthologie récente de *Philosophie de la chimie* éditée par Bernadette Bensaude-Vincent et Richard-Emmanuel Eastes (2020, p. 1) stimule un tel dialogue. Elle met en relation de textes écrits depuis l'époque moderne par des chimistes, des historiens et des philosophes. L'introduction générale souligne cette ambition de « mettre en relief ce que la chimie fait à la philosophie, en quoi elle renouvelle les questions traditionnelles et soulève des problèmes spécifiques ».

prendre qu'un seul exemple bien connu des sociologues, l'enquête menée par Jean-Claude Thoenig (1987, p. 43) dans les années 1970 a conduit à réaliser 872 entretiens avec des membres du corps des Ponts et Chaussées et des strates proches. L'un des principaux résultats empiriques – montrer que « le facteur social qui différencie le plus les attitudes et comportements individuels, n'est ni la catégorie socio-professionnelle d'origine, ni l'idéologie ou l'expérience, mais un fait statutaire : le corps d'appartenance » – n'aurait pas été possible sans un dialogue répété des centaines de fois avec la foule des interviewés pendant l'enquête et de nombreuses fois après la publication de l'ouvrage intitulé *L'Ère des technocrates. Le cas des Ponts et Chaussées*. D'un côté, un sociologue, ne peut exclure tout à fait ses sentiments ni développer une fascination pour son sujet ; de l'autre côté, un « groupe de fonctionnaires pris sous la loupe », une population concernée « a joué le jeu [...] à l'exclusion de deux ou trois caciques craintifs ou arrogants ». Au terme d'une discussion sans « stigmatisation » mais avec rigueur, contradictoire mais compréhensive, « a-t-il été possible de faire la preuve qu'une caste peut vivre sans trop de malheurs ligués contre elle, même si le monde extérieur sait désormais quels sont ses travers, ses points forts, ses limites » (Thoenig 1987, p. 43). Comme si, oscillant entre l'idéal type du savant et du politique de Max Weber (1919, p. 20), un corps social, fût-il technocratique, parvenait aussi à « reconnaître qu'il y a des faits inconfortables, [...] des faits qui sont désagréables à l'opinion » collective qu'il a de lui-même.

Mais, il y a une raison plus spécifique sans doute qui fait de la technologie une invitation au dialogue : elle regorge de malentendus ! Cette idée séduisante est formulée par Sacha Loeve et Thimothée Deldicque (2018) dans une analyse sémantique et philosophique de la technologie depuis le XVIII^e^ siècle. Ce sont « les malentendus de la technologie » qui en font la fécondité. Ces auteurs montrent que la technologie ne peut être saisie de manière complète et définitive parce que les discours sur les techniques, qui sont une forme de connaissance, renvoient en permanence aux techniques de la connaissance, qui sont le support matériel des discours. La technologie au sens *discursif* n'est jamais réductible ni superposable à son sens *matériel*. Elle fonctionne simultanément comme mode de connaissance sur les techniques et comme mode d'existence des techniques.

Relier technologues et technocrates permet de couvrir les modes discursifs et matériels-organisationnels de la technique. Ceci revient à coupler les deux approches du monde relevées par Oswald Spengler dans son essai sur *L'homme et la technique*. « Ainsi sont nés les modes de pensée très différents de l'homme de vérité – du prêtre, de l'érudit, du philosophe – et de l'homme d'action – du politicien, du commandant en chef, du négociant. » (Spengler 1931, p. 38). Y ajouter le technicien introduit une troisième approche, matérielle, dans un sens *opératoire*. Réunir technologues, technocrates et techniciens revient à faire communiquer les modes discursifs, organisationnels et opératoires de la technique. Cette tripartition rejoint l'analyse sociologique des « formes de la médiation technique » de Madeleine Akrich (1993). Selon elle, toute concrétisation d'une innovation technique produit « de façon indissociable des savoirs, des dispositifs techniques et des formes d'organisation ». Ceci constitue un premier enjeu épistémique du dialogue entre technologues, technocrates et techniciens : réunir et assembler les modes discursifs, organisationnels et opératoires de la technique. Aucune des trois catégories socio-professionnelles n'a le monopole d'un mode mais chacune a un recours différent aux trois modes. Un dialogue favorisera donc des compositions diverses de représentations, d'entreprises et d'opérations en fonction des participants, impliqués diversement dans la construction sociotechnique du monde.

Un second enjeu du dialogue renvoie aux considérations sur la mémoire collective et la démocratie technique. Ces espaces techno-politiques imposent, de manière souvent invisible, des contraintes sociotechniques sur le temps long des sociétés. Ils contribuent à un « camouflage » du processus historique qu'ils interprètent pour légitimer le temps présent. Alain Gras souligne la fonction démystificatrice des sciences humaines et

sociales. Si la sociologie « interroge l'histoire ce n'est pas pour confirmer ce que l'observateur contemporain y voit » ni pour adhérer à « la fuite en avant des technocrates qui veulent bien le changement à condition de la maîtriser » (Gras 1979, p. 198). La construction d'espaces de dialogue entre techniciens, technocrates et technologues peut être un outil démocratique pour introduire des alternatives idéologiques et des dissensions politiques. Des dispositifs comme le « forum hybride » sont susceptibles d'ouvrir des brèches démocratiques dans l'ordre moral et administratif de la « démocratie technique » [30]. Le dialogue entre techniciens, technocrates et technologues donne, en effet, accès à différentes strates sociales, à de multiples échelles d'espace et à une diversité de profondeurs temporelles. La sonde tripartite dévoile certains schémas récurrents pouvant circuler à des rythmes ou sous des formes différentes en fonction des stratifications sociales. Elle identifie ainsi le modèle saint-simonien de la société comme ensemble de réseaux de circulation ou l'équation énergie-civilisation constitutive des imaginaires industriels.

Un tel dialogue présente trois apports historiographiques. Tout d'abord, il identifie et analyse certains schémas devenus conventionnels à force d'être répétés partout et tout le temps. Il déconstruit ainsi des permanences et des impensés du régime technicien. Il permet ensuite de suivre des évolutions lentes au fil des générations, des circulations peu visibles entre strates sociales et des séries causales entre phénomènes sociaux qui peuvent être éloignés dans le temps ou dans l'espace. Il introduit enfin des possibilités de contradictions et de désaccords là où les rapports de domination des espaces techno-politiques légitiment des voies étroites, privilégient des mécanismes d'auto-conservation et discréditent des voix alternatives et dissidentes.

Possibilités d'un espace de dialogue

Un dialogue entre techniciens, technocrates et technologues est-il possible ? Durant un séminaire du Centre François Viète, Ronei Clecio Mocellin regrettait la persistance d'« un dialogue de sourds » entre enseignants et philosophes de la chimie. Il prenait comme terrain de réflexion philosophique la confusion fréquente dans les manuels de chimie entre l'élément chimique et le corps simple. Or, le premier est un concept relationnel, le second un résultat expérimental. Le corps simple fut défini par Lavoisier comme « le dernier terme auquel parvient l'analyse » tandis que l'élément chimique fut caractérisé un siècle plus tard par Dmitri Mendeleïev par la « relation abstraite » entre deux éléments chimiques basée sur leurs rapports de masse (Clecio Mocellin 2019). Une oreille tendue des pédagogues aux historiens et aux philosophes de la chimie dissiperait le malentendu. Mais, l'indifférence d'une discipline à l'autre est courante. Je vois trois obstacles structurels à la conduite d'un dialogue intellectuel serein.

Il y a d'abord des obstacles politiques basés sur la défense de territoires disciplinaires. Les regroupements en chapelles ou écoles de recherche sont fréquents dans le monde universitaire car ils permettent une assise sociale et épistémique [31]. Ils résultent de constructions identitaires mêlant des aspects sociaux (figures tutélaires, dynamiques de groupe), psychologiques (confort de l'habitude, peur de l'inconnu et de la solitude) et épistémiques (critères de scientificité, méthodes maîtrisées). Ces écoles de recherche s'affrontent d'autant plus qu'elles reposent sur des schémas théoriques contradictoires. Elles cultivent aussi une mémoire collective qui

30. Au début des années 2000, le « forum hybride » était considéré comme un « espace dialogique » pouvant porter une contradiction au sein des démocraties parlementaires (Callon et al. 2003, §1). Il a été actualisé en octobre 2019 en France par la « Convention citoyenne pour le climat » à la demande du Premier ministre Édouard Philippe. L'expérience a montré les limites démocratiques du dispositif transformé en outil de communication par le gouvernement.

31. Mon travail de doctorat (2004-2007) et l'ouvrage résultant (Teissier 2014) analysent la formation d'une discipline universitaire – la chimie du solide – au XX^e^ siècle en montrant l'imbrication de forces politiques, industrielles, sociales et épistémiques. La compétition entre écoles de recherche, réunies autour de figures tutélaires ou « mandarins », y jouait un rôle primordial dans la constitution d'identités locales et dans la consolidation de territoires de recherche.

diffère de l'histoire des sciences tout en la nourrissant. Elles sont gardiennes d'une tradition et s'affrontent, parfois durement, aux chercheurs en sciences humaines lorsque les conclusions de leurs recherches heurtent trop certaines représentations qu'elles ont d'elles-mêmes. C'est le cas lorsque l'histoire des sciences déconstruit certaines légendes chères aux scientifiques [32]. Les affrontements entre diverses mémoires collectives des sciences sont semblables aux débats de société sur les contenus et les objectifs du roman national. Ils établissent des rapports de force symbolique entre disciplines. Mais, lorsqu'ils cèdent la place à des échanges équilibrés, les dialogues transdisciplinaires qui en résultent peuvent induire une dynamique épistémique et de nouveaux champs de recherche [33].

Un deuxième obstacle au dialogue est d'ordre linguistique. La théorie de la traduction montre que la traversée d'une frontière sociologique transforme un énoncé dans son contenu spécifique et dans sa signification étendue. Le cas de l'expertise technoscientifique le montre. Michel Callon, Pierre Lascoumes et Yannick Barthe (2003, p. 61-104) schématisent le processus de construction de l'expertise comme trois étapes de traduction : 1° la réduction d'un problème de société (macrocosme) à un nombre fini de critères utilisés dans « la recherche confinée » (microcosme) ; 2° la manipulation technique (instrumentale et mathématique) de ces critères simplifiés pour identifier des liens de causalité ; 3° la formulation d'un discours à partir des causalités jugées significatives par rapport au problème initial. Du problème initial à la solution préconisée, la société (macrocosme) a été modifiée par le traitement sélectif du problème (microcosme) qui, à son tour, recompose « les collectifs concernés ». L'expertise modifie donc l'ordre social. Ce n'est pas la leçon techno-politique qui m'intéresse ici mais son implication sémantique. Une traduction crée une relation et un écart entre les domaines linguistiques source et cible. Si l'écart est trop grand, le dialogue est imprécis et les transferts deviennent impossibles.

Le troisième et dernier type d'obstacle est d'ordre culturel. La division des tâches intellectuelles est connue. Immanuel Wallerstein (2005, p. 363) fait remonter « le divorce entre science et philosophie » au XVIII^e siècle. Dans une conférence prononcée à l'université de Cambridge, prolongée par la publication d'un essai de 25 pages, Charles Snow (1959), chimiste de formation et écrivain de métier, a popularisé l'idée d'un écart croissant entre les cultures littéraires et scientifiques. Le propos qui concernait l'Angleterre et le monde occidental d'après 1945 reste actuel. Il pose la question de l'écart culturel entre sciences de l'ingénieur et de la nature d'un côté et sciences de l'homme et de la société de l'autre.

Comment éviter « un dialogue de sourds » entre ingénieries et humanités au sujet de la technique ? Deux efforts sont nécessaires pour réduire les incompréhensions. Le premier est d'accepter la relativité des systèmes de valeur de part et d'autre de la ligne de partage des eaux entre ingénieries et humanités. Cette position de principe est d'autant plus difficile à tenir que les hiérarchies positivistes hantent nos mémoires collectives et habitent nos démocraties techniques. Un garde-fou est la méfiance vis-à-vis des positions de surplomb, des hiérarchies de valeurs et des énoncés universels. Une méthode est le recours à l'épistémologie comme outil

32. J'ai fait l'expérience d'un dialogue de sourd avec Paul Hagenmuller lors de la parution d'un article intitulé « Paul Hagenmuller. Itinéraire de l'enfant terrible de la chimie du solide française » (Teissier 2008) alors que lui-même se présentait « un peu [comme] le père de tous les chimistes du solide français [, ... aidant] tout le monde » (Hagenmuller 2004). Je m'attachais à renverser le récit des « pères fondateurs » si courant en histoire des sciences et à montrer sa fonction motrice pour la construction *a priori* et la cohésion *a posteriori* d'une communauté scientifique. L'incompréhension du chimiste vis-à-vis des sciences humaines et sociales s'est exprimée par une condescendance du mandarin vis-à-vis de la jeunesse du docteur.

33. Un dialogue entre physiciens et chimistes a contribué à l'émergence de la chimie du solide dans le troisième tiers du XX^e siècle comme l'explique Michel Pouchard, l'un des chimistes de cette génération-là : « Il n'y aurait pas de chimie du solide sans [la] collaboration [avec les physiciens]. John Goodenough est un physicien de formation qui a essayé de comprendre les chimistes. Il nous a appris un langage simplifié qui nous a permis de dialoguer avec les physiciens. Avant cet effort de dialogue, il faut dire que les relations n'étaient pas vraiment des rapports d'échange équilibrés, dans la mesure où les physiciens demandaient unilatéralement aux chimistes de leur préparer tel ou tel cristal. » (Cité dans Bensaude-Vincent 2020, p. 170.

d'appréhension des hétérogénéités intellectuelles et disciplinaires. Ceci rend le deuxième effort plus concret. Il s'agit de partir de référents communs entre ingénieries et humanités pour constituer des *espaces de dialogue* [34].

Les espaces de dialogue se distinguent des espaces techno-politiques comme la mémoire collective ou la démocratie technique, par leur matérialité – intellectuelle plutôt qu'institutionnelle –, par leur conscience – réflexive plutôt que conventionnelle – et par leurs échanges – équilibrés plutôt que hiérarchisés. Ils peuvent néanmoins s'appuyer sur des institutions idoines. Ainsi, la revue anglophone *Energy Research & Social Science* forme depuis 2014 « un forum interdisciplinaire pour discuter l'interaction entre les questions sociales et techniques liées à la production et à la consommation d'énergie » [35]. Son rédacteur en chef, Benjamin Sovacool ouvre le premier numéro par une analyse quantitative des articles publiés sur la période 1999-2013 dans trois revues majeures de l'énergie : *The Energy Journal*, *Energy Policy* et *Electricity Journal*. Sur les 4 444 articles de recherche répertoriés (impliquant 9 549 auteurs), environ 50 % des articles sont issus des sciences de la nature, 20 % de l'économie et des mathématiques, 22 % des sciences de la société et de l'homme (*social sciences* et architecture), 8 % étant non attribués (Sovacool 2014, p. 5). La faible part des approches socio-historiques (moins de 0,3 % pour l'histoire, la philosophie et l'anthropologie, 1 % pour la sociologie) et le refus réitéré par les journaux dominants de l'énergie de son propre article de synthèse ont convaincu Sovacool (2014, p. 26) de la nécessité de créer un journal interdisciplinaire présenté comme « inclusif » et « diversifié » sur le site internet de la revue.

Sur un autre registre, les groupes réunissant des chercheurs issus de disciplines différentes sur le thème de l'énergie forment d'autres espaces de dialogue. J'en ai fait l'expérience en rejoignant le Groupement d'intérêt scientifique (GIS) Pôle d'excellence de la recherche ligérienne en énergie (Perle) coordonné par Jérôme Bellettre de l'université de Nantes. C'est à l'invitation de cet enseignant-chercheur, spécialiste de thermique et d'énergétique, ouvert aux humanités, que je dois d'avoir testé une première fois l'idée d'« espaces de dialogue » lors du 3e séminaire annuel du GIS Perle en mars 2019 [36] J'ai ainsi pu engager un dialogue sur l'énergie avec les chercheurs des sciences de la nature et de l'ingénieur présents au séminaire en leur proposant la mise en commun de référents épistémiques.

1.6.4 Dialogues et référents communs : énergie, données-variables, schémas

Je retiendrai ici trois types de référents épistémiques pouvant constituer des lieux communs de discussion : concepts, méthodes, représentations. Chaque type sera décliné grâce à un cas concret : l'énergie comme concept, la sélection données-variables comme méthode et le schéma comme représentation.

Un concept polymorphe : l'énergie

Commençons par un concept central dans cet essai : l'énergie. Sa polysémie mérite un détour par l'histoire des sciences (Balibar 1999) [37]. La formalisation mathématique et expérimentale de l'énergie au milieu du

34. Ce concept s'inspire librement de l'idée d'« espace commun de problématisation » développée par Stéphane Tirard lors de sa direction du Centre François Viète (2008-2016).

35. Extrait de la présentation de la revue sur le site internet correspondant (bouquet de revues Elsevier) : https://www.journals.elsevier.com/energy-research-and-social-science/

36. Le séminaire s'intitulait « Nouveaux projets énergie en pays de la Loire ». Intervenant pour l'axe sciences humaines et sociales du GIS Perle, j'identifiais de possibles « espaces de dialogue » entre histoire et ingénierie de l'énergie en analysant le contenu des neufs autres exposés de la journée, tous issus des sciences de la nature ou de l'ingénieur. Je développais trois référents communs : (a) données et variables ; (b) modélisation des systèmes énergétiques ; (c) modes d'être au monde (Teissier 2019).

37. Ce paragraphe dérive d'un cours d'épistémologie et d'histoire des sciences que j'ai donné en 2010-2011 aux étudiants du master de physique de l'université de Nantes. L'un des objectifs était de sensibiliser ces physiciens aux difficultés conceptuelles posées par l'énergie en explicitant ses multiples reconfigurations depuis le XVIIIe siècle.

XIXe siècle établit sa conservation comme premier principe de la thermodynamique. Hermann von Helmholtz, le premier à publier ce principe en 1847, parle de conservation de « la puissance » (*die Kraft* en allemand), et non de l'énergie, par référence à la chaleur animale, qui l'intéresse en physiologie. Son travail s'inscrit dans une tradition savante remontant à Gottfried Leibniz à la fin du XVIIe siècle. Celui-ci propose la conservation d'une « force vive » (*vis viva*) dans la nature. Sa conception vitaliste du monde s'oppose à la philosophie mécaniste de René Descartes, basée sur la conservation du mouvement. Ce détour historique ouvre le dialogue entre techniciens, technocrates et technologues selon deux perspectives.

La première perspective concerne la sédimentation dans le concept d'énergie de diverses notions issues de la science moderne : mouvement, force, chaleur, puissance. Cette agrégation savante redouble une polysémie courante du mot : dynamisme, fermeté, punch, vigueur. Le mot énergie est un carrefour où se heurtent la puissance des machines et la force des hommes. Techniciens et technologues parlent alors de « convertisseurs » d'énergie (Debeir et al. 1986, §1). Une machine à vapeur ou un moteur à explosion convertissent la chaleur issue du charbon ou du pétrole en travail mécanique. À l'inverse, un radiateur électrique convertit du travail électrique – on dit plus couramment puissance électrique – en chaleur pour le chauffage. Ingénieurs, industriels et économistes recourent à des calculs de rendement. Celui-ci est, pour une machine à vapeur, le rapport entre la puissance motrice et l'énergie fournie. Un cheval fait aussi figure de convertisseur en transformant l'énergie digérée des aliments en travail mécanique. Le plus haut rendement du règne animal est celui du « convertisseur humain » : 20 % de travail utilisable pour un être humain contre 10 % pour un cheval (Debeir et al. 1986, p. 18). Marcel Mauss (1936, p. 12) ne proposait-il pas d'ailleurs de classer les techniques du corps en fonction du « rendement humain », issu du « dressage » et de l'« adresse » des corps.

Convertisseurs humains, animaux et mécaniques sont assemblés pour former des modes de production. Sociologues du travail, historiens des techniques et administrateurs d'entreprises trouvent là un terrain d'échange sur les façons d'organiser la production de produits : artisanat, manufacture, usine, taylorisme, fordisme, toyotisme, etc. Leur dialogue les conduira à des désaccords. Sur la question de l'efficacité par exemple, les indicateurs sont nombreux : rendement d'une machine pour un ingénieur, bien-être au travail pour un ergonome, accumulation de profits pour un financier. Ils renvoient à des systèmes de valeur différents. Plus largement que l'économie, l'énergie traverse l'ensemble du corps social. Elle pose des enjeux de société en termes géographiques, juridiques, politiques, sociaux, etc. Au-delà du corps social, le système énergétique repose sur la biosphère pour ses approvisionnements en stocks (combustibles, matériaux) et en flux (rayons, vents, marées, rivières). En retour, il y déverse des artefacts en quantité et en diversité croissantes depuis le XVIIIe siècle.

Ceci conduit à la deuxième perspective ouverte par l'histoire des sciences. Le premier principe de la thermodynamique ne définit pas l'énergie par son essence mais par sa qualité. Ce qui compte, c'est la dissipation comme le remarque Georges Bataille (1949) ou, au contraire, la conservation comme le souligne Max Planck en 1887 : « Je ne traiterai du concept d'énergie que dans la mesure où il peut être rattaché au principe, supposant donc que le concept d'énergie en physique tient avant tout sa signification du principe de conservation qui le concerne. » (cité par Balibar 1999 L'énergie n'est pas une grandeur positive. Ni observable, ni mesurable, elle incarne un impératif de conservation. Elle est, selon William Thomson (1881, p. 376), ce « principe se répandant partout dans la nature et guidant l'investigateur dans chaque champ de la science ». L'application de la thermodynamique à l'ensemble des sciences de la nature fait de l'énergie un candidat potentiel à l'universalité.

En cela, l'énergie a un statut épistémique semblable à la masse un siècle plus tôt. À la fin du XVIIIe siècle, dans un contexte qui met la précision au cœur des savoirs sur la nature, Antoine-Laurent de Lavoisier systématise

l'usage de la balance en chimie pour effectuer des bilans de matière (Bensaude-Vincent 1993). Il jette des ponts entre l'agriculture, l'économie et la chimie pour équilibrer le monde en termes de flux : matière, chaleur, argent sont des fluides qui circulent et se conservent. « La balance de la nature devient alors un principe idéal, à la fois normatif et régulateur, que l'on pourrait formuler en ces termes : tout – le minéral, le végétal, l'animal, le moral, le social – doit devenir commensurable. » (Bensaude-Vincent 2020, p. 47) Ce principe de conservation généralisé fait de la masse un équivalent général, quasi-universel, à la fin du XVIII^e^ siècle. La masse et l'énergie sont donc liées, à un siècle de distance, par une même ambition universaliste vis-à-vis du principe de conservation. Le rapprochement est d'ailleurs exprimé à la fin du XIX^e^ siècle par un savant, expert et administrateur états-unien, Thomas C. Mendenhall. Dans une histoire de l'électricité, il trace le parallèle suivant entre masse et énergie. « La doctrine de la conservation de l'énergie a fait, pour le philosophe et pour des inventeurs intelligents, ce que la doctrine de la conservation de la masse, telle qu'elle avait été établie par les premiers chimistes, avait fait pour le chercheur de la pierre philosophale. Elle a montré qu'aucune énergie ne pouvait être obtenue à partir d'un lieu où il n'y en avait pas. » (Mendenhall 1887, p. 222). En épistémologue, Mendenhall insiste sur la propension des sciences modernes à « l'établissement de limitations ». C'est donc plutôt une version restrictive du rapprochement masse-énergie que le savant états-unien propose.

Cependant, masse et énergie diffèrent par leurs modes d'existence sensible. La première s'appuie sur les blocs de matière pour être mesurée sur une balance. La seconde n'a pas de matérialité : c'est un concept reliant deux modalités matérielles, le travail et la chaleur, qui, seules, sont mesurables. Les modes d'existence du travail et de la chaleur contiennent une notion de « qualité de l'énergie ». Cette qualité est une quantité, la quantité d'énergie mobilisable pour être utilisée, appelée « exergie » aujourd'hui. Cette phénoménologie de l'énergie peut être traduite dans le domaine juridique par exemple pour distinguer l'énergie comme chose et bien, comme quantité et qualité, comme objectivation et subjectivité [38].

Malgré sa candidature à l'universalité, l'énergie est une entité fuyante et ambiguë aussi bien pour les sciences de la nature que les sciences de l'homme. Pourtant, elle est réifiée, à force d'être convoquée dans le langage courant. Elle est souvent « pensée comme un donné brut, implicitement considéré comme neutre, illimité, inépuisable » par rapport au monde social et par rapport à la biosphère (Debeir et al. 1986, p. 9). Alain Beltran (2018, p. 308) propose de nommer *homo energicus* l'humain ordinaire alors même qu'il récuse sa réduction « à quelques équations ». L'énergie devient un symbole aveuglant de l'universel. À la manière lavoisienne d'une comptabilité pointilleuse, l'énergie prend une forme chiffrée dans les tableaux administratifs, où sont additionnées – jamais soustraites – les filières énergétiques de l'économie. Ceci la transforme : l'énergie n'est plus seulement, comme en physique, cette capacité à produire mouvement, lumière, chaleur ou électricité. Elle devient, en termes économiques, « la capacité à effectuer un travail, utile pour les êtres humains, grâce à des changements dans la structure de la matière ou de sa position dans l'espace. Ces changements ne sont pas gratuits (*free*), mais impliquent un coût ou effort. » (Kander et al. 2014, p. 18-19). Ce sont ces efforts pour capter et utiliser les formes d'énergie qui sont incluses dans les bilans comptables des économistes : l'énergie devient une « ressource ». Cette ressource est marquée par le double sceau de l'invisibilité : invisibilité souterraine des énergies fossiles et nucléaires ; invisibilité quotidienne des consommations d'énergie par les usagers eux-mêmes (Ortar et Subrémon 2016, p. 11).

38. À partir de l'exemple de la chaleur, Blanche Lormeteau (2014, p. 205) écrit dans sa thèse de droit soutenue à l'université de Nantes : « La chose-chaleur et le bien-chaleur définis comme fonctions écologiques et services écosystémiques autorisent la valeur objective à cohabiter avec la valeur subjective, permettant la prise en compte des aspects *quantitatifs* et *qualitatifs* de l'usage d'une forme d'énergie au niveau de sa production comme de sa consommation. La qualité de la chaleur, ce n'est pas la question du recours à des sources d'énergie renouvelables ou de récupération. La qualité de la chaleur s'entend d'une approche exergétique qui ne confond pas la *consommation* quantitative et la *conservation* qualitative. »

Mais, avant d'être un étalon universel ou une quantité échangée ou consommée, l'énergie est une mise en relation. Cette approche relationnelle est importante dans le processus historique. Si le système énergétique n'est pas dé-chiffré, *les nains énergétiques* tels que les énergies renouvelables passent sous les radars quantitatifs de l'administration. Une entrée classique par les politiques publiques masque, par exemple, une large part de l'histoire de l'énergie solaire avant les années 1970 en France (Teissier 2013b, p. 12). Pour écrire une *Histoire des énergies renouvelables en France, 1880-1990*, Anaël Marrec (2018a, p. 36) a décroché du vol surplombant du système énergétique et adopté un rase-mottes au plus proche des convertisseurs de « forces naturelles ». Elle a ainsi repéré une multitude de projets rêvés, prévus ou réalisés, dans des espaces utopiques, métropolitains ou coloniaux. Son interprétation des projets énergétiques comme « nœuds techno-politiques » lui a permis de relier le secteur de l'énergie aux enjeux coloniaux, économiques, militaires ou politiques qui sous-tendaient la plupart des projets.

Nous avons prolongé sa réflexion doctorale en forgeant la métaphore du « sac de nœuds » pour qualifier l'histoire des énergies au XX^e^ siècle (Teissier et Marrec 2019). L'idée était déjà partiellement exprimée par Michel Serres dans la préface des *Éléments d'histoire des sciences* à propos de la complexité du processus historique [39]. Notre métaphore fonctionne à trois niveaux. Elle signale d'abord l'imbrication de facteurs techno-politiques, dont les degrés d'interaction dépendent de l'espace : interaction forte pour un projet local (nœud-convertisseur) ; interaction faible entre projets distants (contact des nœuds dans le sac). Ce premier niveau associe deux métaphores antérieures : celle du « tissu sans couture de composants en interaction » de Thomas Hughes (1998, p. 857) pour l'imbrication techno-politique ; celle des interactions différentes entre systèmes et sous-systèmes due à Jacques Ellul (1977, p. 88). Elle les approfondit par la mise en relation de l'intensité des interactions et de la spatialité des projets. Notre métaphore opère à un deuxième niveau. Elle suggère la difficulté à faire ou à défaire des projets énergétiques (faire ou défaire un nœud) et, plus encore, des ensembles énergétiques (nombre croissant de nœuds à mesure que le sac se remplit) en intégrant de nouveaux facteurs culturels, économiques, politiques et sociaux au-delà des techniques de l'énergie (Marrec et Teissier 2020, p. 248). L'image des nœuds à faire ou à défaire associée aux durées nécessaires en fonction de la taille des nœuds nous semble plus pertinente pour rendre compte d'un verrouillage des systèmes en place que la métaphore de la « trajectoire », si souvent convoquée en histoire des techniques pour rendre compte d'inerties sociotechniques (Teissier et Marrec 2019, p. 314-315). Le succès de cette métaphore mécanique est difficile à comprendre quand on se rappelle qu'elle contient l'image déterministe d'un mobile en mouvement dans un espace vide [40]. Enfin, l'image du « sac » intervient à un troisième niveau : elle rappelle que l'histoire des énergies n'est pas facile à manipuler et qu'elle se prête difficilement à des généralisations. Elle évoque encore l'idée que le social ne peut être saisi que de manière discontinue comme les fragments d'une société, qui révéleraient que des éclats déformés du réel. L'image du « sac » récuse la vision évolutionniste des lignées techniques qui surestime l'autonomie des filières énergétiques telles que le solaire, l'éolien, l'hydrogène, etc.

39. « Loin de dessiner une suite alignée d'acquis continus et croissants ou une même séquence de soudaines coupures, découvertes, inventions ou révolutions précipitant dans l'oubli un passé tout à coup révolu, l'histoire des sciences court et fluctue sur un réseau multiple et complexe de chemins qui se chevauchent et s'entrecroisent en des nœuds, sommets ou carrefours, échangeurs où bifurquent deux ou plusieurs voies. Une multiplicité de temps différents, de disciplines diverses, d'idée de la science, de groupes, d'institutions, de capitaux, d'hommes en accord ou en conflit, de machines et d'objets, de prévisions et de hasards imprévus composent ensemble un tissu fluctuant qui figure de façon fidèle l'histoire multiple des sciences. » (Serres 1989, p. 5)

40. Le cas le plus incohérent peut-être d'usage de la métaphore de la « trajectoire » est un article proposant une socio-histoire de l'hydrogène en Suède (au demeurant intéressant). Alors que les auteurs, recourant à la théorie de l'acteur-réseau, caractérisent trois moments définis par trois ensembles d'acteurs et trois significations de la pile à combustible, ils affirment vouloir « cartographier la trajectoire d'innovation » de l'hydrogène (Hultman et Yaras 2012). Mis à part l'utilisation réflexe d'une expression à la mode, qu'est-ce qui peut bien faire penser à une trajectoire dans cette interprétation construisant trois moments à partir de trois réseaux d'acteurs et de significations ?

L'introduction du concept de « sac de nœuds » et la focalisation sur les « nains énergétiques » décentrent le regard par rapport à l'ensemble homogène qui serait le système énergétique. Ceci relativise d'autant l'autonomie du champ de l'histoire de l'énergie. L'entrée par le problème du stockage est une autre façon de décloisonner l'histoire de l'énergie par une considération transversale des filières énergétiques et par l'intégration de facteurs de contexte au-delà de l'énergie.

Choix méthodologique : données ou variables de la recherche ?

La tension entre l'approche chiffrée et l'approche relationnelle de l'énergie introduit les méthodes comme deuxième référent commun entre humanités et ingénieries. Walter G. Vincenti, ingénieur de formation et professeur d'aéronautique à l'université de Stanford, a orienté une partie de ses recherches vers les sciences et techniques en société (STS). Il montre, dans un article consacré au système d'éclairage électrique de Thomas Edison, comment les ingénieurs de la fin du XIX^e^ siècle prennent seulement en compte les contraintes matérielles et, éventuellement, économiques, mais ignorent complètement les dimensions sociales et culturelles de la technique (Vincenti 1995). Cela n'a sans doute pas été infirmé par son expérience personnelle des interactions entre techniciens et technologues au XX^e^ siècle puisqu'il publie cet article à près de quatre-vingts ans. L'approche technicienne est très répandue dans les deux espaces techno-politiques déjà évoqués, la mémoire collective et la démocratie technique au XX^e^ siècle. Ceci valorise d'autant l'appréhension technico-économique des problèmes de société basée sur les calculs de rendement, l'optimisation de phénomènes chiffrables tels que les prix, les quantités, les tailles, etc.

Saisir des phénomènes par les nombres permet une certaine concision. La conversion entre unités d'énergie est utile pour comparer des filières énergétiques : une tonne équivalent pétrole (tep) vaut 1,43 tonne équivalent charbon (tec) ; 41,87 10^9 joules (J), abrégé en 41,87 GJ ; 11,63 10^6 watts-heure (Wh), abrégé en 11,63 MWh ; ou encore 3,37 10^6 British thermal unit (Btu). Pour les puissances, un cheval-vapeur vaut 735,5 watts en France et 745,7 watts en Grande-Bretagne. En 2019, les sociétés humaines du monde entier consomment 581,5 exajoules d'énergie primaire (1 EJ = 10^{18} J) (British Petroleum 2021, p. 11). L'Europe compte pour 14 % du total mondial (83,5 EJ) et la France pour 1,8 % (9,7 EJ). Pour la France, une telle consommation est de l'ordre de 230 milliards de tonnes équivalent pétrole (Mtep). Malgré la commodité et la pertinence des ordres de grandeur, la comparaison par les chiffres peut servir à masquer des aspects importants des phénomènes en jeu. Ainsi, X. Ract-Madoux (1972, p. 484), chef du département des Études et projets hydroélectriques d'Électricité de France (EDF), s'étonne que des auteurs puissent comparer le coût de l'électricité stockée dans une batterie au plomb et une station de pompage couplée à un barrage hydroélectrique. Ce technocrate d'EDF ne juge pas le rapprochement valable car, si les ordres de grandeur sont proches (autour de 200 F/kW), « la durée de vie » moindre de la batterie (d'un facteur trois au moins) n'est alors pas prise en compte. Une telle comparaison n'est pas valable selon lui car elle gomme les problèmes de maintenance afférents à tout dispositif technique.

Ceci pose une question générale de méthode de résolution d'un problème. Comment choisir, dans l'environnement du problème, ce qui est « donné » et ce qui est « variable » ? Il me semble que la question est rarement posée parce que le choix est dissout par l'habitude disciplinaire. C'est ce dont m'a convaincu l'analyse de neufs projets issus des sciences de l'ingénieur et de la nature présentés en mars 2019 lors du 3^e^ séminaire annuel du GIS Perle (Teissier 2019). Prenons deux exposés pour le montrer. Pour la réalisation d'une cellule photovoltaïque, le rayonnement solaire est pris comme donné, le taux de conversion lumière-électricité comme variable. La situation est classique en science et ingénierie des matériaux : une donnée d'entrée, une boîte noire

à optimiser, un signal de sortie. Construire la boîte noire en assemblant des matériaux de silicium en couches minces est une opération délicate mais le choix des données et variables s'impose par routine, sans y faire attention. Or, prendre comme donnée une moyenne de rayonnement solaire ne satisferait pas des géographes, soucieux du lieu, de la durée, du moment et de la saison d'usages.

Le second exposé portait sur la « décontamination électrochimique des gaz issus de la biomasse à haute température » dans un laboratoire d'électrochimie. L'identification des variables est, cette fois-ci, plus compliquée car elle concerne des gaz générés lors de la décomposition thermique de déchets agricoles ayant des spécificités matérielles (nature, quantité, prix) dépendantes d'un territoire particulier (Pays de la Loire), ces gaz servant ensuite comme combustible pour le fonctionnement d'une pile à combustible. L'une des subtilités de cette recherche est d'identifier des gaz polluants (pour la pile à combustible) et de réduire leur teneur jusqu'à un seuil d'« acceptabilité » sans trop dépenser d'énergie (chaleur) et de temps (durée des processus). Cet exposé fournit une possibilité de rencontre, qui n'a pas été envisagée par les auteurs électro-chimistes, avec les sciences de la société. Ainsi, des logisticiens pourraient étudier le transport des déchets entre les zones agricoles et les stations électrochimiques et la circulation des fluides gazeux entre les différentes piles à combustible ; des économistes s'intéresseraient à la disponibilité des masses de déchets et les fluctuations de prix ; des politistes suivraient le déploiement de politiques agricoles dans la région ; des écologues analyseraient la distribution des biomasses d'origine agricole et naturelle et le bien-fondé de leurs consommations, etc. Ce qui était considéré comme donné par les électro-chimistes (nature, quantité, transport, prix) devient variable, et même objet d'étude, pour les logisticiens, les économistes, les politistes et les écologues. L'éloignement du cœur de la communauté disciplinaire remet en cause l'équilibre consensuel entre variables et données.

L'idée de croiser des approches différentes pour appréhender un problème complexe n'est pas nouvelle. On la trouve, par exemple, de manière explicite au début du xx^e^ siècle avec Bernard Brunhes (1867-1910). Ce physicien de formation enseigne à l'université de Dijon puis de Clermont-Ferrand des cours d'électricité et de thermodynamique [41]. Il étend ensuite ses travaux vers la météorologie, la mécanique des fluides et la géologie lorsqu'il devient directeur de l'Observatoire du Puy de Dôme (1900-1910). C'est dans ce contexte qu'il publie en 1905 un court article montrant l'inversion de l'aimantation permanente de certaines roches volcaniques par rapport à l'aimantation actuelle de la terre, pour laquelle il est connu aujourd'hui. Sa circulation au sein des sciences de la nature, heuristique par les résultats produits, n'est pas rare au début du xx^e^ siècle. Ce qui est plus étonnant est son « incursion » dans une science de l'homme et de la société : le droit. Un intérêt amateur le conduit à produire un travail original à la croisée du droit de l'énergie et de l'aménagement du territoire. Il débute une conférence intitulée « Houille blanche, déboisement et droit de propriété » en expliquant son cheminement, de la physique vers le droit de l'hydroélectricité, par le plaisir de l'inconnu, le désir de mise en relation de domaines hétérogènes et l'appropriation de la pensée juridique :

> Depuis plusieurs années déjà je m'occupe des problèmes que soulève l'utilisation des richesses hydro-électriques de la France. J'ai commencé par aborder ces problèmes en physicien : je n'ai pas tardé à voir l'étroite liaison qui existe, en une matière aussi complexe, entre les questions de science pure et les questions de législation : et je me suis laissé entraîné à des incursions sur le domaine juridique. J'ai trouvé, à ces incursions, le plus vif plaisir personnel : les études de M. [Paul] Bougault [avocat à la Cour d'appel de Lyon], que j'ai suivies avec une attention ininterrompue dans l'excellente Revue *La Houille blanche*, m'ont charmé par cette association de l'esprit de

41. Voir sa notice du site internet Identifiants et Référentiels pour l'enseignement supérieur et la recherche : https://www.idref.fr/031059422#

> logique déductive et du sens des réalités, qui vivifie le droit comme la science expérimentale. Je m'efforcerai de ne pas encourir le reproche que l'éminent avocat adressait à certains ingénieurs, de parler de choses qu'ils ignorent ; et en tous les cas, je n'ai pas la prétention de faire la leçon à des professionnels. Je prétends seulement apporter des réflexions qui peuvent, à leur tour, faire réfléchir. (Brunhes 1905a, p. 1-2)

Dans cet extrait, Brunhes distingue bien l'expert, technicien de l'énergie ou du droit, et l'amateur, technologue non professionnel dont l'objectif est de (faire) réfléchir. Ce décalage du regard par rapport aux habitudes de penser le territoire est même souhaité par certains technocrates, « éminents fonctionnaires », du ministère de l'Agriculture en charge des eaux et des forêts :

> L'intervention de personnes qui, n'étant pas du métier, abordent un problème avec d'autres manières de penser que ceux dont c'est l'occupation journalière, peut d'ailleurs, en certains cas, n'être pas sans intérêt. C'est au moins ce qu'ont bien voulu me dire, soit dans des correspondances personnelles, soit dans des écrits publics, d'éminents fonctionnaires de l'Administration des Eaux et Forêts après que, [au second Congrès du Sud-Ouest navigable] tenu à Toulouse en 1903, j'ai repris, en les appliquant au problème connexe et si capital du reboisement de nos montagnes, les idées que j'ai exposées deux ans plus tôt dans un article de la *Quinzaine*, au sujet de la *Houille Blanche*. (Brunhes 1905a, p. 2)

Ainsi, Brunhes, technicien de l'énergie, entame une discussion agréable et constructive avec des techniciens du droit sur le sujet « complexe » de l'aménagement énergétique et forestier du territoire. Ce faisant, il développe un discours technologique interdisciplinaire, dont le caractère inhabituel et original séduit certains technocrates du ministère de l'Agriculture, ayant la charge d'administrer les eaux et forêts du territoire national. Ce cas de gestion couplée des rivières et des forêts montre comment les manières d'aborder un problème et de concevoir des solutions peuvent être reconfigurées en croisant la science et l'industrie de l'énergie, la notion de droit de propriété et l'administration des territoires par l'État. Il est emblématique d'un dialogue entre sciences, ingénieries et humanités qui, bousculant les habitudes de pensée, recompose ce qui est donné, ce qui est variable et ce qui est même imaginable dans la représentation du monde sensible.

Transferts de représentations : schémas, analogies, modèles

En décalant le regard, une confrontation méthodologique entre disciplines peut modifier les représentations du monde. À l'inverse, les disciplines s'empruntent les unes aux autres des schémas de visualisation. Les transferts figuratifs entre ingénieries et humanités ouvrent un troisième espace de dialogue. En effet, la circulation de figures implique une réappropriation locale et des usages différenciés en fonction des communautés, des disciplines et des contextes. Comme le souligne A.-F. Garçon (2015, p. 86), « la mise en scène textuelle et/ou iconographique d'un geste technique, comme celle d'ailleurs d'un outil ou d'un procédé s'origine dans une intentionnalité distincte, fruit d'un contexte donné ». Le transfert de figures entre disciplines interroge ainsi la construction de la preuve au sein de chaque discipline et la pertinence de la transdisciplinarité pour appréhender un monde pluriel et hétérogène de manière transversale.

Dans cette perspective, Sophie A. de Beaune, Liliane Hilaire-Pérez et Koen Vermeir ont codirigé un bel ouvrage collectif réunissant archéologues, cognitivistes, historiens, informaticiens, muséographes, philosophes, psychologues et théoriciens du langage pour appréhender *L'analogie dans les techniques* de manière transdisciplinaire, de la préhistoire à l'époque moderne. Leur hypothèse de départ était que « l'analogie joue un rôle crucial

dans l'invention, la circulation et l'appropriation des techniques ». L'ampleur du thème justifiait l'ouverture d'« un espace de confrontation et de rapprochement » entre les sciences naturelles, les sciences historiques et les humanités (A. de Beaune et al. 2017, p. 8-9). La définition relationnelle de l'analogie, « D est à C comme B est à A », recouvre, en effet, une diversité de situations impliquant simultanément perception et raisonnement : correspondances sémantiques, figures de style, opérations d'imitation, procédés de comparaison, proportions mathématiques, relations grammaticales, schémas cognitifs, etc. Cet espace de dialogue original permet de formuler une double interrogation visant « les catégories et les terminologies » des techniciens d'une part et « les théories fondées sur des analogies » et les pratiques analogiques des technologues d'autre part (A. de Beaune et al. 2017, p. 26).

La réflexion sur les pratiques analogiques est stimulante parce qu'elle permet d'expliciter l'emprise des univers techniciens sur les imaginaires des technologues. Elle suggère des façons dont la figure du monde est technicisée. Par figure, on peut entendre un contenu rhétorique, symbolique ou géométrique (Rey 2012, p. 1344). Une figure du monde s'apparente aussi à une ébauche de modélisation par ses aspects schématiques et fonctionnels. La modélisation, en impliquant un choix de variables et de données, poursuit l'échange engagé entre humanités et ingénieries au niveau méthodologique. Elle l'élargit encore par les multiples médiations qu'elle sous-tend : entre matériel et idéel, entre science et technique, entre enquête et résultat, entre social et épistémique, entre artefact et nature (Petersen 2000). Elle suscite des échanges d'autant plus intéressants que son utilisation n'est pas uniforme sur la période 1850-2050. Quasi-inexistante jusqu'aux années 1930, elle s'affirme avec la Deuxième Guerre mondiale en recherche opérationnelle et en gestion des systèmes (Armatte et Dahan Dalmedico 2004, p. 255-256). Ses applications militaires concernent « les activités de planification exigeant une grande coordination entre les capacités d'acheminement des hommes et du matériel, les capacités productives et les capacités de stockage ». Ses principales bases sont, jusqu'aux années 1960, la « rationalité » des décisions humaines, individuelles et collectives, et « l'optimisation » des systèmes d'échanges (Armatte et Dahan Dalmedico 2004, p. 257). Ces présupposés logiques et mathématiques des comportements humains sont mis en défaut par les enquêtes de terrain sociologiques et ethnographiques. Mais, dans le même temps, une partie des sciences sociales rêve d'expliciter des mécanismes réguliers des sociétés humaines, y compris par des modélisations démographiques ou économiques.

Le recours aux modélisations s'accroît d'ailleurs depuis un demi-siècle à mesure que les puissances de calcul s'accroissent de manière exponentielle, que les infrastructures numériques quadrillent d'une manière de plus en plus dense les espaces terrestres et maritimes et que les réseaux de satellites de communication encerclent littéralement la planète Terre. Le modèle, par son polymorphisme, et la modélisation, par son caractère médiateur, offrent des espaces appropriés pour engager un dialogue entre ingénieries et humanités. Ils stimulent le partage par une fréquentation commune mais différenciée en fonction des disciplines. Ils soulignent les différences et contradictions possibles dans le choix des données, variables, mécanismes, etc. Une thèse en cours au Centre François Viète explore justement le cadre et le contenu épistémologique d'une « science des futurs possibles ». Laura Duplaquet (2025) pose le problème de l'administration de la preuve dans un domaine comme la climatologie, où les données remontant aux ères géologiques anciennes sont utilisées, à travers des modélisations raffinées, pour confronter des mesures présentes du climat et établir des scénarios climatiques pour les décennies et siècles à venir. Afin de s'abstraire d'une vision naturaliste, Duplaquet inscrit sa réflexion dans une pluralisme épistémologique entre l'histoire et les sciences naturelles à caractère historique telles que la paléoclimatologie et la géologie. Une analyse épistémologique est, en effet, cruciale dans le contexte politique actuel où, malgré les résultats préoccupants et les prédictions effrayantes des rapports successifs du

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), les États hégémoniques d'Amérique du Nord, d'Europe de l'Ouest et d'Asie du Sud-Est continuent d'organiser une croissance économique à leurs échelles nationales et à l'échelle planétaire.

En conclusion, la section 1.6.4 posait la question de la possibilité d'un dialogue entre techniciens, technocrates et technologues autour de la construction de savoirs et de savoir-faire sur le monde. Ces premiers essais de dialogue interdisciplinaire et de circulation entre disciplines sur le thème de l'énergie confirment la pertinence de la question et offrent des pistes encourageantes sur la légitimité de la démarche. Par sa focalisation sur les notions, les méthodes et les images, cette section fait écho au concept de « schèmes techniciens » de la section 1.3.2. Un schème technicien définit un ensemble structuré d'intelligibilité, d'opérativité et d'affectivité qui circule des milieux techniciens vers la société, y compris vers les sciences humaines et sociales. Les espaces de dialogue et les schèmes techniciens offrent ainsi deux moyens complémentaires, mais non exhaustifs, pour mener une exploration des technosciences contemporaines et du régime technicien.

1.7 Plan de l'essai : *Le stockage de l'énergie (1850-2050). Problème de techniciens, concept de technologues, désir de technocrates.*

Le chapitre 1 m'a donné l'occasion de détourner l'exercice classique d'égo-histoire pour exposer les échafaudages méthodologiques, intellectuels et personnels de mon habilitation à diriger des recherches. Il a justifié les cadres spatiaux et temporels de cet essai sur la période 1850-2050 entre l'Europe de l'Ouest et l'Amérique du Nord. Il a dessiné les contours du concept de régime technicien qui sera central pour explorer la modernité technique des sociétés industrielles contemporaines. Un premier dialogue entre humanités et technologies (1.6) a testé le fondement épistémologique de cet essai et la sonde tripartite articulant techniciens, technocrates et technologues. Il est temps de passer à l'étude empirique du thème général, du problèmes du stockage de l'énergie, en la confrontant aux cadres conceptuels du régime technicien, de la technologie et des humanités constituant le corpus.

Le chapitre 2 débute l'exploration du régime technicien par son squelette général. Il trace une cartographie globale du stockage de l'énergie à travers les deux siècles et les deux sous-régions de l'essai. Il s'agit d'une typologie multiple qui identifie et classe les « temps, échelles et gestions du problème ». Les quatre chapitres suivants se focalisent sur un élément constitutif du régime technicien, à des moments différents de la période 1850-2050, en fonction des spécificités du problème du stockage de l'énergie.

Le chapitre 3 explore les strates profondes de la civilisation occidentale marquée par le capitalisme marchand, une appréhension religieuse et savante du cosmos et des pratiques collectives de prédation politique, de production industrielle, d'extraction environnementale, de création culturelle, etc. Ces structures socio-culturelles profondes, qui se superposent comme des strates géologiques, rendent compte de multiples temporalités des sociétés humaines emmagasinées par le processus historique. Elles sont reconfigurées par des forces inédites, savante, technique et industrielle, durant la deuxième moitié du XIX^{e} siècle. De cette interaction socio-historique émerge une nouvelle manière collective de penser et de mettre « l'énergie en magasin ».

Le chapitre 4 délaisse les strates profondes de la civilisation pour suivre la construction de nouveaux espaces énergétiques. Les « voisinages électriques » enchaînent progressivement les populations européennes et états-uniennes à des réseaux d'infrastructures dont la puissance fascine l'occident industriel sur la période 1880-1910. À ce niveau géographique, organisationnel et matériel des infrastructures correspond un enchaînement idéel au régime technicien.

C'est cette « structuration des imaginaires énergétiques » qu'explore le chapitre 5. Trois schèmes énergétiques majeurs croisent le problème du stockage de l'énergie au cours du XX^e^ siècle : la représentation du cosmos comme flux et stocks d'énergie ; la prétention technicienne à saisir les temporalités des sociétés humaines à laquelle n'échappe pas même le futur ; le partage du sensible et du psychique par-delà nature et culture. Ce qui est crucial ici pour comprendre la force agrégative du régime technicien, c'est la multiplicité des registres humains qui sont noués au sein d'un schème technicien : intelligibilité certes, mais aussi opérativité, et enfin affectivité.

Le dernier chapitre réassemble les constituants du régime technicien croisés dans les quatre chapitres précédents autour d'un problème du temps présent : l'économie de l'hydrogène. En réunissant ses différents constituants, le régime technicien devient un monde habité, si ce n'est habitable. Le chapitre 6 montre comment les « mondes hydrogène » agrègent la profondeur temporelle et inconsciente des structures socio-culturelles du capitalisme industriel, des modes de penser, de sentir et de construire des espaces énergétiques, c'est-à-dire des façons d'habiter un voisinage d'infrastructures et un horizon d'imaginaires. Face à l'emprise du régime technicien, les mondes hydrogène nous reposent la question du politique dans la construction du contemporain, du présent immédiat aux futurs incertains, encadré par les héritages du passé.

Chapitre 2

Espaces, temps et gestions d'un problème, 1850-2050

> « L'objectif principal du stockage de l'énergie est "d'adapter" à chaque instant la production à la demande, malgré le caractère le plus souvent irrégulier et aléatoire de l'une et de l'autre, en mettant en réserve les kWh. [...] Ce "transfert dans le temps" de grandes masses d'énergie implique – comme le transport dans l'espace par les lignes électriques – un certain "péage" constitué ici, d'une part, par les pertes d'énergie et, d'autre part, par les charges financières et les dépenses d'exploitation ».
>
> Gaston Remenieras, *Vue d'ensemble sur les divers procédés de stockage de l'énergie*, 1956

Étudier un problème tel que le stockage de l'énergie implique de choisir conjointement des artefacts et des temporalités. La première partie du chapitre 2 justifie le choix des domaines traités et l'exclusion de certaines filières industrielles. Les deux parties suivantes analysent deux aspects du problème qui découlent de ces choix thématiques : les dynamiques temporelles d'abord, les structures gestionnaires ensuite. Elles dessinent deux cartographies du problème facilitant son appréhension à l'époque contemporaine sans en épuiser la complexité socio-historique, qui sera abordée dans les chapitres suivants. La cartographie de la deuxième partie agence les multiples temporalités du stockage de l'énergie : durées, périodes et rythmes du phénomène historique. La France est prise comme référence car elle présente l'avantage d'avoir été bien étudiée et de composer un État-nation relativement homogène par son administration fort centralisée. Certaines précisions seront ajoutées pour indiquer des décalages temporels relatifs à la sous-région ouest européenne où les dynamiques transnationales prennent de l'importance à partir de la Première Guerre mondiale (Lagendijk 2008, p. 25-28). Les États-Unis apparaîtront ponctuellement, comme une toile de fond par rapport à l'Europe de l'Ouest. La troisième partie plonge dans une dimension plus gestionnaire et plus structurelle du problème. Elle détaillera successivement les modes, les fonctions et les échelles du stockage de l'énergie. L'analyse, basée sur les classifications des techniciens et des technocrates, construit des typologies compréhensives du problème sur l'ensemble de la période 1850-2020.

2.1 Espaces : borner le thème, déborder du périmètre

L'énergie n'est pas une réalité ontologique et l'histoire de l'énergie n'a rien d'une évidence (cf. 1.6.4). Dans cette perspective, l'entrée dans le champ de l'énergie par un problème spécifique a une double vertu. D'une

part, elle permet d'explorer un territoire complexe à la manière des nomades, sans s'arrêter aux frontières thématiques mais en faisant l'expérience des marges institutionnelles. D'autre part, elle offre un pivot stable de réflexion, le problème du stockage de l'énergie, qui se déploie dans des contextes différents. Une telle diversité dans l'unité permet de ne pas réifier, voire fétichiser, l'objet de recherche.

Prenons trois situations, une par catégorie d'acteurs, pour évoquer le stockage de l'énergie par une histoire à rebours, dévoilant des perspectives contrastées. « Le stockage de l'énergie », écrit un doctorant en sciences de l'ingénieur il y a une douzaine d'années, « est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. L'opération de stockage d'énergie est toujours associée à l'opération inverse consistant à récupérer l'énergie stockée (le déstockage). Ces deux opérations de stockage/déstockage constituent un cycle » (Camara 2011, p. 25). Cette approche des techniciens du temps présent articule deux gestes inverses, stockage et dé-stockage, effectués à des moments et dans des lieux différents dans un contexte d'essor des énergies renouvelables intermittentes. Elle attire l'attention sur une temporalité spécifique du phénomène. Une telle approche n'est pas forcément celle qui importe aux technocrates. Ainsi, au début des années 1980 alors que le stockage hydraulique est devenu important, un responsable des études chez Électricité de France conçoit le problème à travers deux types de « variations de la demande » d'électricité : « périodiques de grande amplitude » et « aléatoires plus ou moins importantes et rapides » (Courier 1982, p. 403). Le gestionnaire-technocrate doit donc « adapter à tout instant l'offre à cette demande fluctuante [...] à une échelle de temps très fine ». Le travail des technocrates assure alors, à chaque instant et dans la durée, un équilibrage des flux de puissance dans des réseaux électriques. Un siècle plus tôt, alors que les premiers réseaux électriques de puissance colonisent les quartiers d'affaires comme Manhattan à New York, un correspondant anonyme de la revue *Science* envisage l'amélioration des batteries de stockage comme un front à renforcer dans le système électrique en construction, afin de « promouvoir l'adoption universelle de l'électricité » (Science 1889, p. 53). Il fait deux fois œuvre de technologue. Premièrement, il pense la machine dans le système, à la manière de Thomas Hughes (1983) un siècle plus tard. Deuxièmement, il pense le stockage dans le social en suggérant que l'artefact pourvoyeur d'électricité « sous la main quand et où cela est nécessaire » pourrait abolir le temps et l'espace, c'est-à-dire transformer le social.

Ces trois cas singuliers, en suggérant que le stockage d'énergie impose des rythmes et reconfigure des espaces, rendent visibles les effets culturels, économiques et sociaux du régime technicien. Ils illustrent l'idée selon laquelle le social ne peut être saisi que de manière discontinue, par éclats juxtaposés, mais que ces fragments éclatés de réel portent une image plus large de la société dans son ensemble (cf. 1.6.4). Ils s'inscrivent ainsi le cadre conceptuel du « sac de nœuds », qui souligne le croisement et l'assemblage de différents facteurs politiques et économiques au sein d'un même convertisseur d'énergie (Teissier et Marrec 2019, p. 331). Le régime technicien peut ainsi être interprété comme un ensemble de « sacs de nœuds ». Un barrage hydroélectrique, une pile à combustible et un corps humain peuvent être interprétés comme des « sacs de nœuds ». Ceci dote l'historiographie des énergies de ramifications sans fin. Toute recherche étant finie, un bornage est néanmoins nécessaire. Quel périmètre tracer pour appréhender le stockage de l'énergie dans les sociétés nord-américaine et ouest-européenne depuis le milieu du XIX^e^ siècle ?

Trois éléments structurant l'économie de l'énergie de la fin du XIX^e^ siècle restent en place par la suite (cf. chapitre 3). Tout d'abord, les énergies fossiles, en particulier le charbon, sont prépondérantes dans l'économie mondiale. Ensuite, la force hydraulique, déclinée entre tradition (moulins à eau) et modernité (barrages hydroélectriques), constitue une filière importante à côté des énergies fossiles. Enfin, l'utilisation des forces naturelles prend place dans l'imaginaire technicien. Les forces du vent, du soleil, des marées et de la chaleur

terrestre ne doivent pas être négligées malgré leur quasi-absence des bilans énergétiques car elles servent d'« outillage mental » (Lucien Febvre) pour penser l'économie de l'énergie. La « chaleur terrestre » ou géothermie offre par exemple un bel exemple d'interactions entre nature et culture, entre surface et profondeur, entre réserve naturelle et réservoir artificiel (cf. 5.3). Mais, le poids quantitatif d'un artefact est également important. Ainsi, le système électrique étend ses réseaux de puissance au cœur des sociétés industrielles à partir de la fin du XIX^e^ siècle. Il rend incontournable l'appréhension de l'énergie comme un ensemble de flux et de stocks. Le réseau incarne la capacité de stockage d'une puissance pour une utilisation future et l'enchaînement de l'énergie à une série de conversions. Ces deux aspects caractérisent d'ailleurs l'ensemble de la technique moderne pour Heidegger. Les contemporains de la fin du XIX^e^ siècle considèrent également l'électricité en particulier et l'énergie en général et leurs accumulations comme des garanties voire des équivalents de la civilisation. Ceci donne la base du périmètre thématique de l'essai.

J'écarte néanmoins du cœur de l'essai la question des approvisionnements en combustibles fossiles et nucléaires. Le thème implique des enjeux géostratégiques et une économie minière, qui sont des champs de recherche en soi. Il ouvre vers les problèmes environnementaux, dont le recyclage partiel des matériaux, le stockage des déchets nucléaires dangereux durant des milliers d'années, les émissions massives de gaz à effet de serre, etc. Chacun de ces problèmes est un univers en soi. Je justifie d'écarter les énergies fossiles et fissiles de cet essai de deux manières. D'une part, l'économie fossile relève beaucoup plus d'un problème de flux de matière que du stockage d'énergie. L'économiste Pierre-Noël Giraud des Mines de Paris souligne que l'idée d'une « raréfaction des hydrocarbures » est fausse : « Nous avons deux à trois fois trop de carbone fossile par rapport à ce que nous pouvons nous permettre de brûler si l'on prend au sérieux – ce qu'il faut faire – la question climatique. » (cité par Foucart 2014). C'est donc bien plutôt un problème de gestion des flux de carbone dont il s'agit ici par rapport à des stocks naturels très abondants. D'autre part, la référence au stockage fossile ou nucléaire ne concerne pas la production d'énergie mais apparaît comme une conséquence écologique de l'activité industrielle. Elle pointe donc vers les questions de gestion des déchets industriels : artefacts produits, gaz émis, matière polluée, etc. La capture et le stockage de dioxyde de carbone, par exemple, ne sont encore qu'à l'état de projet. Ils seront donc en-dehors du cadre principal de l'essai mais apparaîtront ponctuellement au sujet du partage entre nature et culture (cf. 5.3.3) et de la politique actuelle de transition énergétique (cf. 6.2.3).

L'idée de croisement des mondes sociaux induit par l'énergie, rendue par la métaphore du « sac de nœuds », s'incarne à nouveau ici. Elle se retrouve exprimée de manière similaire par un enseignant-chercheur du Laboratoire de recherche en hydrodynamique, énergétique et environnement atmosphérique (LHEEA) de l'École centrale de Nantes. En 2015, lors d'un entretien avec A. Marrec, Alain Clément tirait la conclusion suivante : « De manière globale, voilà une généralité pour l'énergie : c'est forcément interdisciplinaire, puisque l'énergie, on ne la crée pas, on la déplace, simplement. Avec l'énergie, on passe toujours d'un monde physique à un autre, et ça, c'est très intéressant. » (Clément 2020, p. 132) Le rapprochement est intéressant dans la perspective d'un dialogue entre techniciens et technologues. La propriété de l'énergie à être déplacée, convertie plutôt que créée, stimule son aptitude à connecter des espaces hétérogènes, qu'ils soient physiques ou sociaux. Ceci encourage l'appréhension du stockage de l'énergie par les marges, les travers et les interstices plutôt que par le centre des macro-systèmes techniques.

2.2 Temps : durées, périodes et rythmes du stockage de l'énergie

Le temps vécu est central pour penser la temporalité. Or, les routines de la vie, en premier lieu, le langage, inscrivent le temps dans l'espace. C'est l'un des apports de la linguistique, notamment de la théorie contemporaine de la métaphore de George Lakoff et de ses disciples, d'avoir montré que le langage ne cesse de dire le temps par rapport à des choses, des lieux et des mouvements. De telles spatialisations du temps sont efficaces car leur « cartographie n'est pas arbitraire mais s'inscrit dans le corps et l'expérience et la connaissance quotidienne » (Lakoff 1979, p. 245). Elles sont souvent inconscientes car intégrées à un imaginaire collectif et à un habitus linguistique lors de l'apprentissage de la parole et des langues. Si ce sont les plus courantes, ces métaphores spatiales ne sont pas les seules. Une analyse des métaphores utilisées en histoire des techniques nous a permis, avec A. Marrec d'identifier cinq types de temporalité des techniques en société : opératoire, statistique, mémorisée, socioculturelle et intime (Teissier et Marrec 2019, p. 311-312).

Le type « opératoire » fait justement partie des métaphores spatiales. Il figure le temps comme une flèche : orienté, linéaire et mesurable. Le temps opératoire est issu de la construction des sciences modernes, à partir du XVII^e^ siècle, et de la plus mathématisée d'entre elles : la mécanique. Il est si ancré dans les habitudes de vivre des sociétés à horloges et si précis dans les pratiques technoscientifiques qu'il est « spontanément » pris comme universel. C'est le temps privilégié du régime technicien. Il séduit aussi les chercheurs confrontés aux mesures du social, en premier lieu économistes et géographes, mais aussi d'autres sciences humaines et sociales telles que l'histoire. Il est en effet très pratique pour quantifier l'univers social et dégager des tendances historiques. Ainsi, le temps opératoire offre une base pour l'analyse temporelle de l'énergie et de son stockage au XX^e^ siècle (2.2.1). Cette conception homogène et linéaire du temps se heurte aux discontinuités et hétérogénéités temporelles des univers sociaux (2.2.2). L'incorporation de facteurs économiques, politiques et sociaux induit alors une superposition de temps pour un territoire donné comme la France et des écarts temporels d'un territoire à l'autre, comme entre l'Europe de l'Ouest et l'Amérique du Nord par exemple (2.2.3).

2.2.1 Temps opératoire : exponentielle de l'énergie, linéarité du stockage

Le temps opératoire permet de saisir des évolutions quantitatives et leurs rythmes à condition que les quantités gardent une cohérence suffisante sur la période. Ainsi, la démographie connaît une évolution linéaire en France à l'époque contemporaine. La population est multipliée par 1,86 en 170 ans. Elle passe de 36 à 67 millions d'habitants de 1850 à 2020, à territoire constant. Ce quasi-doublement paraît lent par rapport aux évolutions de la consommation d'énergie. Ainsi, la production électrique double quasiment tous les dix ans en France durant l'entre-deux-guerres (Lacoste 1986, p. 121). « Cette "loi" statistique du doublement décennal » sert de base économique pour Électricité de France à la fin des années 1940 (Beltran et Bungener 1987, p. 64-65). Le doublement en dix ans, qui correspond à une croissance annuelle de 7,2 %, devient une loi auto-réalisée de la politique énergétique française des Trente Glorieuses. La croissance annuelle atteint même 7,4 % en moyenne sur la période 1950-1973.

Comme le montre la figure 2.1, l'évolution n'est pas linéaire comme pour la population française mais exponentielle. Le taux de croissance est infléchi par la « crise énergétique » des années 1970 mais reste fort, égal à 5,3 % en moyenne annuelle sur la période 1973-1981 (Courier 1982, p. 403). La zone grisée, correspondant à la consommation effective d'électricité, se détache alors de la courbe supérieure figurant le doublement décennal à partir de 1973. Une telle évolution exponentielle est également réalisée pour la consommation totale d'énergie en France au XX^e^ siècle. Elle résulte d'une superposition de sources d'énergie visible sur la figure 2.2.

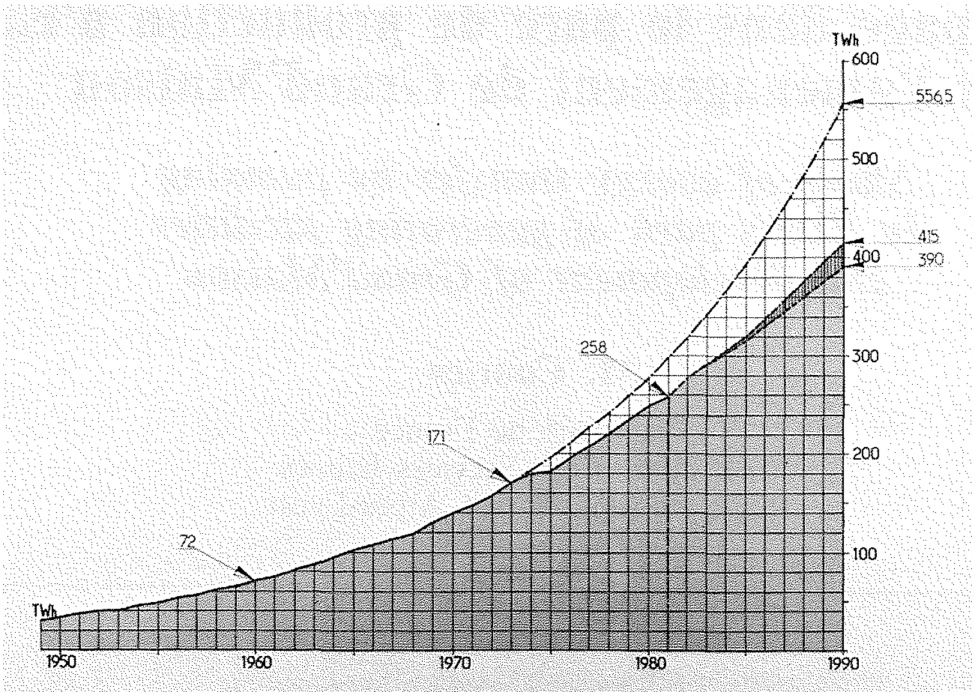

Figure 2.1 – Croissance exponentielle de la consommation française d'électricité, 1950-1990 (Courier 1982, p. 404)

Ce phénomène d'« accumulation » des sources d'énergie est désormais bien connu des historiens des techniques. Yves Bouvier (2012b, p. 34-35) est l'un des premiers à l'avoir clairement exprimé. « Alors que chaque énergie a connu sa période de prédilection, participant à recomposer les équilibres énergétiques, pratiquement aucune énergie n'a connu de déclin. [...] il y a bien apparition successive d'énergies mais celles-ci se cumulent au lieu de se substituer les unes aux autres ». Charbon, hydroélectricité, pétrole, ces trois premières couches sont visibles sur la figure 2.2 avant le milieu du xx^{e} siècle. La généralité de ces accumulations d'énergie depuis le début de l'industrialisation de l'Europe permet de douter de la possibilité d'une substitution effective et massive des énergies existantes par les énergies renouvelables dans un proche avenir. L'un des rares cas connus de transition énergétique à l'échelle du globe est justement observable, dans le cas français, sur la période 1950-1990 de la figure 2.2. Il a consisté dans le remplacement du charbon et de l'électricité thermique (à base de pétrole, gaz et charbon) par des productions nucléaire et hydraulique d'électricité. Mais ce phénomène de substitution est bien limité si l'on pense que la « consommation mondiale d'énergie a été multipliée par six entre 1950 et 2010 », principalement par la combustion d'hydrocarbures (Bouvier 2012b, p. 34).

Par contraste avec la croissance exponentielle de la puissance installée, l'évolution du stockage d'énergie paraît lente. Jean-Marie Tarascon en fait le constat, en décembre 2010, lors de sa leçon inaugurale à la chaire du Développement durable du Collège de France. Ce chimiste du solide spécialisé en électrochimie souligne « la lenteur des progrès dans le domaine du stockage de l'énergie » (Tarascon 2010, §28). La densité d'énergie stockée dans les batteries a été multipliée par cinq seulement en deux siècles. Deux mois plus tard, Tarascon conclut sa leçon du 2 février 2011 en reprenant ce « message important ». Le croquis qu'il a dessiné (figure 2.3) représente l'évolution de la densité d'énergie stockée dans les batteries secondaires les plus performantes sur la période 1900-2050 (Tarascon 2011, p. 52).

Trois segments linéaires se succèdent sur la figure 2.3. Le premier montre un triplement de la densité

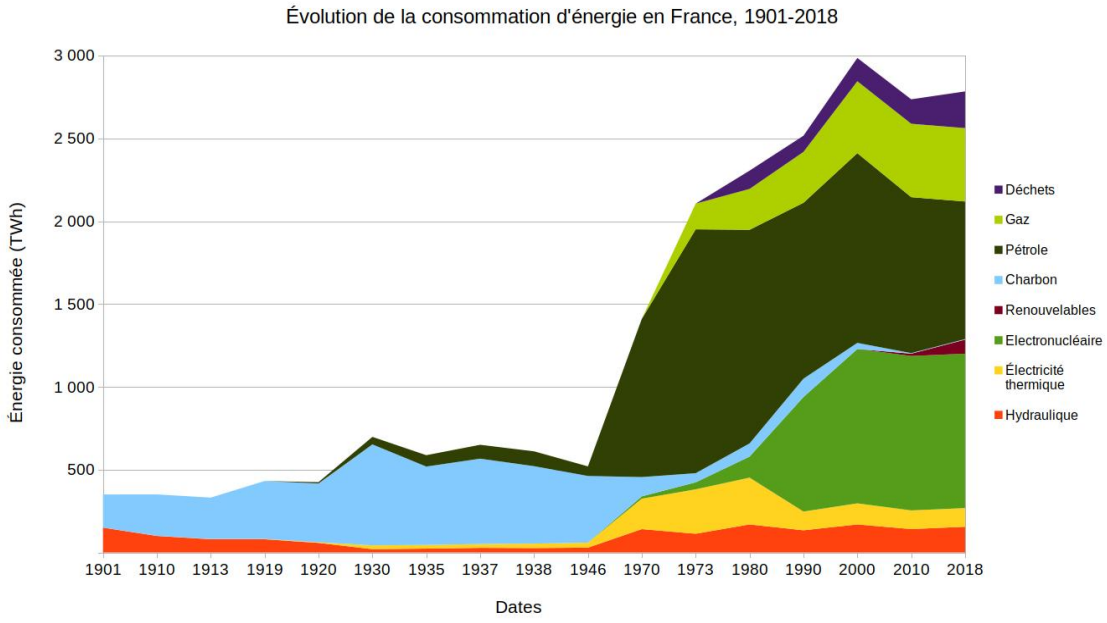

FIGURE 2.2 – Évolution de la consommation d'énergie en France, 1901-2018

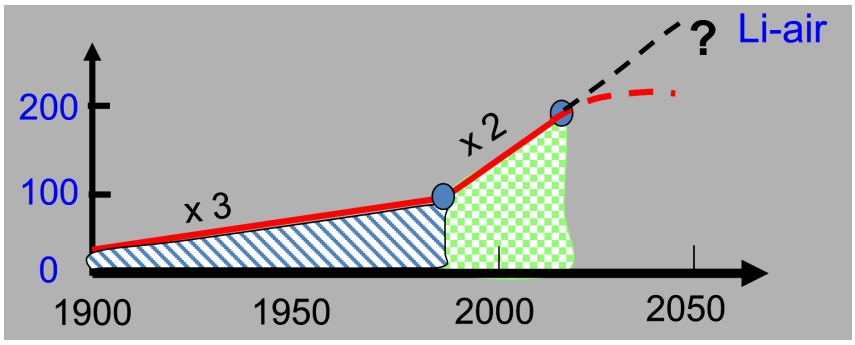

FIGURE 2.3 – Représentation du stockage des batteries secondaires, 1900-2050 (Tarascon 2011)

d'énergie stockée sur la période 1900-1980, de 30 wattheures par kilogramme (Wh/kg) des batteries au plomb de type Planté à 100 Wh/kg pour les batteries au nickel. Le second segment correspond à un doublement de la densité d'énergie grâce à la technologie lithium-ion, de 100 à 200 Wh/kg, en vingt ans seulement, de 1990 à 2010. Le troisième segment promet un doublement de la densité d'énergie stockée : trois ou quatre décennies de R&D permettraient ainsi de commercialiser un nouveau type de batteries (« Li-air ? ») vers 2050. Tarascon commente le croquis en cherchant à équilibrer l'espoir d'une « accélération » de la croissance linéaire, du premier au deuxième segment, et la nécessité de travailler dur pour faire advenir le troisième segment.

L'argument du professeur au Collège de France marque les esprits parce qu'il compare les rythmes du « progrès » de l'électrochimie et de l'électronique. Il oppose, à la croissance linéaire des capacités de stockage de l'énergie en électrochimie, le « doublement de la capacité de stockage [de l'information] en 18 mois » connu comme la « loi de Moore » en électronique (Tarascon 2010, §29). Le technicien devient ainsi technologue puisqu'il esquisse une phénoménologie des techniques. Tarascon différencie deux dispositifs technoscientifiques – batteries et micro-processeurs – à partir de la « complexité » des problèmes qu'ils posent et de la durée de

résolution. Il fait « des interfaces macroscopiques-microscopiques » le principal obstacle à l'amélioration des dispositifs électrochimiques.

Comment alors interpréter la loi de Moore en termes épistémologiques ? Si l'on poursuit le raisonnement de Tarascon, la croissance exponentielle du stockage de l'information a été possible par la résolution des problèmes d'interface dans les dispositifs électroniques. Elle révèle une potentialité des transistors à se laisser connecter pour constituer des circuits intégrés, qui sont, à leur tour, composés en micro-processeurs. Les phénomènes électroniques se montrent dociles face à l'entreprise informatique : ils coopèrent à l'intégration continue des hétérogénéités, du microscopique au macroscopique. Ceci permet l'amélioration rapide de dispositifs de stockage magnétique de l'information. À l'inverse, les phénomènes électrochimiques se montrent récalcitrants au passage des interfaces. Ils ne coopèrent pas facilement à l'entreprise du stockage de l'électricité. Une telle récalcitrance caractérise l'histoire des batteries et des piles à combustible dans la sphère cognitive et industrielle depuis le début du XIX^e^ siècle (Teissier 2017a, p. 82-83).

La « maîtrise des interfaces […] nécessite, selon Tarascon, une approche pluridisciplinaire, dans laquelle, la chimie sous toutes ses formes – inorganique, organique ou chimie de surface – joue un rôle clé ». De technologue, le chimiste du solide devient technocrate lorsqu'il propose d'administrer la recherche selon des modalités disciplinaires de ce type. La technologie se sociabilise. David Brock (2006) a bien montré que la « loi » de Moore n'en était pas une au sens des sciences de la nature. La durée du doublement du nombre de transistors implantés par unité de surface a évolué par exemple au cours du temps, de 18 mois au début à 24 mois à partir du milieu des années 1970. Cette règle de Moore sert également à l'industrie électronique pour construire sa stratégie commerciale faisant d'elle une prophétie auto-réalisatrice. Ceci renvoie à la dimension herméneutique des sciences humaines et sociales. Anthony Giddens insiste sur la manière dont les acteurs sociaux interprètent les situations qu'ils vivent, notamment à travers les règles sociales qu'ils connaissent, ce qui conditionne leur propre action et transforme le système social (Nizet 2007, p. 26-27). L'herméneutique de la loi de Moore s'incarnant en réalité historique alerte sur la subjectivité des comportements humains et la relativité des règles sociales. Si une analyse quantitative objective l'exponentialité de la production d'énergie et la linéarité du stockage d'énergie au XX^e^ siècle, elle ne peut saisir en revanche les significations prises par l'énergie et son stockage en fonction des époques, des lieux et des groupes sociaux.

Sur le seul terrain quantitatif, peut-on d'ailleurs conserver un même indicateur de stockage d'énergie (Wh/kg) sur un long XX^e^ siècle alors que la production d'électricité double tous les dix ans durant la période ? Une analyse historienne modifierait l'indicateur en représentant au cours du temps le rapport entre la densité d'énergie stockée dans une batterie et la quantité d'électricité produite à une époque par habitant. Le gain de stockage électrique de l'énergie serait plus lent encore que le facteur cinq ou six identifié par Tarascon. Mais, le quantitatif, malgré son apparence universelle, n'est pas suffisant. L'herméneutique des sciences humaines et sociales conduit à l'interprétation qualitative du social et de ses transformations. C'est l'une des raisons pour lesquelles le temps opératoire doit être complété par d'autres types de temporalité. Le temps n'est plus alors seulement une flèche homogène, mesurée et transparente mais un ensemble de modalités saturées d'expériences et de significations humaines.

2.2.2 Tuilages des temps sociaux : superpositions, recouvrements, décalages

Avec un titre iconoclaste, Jacques Le Goff réactualise en 2014 une question centrale de l'historiographie : *Faut-il vraiment découper l'histoire en tranches ?* Au-delà de la métaphore d'un temps aussi épais, dense et déformable qu'un morceau de pain, le médiéviste attire l'attention sur la relativité des ruptures historiques.

Il propose un long Moyen Âge finissant, non pas comme c'est la tradition au XV^e^ siècle mais au XVIII^e^ siècle. Ses arguments s'appuient sur la prise en compte, non des comportements d'une maigre élite humaniste de la Renaissance, mais de la masse des populations d'Europe de l'Ouest. Si les masses plutôt que les élites opèrent des mutations profondes, la modernité commence au XVIII^e^ siècle en Europe avec les transformations politiques (républiques), économiques (industrialisation) et culturelles (laïcisation et alphabétisation) plutôt qu'avec les lettrés florentins du XV^e^ siècle. Au-delà du cas de la modernité, Le Goff insiste sur la rareté des ruptures dans le processus historique. Il s'interroge sur ce qui fait une mutation d'ampleur par rapport à une multitude de continuités entre les générations. Comment repérer ces phénomènes profonds rompant deux époques comme deux morceaux de pain ?

La périodisation nécessite le repérage et la hiérarchisation d'une pluralité de facteurs ayant un impact sur la conservation ou l'évolution de situations. L'idée d'« impact » renvoie à un autre problème insoluble en sciences humaines et sociales : la causalité. Périodisation et causalité sont donc reliées par l'interprétation. En mettant l'accent sur l'inachèvement du repérage, le concept de « sac de nœuds » montre l'impossibilité de clore la question. Il fragilise aussi l'opération de hiérarchisation en soulignant l'hétérogénéité des facteurs en jeu (quantitatif *versus* qualitatif par exemple). Mais, il suggère la confection d'une cartographie par l'assemblage de séries causales qui s'emmêlent dans les « nœuds » (convertisseurs) et le « sac » (réseau d'artefacts). La périodisation est alors générée par la superposition de bornes, de durées et de rythmes dépendants de ces multiples séries retenues. Ma perspective est donc inverse ici à celle de Le Goff. Celui-ci prenait la concordance de ruptures dans trois sphères d'activité (politique, économique, culturelle) pour définir une mutation d'ampleur entre deux époques pluriséculaires.

J'ai, au contraire, l'objectif d'assembler les diverses temporalités du stockage de l'énergie avec l'idée que ces diverses séries causales sont le plus souvent indifférentes les unes aux autres, que chacune peut adopter des rythmes propres, selon des cycles de plus ou moins longues durées. Plutôt que concordance de ruptures, il s'agit de superpositions de phénomènes relativement indépendants. Le sentiment de discordance est renforcé par l'introduction d'écarts temporels entre les territoires choisis : France, Europe, États-Unis. Mais, il est important de garder à l'esprit l'aspect interconnecté entre ces territoires dans la mesure où chaque territoire est influencé par les autres. Ainsi, comme le souligne Yves Bouvier (2008, p. 74) à propos de l'industrie électrique à la fin du XIX^e^ siècle, « [la] France fut loin d'être l'un des pays leaders de l'électrification. Allemagne, États-Unis et Suisse menèrent l'installation du système technique dans la totalité des pays européens ».

Il ne s'agit donc pas de trancher le temps d'une histoire totale sur la période 1850-2020 mais de tisser les temporalités multiples du stockage de l'énergie. Le problème de la périodisation, s'il n'est pas résolu, est néanmoins affiné par le recours à des *effets de tuilage*[1].

2.2.3 Cartographie temporelle du stockage de l'énergie en France, 1870-2020

La cartographie suivante présente une figure temporelle du problème du stockage de l'énergie en France sur la période 1870-2020. Comme toute carte, elle permet de se repérer dans un chaos – ici celui des temps – mais n'épuise pas le rapport aux temporalités. Quelques mentions des contextes européens et américains sont précisés afin de souligner des effets de décalage ou de concordance des temps. La cartographie contient quatre périodes tuilées : ordre libéral de la seconde industrialisation (1870-1920) ; capitalisme organisé du premier XX^e^ siècle ; modernisation et planification du capitalisme néo-libéral (1940-1980) ; crises et connexions

1. Je dois à Paul Naegel, docteur en histoire des techniques et chercheur associé au Centre François Viète, l'idée et l'expression de « tuilage » de périodes dans l'appréhension d'un phénomène historique.

internationales de l'ordre néo-libéral (1970-2020). Au sein de chaque période, plusieurs niveaux thématiques apparaissent : le politique et l'économique d'abord ; l'articulation entre énergie et stockage ensuite. Plus les phénomènes sont généraux, plus ils contribuent à la périodisation. Plus ils sont spécifiques, plus ils font entrer dans le stockage de l'énergie. Plus le retrait vers la droite est marqué, plus le phénomène est spécifique. Ces conventions d'affichage ont l'avantage de la clarté.

J'ai extrait et adapté les temporalités à partir de diverses références : histoire économique et industrielle, histoire institutionnelle et sociale, histoire des techniques et de l'énergie. Mais deux travaux m'ont été plus particulièrement utiles pour organiser la périodisation. Le premier concerne l'articulation du politique et de l'économique en France : *Le capitalisme et l'État en France. Modernisation et dirigisme au* XX^e^ *siècle* de Richard Kuisel (1981). Le second travail, issu d'une conférence de Jacques Lacoste (1986), s'intitule « Interconnexion des réseaux d'énergie électrique. Raisons et enjeux de l'interconnexion en France, 1919-1941 ». Il synthétise les dynamiques de construction des réseaux électriques en France sur la période 1870-1940 en les couplant aux questions de stockage d'énergie. Malgré leur ancienneté, ces deux travaux restent d'actualité pour saisir les enjeux du stockage de l'énergie en France au XX^e^ siècle.

■ Ordre libéral de la seconde industrialisation, 1870-1920

□ Démographie stable, de 37 millions d'habitants en France en 1870 à 40 en 1914

□ Économie libérale à faible croissance (Kuisel 1981, p. 19-21), caractérisée par la stabilité et la prudence, les marchés assure les mécanismes de régulation économique tandis que l'État garantit la liberté et la sécurité du marché.

- évolutions économiques (Kuisel 1981, p. 65-67) : stagnation sur 1885-1895, puis, 1896-1913, croissances annuelles de 2,4 % de la production industrielle, de 1,9 % de la productivité, de 1,8 % du PNB.
- différenciation industrielle : électricité, métallurgie, chimie et construction mécanique atteignent des taux annuels de 4,5 à 8,9 % sur 1896-1913 (Kuisel 1981, p. 65-67). L'électricité des années 1900 « occupe une position centrale [au sein] des technologies dominantes [… et] l'une des sources principales de la dynamique économique » (Caron 1991b, p. 9).
- structurations industrielles (Kuisel 1981, p. 19-21) : petites unités de production ; peu d'associations volontaires entre entreprises mais concurrence également faible.

□ Fonctions de l'État (Kuisel 1981, p. 19-21)

- politiques : gouvernements protectionnistes à l'international et non-interventionnistes au national ; le Parlement préserve le statut quo, c'est-à-dire les intérêts des puissants.
- administration et bureaucratie (Kuisel 1981, p. 45) : positionnement stratégique de l'administration de la III^e^ République sur les affaires économiques, notamment des ministères des Finances, du Commerce et de l'Industrie, des Travaux publics, de l'Agriculture et du Travail, du Conseil d'État.
- technocratie : « L'état-major de ces bureaucraties était constitué de hauts fonctionnaires, souvent membres des "grands-corps", et qui adhéraient à l'orthodoxie libérale. » (Kuisel 1981, p. 45).

□ Marchés, industries et systèmes de l'électricité :

- consommation d'énergie en France : 1,8 million de tonnes équivalent charbon par an sur la décennie 1835-1844, soit 14,4 milliards de kWh (60,5 % bois, 25 % houille, 12 % hydraulique) ; 4,3 tec, soit 35 milliards de kWh sur la décennie 1885-1894 (79,1 % houille, 17,2 % bois, 2,8 % hydraulique) (Ramunni 1991, p. 119).
- marchés émergents de l'électricité sur la période 1870-1900 (Lacoste 1986, p. 109) ou 1880-1910 (Caron 1991b, p. 12) : éclairage, force motrice (dont tramway), électrochimie (dont électrolyse) et électrométallurgie. Estimation des productions nationales d'électricité en 1913 : 1 milliard de kWh aux États-Unis ; 1,8 en France ; 1,9 en Russie ; 2,2 en Italie ; 8 en Allemagne (Ausubel et Marchetti 1996, p. 147).
- deux nouveaux cas de régulation administrative dans le domaine de l'électricité :
  - gestion technocratique des tramways, installés à partir de 1894 en France, par le corps des Ponts et Chaussées (Caron et F. Cardot 1991, p. 953).
  - adoption par le Parlement le 15 juin 1906 d'une loi sur la distribution d'électricité imposant l'octroi d'une concession par l'État (Caron et F. Cardot 1991, p. 501).
- « réalisation d'un projet sociétal […] à travers quatre courants essentiels : la quête du bien être, la volonté de sauvegarder la famille comme cellule fondamentale de la société, l'aspiration aux loisirs, l'hygiénisme enfin, sublimé par les conquêtes médicales de l'époque. » (Caron 1991b, p. 9-11)
- décalages temporels en fonction des États : L'Allemagne et les États-Unis ont construit plus rapidement que la France une industrie électrique cohérente et de masse (Caron 1991b, p. 12). Une périodisation basse est établie par David Nye (1990, p. 28) pour les États-Unis en faisant commencer chaque période par la première réalisation nationale : éclairage public et commercial (à partir de 1881) ; traction électrique (1888) ; électrification d'usines (1895) ; économie domestique (1910). Les bornes événementielles peuvent donc varier en fonction des territoires mais ce qui est plus fondamental, ce sont les écarts qu'ils entretiennent en termes de forme, degré et rythme de transformations sociotechniques [2].
- restructuration industrielle : essor de monopoles de l'électricité notamment à travers la constitution de compagnies géantes en Allemagne (Siemens, RWE) et aux États-Unis (Thomson-Houston puis General Electric, Westinghouse). L'Angleterre offre un cas intéressant où les firmes en situation de monopoles sont des filières de sociétés allemandes ou états-uniennes : Siemens, British Westinghouse, British Thomson-Houston (MacLeod 2012, p. 334).
- reconfiguration industrielle de certaines régions : la maîtrise de l'énergie hydro-électrique dans les Alpes induit l'apparition d'une industrie neuve, l'électrométallurgie. L'un des enjeux, pour certains techniciens, est un redéploiement des populations dans les zones rurales aux États-Unis grâce à l'expansion des réseaux électriques (Crompton 1905).
- Filière du stockage de l'électricité :

2. La question de l'estimation de décalages temporels est délicate car elle dépend de ce qui est regardé précisément. Ainsi, certains historiens situent la stabilisation de l'industrie électrique aux États-Unis sur le même créneau que Caron pour la France : 1880-1910 (McGuire et al. 1993, p. 217). Les écarts sont parfois faibles si l'on considère des premières réalisations nationales : installation d'un premier tramway à Richmond (Virginie) en 1888 pour les États-Unis et d'un premier tramway au Havre en 1894 pour la France. En revanche, le taux de pénétration des marchés du transport urbain est très différent à la fin du siècle : en 1896, 76 % des réseaux de tramways sont électrifiés aux États-Unis contre 2,5 % en France (Beltran et Carré 2016, p. 75). De plus, les municipalités françaises doivent faire appel à des compagnies états-uniennes comme Thomson-Houston car les entreprises françaises ne disposent pas alors d'expertise pour installer un système de tramway complet.

- R&D des batteries et promesses technoscientifiques sur la période 1880-1900 : alternances de moments d'enthousiasme en faveur des batteries (1880-1882, 1894-1896) et de déception (1883-1893, 1897-1900) (A. Reckenzaun 1887, p. 9903 ; Salom 1893, p. 321). Un article promotionnel du *Western Electrician* (Electrician 1889, p. 10994) annonce une futur radieux de la batterie de stockage dans la « connexion » des systèmes électriques : tramways, éclairage central et isolé, propulsion des bateaux, sonneries, petits moteurs pour machines à coudre, ventilateurs, etc. L'intérêt est relancé au milieu des années 1890 avec l'essor du marché des automobiles électriques (Mom 2004, p. 10-11).
- Problèmes technoscientifiques : parmi les 11 « problèmes d'ingénierie électrique » les plus importants du moment, l'électricien états-unien R. E. Crompton (1905) en mentionnent deux relatifs aux questions de stockage : 1° amélioration des batteries au plomb afin de réguler les pics de consommation des réseaux de distribution ; 2° réfrigération locale par l'électricité afin de faciliter « le stockage du froid dans les garde-manger des maisons privées ». Les deux problèmes sont tournés vers la consommation d'énergie d'une part et de nourriture d'autre part.

La Première Guerre mondiale présente « une rupture avec le passé » en Europe dans l'intensité et la forme d'intervention de l'État dans l'économie par rapport à l'ordre libéral de 1900 (Kuisel 1981, p. 19-21). Mais, au début du XX^e^ siècle, certains observateurs décèlent déjà un renforcement de l'autorité économique des États. Le social-démocrate allemand Rudolf Hilferding forge le concept de « capitalisme organisé » pendant la guerre pour désigner ce phénomène qu'il voit comme un nouveau stade du capitalisme défini par l'intervention de l'État, la concentration industrielle, la planification de la production et le groupement d'intérêt de patrons et de salariés.

■ Capitalisme organisé du premier XX^e^ siècle

□ Économie de guerre dirigée par l'État, 1914-1919 :

- Approvisionnement en vivres, munitions et matériels depuis la Grande-Bretagne sous l'égide des ministères des Affaires étrangères et du Commerce (Dethan 1984, p. 158). Formation de « consortiums » avec des industriels, des transporteurs maritimes et des administrateurs pour coordonner les importations de matières premières sous l'autorité des bureaux interalliés (Kuisel 1981, p. 88).
- Politique industrielle de guerre sous l'autorité de trois ministres, Albert Thomas et Louis Loucheur, ministres successifs de la Reconstruction industrielle, et Étienne Clémentel, ministre du Commerce et de l'Industrie de 1915 à 1919 (Kuisel 1981, p. 71-76)
- Passage d'une gestion des stocks à une gestion des flux (Kuisel 1981, p. 8)

□ Administration de l'économie par l'État en temps de paix, 1920-1940

- Retour « à la normale » (d'avant 1914) dans la plupart des secteurs économiques : projet politique de « démanteler les mécanismes de l'économie de guerre » (Kuisel 1981, p. 121-122)
- Structuration du marché de pétrole et du gaz à l'échelle transcontinentale, sous hégémonie anglo-américaine, à partir des années 1920. Formation d'un cartel de sept sociétés dominantes appelées les « Sept Sœurs » (Seven Sisters) jusqu'à aujourd'hui (Gras 2015, p. 96-107)

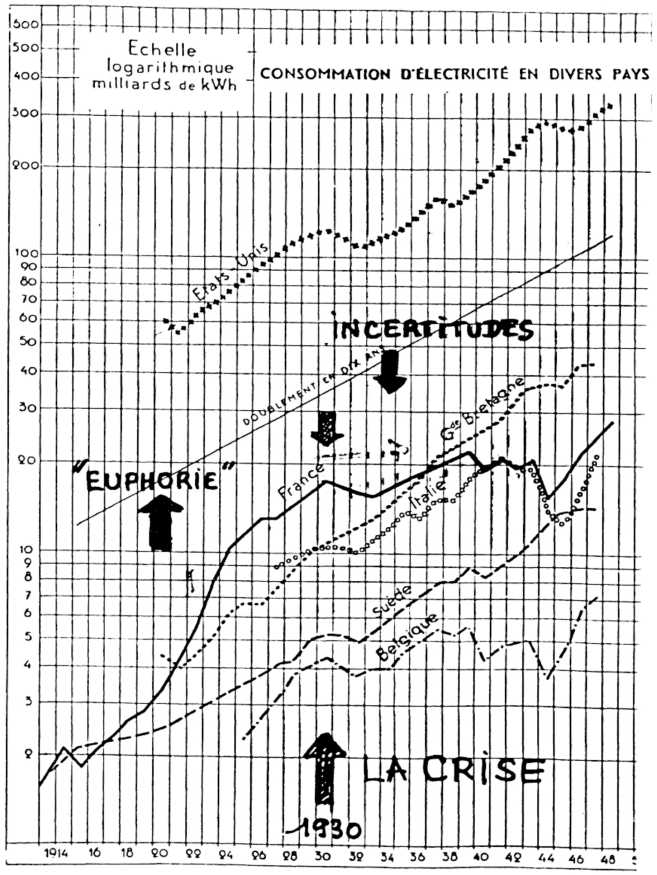

FIGURE 2.4 – Consommation d'électricité de plusieurs pays européens et des États-Unis, 1914-1948 (Lacoste 1986, p. 121)

- Renforcement de l'administration des mines et de l'énergie (Kuisel 1981, p. 128-131)
  - Intégration des mines au domaine public en 1919 et participation de l'État aux bénéfices
  - Création de « sociétés d'économie mixte » : 1° reconstruction du réseau électrique du Nord-Est par des sociétés à capital et gestion mixtes ; 2° Compagnie nationale du Rhône en 1921 (navigation, irrigation et production d'électricité) ; 3° Compagnie française des pétroles (État à partir de 1927) pour exploiter le pétrole en Irak.

□ « Capitalisme organisé » dans l'industrie électrique, 1900-1940

- Administration par l'État
  - « hyper-réglementation » de type minière de la filière électrique, sous administration des Ponts et Chaussées (Lacoste 1986, p. 123). Expertise du corps pour les réseaux de trains et tramways : « la précocité et l'efficacité françaises dans le domaine de la conception des réseaux prolongent un très ancien héritage, transmis entre autres par les ingénieurs des Ponts et Chaussées » (Caron 1991b, p. 13).
  - Loi Perrier du 16 octobre 1919 : l'hydroélectricité devient « une énergie nationale » (Bouvier 2012b, p. 33). Son premier article stipule que « 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 ».

    - incitations publiques pour stimuler l'investissement privé dans les infrastructures de transports d'électricité (Didry et Marty 2016, p. 27)
  - Gestion privée des réseaux électriques
    - En France, structuration verticale des sociétés d'électricité car, historiquement, les réseaux ont été gérés par des filiales d'équipementiers électromécaniques (Didry et Marty 2016, p. 29).
    - Consommation d'électricité : multipliée par dix en 20 ans, de 2 TWh en 1914 à 20 TWh en 1936 ; croissance moyenne proche de 7 % sur la période 1900-1940, soit un doublement tous les dix ans en France (Beltran et Bungener 1987, p. 64) comme le montre la figure 2.4. La crise financière provoque une baisse sensible de la consommation aux États-Unis et en Europe (sauf Grande-Bretagne) en 1929-1930 et induit une période d'incertitudes en France (ralentissement de la croissance).
    - Ententes régionales d'acteurs privés pour différencier les tarifs vers 1930 : l'Union des producteurs d'électricité des Pyrénées orientales (UPEPO) définit « une échelle des valeurs d'énergie considérant différentes catégories : l'énergie des 24 heures, celles des 12 heures, l'énergie d'éclusée, de lac et de pointe » (Bouneau 1985, p. 81).

□ Cas de l'intégration électrique des territoires, 1900-1940

- l'idée d'une interconnexion nationale préexiste à la Première Guerre mondiale (Caron 1991b, p. 13) mais, jusqu'aux années 1920, le territoire juxtapose les réseaux locaux organisés autour de centrales thermiques (Lacoste 1986, p. 110). De manière générale en Europe, « les producteurs d'électricité augmentent leur facteur de charge en étendant leur clientèle » (Lagendijk 2008, p. 25).
- systématisation des interconnexions, 1920-1940 :
  - En Europe, premières interconnexions entre réseaux nationaux à partir des années 1920, justifiées par l'optimisation du « facteur de charge » et du « mix économique » (Lagendijk 2008, p. 18-21).
  - En France, formation d'un « super-réseau » pour deux raisons (Lacoste 1986, p. 112-115) : 1°(générale) l'élargissement des marchés augmente la rente (« surplus de productivité globale »), ce qui explique le succès économique « de ceux qui ont joué l'escalade des tensions » ; 2°(spécifique) améliorer le « mix économique » en couplant les productions d'électricité par houilles noire et houille blanche (Lagendijk 2008, p. 26). Il s'agit de « marier la France thermique et industrielle du Nord avec la France hydraulique et rurale du Sud » (Lacoste 1986, p. 112).
  - Dans les campagnes, « électrification rurale sous l'égide de l'État » et « modernisation des campagnes » (Coutard 2001, p. 79-82) : de 20 % des communes françaises électrifiées en 1918 à 96 % en 1937, investissement de 8 milliards de francs de l'État
- force motrice de l'hydro-électricité dans l'intégration électrique : elle s'explique par le fait que l'interconnexion des réseaux d'électricité thermique et hydraulique fait écho aux trois principales valeurs des technocrates évoquées par Richard Kuisel (1981, p. 144-145) : une seule bonne solution, une efficacité maximale, la promesse d'abondance.
  - Au début du siècle, le Sud-Est présente une exception dans le paysage fragmenté des réseaux électriques français (Lacoste 1986, p. 110). C'est la seule zone interconnectée

à une échelle régionale couplant les barrages hydroélectriques des Alpes et les centrales thermiques des plaines pour assurer la consommation urbaine de la côte méditerranéenne (12 % de la production française en 1912).

    - Dès 1919, le « développement rationnel des sites hydro-électriques et des réseaux à haute tension » justifient la création de « sociétés d'économie mixte » de l'électricité, même si elles sont rares en pratique (Kuisel 1981, p. 128).
    - En juin 1938, le gouvernement d'Édouard Daladier fait adopter un décret-loi, assorti d'un budget de trois milliards de francs, pour la construction « de grands aménagements hydroélectriques » et de « lignes d'interconnexion à très haute tension » (Beltran et Bungener 1987, p. 61-62). Cas emblématique d'un « capitalisme organisé » par l'État facilitant l'entente des compagnies privées dans des organisations professionnelles (Chambre syndicale des forces hydrauliques, Société hydro-technique de France).
    - Le désir d'interconnexion suscité par l'hydro-électricité augmente encore avec les premières usines de pompage hydraulique. Celles-ci restituent le jour, en heures pleines, l'électricité générée par l'eau pompée la nuit, en heures creuses. En France, l'usine de pompage du Lac noir dans les Vosges est considérée comme la première installation de ce type de « puissance significative » : 100 MW (Courier 1982, p. 408). En 1938, la société Énergie électrique du Rhin équipe « la centrale au fil de l'eau de Kembs » d'une station de pompage pour remonter, en heures creuses, les eaux du Lac noir vers le Lac blanc (Cassaz 1992, p. 287). La France s'inspire des pays concurrents. Si du pompage hydraulique de petite taille fonctionne en Italie et en Suisse dès les années 1890, l'activité commerciale débute aux États-Unis et en Allemagne dans les années 1920 (Chen et al. 2009, p. 295).
  - Gestion centralisée du réseau interconnecté, ca. 1940 : « un dispatching central bien que les sociétés restassent privées […] donnait des ordres de marche aux différentes usines » (Pierre Massé cité par Beltran et Bungener 1987, p. 62).

■ Modernisation et planification du capitalisme néo-libéral, 1940-1980

□ Conséquences de la Deuxième Guerre mondiale sur le rôle de l'État : pénuries économiques et autoritarismes politiques ; débuts de la Guerre froide.

- Interventions conjoncturelles, 1944-1951 : « épisode a-économique » de production, notamment d'électricité (Beltran et Bungener 1987, p. 64) : « les quantités et non plus les prix servaient de variables d'ajustement » (Pierre Massé)
- Interventions structurelles, 1944-1949 : reconstruction, modernisation, planification de l'agriculture et de l'industrie. Mouvement incarné par le plan Monnet.
- Productivisme énergétique du premier gouvernement de Gaulle : forte augmentation des importations pétrolières sur la période 1944-1973 (figure 2.2) ; réduction de l'extraction nationale de charbon (Puiseux 1982, p. 611-612)

□ Économie dirigée ou « néo-libérale », 1950-1980

- tendances générales : forte croissance, modernisation et planification
- interventions de l'État : nationalisation de grandes entreprises, incitations et contrôles sélectifs, idéal d'une « économie concertée » (Kuisel 1981, p. 409)

- « le choix de la concurrence comme vecteur d'un dirigisme libéral » (Didry et Marty 2016, p. 37) : création en 1953 de la Commission technique des ententes (devenue Autorité de la concurrence en 2008)
- Compromis entre modernisateurs et libéraux : « une conception d'une politique industrielle fondée sur une étroite coopération entre les administrations et les futurs champions nationaux ».

□ Industries et énergie

- Compétitions entre filières et accumulation de nouvelles sources d'énergie
  - Prépondérances des hydrocarbures : croissances massives des consommations de pétrole et gaz (cf. figure 2.2) ; stratégie européenne de constitution de stocks de pétrole depuis la crise du canal de Suez en 1956 (entre 90 et 100 jours de réserve de consommation intérieure)
  - Déclin des politiques urbaines des tramways électriques, d'abord aux États-Unis : au cours des années 1940, 45 villes états-uniennes dont Los Angeles, San Francisco et New York, démantèlent leurs réseaux de trolleys électriques (Gonzalez 2013, p. 48).

□ Administration de l'électricité par l'État : nationalisation des réseaux électriques et création d'Électricité de France en 1946 avec un statut juridique d'établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC)

- stratégie de prévision et de planification à l'échelle nationale : La « "loi" statistique du doublement décennal » sert de base aux approches prévisionnelles d'EDF (Beltran et Bungener 1987, p. 64)
- organiser une croissance soutenue de 5 % par an en puissance installée. La figure 2.5 montre, sur la période 1946-1970, une croissance similaire de l'électricité thermique (de 6,6 GW à 20) et de l'hydroélectricité (de 4,2 GW à 15,7) (Morsel 1996, p. 336).
- optimiser les flux, une solution technocratique à la pénurie : « Le problème qui se posait [en 1944] était d'exploiter cet ensemble en vue de l'économie maximum de charbon. Il y en avait très peu et c'est comme cela que je me suis posé le problème : à quelle époque tirer sur les réservoirs ? A quelle époque stocker pour réaliser une économie maximum de charbon ? » (Pierre Massé cité par Beltran et Bungener 1987, p. 62).

■ Crises et connexions internationales de l'ordre néo-libéral, 1970-2020

□ Reconfiguration des années 1970 pour l'énergie à l'échelle internationale

- crises économiques et pétrolières : stratégie politico-économique de l'Organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEP), créée en 1960
- politiques gouvernementales en Europe et aux États-Unis :
  - Techno-politique de l'électricité nucléaire en France (Hecht 2004) : plan du Premier ministre, Pierre Messmer, en 1974, construction de 13 réacteurs de 900 MW en deux ans ; justifié par l'amplification de « l'écart entre les coûts proportionnels du nucléaire et du fuel » (Courier 1982, p. 408)). Singularité de la France dans le paysage mondial (figure 2.5) : de 4 % de nucléaire dans le mix électrique en 1970 à 55 % en 1993, environ 70 % en 2018 (Ministère de la Transition écologique et solidaire 2020, p. 52) ;

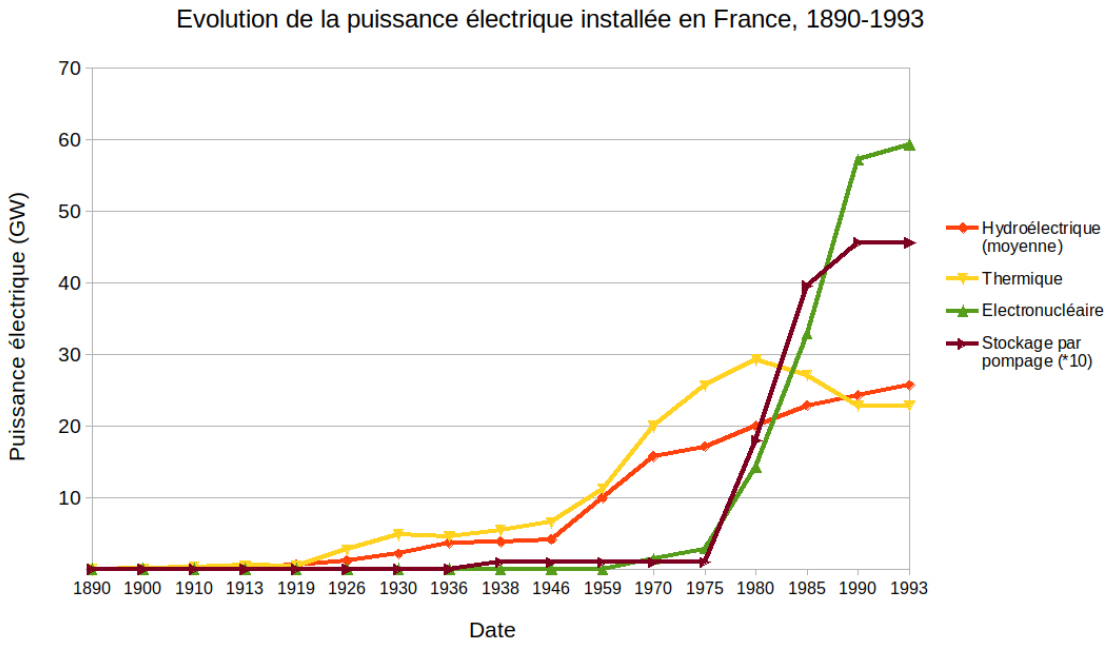

FIGURE 2.5 – Puissance électrique installée en France, 1880-1993

- Accélération du thermoélectrique sur la période 1970-1980 (29,3 GW), poursuite de l'hydroélectrique au même rythme (20 GW) (Morsel 1996, p. 775) ;
- (timide) soutien aux « énergies nouvelles » avec un Commissariat à l'énergie solaire sur un courte période 1978-1982 et avec un faible budget, de l'ordre de 1 % de celui du Commissariat à l'énergie atomique.
- Aux États-Unis, le Department of Energy régule les recherches *off-shore* de pétrole et les compagnies électriques fondent en 1972 l'Electric Power Research Institute avec l'accord du Sénat (Klausner 1979, p. 6).

- Restructuration industrielle du secteur privé : intégration horizontale des compagnies pétrolières vers le gaz, le charbon, l'uranium et le solaire. Auto-identification comme sociétés de l'énergie.
- « Système social de l'énergie » (Klausner 1979, p. 6) : tendance à l'homogénéisation des infrastructures et superstructures de l'énergie aux échelles nationales et internationales. Symboles communs : 1° un étalon commun de comparaison des sources d'énergie en termes de puissance (kW) et de coût ($) ; 2° une conception technologique du marché de l'énergie en termes de « flux physiques » (Klausner 1979, p. 20).

□ Tendances de la période 1980-2020 :

- Contexte de libéralisation de l'économie (par rapport à la période précédente) initiée aux États-Unis et en Grande-Bretagne dans les années 1980 et accentuée par la fin de la Guerre froide durant les années 1990.
  - Normalisation des valeurs de compétition et de privatisation, dont les modèles de politique publique ont du mal à rendre compte (Bartle 2002, p. 24).

- Globalisation des échanges commerciaux et des régulations administratives en direction du libre-échange international : création de l'Organisation mondiale du commerce en 1995, plus directive (vers la libéralisation) que le GATT (1947-1994) qu'elle remplace.

- Politique et citoyens : questions environnementales comme enjeu politique des sociétés industrielles ; situations de rationnement envisageables ; mouvements de décroissance ; territorialisation des luttes écologiques ; etc.
- Union européenne et économie :
  - introduction de « réseaux trans-européens » des transports, des télécommunications et des énergies par le traité de Maastricht de 1992
  - libéralisation des industries de réseaux au sein de l'Union européenne à partir de 1995. Une comparaison internationale entre télécommunications (fortes incitations du secteur privé à la libéralisation) et électricité (faibles) sur la période 1980-2000 suggère que les États-nations ne contrôlent que le calendrier de libéralisation et non la pertinence d'une libéralisation (Bartle 2002, p. 21-23). La France s'oppose plus que l'Allemagne et surtout que la Grande-Bretagne aux processus de libéralisation.
- Commission de régulation de l'énergie (CRE) créée en 2000 pour réguler les marchés de l'électricité et du gaz en France dans le contexte de libéralisation européenne.
- Puissance électrique totale en France : de 108 GW en 1993 à 130 GW en 2017

□ Stockage de l'énergie et politique électrique en France :

- Technocratie et optimum d'exploitation : sur la période 1946-1972, les planificateurs d'EDF, dont Pierre Massé, pensent le pompage hydraulique comme « un moyen de pointe » permettant de réduire la puissance installée maximale en heures pleines (Gérard 1972, p. 488).
- Le « taux d'actualisation » d'une centrale électrique (dépendant du prix total de production d'électricité) est fixé, par le Commissariat général du Plan, à 4 % durant les deux premiers plans (1946-1957) et à 8 % durant le troisième (1958-1961) (Beltran et Bungener 1987, p. 66).
- Politique de l'État en faveur du pompage électrique
  - Rupture induite par les crises pétrolières : l'industrialisation de l'énergie nucléaire (plan Messmer) a pour conséquence un surplus d'électricité en heures creuses (fonctionnement stable des centrales nucléaires sur 24 heures).
- Politique nationale de « transfert d'énergie par pompage » (cf. figure 2.5) :
  - 1,7 GW de pompage installé sur la période 1974-1978 (9 % de la puissance hydroélectrique totale) ;
  - projet de 2,2 GW sur la période 1976-1986 (Courier 1982, p. 411), soit un total installé de 4 GW en 1986 (17 %) ;
  - plateau d'installation après 1986 (contre-choc pétrolier), soit un total de puissance installée de 4,3 GW de « stations de transfert d'énergie par pompage » (STEP) en 2013 (Ademe, Artelys et al. 2013, p. 12) [3].

3. Deux experts du domaine, dont un employé de l'Ademe, indiquent un chiffre plus important, 5 GW, à la même date (Bal et Philibert 2013, p. 11)

- En 2018, estimation d'une production électrique de 5,2 TWh par STEP, soit 7,4 % de la production hydroélectrique totale (70 TWh) (Ministère de la Transition écologique et solidaire 2020, p. 52).
- Mentions récentes de stations de pompage d'eau de mer actionnées par des éoliennes.

À quoi sert une telle chronologie me demandait Pierre Lamard en novembre 2022 ? Outre un bornage préliminaire qui m'a été nécessaire, je vois trois fonctions principales à cette cartographie des temps sur la période 1870-2020. Sa fonction première est d'être une ressource visuelle pour saisir le phénomène du stockage de l'énergie sans avoir besoin de mémoriser toutes les dates qu'elle contient. Elle joue le même rôle auxiliaire que les différentes figures du chapitre 2 et, comme celles-ci, servira à alléger la lecture des trois prochains chapitres. Elle pose ensuite un problème historiographique. Une cartographie temporelle contient une dimension interprétative puisqu'elle présélectionne des phénomènes et suggère une estimation de leur importance pour comprendre le problème du stockage de l'énergie. Elle n'épuise pas la réalité mais rend présents des éléments socio-historiques jugés pertinents pour l'appréhension d'un problème, ici le stockage de l'énergie sur la période 1870-2020. Sa troisième fonction est d'ordre instrumental. Elle joue un rôle analogique dans la perspective d'un dialogue entre les humanités et les sciences de l'ingénieur. Une cartographie des temps fonctionne pour les technologues à la manière d'un plan de machine ou d'usine pour les techniciens. Je n'ai pas cherché à innover dans la représentation du temps mais je vois là une occasion intéressante pour faire dialoguer sciences de l'homme et de l'ingénieur. Les humanités numériques pourraient contribuer au renouvellement des visualisations des temps et des temporalités dans la perspective d'une réflexion interdisciplinaire sur les imaginaires du temps dans la construction des savoirs sur les sociétés humaines [4].

2.3 Gestions : modes, fonctions et échelles du stockage de l'énergie

En mai 1956, la Direction des études et recherches d'EDF publie un rapport d'une quarantaine de pages intitulé *Vue d'ensemble sur les divers procédés de stockage de l'énergie*. Elle en a confié la rédaction à son Service des études et recherches hydrauliques et à son chef de service, l'ingénieur hydraulicien Gaston Remenieras. Le rapport signé, comme c'est alors l'usage, par le responsable hiérarchique incarne la parole technocratique d'EDF. La vision du stockage de l'énergie qui s'en dégage n'en est que plus intéressante. Or, dès l'introduction, le stockage d'énergie est inscrit dans le cadre spatio-temporel du réseau électrique et dans le schéma économique de la compétition entre sources d'énergie (Remenieras 1956, p. 1).

Du côté réseau, le stockage d'énergie a une fonction régulatrice des flux électriques : « "adapter" à chaque instant la production à la demande, malgré le caractère le plus souvent irrégulier et aléatoire de l'une et de l'autre ». Mettre « en réserve les kWh » pour écrêter les pics de consommation, ce principe s'applique depuis les premiers réseaux électriques des années 1880. Du côté économique, l'opération a un coût financier. « Ce "transfert dans le temps" de grandes masses d'énergie implique – comme le transport dans l'espace par les lignes électriques – un certain "péage" ». Les coûts sont occasionnés par les pertes énergétiques durant le stockage et par les frais d'installation et d'exploitation des dispositifs de stockage. Cette analyse de Gaston

4. J'ai croisé le thème de la visualisation de données par les ordinateurs grâce à deux docteurs en humanités numériques formés au Centre François Viète : Benjamin Hervy (2014), dont la thèse portait sur la numérisation d'une maquette du port de Nantes vers 1900 ; Matthieu Quantin (2018), dont la thèse conduit au développement d'un outil de calcul des proximités sémantiques entre textes (Haruspex). Une collaboration pluridisciplinaire nous a permis de produire des réseaux de points figurant une proximité sémantique entre des entretiens de chimistes et d'industriels. L'un des enjeux épistémiques de cette figuration était la dimension temporelle (Teissier, Quantin et al. 2018, p. 147). Nous avons essayé, mais sans résultat concluant, de faire apparaître la manière dont la génération des interviewés pouvait structurer les discours.

Remenieras et du service technico-économique qu'il dirige à EDF est placée en épigraphe du chapitre 2 parce qu'elle souligne la fonction essentielle du stockage d'énergie : synchroniser les temps de production et de consommation de puissance à moindre coût, à travers un réseau hétérogène reliant divers espaces énergétiques. Cet objectif économique de régulation spatio-temporelle des systèmes énergétiques est permanence de la période 1850-2050. Il est particulièrement visible dans la construction et le fonctionnement des réseaux électriques des années 1880 aux années 2020.

Si ces coûts économiques sont jugés trop élevés, deux alternatives existent en modifiant le réseau : accroître les puissances installées en augmentant le nombre ou la puissance des centrales électriques ; mieux connecter les lieux de production et de consommation d'électricité. Ces alternatives au stockage ont également un coût : consommation supplémentaire de combustible des centrales thermiques ; travaux de renforcement des barrages pour les centrales hydroélectriques ; frais d'installation et d'entretien des pylônes et des câbles, etc. L'opérateur électrique doit donc lisser les écarts entre production et consommation d'électricité dans le réseau en jouant sur la complémentarité des sources d'énergie – charbon versus hydraulique –, sur les possibilités de stockage d'électricité et sur l'optimisation des interconnections. Ceci implique un dimensionnement approprié des échelles de puissance, d'espace et de temps du réseau en agissant sur plusieurs variables économiques : « rendement en énergie, dépenses d'investissement, frais d'exploitation, etc. » (Remenieras 1956, p. 1)

Ainsi, ce rapport de 1956 du Service des études et recherches hydrauliques d'EDF analyse le stockage de l'énergie selon trois niveaux : ses modes, ses fonctions, ses échelles. Chaque niveau fournit aux techniciens et technocrates une classification conceptuelle et un outil opératoire pour administrer le problème. Même si ces classifications sont marquées par leur dimension opératoire et par le contexte de leur fabrication, elles offrent une base aux technologues pour élaborer des typologies de recherche. Il s'agit alors de sélectionner les classifications des acteurs les plus complètes, de les relier par-delà les contextes et les lieux, puis de les intégrer pour constituer des typologies de recherche. Une telle démarche est compréhensive, par la collecte de classifications sur le territoire occidental durant la période 1850-2020, et critique, par la mise à distance vis-à-vis des lieux et des contextes de fabrication. Elle permet d'établir une typologie des modes (2.3.1), des fonctions (2.3.2) et des échelles (2.3.3) du stockage de l'énergie.

2.3.1 Modalités du stockage

Un mode de stockage est la manière dont un type d'énergie peut être stocké. Comme un type d'énergie est, en général, stockable de plusieurs manières, il est plus précis de parler de modalité de stockage. L'énergie thermique dispose, par exemple, de trois modes différents de stockage : par modification de la température d'un matériau (eau chauffée ou refroidie), par changement de phases d'un matériau (eau liquide-glace), par réaction chimique au sein d'un matériau (alumino-phosphates) (Ngô 2016, p. 20). Elle possède une modalité ternaire, qui encadre les possibilités et les limites de son stockage (au sens d'une *affordance*).

Modes de stockage par conversion de formes d'énergie

Ces considérations nous conduisent au cœur d'une phénoménologie du stockage de l'énergie. Celle-ci implique un cycle de stockage-déstockage induit par la conversion entre deux formes d'énergie (cf. 3.3.1). Cinq formes d'énergie peuvent être répertoriées sur l'ensemble de la période 1850-2020 : biologique, chimique, électrique, mécanique, thermique. Chaque forme d'énergie peut être convertie en d'autres formes par certaines transformations de la matière : agitations thermiques, changements de phases, déplacements massiques, pressions mécaniques, réactions chimiques, etc. La figure 2.6 présente les différentes possibilités de conversion

d'une forme initiale d'énergie (stockée) en une forme finale (déstockée).

FORME DÉSTOCKÉE → \ FORME STOCKÉE ↓	BIOLOGIQUE	CHIMIQUE	ÉLECTRIQUE	MÉCANIQUE	THERMIQUE
BIOLOGIQUE	désir humain	méthanisation agro-industrielle		forces animales et humaines	
CHIMIQUE		hydrogène « gris », méthane	électrogène, pile à combustible, décharge de batteries	automobiles thermiques	zéolites, alumines, silicates (dissociation)
ÉLECTRIQUE		hydrogène « jaune » (et « vert »)	condensateurs, supraconducteurs	pompage hydraulique, compression d'air, rotation du volant, mobilité électrique	chauffe-eau électrique
MÉCANIQUE			déstockage hydraulique, décompression d'air, inertie des volants	balanciers et poulies, ressorts, accumulateurs hydrauliques, perforatrices	
THERMIQUE		zéolites, alumines, silicates (combinaison)	stockage thermo-électrique		capacité calorifique (chauffe-eau solaire, mur Trombe), changement de phases, cavités souterraines

FIGURE 2.6 – Modes de stockage par conversion de formes d'énergie

Les formes d'énergie initiales ou stockées sont disposées verticalement, les formes d'énergie finales ou déstockées après conversion, horizontalement. La première ligne du tableau se lit de la manière suivante. L'énergie « biologique » stockée sous forme de nourriture, conduit, après conversion (digestion et intégration) :

- 1°case, colonne « biologique » : les humains à un désir inassouvi de dépense d'énergie et de création, constituant « la part maudite » de l'humanité, dans la cosmologie de Georges Bataille (cf. 1.6.4 et 5.3.4) ;
- 2°case, colonne « chimique » : les bovins à être parqué de manière à produire du méthane par transformation chimique du lisier accumulé à une échelle industrielle, comme le défend, par exemple, le ministère français de l'Agriculture auprès d'agriculteurs en difficulté économique [5] ;
- 4°case, colonne « mécanique » : les animaux et les humains à travailler avec leurs muscles comme ils le font depuis qu'ils existent.

La diagonale de la figure 2.6 rassemble les conversions au sein d'une même forme d'énergie. Le cas de l'hydrogène « gris » par exemple rend compte du mode de production majoritaire du dihydrogène industriel

5. https://agriculture.gouv.fr/methanisation-la-ferme-un-supplement-de-revenu-et-un-geste-pour-lenvironnement

aujourd'hui : à plus de 95 %, issu du reformage par la vapeur du méthane présent dans le gaz naturel. Il est qualifié de « gris » parce que l'un des sous-produits de la réaction chimique est du dioxyde de carbone. L'hydrogène apparaît comme un « vecteur énergétique », c'est-à-dire un support stable d'énergie pouvant être déplacé dans l'espace et stocké dans le temps en fonction de logiques gestionnaires. Il se distingue d'une source d'énergie parce qu'il nécessite une dépense d'énergie pour le produire, qui est supérieure à celle qu'il restitue. Comme l'électricité, autre vecteur énergétique, c'est la manœuvrabilité de l'hydrogène qui milite actuellement à son intégration à la gestion des réseaux d'énergie. Son inefficacité énergétique tendrait au contraire à le disqualifier.

L'hydrogène est aussi intéressant pour la phénoménologie du stockage d'énergie parce qu'il participe à un cycle symétrique de stockage-déstockage. Lorsqu'il est produit durant les heures creuses par électrolyse avec de l'électricité nucléaire, il est dit « jaune » (ce qui représente entre 2 et 4 % de sa production industrielle actuelle). Il est ensuite déplacé pour alimenter une pile à combustible afin de générer de l'électricité en heures de pointe ou pour certains marchés de niche (générateurs d'urgence dans les hôpitaux). Ceci décrit un cycle en deux temps, de stockage d'abord (hydrogène jaune) puis de déstockage (dans la pile à combustible). Le cycle se parcourt comme un aller-retour de la case électrique-chimique à la case chimique-électrique, symétrique par rapport à la diagonale. Il n'est pas unique sur la figure 2.6. La même symétrie d'aller-retour concerne les modes mécanique-électrique (stations de transfert d'énergie par pompage, centrale à air comprimé, volants d'inertie) et les modes de combinaison-dissociation de matériaux thermochimiques (alumines, silicates, zéolites). Ces modes sont donc caractérisés par une « cyclabilité » ayant un rendement et une période donnés (Ademe 2009, p. 11) (cf. 2.3.3).

Une typologie des modes de stockage effectifs, 1850-2020

Certains modes de stockage peuvent apparaître ou disparaître des classifications techniciennes au gré des enjeux économiques qu'ils représentent ou des imaginaires qu'ils convoquent. Ainsi, une comparaison des classifications de William Thomson (1852b), d'Édouard Hospitalier (1880) et de Louis Bell (1897) a montré plusieurs possibilités classificatoires en l'espace d'un demi-siècle à peine (cf. 3.3.3).

La typologie présentée sur la figure 2.7 incorpore les fluctuations rencontrées sur la période 1850-2020 et présente les principaux modes de stockage d'énergie. Chaque modalité est associée à des cas concrets, effectivement déployés sur le terrain. Pour simplifier, les deux étapes symétriques d'un même cycle de stockage-déstockage ne sont plus dissociées comme sur la figure 2.6 mais regroupées.

La première colonne indique la forme d'énergie du stockage (avant conversion) en reprenant les cinq formes précédentes dans le même ordre alphabétique que précédemment : biologique, chimique, électrique, mécanique et thermique. La deuxième colonne précise la forme d'énergie déstockée (après conversion) et, si nécessaire, des éléments spécifiques des modes de stockage. La troisième colonne indique des exemples emblématiques correspondant à des cas historiques ou restés à l'état de promesse s'il n'y a pas eu de réalisations effectives.

2.3.2 Fonctionnalités du stockage

Techniciens et technocrates schématisent les filières énergétiques comme des chaînes d'opérations, dans une version technologique, ou comme des chaînes de valeur, dans une version économique (1985). Ils identifient ainsi des segments d'activité, relativement distincts les uns des autres, et reliant les producteurs aux consommateurs.

Forme de stockage	Forme déstockée et applications	Exemples de dispositifs déployés
Biologique (nourriture)	Force animale (« réserve d'énergie » Thomson, 1852a)	Cas industriel : « moteurs animés » des manèges de chevaux du textile au XIX^{e} siècle (Kasdi & Jarrige, 2020) Cas urbain : traction hippomobile des taxis des capitales européennes, ca. 1900 (Mom, 2009)
	Travail humain	Division inter-régionale et transnationale du travail du « système-monde moderne » (Wallerstein, 1974)
	Désir humain	Dépense irrationnelle d'énergie comme « part maudite » de l'humanité (Georges Bataille) (Degryse, 2004)
Chimique	« combustibles naturels » (Thomson, 1852a)	Biomasse, bois, charbon, éthanol (agricole), gaz (extrait du charbon, des marais, du sous-sol), huiles, tourbe, etc.
	« combustibles artificiels » (Thomson, 1852a)	Hydrocarbures séparés (pétrochimie), hydrogène (reformage, électrolyse), méthane, phosphore, uranium (enrichi), etc.
	batteries de stockage batteries « à circulation »	Batteries plomb-acide de démarrage des automobiles thermiques : 70MW de puissance installée dans le monde (Ngo, 2016)
	piles à combustible	Génération électrique dans les navettes des missions Apollo des années 1960 : 4,5kW pendant une dizaine de jours (Teissier, 2017)
Électrique	bobines supraconductrices	Prototypes R&D pour l'essentiel
	condensateurs super-condensateurs	Super-condensateurs facilitant le démarrage des tramways électriques : gain énergétique de 30 % (Ngo, 2016)
Mécanique	translation de solides	« Solides en hauteur » (Thomson, 1852a) de type poulies et balanciers « Ressorts » pour montres et tournebroches (Hospitalier, 1880)
	transfert d'énergie par pompage hydraulique & grues hydrauliques	Première usine française de pompage hydraulique d'une « puissance significative » : Lac noir, Vosges, 1930s (Courier, 1982) « Accumulateurs hydrauliques » de 80 tonnes : transbordement sur les docks de Marseille et Anvers (Hospitalier, 1880)
	air comprimé	Locomotive à air comprimé (Andraud, 1839) Installation souterraine de Huntorf (Allemagne) depuis 1978 : 2 cavités de 150 000 m^{3}, 60 bar, 290MW pendant 2,5h (Ngo, 2016)
	volant d'inertie	Moins de 25MW installés à l'échelle mondiale (Ngo, 2016), mais solution « prometteuse » au stockage électrique (Ademe, 2013)
Thermique	thermochimique	Principales solutions envisagées : alumino-phosphate, hydratation de zéolithes ou de gels de silice (Ademe, 2013)
	changements d'état	Principales solutions envisagées : eau, paraffine et sels fondus (Ademe, 2013)
	variations de chaleur (capacité calorifique)	Stockage souterrain aquifère : env. 400GWh de chaleur et de froid en Suède ; 300GWh de froid à Shangai (Ngo, 2016) Architecture solaire au XX^{e} siècle (Bouet, 2017) Centre électro-solaire de 5MW de Beit Ha'Arava (Israël) depuis 1984 : 2 « étangs solaires » de 40 000 et 210 000 m^{2}. (Bailey *et al.*, 2002)

Figure 2.7 – Principaux modes de stockage d'énergie, 1850-2020

Stockage d'énergie et chaîne d'opérations

La filière électrique peut ainsi être décomposée en une série de quatre ou cinq chaînons de valeur. Par exemple, une étude administrative de l'Ademe (2017, p. 40) décompose la chaîne en quatre segments – production, transmission, distribution, fourniture – tandis qu'une équipe de sciences de l'ingénieur (Chen et al. 2009, p. 293) opte pour cinq segments – combustible, génération, transmission, distribution et services. La métaphore de la chaîne s'inscrit dans la phénoménologie de l'électricité. Jacques Lacoste (1986, p. 108-109), contrôleur général adjoint à EDF, explique que la filière électrique n'est « pas une industrie de transformation comme les autres » à cause de deux propriétés de l'électricité. Premièrement, l'électricité est « divisible ». Ceci offre un potentiel de multiplication des usages en bout de chaîne. Deuxièmement, l'électricité est « non stockable » au sens strict. Une batterie électro-chimique est une réserve d'électricité stockée sous forme chimique. Cette incapacité au stockage impose une « solidarité des opérations » le long de la chaîne électrique et le recours

important aux convertisseurs énergétiques (Lacoste 1986, p. 108-109). Ceci est encore renforcé par une troisième propriété de l'électricité bien connu des électriciens de la fin du XIXe siècle : sa « fluidité » (Beltran et Bungener 1987, p. 60). Par cet écoulement incessant de puissance, la morphologie de l'électricité nécessite une gestion intégrée et quasi-instantanée du réseau. L'incapacité au stockage et la fluidité de l'électricité imposent une systématisation et une synchronisation des réseaux électriques plus importantes que dans le cas de réseaux de distribution de matière discontinue comme le charbon. Le charbon peut s'entasser, l'électricité n'attend pas. Si le flux déborde, le réseau électrique disjoncte. La phénoménologie de l'électricité a une conséquence majeure sur la politique des réseaux. La multiplication des convertisseurs énergétiques sont autant de « sacs de nœuds » qui étendent et verrouillent le réseau électrique. Ce mécanisme d'extension-verrouillage (McGuire et al. 1993) organise l'espace énergétique par la régulation des flux de puissance (cf. 1.6.4).

L'organisation linéaire de la chaîne de la production à la consommation d'électricité est mise à mal par le stockage d'énergie car il intervient de manière transversale sur toute la chaîne électrique (cf. 6.2.4) et par rétroaction sur les assemblages du réseau électrique (cf. 1.6). Son ubiquité et sa rétroactivité font du stockage de l'énergie un facteur de complexité du système énergétique. Les usages du stockage de l'énergie sont multiples au-dedans et au-dehors des réseaux électriques. Ils sont pourtant réductibles à une unique opération de gestion : *le déplacement d'énergie dans le temps et/ou dans l'espace*. Un professeur de l'université de Columbia, Francis B. Crocker (1895, p. 602), le dit clairement pour l'électricité de la fin du XIXe siècle : « La fonction des accumulateurs est de recevoir de l'énergie électrique à un moment ou à un endroit et de le distribuer à un autre moment ou un autre endroit. » Cent vingt ans plus tard, les fonctionnaires et experts de l'Ademe ne pensent pas le problème autrement. Ils distinguent « le stockage permettant de décaler l'usage dans le temps sans le décaler dans l'espace » et celui qui décale l'usage dans le temps et dans l'espace [6]. Le premier est appelé « stockage stationnaire », le second « stockage embarqué ou portable ».

Quatre fonctions : tracter, accumuler, générer, réguler

Plus précisément, le stockage de l'énergie répond à quatre fonctions principales : propulsion et traction, accumulation, génération et régulation. La figure 2.8 les présente de manière synthétique en déclinant chaque fonction (colonne 1) selon des domaines d'application (colonne 2) et l'ordre de grandeur de la durée de déstockage (colonne 3). Contrairement aux modes de stockage qui peuvent apparaître ou disparaître selon des enjeux économiques ou politiques du moment (cf.2.3.1), les fonctions du stockage s'ajoutent les unes aux autres au cours de l'époque contemporaine. La quatrième colonne de la figure 2.8 donne une estimation de la date de commercialisation d'un dispositif assurant la fonction. À partir de ces dates, la fonction correspondante persiste jusqu'à aujourd'hui. Détaillons les quatre fonctions du stockage d'énergie qui jouent un rôle à l'époque contemporaine.

La fonction propulsive renvoie à un ensemble de pratiques qui sont, pour l'essentiel, extérieures au périmètre de cet essai. Elle embrasse, en effet, la propulsion thermique des engins automobiles depuis la seconde industrialisation : avions, camions, fusées, mobylettes, navires, trains diesel, voitures, etc. Elle est peu traitée dans cet essai car le stockage de l'énergie comme problème n'y est pas central (cf. 2.1). Certes, il existe des zones de recouvrement. Dans le cas de l'automobilisme par exemple, il apparaît plusieurs marchés de niche de traction ou de propulsion électriques sur la période 1850-2020 : aérostats, automobiles, bennes à ordures, camionnettes de livraison (de lait), charriots élévateurs, tramways, voitures hydrogène ou à batteries, etc.

6. Extrait du site internet consulté en 2014, cf. https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-laction/stockage-lenergie

Fonctions du stockage	Domaines d'application	Durée d'opération de l'énergie stockée	Débuts commerciaux
Propulsion et traction	Transport maritime à vapeur (charbon)	Dizaines de jours	1800s
	Ferroviaire interurbain (charbon)	Plusieurs jours	1830s
	Locomotives, tramways, poids-lourds, voitures (à batteries d'accumulateurs)	Plusieurs heures	1880s
	Transports routiers (charbon, électricité, gaz, pétrole)	Plusieurs heures	1880s
	Transports aéronautiques (kérosène)	Plusieurs heures	1920s
	Navettes spatiales (hydrogène-oxygène)	Dizaine de minutes	1950s
Accumulation	Médecine électrique	Secondes ou moins	1750s
	Concentration de forces naturelles dispersées	Heures à jours	1880s
	Démarreurs électriques des moteurs à explosion (automobiles à essence)	Fraction de seconde	1900s
	Accélération de voitures électriques ou hybrides	Plusieurs secondes	1990s
Génération	Transmission d'informations (télégraphies et téléphonies)	Secondes ou moins	1860s
	Dispositifs isolés ou en mouvement (balises, lampes, phares, petits moteurs)	Heures à années	1870s
	Générateurs d'urgence (air comprimé, électrogène, pile à combustible)	Quelques heures	1950s
	Centrales électriques en aéronautique (mission Apollo, satellites, stations)	Jours à années	1960s
	Batteries Li-ion (ordinateurs portables)	Dizaine d'heures	1990s
Régulation	Stabilisation de machines par un régulateur mécanique (volant d'inertie)	Secondes à heures	1780s
	Stabilisation des réseaux électriques	Secondes à heures	1880s
	Dispositifs de stockage d'urgence	Heures à jours	1880s
	Transfert d'énergie des heures creuses vers heures de pointe	Heures à années	1880s
	Stockage géostratégique d'hydrocarbures	Quelques mois	1950s

Figure 2.8 – Principales fonctions du stockage d'énergie à l'époque contemporaine

La fonction cumulative est la plus ancienne. Elle renvoie d'abord à la mise en série des bouteilles de Leyde au xviii^e^ siècle pour produire des chocs électrostatiques dans le domaine de la médecine électrique ou pour construire une science de l'électricité de manière expérimentale et quantifiable (cf. 3.2.2). Sa dimension industrielle émerge avec l'essor des forces naturelles à partir des années 1860 en Europe (cf. 3.1.2). En 1881, Gustave Le Bon souligne la nécessité de concentrer l'énergie solaire dispersée « sur de vastes surfaces » pour faire fonctionner des machines de puissance[7]. Au xx^e^ siècle, la production d'impulsion de puissance sert au démarrage des moteurs à explosion des véhicules automobiles, ce qui induit un usage massif des batteries au plomb de type Planté. Des dispositifs d'accumulation électrique peuvent également apporter des suppléments de force pour faciliter l'accélération d'une voiture électrique ou hybride (cf. 6.2.2). Ce faisant, ils nous font

7. La citation est extraite de Marrec 2018a, p. 82 : Gustave Le Bon (1881) écrit 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. »

basculer vers la troisième fonction.

La fonction génératrice recouvre des usages d'urgence ou des usages prévus, mais à durée limitée. Le premier cas réunit des dispositifs aussi différents que des « réservoirs de gaz comprimés [...] à haute pression » servant de réserves de force en cas d'urgence pour certaines locomotives dans les mines (Remenieras 1956, p. 3), des groupes électrogènes pour soutenir les instabilités d'un réseau électrique défaillant de manière structurelle ou encore des piles à hydrogène de secours pour des équipements sensibles en milieu hospitalier en cas de coupure du réseau électrique. Le deuxième cas concerne la génération électrique courante pour des artefacts mobiles en autonomie (fusée Apollo, satellites, ordinateurs portables) ou pour des artefacts stationnaires (phares, balises). Ce type d'utilisation est souvent justifié par un isolement géographique ou physique par rapport à un réseau central (Remenieras 1956, p. 28) ou par l'absence de réseau de distribution électrique comme à l'époque de Joseph Swan et William Thomson.

La fonction régulatrice est polysémique et s'applique à différentes échelles. Elle peut désigner, à l'échelle macroscopique, une régulation géopolitique. Cet aspect devient crucial en Europe dans le cadre du capitalisme néo-libéral (1940-1980) (cf. 2.2.3) alors que les importations d'énergies fossiles depuis le Moyen-Orient et l'Europe soviétique s'accroissent (cf. 6.3.4). Suite à la crise diplomatique et militaire du canal de Suez en 1956 qui menace leurs approvisionnements, les États européens s'imposent la constitution et la gestion de stocks d'énergies fossiles (pétrole, gaz) sur leurs territoires. Un seuil minimal de 90 jours de consommation interne est fixé pour le pétrole, aujourd'hui augmenté à 100 jours pour la France (Assemblée nationale 2005, p. 4). Les réserves de combustibles fossiles sont entreposées, pour l'essentiel, dans des cavités naturelles souterraines, notamment dans la région de Manosque. À l'échelle microscopique, la régulation d'énergie mécanique permet de stabiliser une machine durant son fonctionnement. À la fin du XIX^e^ siècle, Édouard Hospitalier (1880, p. 354) précise que le volant d'inertie est un régulateur mécanique essentiel pour assurer la rotation à vitesse constante d'une machine à vapeur. La stabilisation des machines est aussi ancienne que la mécanisation de l'économie. Elle a pénétré le langage technicien tout en restant opératoire dans les pratiques du XIX^e^ siècle. Les éditions de 1835, 1878 et 1935 du *Dictionnaire de l'Académie française* définissent un « régulateur » comme « toute pièce, de tout appareil qui s'applique à une machine pour en modérer les mouvements et les rendre réguliers ». Elles mentionnent comme exemples courants le ressort d'une montre ou d'une horloge et le volant d'inertie d'une machine à vapeur. Entre ces deux échelles, la fonction régulatrice opère au niveau mésoscopique d'un quartier ou d'une région. Elle prend alors les trois formes principales de stabilisation et de modération d'un réseau électrique (cf. chapitre 3).

Le stockage d'énergie intervient de trois manières dans la régulation des réseaux électriques sur la période 1880-2050. Il joue sur trois temporalités différentes de la gestion du réseau : instantanée ou *en temps réel*, imprévisible ou *d'urgence*, périodique ou *d'optimisation*. La régulation électrique est donc d'abord un impératif phénoménologique de chaque instant. Pour que le réseau soit stable, les puissances produites et consommées doivent être équilibrées en temps réel par des dispositifs de stockage comme les batteries électro-chimiques rechargeables. Cette stabilisation existe depuis l'essor des réseaux électriques dans les années 1880. Elle concerne le réglage de puissance, de tension, de fréquence. Placé dans une sous-station électrique, une batterie de stockage rend plusieurs services simultanément : arbitrage de distribution, lissage de puissance, raffermissement du courant, de la charge et de la tension, etc. (Institute of Electrical and Electronics Engineers 2015, p. 52). Dans un périmètre de transmission et de distribution d'électricité, le stockage par batteries contribue aussi « à maintenir tous les composants système d'une ligne de transmission en opération synchrone les uns avec les autres afin d'empêcher l'effondrement du système » (Chen et al. 2009, p. 293). Toutes ces fonctions régulatrices

entrent aujourd'hui dans la catégorie de « services système » (Ademe, Artelys et al. 2013, p. 39). Un gestionnaire de réseau peut ainsi écrêter la demande (*peak shave*) pour renforcer la stabilité d'un périmètre sensible ou améliorer la qualité du courant délivré en atténuant les oscillations, les pics, les bosses, etc., de l'électricité générée (Chen et al. 2009, p. 293).

Le deuxième usage régulateur du stockage d'électricité relève de la continuité de fourniture de puissance en cas de panne ou d'accident. Dans un numéro thématique récent d'*Artefact. Techniques, histoire et sciences humaines*, Guy Lambert et Olivier Raveux attire l'attention sur l'étude des pannes et des accidents pour mieux appréhender la technique en société. Les pannes, « arrêts soudains – involontaires ou non – du fonctionnement d'appareils, de machines ou de dispositifs », et les accidents, « incidents inattendus entraînant des dommages sur les personnes et les biens » sont en effet des aléas constitutifs du régime technicien (Lambert et Raveux 2019, p. 10). Les systèmes électriques ne font pas exception. Dès la fin du XIX^e^ siècle, les gestionnaires de centrales électriques incorporent des batteries d'accumulateurs pour fournir de l'électricité au réseau en cas d'arrêt momentané des génératrices de courant [8]. Elles œuvrent comme « batteries-tampon » pour « régulariser la différence de potentiel pendant les variations instantanées du débit en ligne » (Hospitalier et Bainville 1901, p. 54). Elles se chargent lorsque la puissance produite excède la consommation et se déchargent dans le cas contraire. Aujourd'hui, les pannes de centrale électrique sont prises en charge, de manière différenciée dans le temps, par des réserves dites primaires, secondaires ou tertiaires en fonction du temps de réponse nécessaire et de la quantité d'énergie disponible en réserve (Ademe, Consultants et al. 2017, p. 19). Ces réserves sont également utilisées, après effondrement d'un réseau ou *black-out*, pour son redémarrage ou *black-start* (Chen et al. 2009, p. 293).

Le troisième usage de la régulation électrique est d'ordre économique. Le stockage d'énergie permet d'augmenter le « facteur de charge » d'une centrale électrique, c'est-à-dire le rapport entre sa puissance moyenne de fonctionnement sur une période donnée et sa puissance nominale. Plus la puissance effective est proche de la puissance nominale, plus la gestion de la centrale est rentable. Les enjeux sont résumés ainsi en 1956 par le rapport-bilan d'EDF sur le stockage d'énergie : « L'objectif principal du stockage de l'énergie est "d'adapter" à chaque instant la production à la demande, malgré le caractère le plus souvent irrégulier et aléatoire de l'une et de l'autre, en mettant en réserve les kWh. Surabondants durant certaines périodes, en vue de les utiliser ultérieurement aux époques de forte consommation. » (Remenieras 1956, p. 1). Cet objectif de régulation temporelle joue à toutes les échelles d'intégration du système électrique : municipal, régional, national, continental. L'optimisation économique intéresse aussi bien les gestionnaires états-uniens de centrales isolées dans l'ordre libéral de la seconde industrialisation (1870-1920) (cf. 4.2.4) que les technocrates français du premier XX^e^ siècle en charge des réseaux régionaux (cf. 5.1) ou du « super-réseau » national (cf. 5.2.3) ou encore les administrateurs des « réseaux trans-européens » de l'énergie à l'ère de la mondialisation néo-libérale du XXI^e^ siècle (cf. 6.2.4).

En pratique, les trois principaux usages du stockage de l'énergie dans les réseaux électriques sont couplés les uns aux autres. Ainsi, des services système de qualité sur un périmètre donné permettent au gestionnaire du réseau de retarder la construction d'un nouvel aménagement d'équilibrage comme une ligne de transmission dans un contexte de croissance de la demande ou d'assurer une « fiabilité de la puissance délivrée pour des applications "lointaines" » (Chen et al. 2009, p. 293). Si, au contraire, ces services système sont mal dimensionnés pour des consommations en croissance rapide, des pannes peuvent survenir de manière plus

8. Henry Sutton (1881, p. 187), un électricien britannique, écrit :« qu'un accident ou un arrêt prenne place dans la machinerie générant le courant, l'ensemble des appareils comme les lampes ou les machines-moteurs seront influencés ; s'il y avait un réservoir d'électricité entre le générateur et les appareils de toutes sortes utilisant la force, ce dérangement ne se produirait pas. »

fréquente. L'intersection de ces trois usages du stockage de l'énergie montre bien comment le problème de la régulation spatio-temporelle interroge également la gestion économique et politique des réseaux de puissance.

2.3.3 Échelles de temps, d'espace et de puissance des opérations de stockage

En 2013, un consortium réunissant une dizaines d'industriels de l'énergie et des administrations techniques des ministères de l'Environnement (Ademe) et de l'Économie (DGCIS) commandite une *Étude sur le potentiel du stockage d'énergies* (Ademe, Artelys et al. 2013). Le rapport détaille les caractéristiques techniques de gestion des dispositifs de stockage pour remplir un certain nombre d'usages, que le rapport nomme « services ».

Durées et étendues d'opération

Le rapport traite des deux types de systèmes les plus importants en termes économiques : le thermique et l'électrique[9]. Les dispositifs de stockage sont caractérisés par trois constantes de temps et une échelle géographique dont la valeur varie en fonction des fonctions exercées (Ademe, Artelys et al. 2013, p. 49). Ces variables spatio-temporelles et leurs ordres de grandeur sont indiquées sur la figure 2.9.

Échelles spatio-temporelles	Temps de décharge	Temps de réaction	Fréquence d'appel	Échelle d'espace
Modes de stockage	Durée d'utilisation	Réactivité	Durée du cycle charge-décharge	Étendue du système
Dispositif électrique	Secondes à centaines d'heures	Millisecondes à dizaines de minutes	Journalier à annuel	D'un site de stockage au réseau national
Dispositif thermique	Heures à mois	Dizaines de minutes à heures	Journalier à annuel	Taille du réseau de chaleur ou de froid

FIGURE 2.9 – Caractéristiques spatio-temporelles de dispositifs de stockage électrique et thermique, adaptées de (Ademe, Artelys et al. 2013, p. 49)

Les trois variables temporelles sont le temps de décharge, le temps de réaction et la fréquence d'appel. La première variable mesure la durée d'utilisation du dispositif. La comparaison des valeurs de la figure 2.9 indique des échelles d'opération différentes entre dispositifs électriques et thermiques. Les durées électriques peuvent être très courtes, de l'ordre de la seconde (ce qui est impossible pour des dispositifs thermiques) alors que les durées thermiques peuvent être de l'ordre de plusieurs mois dans le cas où le stockage joue sur des variations saisonnières (ce qui induirait des pertes énergétiques très élevées pour les dispositifs électriques).

La deuxième variable, qui concerne la réactivité des dispositifs de stockage vis-à-vis de la demande, suggère une même différence de dynamique. Ainsi, les dispositifs électriques nécessitent toujours une réaction plus rapide que les thermiques : inférieure à la dizaines de minutes pour les premiers, supérieure à la dizaine de minutes pour les seconds. Ces différences opératoires s'expliquent par des différences phénoménologiques de transmission des signaux électriques et thermiques.

La troisième variable, ou fréquence d'appel, résulte des deux premières. Elle rend compte de la durée du cycle de stockage-déstockage d'énergie et du nombre de cycles possibles par unité de temps. Elle peut être

9. L'acception « électrique » inclut ici trois modes présentés dans la figure 2.7, correspondants aux formes de stockage chimique (batteries secondaires), mécanique (pompage hydraulique) et électrique proprement dite (condensateurs).

qualifiée de « cyclabilité » pour souligner la performance énergétique du dispositif à travers le « rendement de cycle » (Ademe 2009, p. 11). À l'heure actuelle, le rendement de cycle des dispositifs électriques de stockage se situe au-dessus de 80 %.

La quatrième variable de la figure 2.9 concerne la taille du système global et non plus le seul dispositif de stockage. Là encore, des différences importantes distinguent les réseaux électriques et thermiques. Les premiers sont en général plus étendus : une interconnexion thermique ne dépasse pas la taille d'une municipalité alors que l'interconnexion électrique, même si elle reste sous l'autorité nationale, peut avoir l'étendue des réseaux trans-européens.

Les différences d'échelles de temps et d'espace des réseaux impliquent non seulement des différences phénoménologiques entre électricité et thermique mais encore des différences de gestion des infrastructures. D'autres caractéristiques temporelles entrent ainsi en ligne de compte. Aux temps réguliers, et pour ainsi dire théoriques, de la figure 2.9, il faut ajouter des temps de dysfonctionnement (décharges parasites et « mort subite » d'une batterie), des temps de possession du dispositif de stockage (propriété, *leasing*), des temps de maintenance (notamment pour des systèmes isolés comme les balises maritimes ou de télécommunication) et, finalement, des durées de vie du système global et de chacun de ses éléments (Ademe 2009, p. 11). La recherche et le développement industriels constituent un moyen d'améliorer chaque artefact technique mais la gestion d'un ensemble technique reste toujours tributaire de ces temps parasites.

Gestion et aménagement des infrastructures de puissance

Passons des échelles de temps et d'espace du stockage de l'énergie à la gestion des infrastructures correspondantes. Plusieurs types d'acteurs y prennent part.

Pour les réseaux thermiques, l'*Étude sur le potentiel du stockage d'énergies* ne retient que trois types d'acteurs, nommés « opérateurs » : producteurs d'énergie thermique (chaleur ou froid) ; gestionnaire de réseau ; consommateurs, qui sont de fait les gestionnaires de bâtiments desservis (Ademe, Artelys et al. 2013, p. 48). Il dédouble chaque type dans le cas des réseaux électriques. Les producteurs sont soit « conventionnels » – nucléaire, gaz, charbon, fioul –, soit « intermittents » – solaire, éolien. Les gestionnaires assurent soit le transport sur de longues distances tel Réseau de transport d'électricité (RTE) en France, soit la distribution finale, à l'échelle locale, tels Électricité réseau distribution France (ERDF) principalement et environ 150 « entreprises locales de distribution » (ELD). Les consommateurs sont soit individuels, soit collectifs, notamment tertiaires et industriels. Une seconde différence est l'existence d'un quatrième type d'acteurs pour les réseaux électriques : les « stockeurs indépendants » d'électricité. Ces derniers s'insèrent dans la chaîne de valeur générale par la fourniture de « services intermédiaires », sans être ni producteurs, ni consommateurs d'énergie. Ceci pose des problèmes juridiques nouveaux en fonction des juridictions nationales et trans-nationales [10]. La production d'énergie devient moins importante, *in fine*, que le fait de « rendre un service, et un service calibré sur le tempo de l'architecture d'ensemble dont le fonctionnement doit se produire » (Dubey et Jouvancourt 2018, p. 112-113). Si l'essor du « commerce de tâches » est une tendance générale de l'économie mondiale depuis les années 1990 (Philips 2018, p. 247), il joue, dans le cas précis de l'électricité, un rôle de tout premier en termes économiques et politiques.

Au début du XXIe siècle, dans le contexte d'une prise de conscience de dérèglements climatiques de la

10. Aux États-Unis par exemple, un avocat d'affaires, Michael J. Allen (2016), défend la nécessité d'une législation sur le stockage de l'énergie prise en charge par le Congrès. S'appuyant sur la juridiction fédérale du transport d'électricité, sur la gestion locale des énergies renouvelables et sur son expérience professionnelle, il argumente en faveur d'une législation unifiée à l'échelle fédérale et fustige les risques de « balkanisation du réseau » au niveau de chaque état.

planète, la « décarbonation » de l'économie mondiale est affichée comme un objectif politique par les régions les plus riches (cf. 6.2.2). L'Union européenne notamment annonce une « neutralité carbone » de son économie à l'horizon 2050. Ces tendances stimulent l'intégration d'une part croissante des énergies renouvelables dans le « mix électrique » de la sous-région. Or, les rythmes naturels des énergies éoliennes et solaires introduisent des fluctuations supplémentaires dans les réseaux en termes d'intermittence, d'imprévisibilité et de périodicité de la production d'électricité qui exacerbent les besoins de régulation (cf. 6.2.3). L'architecture des réseaux s'oriente ainsi vers une multiplication d'agrégats spatiaux qualifiés de « ressources d'énergie distribuée » par les électriciens (cf. 6.2.4). Cette reconfiguration en profondeur menace la stabilité d'infrastructures électriques, conçues au début du XX^e^ siècle, à partir de gros centres de production, ou *centrales* électriques, au fonctionnement régulier. Le stockage de l'énergie et sa gestion par de nouveaux opérateurs électriciens s'imposent donc comme un problème de société pour les décennies à venir.

Dans cette prospective, le stockage d'énergie se constitue comme un marché lucratif. Un rapport de l'Ademe (2009, p. 11), intitulé *Le stockage de l'énergie électrique*, distingue deux échelles de stockage impliquant deux modes de gestion en termes de retour sur investissement, division du travail, entretien, sécurité et impact environnemental. L'argumentation s'appuie sur l'idée d'une « chaîne » d'opérations industrielles : projet, construction, distribution, consommation, recyclage, législation des matériaux dangereux (dont métaux lourds). Les petites et moyennes capacités de stockage relèvent essentiellement de réserves de batteries électrochimiques tandis que le stockage de masse concerne les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP). Les puissances impliquées sont de l'ordre de quelques centaines de kilowatts pour une réserve de batteries et de quelques centaines de mégawatts pour un barrage hydroélectrique, soit trois ordres de grandeur de différence. Cette catégorisation par échelle de puissance est partagée par les techniciens et les technocrates, même si les ordres de grandeur peuvent dépendre des contextes de travail [11].

Le stockage par pompage est aujourd'hui le plus répandu à l'échelle planétaire mais la tendance pourrait s'inverser d'ici 2040. En 2010, la puissance STEP installée dans le monde représentait 100 GW, soit 3 % de la puissance électrique mondiale (Chen et al. 2009, p. 295). Elle atteint 153 GW fin 2017, 2 % de la puissance électrique mondiale, puis 180 GW fin 2023 d'après les estimations de l'Agence internationale de l'énergie (IEA). Il y a une décennie seulement le transfert par pompage hydraulique était le seul mode de stockage considéré comme économiquement rentable (Ademe, Artelys et al. 2013, p. 200). D'autres modes de stockage sont désormais envisagés : batteries, hydrogène et air comprimé (Ademe, Consultants et al. 2017, p. 10). Le stockage par batteries croît rapidement à cause de la flexibilité qu'il assure aux réseaux électriques. Estimée à 17 GW environ en 2020, la capacité mondiale devrait plus que doubler en cinq ans (2018-2023) pour approcher 40 GW fin 2023. Une experte de l'IEA, Claudia Pavarini (2019) explique que, si la demande mondiale en électricité devrait augmenter de 20 % sur la décennie 2020-2030, la flexibilité des réseaux devrait augmenter de 80 % à cause de l'intégration des productions photovoltaïques et éoliennes aux systèmes électriques. Son analyse s'appuie sur les rapports *World Energy Outlook* de l'IEA. Le rapport de 2018 prévoit que le stockage par batteries devrait décupler pour atteindre 400 GW en 2040.

Ce cas particulier correspond à notre expérience collective du temps présent. Il relève d'une situation plus générale. La gestion de l'énergie implique toujours l'articulation entre un « champ d'expérience » et un « horizon d'attente » pour reprendre la conceptualisation que Reinhard Koselleck (1997, p. 271-280) applique

11. Dans une thèse de sciences de l'ingénieur intitulée *Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs*, Mohamed A. Camara (2011, p. 29) distingue le stockage à « grande échelle » de l'ordre de quelques MWh couplé à un parc éolien à un stockage à « petite échelle » de quelques dizaines de Wh pour « un système sur un site isolé » de type balise maritime ou relais de télécommunication. Cette fois-ci, le rapport est seulement de deux ordres de grandeur.

à la modernité européenne. Deux chercheurs sur l'hydrogène m'ont fait toucher du doigt l'horizon implicite mais structurant de tout aménagement dans le domaine de l'énergie. Ainsi, la construction d'une centrale thermique implique un modelage du futur par inertie des infrastructures. « Typiquement, il y a tel générateur thermique qui arrive en fin de vie, par quoi est-ce qu'on le remplace ? Si on investit sur du thermique avec du gaz ou du charbon, on est reparti sur 20 ou 30 ans par exemple, c'est-à-dire que pendant 20 ans, on ne va pas changer grand-chose » (Roche 2022, p. 9). La durée de structuration, ou la « dépendance au sentier », est encore plus élevée dans le cas de l'électronucléaire. « Quand on décide de développer une stratégie énergétique autour du nucléaire [...] on impose cette politique énergétique pour au moins [...] un siècle [...] : une quinzaine d'années pour construire les centrales ; maintenant, on leur donne un temps de vie de 60 ans ; on ne sait pas encore faire pour le démantèlement, mais disons au moins le temps de construction, 15 ans » (Coutanceau 2022, p. 15). L'expérience collective du présent contribue donc à orienter les futurs d'une manière durable et, souvent, irréversible. Ces considérations sur la projection présente d'horizons d'attente et la structuration de futurs en chantier justifie, une nouvelle fois, l'incorporation de la période 2020-2050 dans le périmètre de cet essai.

2.4 Conclusion : gérer l'espace et le temps de l'énergie par le stockage

La section 2.1 du chapitre a d'abord clarifié le périmètre d'étude de l'essai. Elle justifie l'exclusion de l'économie des combustibles fossiles et nucléaires parce que la politique des flux y est plus centrale que la gestion des stocks.

La section 2.2 repère ensuite les occurrences du stockage de l'énergie selon deux coupes transversales : temporelle sur les deux siècles retenus (1850-2050) ; spatiale, à travers les deux sous-régions étudiées, l'Amérique du Nord et l'Europe de l'Ouest. Cette cartographie spatio-temporelle inscrit le problème du stockage de l'énergie dans une superposition de temporalités et dans les champs de l'économie politique et de l'industrie électrique (2.2.3). Les scansions classiques de la politique et de l'économie de la France ont ainsi été confrontées aux tendances quantitatives de l'énergie. La périodisation politique est aveugle, en première lecture, à la croissance continue de consommation énergétique et à la superposition de sources d'énergie tout au long du XX^e^ siècle (figure 2.2). Expansion et superposition des énergies sont deux tendances lourdes des sociétés industrielles de l'occident contemporain. La figure 2.4, donnant l'évolution de la consommation d'électricité du premier XX^e^ siècle, montre la coïncidence entre l'euphorie suivant la Première Guerre mondiale et l'accélération de la croissance électrique durant les années 1920 dans le cadre d'une politique nationale de l'interconnexion en France. Ceci rend sensible une rupture distinguant un premier moment de « modernité électrique » (1880-1910) d'un deuxième moment de « modernisation électrique » (1940-1980). Le premier épisode correspond au chapitre 4, le second sera traité au sein du chapitre 5. Le chapitre 6 clôt l'essai sur un cas contemporain où le stockage de l'énergie justifie la création et la matérialisation de mondes nouveaux autour de l'hydrogène. Il donne forme et mouvement aux caractéristiques du stockage de l'énergie, analysées de manière statique dans le chapitre 2, en montrant un monde en voie de construction à travers des espaces sociaux et géographiques de l'énergie.

La cartographie diachronique est suivie par une cartographie plus synchronique. La section 2.3 met en relation les niveaux de gestion du problème à partir de classifications techniciennes formulées à différents moments de la période 1850-2020. J'en déduis plusieurs typologies, qui intègrent ces différentes classifications d'acteurs, sous la forme de tableaux compréhensifs. Le cadre intellectuel et opérationnel du stockage de l'énergie distingue ainsi des modes (figures 2.6, 2.7), des fonctions (figure 2.8) et des échelles du problème (figure 2.9).

Malgré sa lourdeur analytique, la section 2.3 est nécessaire pour présenter les notions et les outils forgés et utilisés par les techniciens et les technocrates pour comprendre et gérer le problème du stockage de l'énergie dans les sociétés industrielles contemporaines. Ses figures et tableaux seront utiles en différents points de l'essai pour rendre plus facile la lecture.

Le problème du stockage de l'énergie introduit à un jeu d'équilibriste entre flux et stocks d'énergie à des rythmes et durées variables, dans des espaces hétérogènes. Il révèle aussi certains enjeux économiques et politiques du monde contemporain et du régime technicien. La spécificité de stockage d'énergie à l'époque contemporaine se dégage par une lecture des structures profondes des sociétés industrielles de la deuxième moitié du XIX^e^ siècle. Comme le montre le chapitre 3, l'énergie y devient un pilier de la civilisation industrielle et son stockage un levier économique et un idéal culturel. Elle prend, dans le cas de l'industrie électrique, une configuration particulière et ambiguë. L'électricité porte, en effet, une tension contemporaine entre l'enchantement qu'exerce la modernité technicienne et l'angoisse collective sous-jacente à la civilisation industrielle. La mise en magasin de l'énergie est un geste apaisant la peur d'un épuisement du charbon dans les sociétés européennes de la deuxième moitié du XIX^e^ siècle. À la métaphysique anxieuse d'un manque à venir répond la geste moderne d'une accumulation de puissance. La civilisation occidentale s'efforce de troquer l'incertitude d'un avenir aléatoire contre la monotonie d'une mise en réserve quotidienne de la nature.

Chapitre 3

L'énergie en magasin : contextes et enjeux initiaux, 1850-1900

> « Il faut qu'on arrive à ce point, que chacun puisse avoir des *forces* en magasin comme on a aujourd'hui des chevaux à l'écurie pour le travail du lendemain. »
> Antoine Andraud, *De l'air comprimé employé comme moteur, ou De la force obtenue gratuitement et mise en réserve*, 1839.

> « Des méthodes pour stocker ou accumuler l'énergie de manière économique afin qu'elle soit facilement transportable a longtemps été l'espoir et l'aspiration de tout ingénieur mécanicien intelligent. Pendant un temps, la croyance que le problème était résolu à travers l'utilisation de l'électricité fut largement répandu ».
> Thomas Mendenhall, *A Century of Electricity*, 1887

Dans *L'Archéologie du savoir*, Michel Foucault (1969, p. 9) invite à interroger le « jeu de décrochage en profondeurs » des pratiques et des imaginaires anciens dont les « strates » profondes sont néanmoins accessibles au présent. Le stockage de l'énergie est un cas d'école pour tester une telle exploration car il montre comment, dans la deuxième moitié du XIX^e^ siècle, des héritages socio-culturels anciens sont recomposés au présent. En termes savants, le stockage de l'énergie comme « fait social total » met « en branle [...] la totalité d'une société et de ses institutions » (Mauss 1924, p. 179). Il caractérise ainsi la modernité technicienne. Héritant de sédimentations profondes, de pratiques oubliées ou de représentations désuètes, il est reconfiguré au présent par des facteurs politiques, juridiques, économiques, etc. Un tel processus socio-historique reflète, d'une certaine manière, les contrastes d'un paysage géologique dans lequel une tectonique de plaques plissées, stratifiées et paresseuses est ébranlée par les forces puissantes, vibrantes et rythmées de séismes imprévisibles. Une telle interprétation de la construction du présent par des stratifications anciennes rejoint, me semble-t-il, la proposition de Mathieu Arnoux (2013) selon laquelle « l'énergie est un objet d'étude passionnant » dans la longue durée à condition d'explorer « l'empilement de strates d'époques et d'importances différentes qui composent [l'énergie], et qui définissent en fin de compte le mix énergétique d'une société ». Il y aurait quelque chose qui se « périme » moins vite dans les pratiques énergétiques que dans les objets matériels qui les rendent possibles à une époque donnée. Si Arnoux part de la période médiévale pour remonter à rebours vers la préhistoire et descendre en aval vers l'époque moderne, son hypothèse de travail peut aussi être testée à l'époque contemporaine.

On retrouve une persistance des pratiques et des imaginaires énergétiques du XIXe siècle par rapport au temps long. Ainsi, le problème du stockage de l'énergie superpose trois strates d'activités humaines anciennes correspondant aux trois noms de l'expression : stockage, problème, énergie. Activité immémoriale, la notion de « stockage » est multiforme. Elle accompagne les sociétés humaines sédentaires depuis la révolution agraire du néolithique il y a dix millénaires. Le stockage agricole et l'élevage sont contemporains de la construction des premiers États de l'Ancien Monde. Dans *Homo domesticus : une histoire profonde des premiers États*, James Scott (2017) interprète même la mise en place des inégalités sociales par les États du néolithique comme la prise de contrôle par les élites d'alors de la production et de la redistribution des céréales. L'opération de stockage des grains est alors centrale dans la hiérarchisation sociale des sociétés néolithiques. Elle a pour conséquence l'urbanisation des sociétés sédentaires et leur expansion démographique. Sans entrer dans le détail, ce processus plurimillénaire rend le stockage agricole « dépendant d'un nombre exceptionnel de facteurs physiques, climatiques et sociaux » (Bonte et Izard 2010, p. 35) [1]. La relation qu'une société entretient avec le stockage de matière ou le stockage d'énergie détermine sa vision du monde et son rapport aux choses. Elle sous-tend sa cosmologie.

Cultiver avec les saisons mais stocker contre elles, cette opposition fondamentale forge le double sens du mot culture : gérer la terre et organiser la société. L'alimentation, qui en découle, constitue « un fait social et culturel total » en anthropologie par l'association « des procédures de sélection, d'acquisition, de conservation et de préparation des aliments, des savoirs […], des conduites, des représentations, des mythes, etc. » (Hubert 2010, p. 751). Les cycles saisonniers de stockage se doublent d'organisations spatiales. Citons l'invention du capitalisme marchand par les cités-États méditerranéennes, Gênes et Venise, au XIVe siècle (Braudel 1985, p. 85-87). Là encore, les durées de conservation des denrées exotiques et des produits rares et leurs lieux de stockage organisent les rythmes et les routes de l'économie-monde à l'époque moderne. La gestion des flux et des stocks de marchandises devient plus cruciale encore avec l'essor de la production industrielle à partir du XVIIIe siècle. Le concept de gestion fait glisser vers la deuxième forme d'activités agrégée au stockage de l'énergie : le « problème ». Gérer une situation, c'est poser un problème et trouver une solution. Le problème gestionnaire s'inscrit dans une manière de penser le monde selon une perspective opératoire. Son expansion est liée à l'essor des sciences de la nature à l'époque moderne. L'articulation entre théorique et opératoire engendre la recherche et le développement à partir de la fin du XIXe siècle. La prévision et l'optimisation, qu'elles soient économiques ou démographiques, sont héritières au XXe siècle de ces façons de modéliser le monde afin de le transformer. Enfin, troisième forme d'activités humaines de l'expression, l'« énergie » se situe aux jointures entre sciences de la nature et sciences de l'ingénieur comme l'a souligné le chapitre 1. Elle devient, avec l'industrialisation du XIXe siècle, un symbole quasi-universel de civilisation et une force motrice du système industriel.

Stocker des ressources, formuler des problèmes et domestiquer l'énergie sont trois « composantes du complexe humain » contemporain, pour transférer une expression des préhistoriens (Camps 1982, p. 55) à l'étude de la civilisation du charbon. Chaque composante, qui a « son rythme propre », coexiste avec les deux autres au XIXe siècle. La section 3.1 décrit ce socle social et culturel de la deuxième moitié du siècle. Dans le même temps, l'essor de l'industrie électrique reconfigure la stratification socio-culturelle de la civilisation du

1. À titre d'exemple, et dans le cadre de l'exercice de l'habilitation à diriger des recherches, je voudrais mentionner le travail de Pauline Kolomdja sur l'anthropologie de l'habitat des peuples Moundang du nord du Cameroun durant la deuxième moitié du XXe siècle, que j'ai encadré. Kolomdja (2017, p. 18) met en évidence une relation entre climat, saisons et matériaux dans la construction des greniers traditionnels : le pisé évite les incendies et le pourrissement des denrées tout en étant sensible à la pluie, ce qui implique le choix des saisons sèches pour la construction des murs. Elle fait également le parallèle entre l'organisation spatiale (position et exiguïté des greniers) dans l'habitat familial et la division genrée du travail (p. 24-26). Quand les pratiques de construction change durant la période postcoloniale, les greniers disparaissent en tant que tel mais sont intégrés dans un coin de la cuisine réservée aux femmes de la maison (p. 64).

charbon. Cette rencontre entre des héritages anciens vis-à-vis de l'emmagasinement et de la domestication de l'énergie et les novations électriques des années 1880 fait émerger trois modes d'existence du stockage d'énergie et de l'électricité. Ces trois *modulations électriques* impliquent de nouveaux rapports à la relation, à l'accumulation et à la normalisation dans les sociétés industrielles de l'époque. Elles sont successivement analysées dans la section 3.2.

La première section du chapitre 3 insiste sur la stratification des enjeux de l'énergie à l'âge industriel tandis que la deuxième section est construite sur la circulation entre trois pays : États-Unis, France, Royaume-Uni. Les deux sections ne procèdent pas à une comparaison terme à terme entre ces territoires hétérogènes mais interconnectés. Elles se focalisent plutôt sur les spécificités de chaque territoire et sur la porosité entre territoires. Chacun des trois pays fait écho aux deux autres mais relève d'une situation socio-historique qui lui est propre. La section 3.3 conclut cette exploration en s'attachant, au contraire, à rassembler les récurrences et les cohérences entre ces territoires afin d'identifier plusieurs caractéristiques transversales des sociétés industrielles occidentales de la deuxième moitié du XIX^e siècle.

3.1 Stratifications du stockage de l'énergie dans le second XIX^e siècle

« [Q]uelles strates faut-il isoler les unes des autres ? » C'est la première question que pose Michel Foucault (1969, p. 10) pour débuter son archéologie des savoirs. J'y répondrai, dans le cadre de cet essai, par l'exploration de trois pratiques anciennes : le stockage de ressources, la domestication d'énergie, la formulation de problèmes. Abordons-les dans cet ordre. Chaque stratification est envisagée selon une perspective qui lui convient : sémantique pour le stockage ; économique pour l'énergie ; épistémologique pour le problème.

3.1.1 Significations du stockage dans la langue française du XIX^e siècle

Les dictionnaires et les encyclopédies, parce qu'ils recueillent une multitude de significations anciennes et présentes, superposent des strates de pratiques abandonnées ou vivaces. Ils se prêtent d'autant mieux à une archéologie des pratiques qu'ils présentent des éditions successives. C'est le cas du *Dictionnaire de l'Académie française* dont les neuf éditions successives, depuis la première en 1694 jusqu'à l'actuelle, couvrent plus de trois siècles d'une histoire conservatrice de la langue française [2]. Cette série, malgré des biais éditoriaux, rend compte par ses lents ajustements séculaires d'un certain consensus culturel, d'une sédimentation peu sensible aux modes et d'une stratification des usages suivant des époques, des domaines d'activité et des territoires.

Feuilleter ce dictionnaire sériel revient à visiter une culture étagée même si le parcours paraît parfois anguleux et décharné. Face à un phénomène social aussi dense et pluriel que le stockage, une fouille des dictionnaires et des encyclopédies donne une première ébauche de la nécropole culturelle sur laquelle est bâtie la société contemporaine. Elle révèle, au fil du temps, une circulation des concepts, des schémas et des méthodes à travers les sphères d'activités humaines par des « emprunts intertechniques [issus] des contacts et des échanges » entre praticiens (Quemada 1978, p. 1211-1215). Ces circulations sont orientées par des hiérarchies de « prestige » et des rapports de « dépendance » entre spécialités et professions.

Ainsi, les termes « stockage » et « stocker » entrent justement en usage dans la langue française à la fin du XIX^e siècle (Rey-Debove et Rey 2004, p. 2493). Mais, ils ne disposent pas d'entrée dans le *Grand Dictionnaire*

2. La série éditoriale du *Dictionnaire de l'Académie française* est d'autant plus pertinente que l'institution se pose en gardienne d'une tradition linguistique et culturelle et qu'elle s'efforce de suivre une politique éditoriale conservatrice depuis trois siècles. Son second avantage est l'accès libre aux neufs éditions numérisées avec une comparaison facile d'une même entrée entre éditions différentes. Toutes les citations du dictionnaire seront extraites du site internet correspondant : https://dictionnaire-academie.fr/

universel du XIX*e siècle* en quinze volumes, publié entre 1867 et 1876, par Pierre Larousse. Seul « stock », issu de l'anglais *stok* signifiant « souche », a une entrée pour dire les « denrées, marchandises disponibles sur une place, un marché, dans un magasin » (Larousse 1867-1876, vol. 15). Le mot s'applique indifféremment à des quantités de produits agricoles (sucre) ou manufacturés (métaux), à des « fonds existant en numéraire » dans une banque ou à « un résidu […] de glace [d'une année sur l'autre] qui forme le noyau des glaciers ». Il circule donc entre des domaines variés : agricoles, industriels, financiers et paysagers. Ce nomadisme transgresse, au passage, la frontière entre culture et nature (cf. 5.3). Le mot stock rend également compte d'un dépôt dans un espace circonscrit : bâtiment, coffre, magasin, marché, pays, place, port, région, ville (Larousse 1867-1876, vol. 15).

Si « stockage » n'a pas encore d'existence propre en français, le fait de rendre « disponibles » des produits dans un endroit est transcrit par d'autres mots de la langue. Le « recueillage » dit l'« action d'emmagasiner [...] des marchandises dans les docks » (Larousse 1867-1876, vol. 13, 803). Il renvoie, comme « emmagasinement », au fait d'« amasser, entasser, accumuler » (Larousse 1867-1876, vol. 7, 445). Dans le même registre, le terme « réserve » a un usage plus ancien. Depuis la fin du XVI^e^ siècle, il désigne une « quantité accumulée de manière qu'on puisse en disposer et la dépenser au moment le plus opportun » (Rey-Debove et Rey 2004, p. 2264). Dans l'*Encyclopédie* éditée par Denis Diderot et Jean d'Alembert [3], son emploi alterne entre l'économie domestique, comme « réserve de bois ou bois de réserve », et l'économie politique, par référence au « magasin » et à l'« entrepôt ». La réserve comme quantité accumulée, ou stock, a pour symétrique un lieu de dépôt circonscrit, ou réservoir.

Le terme « réservoir » dispose d'un article dans l'*Encyclopédie* pour décrire « un lieu où l'on amasse des eaux pour les distribuer à diverses fontaines, bien différent d'un bassin ou d'une simple cuvette de distribution ». Il est également fréquent en médecine couplé à la circulation des fluides physiologiques. Toutes les éditions du *Dictionnaire de l'Académie française* depuis le XVII^e^ siècle mentionnent dans les corps vivants, un flux étant défini comme l'« écoulement d'un liquide hors de son réservoir habituel » (1878). Ceci concerne de nombreux fluides biologiques : bile, lait, menstrues, sang, urine, etc. Le couplage flux-réservoir suggère un accroissement des circulations par rapport à la normale. L'image est reprise en économie au XVIII^e^ siècle. Ainsi, Étienne Bonnot de Condillac oppose les campagnes, où l'argent circule peu, aux villes qu'il qualifie de « grands réservoirs où l'argent entre et d'où il sort par un mouvement qui se soutient ou qui se renouvelle continuellement » (cité dans Larousse 1867-1876, vol. 13, 1028). La métaphore comparant l'argent à un fluide en mouvement figure l'échange commercial comme une évidence naturelle qui n'a pas de fin. Ce faisant, elle argumente en faveur de la pensée libérale pour laquelle l'échange est source de valeur.

L'idée de stockage relie des stocks localisés et des mouvements entre réservoirs. Denrée, fluide, marchandise, monnaie sont autant de choses accumulées en prévision d'un besoin futur. Du paysan à l'économiste, l'attitude existe déjà au XVIII^e^ siècle. Les usages de réserve et de réservoir le montrent bien. Ce qui change avec le capitalisme industriel du XIX^e^ siècle, c'est la signification de l'accumulation. En 1901, dans un contexte d'expansion économique forte, le chef de file des économistes libéraux français, Paul Leroy-Beaulieu souligne que « la civilisation occidentale a dû son essor à la vigueur de l'individu, à l'esprit d'initiative, de hardiesse en même temps que de prévoyance et de capitalisation » (cité dans Kuisel 1981, p. 32-33). Cet esprit d'accumulation distinguerait, selon ce colonialiste convaincu, « l'Européen et l'Américain de même souche des autres races ». L'accumulation, qui fait encore référence à « entassement, amas de plusieurs choses ajoutées les unes aux

3. Toutes les citations du *Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers* édité par Denis Diderot et Jean Le Rond d'Alembert sur la période 1751-1772 sont extraites du site internet et du moteur de recherche du projet ENCCRE (Édition Numérique Collaborative et CRitique de l'Encyclopédie) : http://enccre.academie-sciences.fr/encyclopedie/

autres » dans la septième édition du *Dictionnaire de l'Académie française*, paru en 1878, est considéré comme un impératif de civilisation pour les économistes libéraux de 1900.

Après l'économie, l'écologie et la physiologie, un dernier domaine inscrit dans les dictionnaires et encyclopédies du XIXe siècle concerne l'énergie. Alors que la « science de l'énergie » a connu un développement remarquable depuis les années 1830 (W. Thomson 1881, p. 376), l'entrée « énergie » du volume 7 du *Grand Dictionnaire universel du XIXe siècle* paru en 1870 ne retient que les sens habituels : vertu morale, volonté psychologique, force musculaire, puissance divine (Larousse 1867-1876, vol. 7, 530). « Force, vertu, puissance agissante », l'orientation est la même dans le *Dictionnaire de l'Académie française* de 1878. Rien d'étonnant à cela puisque, par principe, les nouveautés trouvent lentement leur chemin vers les entrées des dictionnaires encyclopédiques.

Trois mentions relatives au stockage de l'énergie se sont néanmoins glissées dans les volumes du *Larousse* (1867-1876). La première mention concerne la science de l'énergie à l'entrée « rapport ». Au sujet des expériences de Julius von Mayer sur la transformation de chaleur en travail, l'article indique qu'un effet peut durer plus longtemps que sa cause (Larousse 1867-1876, vol. 13, 702). Il illustre cette proposition par le fait que « [la] chaleur du soleil est emmagasinée dans les houillères ». Au détour d'une discussion pointue sur « la philosophie du relatif » dans la pensée moderne, apparaît une image inédite : la formation sédimentaire de houille (minerai de charbon le plus courant), issue de la compression d'amas biologiques ayant poussé grâce au soleil, est comparée à la *mise en magasin* de l'énergie. Cette métaphore transfère au charbon naturel un concept issu des pratiques économiques, l'emmagasinement des marchandises. Cette création sémantique acculture la nature. Une acculturation semblable se retrouve dans la deuxième mention croisant le stockage de l'énergie. À l'entrée « réservoir », un alinéa spécifique attribué au domaine de la physique définit le « réservoir » comme un « [lieu] où s'accumule un fluide » puis illustre la définition par la métaphore suivante : « [la] terre est le réservoir de l'électricité » (Larousse 1867-1876, vol. 13, 1025-1029). Quelques lignes plus bas apparaît la troisième mention, dans un cadre industriel, et non plus naturel cette fois-ci : un « réservoir de vapeur » désigne « l'espace compris entre la paroi cylindrique supérieure d'une chaudière et le niveau de l'eau ».

Ces trois mentions montrent que l'idée de stockage d'énergie, sans être formulée explicitement, transparaît dans des formulations inédites et imagées : le soleil comme pourvoyeur de charbon ; la terre comme réservoir d'électricité ; le ventre d'une machine comme réservoir de vapeur. Ces trois métaphores sont construites par identification commerciale pour la première (le soleil, comme le charbon, est mis en magasin) et par analogie de formes pour les deux autres (fluide électrique et fluide gazeux). Dans ce dernier cas, l'analogie s'inscrit dans une tradition ancienne et puissante des opérations hydrauliques pour rendre compte de mise en réserve (réservoir) de choses circulantes : argent en économie, bois en agronomie, humeurs en physiologie, etc. Mais, les deux premiers transferts sémantiques trahissent un écart créatif par rapport aux héritages dans les manières de penser les formes d'énergie et leur mise en réserve. Ces nouveautés sémantiques coïncident avec les évolutions économiques de l'époque.

3.1.2 Réserves de charbon : prévision et anxiété en Grande-Bretagne, 1860-1900

L'inscription sociale de l'énergie croise au XIXe siècle l'économie du charbon. Contrairement aux « forces naturelles » qui posent d'abord un problème de conversion de flux, le charbon relève d'une des stocks. Dans un cas comme dans l'autre, le problème n'est pas seulement technico-économique. Il s'inscrit dans un « cadre idéologique » large que Charles-François Mathis (2021) qualifie de « civilisation du charbon » en Angleterre. Relisant Fredrik Albritton Jonsson, il montre que, au cours du XIXe siècle, une école de pensée « malthusienne »

s'inquiète, pour des raisons économiques, écologiques ou religieuses, de l'épuisement des réserves de charbon. Elle se heurte à une école rivale, qualifiée de « cornucopienne » par référence à la Corne d'abondance de la mythologie grecque (*cornucopia* en latin), qui est « convaincu[e] de l'abondance du charbon ou de la possibilité de le remplacer en temps voulu par d'autres ressources, grâce à Dieu et à l'ingéniosité humaine » (Mathis 2020, p. 6). Malgré les différences de tradition, c'est finalement toute la société britannique qui a « l'esprit et le cœur tournés vers le charbon » (Mathis 2021, p. 16). L'imaginaire national et l'inconscient collectif sont profondément marqués par « l'horizon tragique des sociétés fossiles » (Mathis 2021, p. 101-109). La « question du charbon », qui interroge les ressources de houille pour l'économie nationale, anime les débats, de manière récurrente au Royaume-Uni, de la fin du XVIII^e^ siècle aux années 1930.

Dans ce contexte culturel et économique particulier, l'État britannique enrôle le milieu scientifique pour estimer les réserves de charbon à l'échelle du pays, de l'empire et du globe (Marrec 2018a, p. 68-69). En 1861, une enquête du Geological Survey conduite par Edward Hull estime à 80 milliards de tonnes de charbon les réserves de l'Angleterre, du pays de Galles et de l'Écosse (Madureira 2012, p. 402-404). Avec une extraction annuelle de 80 millions de tonnes de houille en 1860 (Rioux 1989, p. 100), l'estimation géologique assurerait ainsi mille ans de réserve de charbon à la Grande-Bretagne. Hull et son équipe ont incorporé à l'estimation des réserves deux types de houillères qui, jusque-là, n'étaient pas pris en compte dans les bilans : les filons difficiles d'accès susceptibles de devenir rentables dans un futur proche grâce à une meilleure expertise en extraction profonde ; les filons encore inconnus, un « charbon caché » dont l'éventualité d'être découvert est grande. Plutôt que d'appliquer le critère habituel de « réserves prouvées en place », les géologues britanniques comptabilisent les « réserves raisonnablement assurées ». Sans définir ce « raisonnablement », ils parient sur les améliorations technoscientifiques. À l'inverse, certains économistes et industriels britanniques s'inquiètent d'une augmentation drastique des consommations de charbon qui pourrait diviser par dix la durée d'exploitation avant pénurie (Madureira 2012, p. 405-407).

En 1865, un succès de librairie, *The Coal Question* de William Stanley Jevons, dramatise « la question du charbon ». Il popularise l'idée selon laquelle les gains d'efficacité des machines à vapeur, au lieu de contenir les hausses de consommation, les accélèrent. Jevons explique ce paradoxe économique (appelé « effet rebond » par la suite) par trois effets suscités par un charbon à bon marché : l'augmentation des investissements ; l'accroissement de la demande en matériaux, forces motrices, machines et travail ; l'expansion de la vapeur se substituant à d'autres sources d'énergie moins intensives (Madureira 2012, p. 408-410). Un tel phénomène constitue une boucle de *feed-back* ou une « structure de renvoi » caractéristique d'un système sociotechnique (Ellul 1977, p. 88). La hausse de consommation de charbon devrait d'autant plus réduire la durée des réserves de houille qu'il serait couplé, selon Jevons, à une croissance démographique de la population et de la richesse par habitant. La publication de *The Coal Question* sème d'autant plus le trouble que les estimations des experts peuvent grandement différer au cours du siècle (Mathis 2020, p. 4). Les débats suite la publication de Jevons ont trois conséquences majeures en Grande-Bretagne (Madureira 2012, p. 415). Premièrement, le Parlement ébauche une politique énergétique en créant une Commission royale des approvisionnements en charbon (1866-1871). Les nouvelles enquêtes géologiques de la Commission renvoient à nouveau la pénurie de charbon aux calendes grecques. Elles estiment à 360 années la durée d'approvisionnement avant une possible pénurie. Ces annonces officielles ne parviennent toutefois pas à contenir le vent de « panique charbonnière » (*coal panic*) ni à apaiser l'inquiétude larvée des milieux d'affaires durant deux décennies (1870-1890). C'est la deuxième conséquence : une anxiété générale concernant la manière dont la raréfaction des réserves limiterait la croissance économique, couplée à une hausse du prix du charbon. Les milieux d'affaires britanniques s'inquiètent d'une

perte de leur suprématie en Europe alors que la Grande-Bretagne extrait quatre fois plus de charbon que l'Allemagne et dix fois plus que la France en 1870 (Rioux 1989, p. 100). Mais, le flot d'inquiétude circule également sur le continent et fait craindre un déclin économique de l'Europe par rapport au reste du monde. La troisième conséquence des débats sur la pénurie de charbon est d'ordre épistémologique. Les débats implantent le concept de « réserves probables » dans le paysage de la prospection minière par opposition aux habituelles « réserves prouvées ». L'idée probabiliste, même mal définie, s'affirme comme « une jauge opérationnelle, complète et testable » en géologie (Madureira 2012, p. 414). Elle se fortifie et s'arrime au régime technicien du « raisonnable ». Elle devient ainsi un outil de politique industrielle en Grande-Bretagne.

L'espoir placé dans la probabilité de trouver des réserves cachées permet de juguler, en partie, l'angoisse suscitée par la perspective d'une économie limitée à l'horizon d'un siècle ou deux. Cette angoisse des sociétés européennes s'explique parce que l'idée de finitude et de ralentissement est impensable dans le cadre positiviste d'un progrès industriel indéfini. La suite de l'histoire donne plutôt raison à la confiance des commissions royales géologiques qu'aux craintes des économistes comme Jevons en ce qui concerne la poursuite du rythme soutenu d'extraction minière. La Grande-Bretagne triple en effet sa production de houille, de 80 à 230 millions de tonnes annuelles, sur la période 1860-1900 (Rioux 1989, p. 100).

3.1.3 Thermodynamique et épistémologie des réserves d'énergie

La perspective d'une pénurie de charbon met sur le devant de la scène d'autres ressources énergétiques. Alors que, pour Jevons, le « stock d'énergie » disponible pour l'économie est figé et indépendant de l'action humaine, des observateurs de l'époque attirent l'attention sur l'exploitation d'autres forces de la nature. William G. Armstrong, industriel, inventeur et président de l'Association britannique pour l'avancement des sciences, mentionne l'hydroélectricité, le pétrole et le rayonnement solaire (Madureira 2012, p. 412). La conversion de chaleur solaire en travail mécanique a plusieurs hérauts à partir des années 1860 : John Ericsson puis Frank Shuman aux États-Unis ; Louis Simonin, Augustin Mouchot puis Gustave Le Bon en France. Ingénieur des mines de Saint-Étienne, Simonin relaie les débats britanniques sur le risque de pénurie de charbon et, comme antidote, propose la mise du « soleil en bouteille » (Jarrige 2010, p. 87). Dans le même registre métaphorique que le *Larousse* qualifiant les houillères de chaleur solaire emmagasinée, Simonin imagine le charbon comme du « soleil en cave ». Ces exemples sont issus d'une recomposition des enjeux de conversion et de stockage de l'énergie suite à la formalisation de la thermodynamique au milieu du XIX^e^ siècle.

Naturalisation de la société par la thermodynamique

Au cours des années 1840, le travail de savants germaniques et britanniques converge autour d'un principe de conservation de l'énergie. Ce qui deviendra le premier principe de la thermodynamique formule l'égalité entre l'énergie et la somme de chaleur et de travail. Il réfute la possibilité d'un mouvement perpétuel et la possibilité d'une création d'énergie. Comme le résume Hermann von Helmholtz en 1847, « nos machines et nos appareils ne créent jamais la force ; elles restituent sous une forme nouvelle, les forces ordinaires de la nature ». Plusieurs savants britanniques contribuent à la formalisation de la thermodynamique : Michael Faraday, James Joule, William Thomson, etc. Ils sont marqués par une approche utilitariste de l'énergie. La thermodynamique présente, de manière générale, les « deux caractères [des technosciences] : l'*indissolubilité* des deux pôles théorique et technique-opératoire ; le *primat ultime* de la technique sur la theoria » (Hottois 1984, p. 60). C'est aussi le cas du principe de conservation de l'énergie. La conservation de l'énergie contraint en principe le cosmos tout entier mais sa confirmation empirique impose toujours un dispositif matériel et

local. La prétention universelle d'une telle « loi » de la nature est en tension avec la « mesure d'ingénieur » qui la sous-tend. La notion d'énergie n'a pas de mode d'existence sensible. Seuls le travail et la chaleur ont une existence empirique et mesurable. L'invention d'une grandeur heuristique mais ineffable – l'énergie – comme la somme de deux grandeurs sensibles et mesurables – la chaleur et le travail constitue une ambiguïté d'ordre épistémologique comme l'a bien analysé Isabelle Stengers (1997, p. 187-188). L'énergie devient un étalon universel de la physique sans pour autant donner la « raison » de l'équivalence entre travail et chaleur. Sa « généralité se paie par la mutité quant à ce qui est mesuré » (Stengers 1997, p. 187).

La définition de l'énergie comme principe universel lui assure un large crédit pour l'étude du monde matériel, mais aussi pour appréhender les phénomènes psychiques, sociaux et historiques. L'énergie peut désormais servir à bâtir une cosmologie, c'est-à-dire un cadre général d'ordonnancement du cosmos. Cette cosmologie sera qualifiée d'« énergétisme » par la suite. Durant la deuxième moitié du XIXe siècle, « la conservation de l'énergie [met] en jeu de "grands problèmes" [...] susceptible d'intéresser tout le monde, du philosophe au physicien en passant par le biologiste, le médecin, voire aussi le sociologue, l'économiste ou le psychologue » (Stengers 1997, p. 191). Wilhelm Ostwald est connu pour son énergétisme radical. Pour ce moniste conséquent, c'est « dans l'énergie que s'incarne le réel ». Ostwald forge l'expression d'« impératif énergétique » pour désigner un principe généralisé de conservation de l'énergie qui s'applique non seulement à la matière cosmique mais encore à la psyché humaine et aux sociétés historiques (Hiebert 1966, p. 1061-1062). Au-delà des cercles techniciens, des auteurs formés aux humanités importent l'énergétisme dans l'étude des sociétés humaines. Ceci contribue à forger et à accréditer l'équation énergie-civilisation (cf. 1.3.4). L'éditeur et journaliste Edward L. Youmans suggère dans les années 1860 que chaque époque est déterminée, par analogie avec l'énergie, par « une quantité fixe de morale et de liberté » (Hiebert 1966, p. 1058-1059). Il est aussi un fervent soutien intellectuel et financier d'Herbert Spencer.

Spencer contribue lui aussi à l'équation énergie-civilisation. Il fait de l'énergie un facteur d'explication des « différences matérielles entre sociétés » (Zachmann 2012, p. 11). Avant Charles Darwin, Spencer a élaboré une philosophie synthétique (1858-1896) unifiant les phénomènes inorganiques, biologiques, psychiques et sociaux. Parfois caricaturée par l'expression « survie des plus aptes », la pensée de Spencer mérite un détour, entre autres, pour son audience inégalée dans les sciences humaines et sociales du dernier tiers du XIXe siècle. Déçu par les Églises instituées, Spencer reprend à son compte le terme d'agnostique forgé par son ami Thomas H. Huxley (Becquemont et Mucchielli 1998, p. 197). Moins matérialiste que ce dernier, Spencer cherche des principes transcendants dans les lois cosmiques pour expliquer les sociétés humaines. Toute son œuvre est travaillée par une tension entre la fascination de l'inconnaissable (divin) et le désir de régularités (cosmique et sociale). Sa philosophie synthétique emprunte abondamment à la thermodynamique et à la biologie. D'une part, Spencer reprend à William Grove l'idée d'une « persistance de la force » physique et psychique à l'échelle du cosmos (Becquemont et Mucchielli 1998, p. 106, 197). Vers la fin de sa vie, il comparera même Dieu à « une Énergie infinie et éternelle, d'où procèdent toutes choses ». D'autre part, il recourt aux analogies entre organismes et sociétés pour décrire les structures et les fonctions des institutions. Cet organicisme nourrit et s'inspire de l'anthropologie évolutionniste d'Edward Tylor dans les années 1870. Tylor en Angleterre et Lewis H. Morgan aux États-Unis construisent une tripartition de la culture basée sur les ressources : la « sauvagerie » est définie par la nourriture sauvage (collecte et chasse) ; le « barbarisme » par une domestication de la nourriture (agriculture et élevage) ; la « civilisation » par l'écriture (accumulation et stockage de connaissances). Le recours aux analogies avec la nature sont alors fréquentes dans les sciences de l'homme et de la société en train de construire leurs épistémologies à la fin du XIXe siècle (Passeron 1991, p. 80-85).

À l'inverse, l'anthropologie culturelle menée par Franz Boas aux États-Unis critique le naturalisme et le déterminisme technologique de l'anthropologie évolutionniste. En Allemagne, Max Weber fustige le transfert des concepts des sciences de la nature vers les sciences de la société et met en garde contre le naturalisme en général et celui d'Ostwald en particulier (Zachmann 2012, p. 12). En France, Charles Renouvier « s'oppose à Saint-Simon, à Comte, à Hegel [...] à Spencer – qui postulent a priori que l'enchaînement des choses répond à une nécessité transcendante, qu'elle se nomme Providence, Raison, Progrès ou Évolution » (Becquemont et Mucchielli 1998, p. 280). Contre l'organicisme de Spencer, il défend la supériorité du social sur le biologique. En Angleterre, Thomas H. Huxley rompt lui aussi avec son ami Spencer en 1886 en affirmant l'irréductibilité de la morale par rapport au vivant (Becquemont et Mucchielli 1998, p. 192). Son petit-fils, l'écrivain Aldous Huxley ridiculise la réduction de l'humanité à un tas de charbon disponible : « nous pensons naïvement, dit-il [... en 1928], que parce que nous utilisons cent dix fois plus de charbon que nos ancêtres, nous sommes cent dix fois meilleurs intellectuellement, moralement et spirituellement » (cité par Basalla 1982, p. 170).

Malgré les critiques de Boas ou Weber, l'équation énergie-civilisation dispose d'une large audience au sein des sociétés industrielles. Elle est reformulée, en 1881, par le médecine et sociologue français, Gustave Le Bon, inquiet d'une pénurie probable de charbon en Europe. Il craint de voir « l'axe de la civilisation […] se déplacer vers l'Asie » car celle-ci, d'après les estimations géologiques, disposerait d'« immenses réservoirs de combustible » (cité par Marrec 2018a, p. 79). Les débats sur la pénurie de charbon font écho à un second aspect de la thermodynamique.

En plus du principe de conservation de l'énergie, un autre principe est formulé en thermodynamique. Il s'agit d'un principe d'évolution, formulé par le physicien prussien, Rudolf Clausius, au cours des années 1850, à partir d'une relecture originale des travaux de l'ingénieur polytechnicien, Sadi Carnot (Stengers 1997, p. 196-213). Il affirme qu'un système physique isolé évolue de manière irréversible vers un plus grand désordre. Thomson (W. Thomson 1852a) interprète ce principe en termes utilitaires comme « une tendance universelle dans la nature à la dissipation d'énergie mécanique ». Ces considérations prédisent une mort thermique de l'univers, à l'horizon de quelques milliards d'années (Smith et N. Wise 1989, p. 497-502). Ce second principe de la thermodynamique introduit le concept d'entropie, dérivé d'un mot grec signifiant « transformation »). Il sera qualifié, par Henri Bergson, de « plus métaphysique de tous les principes de la nature » (Hiebert 1966, p. 1074). C'est à nouveau la dimension très générale, mais floue, de la notion qui assure une large circulation de ce principe d'évolution au-delà des milieux physiciens de l'époque. La thermodynamique est ainsi réappropriée dans le sens d'une naturalisation de la société, même si, plus encore que dans le cas de la pénurie de charbon, la mort thermique de l'univers dessine un horizon temporel dont l'échelle est incommensurable avec l'existence humaine.

Sources et réserves d'énergie chez William Thomson

est un troisième savant britannique impliqué dans la construction de la thermodynamique est (Balibar 1999, p. 342-347). Son itinéraire intellectuel et professionnel permet de mieux cerner les enjeux du stockage de l'énergie de la deuxième moitié du XIX^e^ siècle. Thomson est un savant éclectique et un entrepreneur avisé, anobli en 1892 par la reine Victoria en Lord Kelvin pour services rendus à la couronne. Il est professeur d'université pendant cinq décennies à Glasgow, alors capitale industrielle, chantier naval et seconde ville de l'Empire britannique. Outre la thermodynamique, il contribue à reconfigurer la philosophie naturelle de son temps par la formalisation mathématique et théorique de l'électromagnétisme de 1840 à 1870, participe au développement des systèmes de communication télégraphique transatlantique et mène diverses activités

industrielles et commerciales (Smith et N. Wise 1989, p. xxii-xxiii). Son travail entrelace les approches théoriques, expérimentales, opératoires et commerciales de l'énergie.

Comme Ostwald, Thomson défend une représentation énergétiste du cosmos. Dans le *Treaty of Natural Philosophy* (1867), qu'il coécrit avec Peter G. Tait, on lit que « l'énergie est aussi réelle et aussi indestructible que la matière ». Par la suite, il formule une cosmologie originale à partir de l'énergie. Cette « économie de la nature en accord avec les lois de l'énergie » est connue et discutée par plusieurs savants majeurs de la deuxième moitié du siècle, dont Helmholtz, William Rankine et George Stokes. Elle s'appuie sur ce que Thomson considère comme un axiome de la philosophie naturelle : la « dissipation universelle de l'énergie » (Smith et N. Wise 1989, p. 497-502). Cette dissipation devient, à ses yeux, un pilier théorique de la thermodynamique, un donné empirique du fonctionnement des machines à vapeur ou du soleil et un signe de la puissance de Dieu à travers une dynamique universelle. Thomson applique sa vision thermodynamique de l'univers à trois questions : la nature de la chaleur solaire, les conséquences gravitationnelles de cette chaleur et l'origine du système solaire (Smith et N. Wise 1989, p. 502-523).

La première question le conduit à s'interroger « Sur les sources d'énergie dans la nature disponibles pour la production par l'homme d'effet mécanique ». C'est le titre d'une conférence que Thomson prononce en novembre 1881 devant l'Association britannique pour l'avancement des sciences. Il répond là, à trente ans de distance, à une première conférence qu'il avait donnée devant la Société royale d'Édimbourg en février 1852, sous un titre similaire : « Sur les sources disponibles pour la production par l'homme d'effet mécanique ». Les deux conférences furent publiées sous forme d'articles (W. Thomson 1852b, 1881). Leur comparaison révèle deux invariants de la pensée de Thomson et deux novations entre ces deux dates. Le premier invariant consiste à prendre la chaleur du Soleil comme référent central d'une réflexion sur les formes d'énergie sur Terre. Ceci est cohérent avec l'attachement de Thomson pour la dissipation universelle de l'énergie mais il reconnaît sa dette envers John Herschel, qui était parvenu à la même conclusion en 1833 à partir d'une réflexion en astronomie.

Le second invariant est la classification des formes d'énergie en fonction des « réserves » (*stores*) de travail mécanique qu'elles représentent pour les activités humaines (W. Thomson 1852b, p. 112). Six classes de réserves d'énergie sont énumérées : nourriture des animaux, chaleur, matière solide en hauteur, mouvements de l'eau et de l'air, « combustibles naturels » (bois, charbon, gaz extrait du charbon, huiles, gaz des marais, diamant, soufre natif, métaux natifs, fer des météorites), « combustibles artificiels » (métaux fondus ou déposés électrolytiquement, hydrogène, phosphore).

Thomson (1852b, p. 113) réduit ces six classes d'énergie selon trois causes naturelles. Il commence par « la principale source d'effet mécanique disponible à l'homme », la chaleur du soleil, dont dépend le travail animal, des moulins à eau, des machines à vapeur ainsi que, pour partie, des moulins à vent et de la navigation à voile. Il cite ensuite les « mouvements de la terre, de la lune et du soleil », « une source importante » d'effet mécanique, à travers les moulins à marées et une partie de la navigation à voile. Il termine enfin par les autres forces, d'origine terrestre ou météorique, jugées « insignifiantes » pour les applications humaines : carrières des montagnes et mines, sources chaudes, sulfure natif et autres combustibles inorganiques natifs, chaleur des météorites et combustion du fer météorique. Cette double classification, par type de réserves d'énergie et de causes naturelles, évolue peu sur la période 1850-1880 puisque Thomson prend la peine de la reproduire intégralement dans l'article de 1881. Elle révèle une méthode analogique, qui transfère les schémas conceptuels entre domaines naturels et sociaux, et une pensée opératoire, qui pèse les « sources naturelles d'énergie » en fonction de leur valeur « pratique » pour le travail humain (W. Thomson 1881, p. 377).

Cette pensée opératoire se nourrit des débats sur les réserves de charbon des années 1860-1890. Thom-

son (1881, p. 377-383) procède à une comparaison du coût financier et de l'efficacité énergétique de différents types de convertisseur d'énergie : moulin à marée et à eau, navigation à voile et à vapeur, machine à vapeur, etc. Il replace les réserves d'énergie dans des perspectives historiques. C'est là que réside la première novation par rapport à 1852 : l'inscription de l'économie des énergies dans des temporalités humaines. Thomson met en balance « le temps présent d'une ascendance de la vapeur » à la forte puissance installée de la puissance du vent : trois quarts des 40 000 vaisseaux de la flotte britannique sont des voiliers, ainsi qu'une une multitude de moulins à vent.

Il oppose ainsi des effets de mode de la société, le vent étant jugé « démodé », à des structures profondes de l'économie, enfouies ici sous le décompte malaisé d'une infinité de petites puissances. Et s'il regrette « une lamentable décadence de l'énergie du vent », il doute qu'elle se poursuivra. Deux raisons à cela : les « réserves souterraines de charbon du monde vont s'épuiser sûrement, et pas lentement, et le prix du charbon va augmenter tendanciellement » (W. Thomson 1881, p. 379). Une telle formulation se comprend dans le phénomène d'anxiété provoqué par la publication de *The Coal Question* en 1865. Mais, pour Thomson, la raréfaction escomptée du charbon n'induira pas de limitation économique car elle sera compensée par l'augmentation de forces des moulins à vent ou d'autres formes de « moteurs à vent ». Il défend qu'à son époque même, « en certains lieux », la puissance du vent pourrait remplacer le charbon pour l'éclairage.

Cette confiance est soutenue par l'irruption d'un nouveau vecteur d'énergie dans le domaine industriel : l'électricité. C'est la seconde et principale novation par rapport à l'article de 1852, où des « moteurs galvaniques » étaient évoquées de manière anecdotique. Elle n'est pas propre à Thomson mais due aux contextes de l'époque. Cependant, le cheminement de Thomson est fort intéressant dans le cadre du stockage de l'énergie. En 1857, alors que l'Institution des ingénieurs civils s'interroge sur les perspectives commerciales des moteurs électromagnétiques, Thomson se montre dubitatif sur leurs débouchés par comparaison avec l'économie bon marché du charbon (Smith et N. Wise 1989, p. 712-713). C'est une conférence de Charles William Siemens en 1878 devant l'Institution des ingénieurs mécaniques [4] qui le convainc de l'intérêt industriel de l'électricité. C. W. Siemens y défend la possibilité de transmettre une forte puissance électrique d'un barrage construit sur les chutes du Niagara vers les principales métropoles américaines à plusieurs centaines de miles de là : Montréal, Boston, New York, Philadelphie. L'année suivante, le Parlement britannique demande à Thomson une expertise sur le sujet. Le Comité parlementaire sur l'éclairage électrique a besoin d'estimations chiffrées sur la production, la consommation et le transport d'électricité.

La conférence de 1881 trahit l'enthousiasme de Thomson pour ces nouvelles perspectives industrielles. Il met en situation deux artefacts électriques récents qui modifient l'appréhension de l'énergie dans l'espace et le temps. Le premier est la machine dynamo-électrique, ou dynamo, qui « génère de l'électricité » à partir d'un travail mécanique fourni par des chutes d'eau ou des machines à vapeur. Cette électricité en quantité peut ensuite être transportée dans des fils de cuivre sur de longues distances avec d'autant moins de perte thermique que la tension électrique est élevée. Thomson souligne un changement d'échelle spatiale de la transmission de puissance de trois ordres de grandeur : des centaines de mètres dans le cas de la force mécanique ; des centaines de kilomètres dans le cas de la puissance électrique. Le projet de transport depuis les chutes du Niagara évoqué par C. W. Siemens sert de référence à Thomson. Cela augure « de conditions vraiment réalisables à un coût économique » (W. Thomson 1881, p. 383-384).

Le second artefact électrique évoqué par Thomson concerne les batteries électrochimiques. Ce domaine est en ébullition depuis l'année précédente à cause de l'amélioration de la batterie au plomb de type Planté

4. Cette appellation est utilisée par Thomson (1881, p. 382), mais Smith et Wise (1989, p. 713) parlent de l'Institution des ingénieurs civils.

par Camille Faure. Cet ingénieur des Arts et métiers a fait breveter un procédé pour réduire la durée de production des cellules électrochimiques de plusieurs mois à quelques jours (Lockwood 1894, p. 340-341). Leur « applicabilité commerciale semble alors assurée » selon les électriciens de l'époque (Barnett 1896, p. 303). Thomson (1881, p. 378) insiste sur la fonction de stockage d'énergie des batteries. En un lieu donné, l'« accumulateur électrique de Faure » permet d'« emmagasiner » (*store up*) la puissance produite par une dynamo magnéto-électrique de type Gramme reliée à un moulin à marée ou à vent. Si l'installation dispose d'un nombre suffisant d'accumulateurs, une énergie suffisante est stockée pour assurer les plages d'éclairage nécessaires avant la recharge suivante. La durée entre deux charges varie selon des cycles de douze heures dans le régime des marées et des temps variables dans le régime des vents. Il y a lieu de proportionner la capacité de stockage avec les besoins électriques et les rythmes éoliens. Ainsi, 20 kilogrammes de batterie Faure seraient suffisantes pour fournir une puissance d'éclairage de 60 chandelles-heure, six heures par jour, pendant quatre jours (W. Thomson 1881, p. 380). Si le temps calme se prolonge au-delà de cette durée, Thomson suggère l'utilisation d'« une petite machine à vapeur prête à fonctionner » ou de « quelques bougies ou lampes à huile en réserve » en attendant la recharge. Il s'est convaincu de la sécurité de la « boîte d'énergie électrique » en participant, au printemps 1881, au transport expérimental, entre Paris et Glasgow, d'une batterie chargée (Lockwood 1894, p. 340-341). Celle-ci a ensuite « splendidement » passé les épreuves qui lui ont été imposées au laboratoire de Thomson à l'université de Glasgow (Smith et N. Wise 1989, p. 715).

L'enthousiasme de Thomson est aussi celui d'une époque durant laquelle se transforment la signification, l'expansion et l'utilisation de l'électricité en Europe et en Amérique. Au-delà de l'espoir somme toute assez banal générés par de nombreux artefacts à l'époque contemporaine, il attire l'attention sur la manière dont certaines modalités de l'électricité reconfigurent, à partir des années 1860, les rapports des contemporains au problème du stockage de l'énergie.

3.2 Modulations électriques en France, Grande-Bretagne et États-Unis, 1860-1890

L'électricité du dernier tiers du XIX^e^ siècle, comme toute culture technique, hérite de concepts, de technicités et de modes d'existence d'artefacts, issus de régimes techniques antérieurs. La manière dont ces héritages sont continûment incorporés tout au long du siècle affaiblit l'idée d'une rupture franche, suggérée par l'historiographie de la « deuxième révolution industrielle ». Ceci pousse à préférer, à l'artificialité de moments inauguraux, l'idée d'une acclimatation des artefacts électriques au cours d'une « seconde industrialisation » selon des modalités inédites. Ces modalités, structurées par les sociétés qui les accueillent, les structurent en retour par leurs potentiels et leurs puissances (*affordance*). Elles constituent des modes d'existence des objets électriques, structurées et structurantes, que j'appellerai *modulations électriques*. Avec les « modulations d'existence », Souriau (1943, p. 156) rendait fondamental pour chaque être le passage entre ses différents modes d'existence (cf. 1.2.2). À sa suite, je parle de « modulation » pour insister sur la variété et la continuité des situations où se déploient les artefacts en société. À la manière des tonalités musicales, les situations technologiques se répètent et se reproduisent avec de légères variations en fonction des lieux et des contextes. Dans le cas de l'électricité, l'idée de « modulation » rend également compte d'une spécificité phénoménologique relative à la fluidité, l'intensité et le rythme des courants électriques.

Au moins trois ensembles de modulations électriques croisent le stockage d'énergie sur la période 1860-1890 en Europe et aux États-Unis : des *relations*, dans le sens double de *relater* et *relier* ; des accumulations,

comme désir renouvelé de stockage et de puissance ; des professions, à travers les activités de normalisation et de régulation. Elles seront développées dans cet ordre, de la signification à la standardisation, de leur symbolisme comme « sémiophores » [5] à leur valeur comme normes sociales.

3.2.1 Relations électriques : relater et relier les artefacts de l'électricité

La première modulation électrique est la mise en récit d'un patrimoine, stimulée par un désir d'organiser l'électricité dans le temps. Un ouvrage en particulier, déniché à la Bodleian Library d'Oxford, a retenu mon attention par sa périodisation. *A Century of Electricity*, publié en 1887 par un physicien, expert et administrateur états-unien, Thomas C. Mendenhall (1887, p. 3), prend les expériences du « philosophe italien » Luigi Galvani pour « inaugur[er] une nouvelle ère des sciences physiques ».

La période 1787-1887 comme premier siècle de l'électrique surprend par rapport à l'historiographie du XX^e^ siècle [6]. Edgar Zilsel (1941) a décrit la philosophie électrique et magnétique de William Gilbert comme un programme de recherche expérimental à la fin du XVI^e^ siècle. Thomas Kuhn (1975) a inscrit l'étude collective et contradictoire de l'électricité dans la vie des académies royales des sciences de Londres et Paris vers 1700. Christine Blondel (Blondel 1993) a montré l'importance des artefacts (machines à frotter, bouteilles de Leyde, paratonnerre) dans la constitution des savoirs et savoir-faire électriques au XVIII^e^ siècle dans un ensemble d'académies, de cabinets médicaux et de lieux de spectacles (salons, marchés, théâtres). L'électricité constitue une branche du savoir officiel, une thérapeutique médicale et une activité économique à la fin du XVIII^e^ siècle lorsque Galvani, professeur de physiologie à l'université de Bologne, étudie la nature de l'électricité animale (Bernardi 2001).

Alors, pourquoi Mendenhall ouvre-t-il la science de l'électricité avec Galvani ? Plusieurs raisons à cela : par ignorance sans doute, d'épisodes anciens alors méconnus (même si son premier chapitre concerne le XVIII^e^ siècle) ; par opportunisme éditorial de la commémoration d'un siècle ; par réflexe positiviste peut-être en isolant une expérience comme l'acte inaugural d'une science ; par volonté d'organiser, possiblement, l'électricité dans un court XIX^e^ siècle voisin de son époque et de sa propre expérience. Mendenhall insiste dans la préface sur la densité de résultats de cette « nouvelle électricité » depuis Galvani. Il est donc probable qu'il entend surtout distinguer l'électricité dynamique (issue de la pile de Volta) de l'électricité statique connue depuis l'Antiquité au moment précis où la première se popularise. L'entrée de l'électricité dans les foyers et la « familiarité personnelle de son utilisation […] pour des centaines de milliers de gens intelligents » auraient « excité un désir » de mieux connaître les principes physiques à la base des nombreuses applications électriques et leurs évolutions (Mendenhall 1887, p. 3).

Mendenhall referme son ouvrage par de prudentes prévisions concernant l'électricité « dans le deuxième centenaire de sa nouvelle vie ». Il envisage une extension des applications électriques, allant jusqu'à des dispositifs de « vision par l'électricité », mais avertit les optimistes que « sa croissance et son développement devraient être moins phénoménaux » (Mendenhall 1887, p. 225). À travers ce récit, c'est bien le présent qui reste la perspective centrale de l'auteur : l'expansion à son époque d'une intimité avec les artefacts électriques – c'est-à-dire le déploiement d'une technicité électrique dans la population – justifie à ses yeux un retour vers la formation des

5. Le concept de sémiophores, littéralement « porteurs de signes », est repris de l'analyse de Krzysztof Pomian (2014, p. 35) : « Le chemin des sémiophores [… va de] l'art rupestre, pariétal et mobilier, jusqu'à l'iconosphère contemporaine. Mais ils ont été dès l'origine et restent jusqu'à aujourd'hui des artéfacts qui extériorisent et matérialisent la vie imaginaire, émotionnelle et passionnelle des humains. »

6. Mon étonnement par rapport à la périodisation de Mendenhall est due à mes activités d'enseignement. Je me suis familiarisé avec l'historiographie de l'électricité dans le cadre d'une unité d'enseignement du master Épistémologie, histoire des sciences et des techniques de l'université de Nantes, centrée sur l'histoire de l'électricité et du magnétisme depuis l'époque moderne.

principes de l'électricité et une anticipation pour prévenir de trop grandes espérances. Son récit promeut aussi une approche technocratique de l'électricité en proposant la création d'un comité gouvernemental d'experts pour contribuer à normaliser les données du domaine (Mendenhall 1887, p. 213-214).

En somme, Mendenhall organise les temps et les formes de l'électricité en fonction de son agenda politique et de son imaginaire technicien. Son récit, ou sémiophore, administre des valeurs comme ses mandats administratifs organisaient des sociabilités lorsqu'il était agent de la modernisation scientifique du Japon de l'ère Meiji, président d'instituts polytechniques d'enseignement aux États-Unis ou promoteur du système métrique en Amérique du Nord. Mendenhall relate les existences de l'électricité dans des tranches de temps comme il régule les existences humaines dans des institutions technoscientifiques. Il administre, de la même façon, un patrimoine mémoriel et une institution humaine. Son approche est techno-politique par sa transformation de la mémoire collective et de la démocratie technique. Ce faisant, Mendenhall façonne doublement le régime technicien.

À ces deux premières mises en relation – de signification dans les sémiophores et de sociabilisation dans les institutions – s'en ajoute une troisième : la mise en relation d'artefacts électriques. C'est ce qu'imagine William Thomson (1881, p. 378) lorsqu'il propose de relier des moulins à vent, des dynamos et des accumulateurs par des fils de cuivre et de dimensionner l'installation pour avoir suffisamment d'énergie électrique entre deux épisodes venteux. Dans la terminologie des artefacts de Krzysztof Pomian (2014, p. 33-36), ceci revient à assembler des « choses » et des « mesureurs » électriques (ampèremètre et voltmètre) au sein d'un « sémiophore » qu'est la conférence de 1881. Une telle modulation relationnelle caractérise le domaine électrique à l'époque contemporaine. Dans quelle mesure change-t-elle au cours du siècle qui sépare Luigi Galvani de Thomas Edison ?

La mise en relation d'artefacts électriques est déjà à l'œuvre dans les travaux de Luigi Galvani et Alessandro Volta. À la fin du XVIII^e siècle, artefacts métalliques, bouteilles de Leyde, cuisses de grenouille, machines à frotter, mesureurs électriques et morceaux de métal sont reliés par une culture savante : ambiguïtés, disciplines, disputes, faits, honneurs, métaphysiques, méthodes, mots, symboles, théories et valeurs (Pera 1992). La multiplication des médiations entre nature et culture est, selon la théorie de l'acteur-réseau, une manière efficace de rendre une science « plus exacte, plus vérifiable, plus robuste » en l'arrimant plus solidement « au reste du collectif » académique (Latour 2001, §1). Mais, le galvanisme déborde du cadre académique vers la science-fiction d'abord, la littérature ensuite, et la culture générale enfin. Sa force est d'évoquer les mystères de la vie. Ainsi, vingt ans après la mort de Galvani, Mary Shelley (1818, p. 60-61) reprend les effets de l'électricité animale pour aider le docteur Frankenstein à « transmettre une étincelle de vie à la forme inerte [… dont les] membres [sont] agités d'un mouvement convulsif » à la façon de cette désormais fameuse cuisse de grenouille.

À l'autre extrémité du XIX^e siècle, Thomas Hardy (1888, p. 37) utilise encore « une sorte de galvanisme » dans la nouvelle *The Withered Arm* (*Le Bras flétri*) pour maintenir en vie pendant trois jours une jeune femme abattue par un choc physique et moral. Dans les strates du *Larousse*, l'article « électricité » s'interroge sur l'identité du flux électrique et de l'influx nerveux. Et même si la réponse paraît négative au niveau expérimental[7], les effets électriques sur les tissus vivants sont utilisés en électro-thérapie par les médecins. Depuis la fabrication des bouteilles de Leyde au milieu du XVIII^e siècle, les « électriseurs » ont développé trois modes d'application : statique, galvanique et par induction (Larousse 1867-1876, vol. 7, 309-310). Seule

7. L'article souligne néanmoins deux « graves objections » à l'identification : les différences d'ordre de grandeur de « la vitesse de propagation » dans les tissus vivants et les corps métalliques (20m/s contre 200 000 km/s) mesurées par Hermann Helmholtz ; la rupture de l'influx nerveux par « ligature » des nerfs alors que celle-ci n'a pas d'effet sur les impulsions électriques (Larousse 1867-1876, vol. 7, 309-310).

l'induction, ou « faradisation », est encore employée en thérapeutique à l'époque. Elle peut opérer sur la peau, les muscles et de nombreux organes : vessie, rectum, utérus, pharynx, œsophage, cordes vocales, foie, estomac, poumons, cœur, etc. Ainsi, ces différentes modulations issues du champ culturel et médical octroient à l'électricité une aptitude *à passer à travers* (des corps, des organes, des tissus) et à transmettre une *certaine puissance de vie*, qui hérite du concept ancien de « force vitale » et de l'opération moderne d'effets empiriques. Elles explicitent de multiples porosités entre science et littérature, entre opératoire et esthétique, entre nature et culture.

Tout au long de l'époque contemporaine, l'électricité montre une forte propension à connecter des choses distinctes et à mettre en correspondance des réalités hétérogènes. Cela est vrai localement et à distance. Prenons deux exemples. La pile à combustible concrétise cette force d'interdépendance au niveau local. Son histoire est une vaste entreprise, sans cesse recommencée depuis deux siècles, de mise et remise en connexion de catalyseurs, d'électrons, d'énergies, de fluides, de forces, de gaz, de réactifs, de surfaces et de volumes, assemblés pour faire fonctionner, de manière régulée, une boîte densément stratifiée, mais ouverte sur le milieu social environnant (Teissier 2017a). Le deuxième exemple concerne le télégraphe qui, au cours du XIX^e^ siècle, constitue une entreprise intercontinentale de mise en relation – matérielle et discursive – des États-modernes dans une perspective économique et coloniale (Beltran et Carré 2016, p. 31-44). La conséquence médiatique, qui fait émerger la figure du « reporter » relatant les événements en « temps réel » et reliant le monde aux capitales européennes, induit une « nouvelle saisie de l'espace » (rétrécissant l'espace et accumulant les connaissances) et « un nouveau type de temporalité » (réduisant le temps des décisions politiques et économiques) (Beltran et Griset 1990, p. 44). L'extension des réseaux de télégraphie d'abord, puis de téléphonie et de télécommunication, contribue à l'accélération technique analysée par Harmut Rosa (2005) comme la transformation des *habitus* collectifs et du milieu de vie.

Malgré leurs différences, un objet comme la pile à combustible et un réseau comme la télégraphie tissent des mises en relation matérielle et discursive de réalités hétérogènes. Ils présentent deux cas de continuité technologique durant l'époque contemporaine. Mais, d'autres exemples relevant de l'histoire de l'électricité appellent des interprétations plus discontinues de la seconde industrialisation. Ainsi, l'essor des réseaux électriques indiquent une rupture du processus historique. Thomas Hughes (1983, p. 1) défend la thèse que la construction et l'expansion des macro-systèmes techniques de l'électricité sur la période 1880-1930 aux États-Unis et en Europe provoque une réorganisation d'ampleur des sociétés modernes. Les réseaux électriques recomposent l'organisation, l'intégration, la coordination et la systématisation du social.

3.2.2 Accumulations électriques : cumuler et stocker la puissance

La mise en réseau de l'électricité renouvelle le problème du stockage de l'énergie. Pour comprendre comment, revenons à la conférence de William Thomson de novembre 1881 devant l'Association britannique pour l'avancement des sciences. La conférence a d'abord expliqué comment proportionner une installation locale reliant un moulin, une dynamo et des batteries pour faire face aux aléas climatiques. La conclusion change d'échelle. Elle considère un « réseau électrique » (*electric main*) de plusieurs centaines de kilomètres, incarné par l'équipement hydro-électrique des chutes du Niagara connecté aux zones urbaines du Nord-Est des États-Unis (W. Thomson 1881, p. 384-385).

Thomson se demande comment recueillir la puissance électrique transmise sur de longues distances puis distribuée au niveau des centres urbains. Comme pour un fleuve, le courant électrique déverse sa puissance en continu en bout de réseau. En outre, pour réduire des pertes thermiques (par effet Joule) dépendants de la

distance parcouru, Thomson, à la suite de C. W. Siemens, adhère à l'idée d'un transport d'électricité sous haute tension pour les longues distance. Il propose donc de déverser les 80 000 volts du réseau dans une réserve proportionnée à cette puissance : 40 000 batteries Faure ayant une force électromotrice de deux volts, ce qui assure le nécessaire équilibre des tensions. Un « système méthodique » permettrait ensuite de remplacer, par bloc de 50 cellules, les batteries chargées par des batteries déchargées. L'« invention splendide de Faure » de 1880 fait désormais pencher Thomson vers les accumulateurs géants en bout de réseau plutôt que vers l'abaissement des tensions par des dynamos qu'il envisageait auparavant. À un niveau équivalent de sécurité, il choisit la batterie électrique pour sa « simplicité et régularité ». Cette solution a des implications professionnelles pour la gestion des batteries par les opérateurs électriques et pour leur production industrielle de masse. Elle a aussi des conséquences sociales sur la manière dont les « boîtes d'énergie électrique » de faible tension sont distribuées, vendues et utilisées par les consommateurs pour l'éclairage urbain et l'opération des machines électriques à coudre, à tour et de traction.

Le choix de Thomson indique un changement de statut épistémique et symbolique de l'accumulation électrique sur la période 1860-1880. L'essor des batteries de Planté à Faure induit une modulation inédite du stockage de l'énergie. Quand, en 1862, un ingénieur britannique de l'industrie télégraphique, Frederick C. Webb publie *A Treatise on the Principles of Electrical Accumulation and Conduction*, il s'agit de condensateurs, dont font partie les bouteilles de Leyde, dans des circuits électriques. L'expression « accumulation électrique » ne fait pas alors référence au stockage mais à l'assemblage. C'est le sens courant de batterie, qui, par analogie avec une ligne de canons, désigne une série d'objets alignés. Une batterie électrique est un alignement de bouteilles de Leyde. Un tel assemblage a deux objectifs pratiques. D'abord, la mise en série facilite la charge des condensateurs disposés « en cascade ». Ensuite, elle permet, à la décharge, d'obtenir « une plus forte électricité » (*Dictionnaire de l'Académie française*, 1878). L'accumulation électrique désigne la production d'« un degré d'énergie d'autant plus considérable que le nombre de bouteilles est plus grand » (Larousse 1867-1876, vol. 2, 377). Elle renvoie à un *effet cumulatif* dû à l'association en série de bouteilles de Leyde.

La même idée est exprimée par Joseph Swan en 1882 dans une conférence intitulée « Accumulation voltaïque » devant la Société chimique de Newcastle-upon-Tyne. Employé dans une manufacture chimique de la ville, Swan est connu pour la fabrication des premières ampoules à incandescence sous vide à la fin des années 1870. Il a équipé sa maison d'éclairage électrique ainsi que celle de ses voisins et amis parmi lesquels on compte William G. Armstrong. Au moment de la conférence, Swan est un entrepreneur à la tête de la Swan Electric Light Company fondée en 1881. Il reprend l'expression « accumulation voltaïque » de Gaston Planté dans le double sens d'« effet cumulatif » et de « stockage » (Swan 1882, p. 5052). Il signale un glissement sémantique du premier sens, associé aux bouteilles de Leyde depuis le XVIII^e^ siècle, au second sens dont l'usage s'intensifie des premières batteries au plomb de Planté en 1859 aux améliorations de Faure en 1880. Swan approfondit la réflexion de Planté en avançant que la « vraie essence de l'idée de stockage est la rétention (*retentivity*) », une batterie devant « agir comme un réservoir, ou réserve (*store*) [...] de la charge qui lui a été communiquée ». Il forme une image du stockage électrique, par analogie de forme, avec l'hydraulique des réservoirs. Cette réflexion épistémique se double de considérations économiques sur le prix et la disponibilité des matériaux composant un artefact et sur le temps nécessaire à sa production. Ce double regard le conduit à une qualification contradictoire de la pile à combustible. Sur le plan épistémique, Swan (1882, p. 5052) célèbre « la cellule gazeuse de Grove » comme la « cellule idéale » de rétention parce que, contrairement aux autres batteries, elle ne présente ni fuite électrique, ni altération chimique au cours du temps. Sur le plan commercial en revanche, il disqualifie le prototype fabriqué par William Grove au début des années 1840

parce qu'il incorpore le métal « si rare » qu'est le platine.

Ainsi, sur la période 1860-1880, l'accumulation électrique en vient à désigner le stockage d'énergie en plus de l'effet cumulatif de génération d'électricité. Les cellules électrochimiques voient ainsi leurs modes d'existence se dédoubler. Au début de la période, elles sont principalement associées au galvanisme par les dictionnaires spécialisés, qui parlent de « pile galvanique » (Laboulaye 1853, t. 2, 112). Une pile est alors « l'instrument par excellence pour obtenir de grandes quantités d'électricité » (Laboulaye 1861, p. xi). Elle est un « générateur spontané d'électricité » dynamique (Larousse 1867-1876, vol. 12, 1009) [8]. Ces histoires *a posteriori* introduisent des anachronismes justement stimulés par l'importance du stockage d'électricité au moment où écrivent ces auteurs vers 1890. Les « courants secondaires » renvoient, en effet, plutôt à des débats fondamentaux en électrochimie qu'à des opérations de stockage (Kragh 2000, p. 138).

Le second, et nouveau, mode d'existence des batteries électriques est le stockage d'énergie. Alors qu'elle s'apparentait jusque-là au seul effet cumulatif et instantané, l'accumulation électrique désigne désormais aussi la mise en réserve d'énergie pendant une certaine durée. Les professionnels de l'électricité distinguent ainsi deux types de « transformation de l'énergie électrique » suivant que l'usage de l'électricité est « instantané ou immédiat » (bobines, survolteurs, dévolteurs, redresseurs, déphaseurs, etc.) ou qu'il est « différé » dans le temps (accumulateurs) (Hospitalier et Bainville 1901, p. 4, 53). Pour exprimer l'idée de « réserve » d'énergie, ils forgent l'expression « batterie d'accumulateurs » au début du XX^e^ siècle. Une batterie d'accumulateurs peut ainsi relier plusieurs centaines de cellules électrochimiques dans les centrales électriques (cf. 4.2) ou dans les locomotives de l'époque (cf. 4.1.3).

Ces pratiques enrichissent le vocabulaire technique. Dans une conférence intitulée « La question de la batterie de stockage » donnée à l'institut Franklin de Philadelphie, un chimiste local, Pedro G. Salom (1893, p. 321), souligne l'équivalence des trois expressions suivantes : « accumulateur électrique », « batterie de stockage » et « batterie secondaire ». La première expression est l'appellation traditionnelle remontant au XVIII^e^ siècle pour désigner les bouteilles de Leyde ; la deuxième indique la nouvelle fonction des accumulateurs apparue durant la période 1860-1880 ; la troisième précise leur aptitude à être rechargés par opposition aux batteries « primaires » de type piles de Volta datant du début du XIX^e^ siècle, qui, elles, n'ont droit qu'à une seule décharge. Salom déplore la confusion occasionnée par ces expressions dans l'esprit du public parce qu'il n'y a pas stockage effectif d'électricité. Un « accumulateur [...] est simplement un réservoir commode pour stocker (*store*) les ingrédients actifs nécessaires pour générer un courant électrique » (Salom 1893, p. 329). Il convient donc, pour être précis, de parler de « stockage électrique d'énergie » (Lockwood 1894, §300).

3.2.3 Normalisations électriques : milieu électricien et réseaux électriques

L'essor de nouvelles filières électriques induit de nouveaux modes de normalisation des sociétés. Une adaptation interne entre les différentes parties d'un réseau électrique – production, transmission, distribution, consommation – est nécessaire pour le bon fonctionnement de l'ensemble technique comme le savent bien les « bâtisseurs de systèmes » tel Thomas Edison [9]. Ceci nécessite la mise en conformité des différents artefacts

8. Certaines histoires de l'électricité écrites après 1880 par des électriciens font remonter le « stockage d'électricité » à l'apparition des piles de Volta. Elles citent les travaux du chimiste Nicolas Gautherot en 1801, à l'appui de leur thèse, crédités d'avoir repéré des « courants secondaires » de décharge, en sens inverse de courants de charge de condensateurs (Trevert 1891, p. 41-43 ; Salom 1893, p. 322-323)

9. « Il n'était pas seulement nécessaire que les lampes donnent de la lumière et que les dynamos génèrent du courant, mais les lampes devaient être adaptées au courant des dynamos, et les dynamos devaient être construites pour donner le type de courant requis par les lampes, et de même toutes les parties du système devaient être construites en référence à toutes les autres parties, puisque, dans un sens, toutes les parties forment une seule machine, les connexions entre les parties étant électriques plutôt que mécaniques. Comme pour toute autre machine, l'échec d'une partie à coopérer avec l'autre partie désorganise l'ensemble et le rend inopérant pour le but

(dynamos, lampes, machines) et des flux transmis (courants, tensions) et un contrôle permanent de l'équilibre des réseaux électriques entre puissances produites et consommées (Hughes 1983, p. 1-17). À mesure que les réseaux couvrent un nombre croissant de territoires, ils imposent une normalisation à une part croissante de la société. De structurés, ils deviennent structurants. Cette normalisation se déploie d'abord dans le périmètre de chaque État-nation, jusqu'à la Première Guerre mondiale en Europe (Lagendijk 2008, p. 27).

Plusieurs cas de normalisation ont été étudiés en histoire de l'électricité. Le cas bien connu, de la compétition entre systèmes continu et alternatif, a conduit à l'adoption du courant alternatif aux États-Unis et en Europe à la fin du XIX^e^ siècle. L'épisode a été dramatisé aux États-Unis par l'expression de « guerre des courants » opposant Thomas Edison à son rival Nikola Testa sur la période 1886-1893 (Millard, 1990). Mais, il s'agit surtout d'une compétition économique entre des systèmes sociotechniques opposant de puissantes compagnies financières. Comme en Europe, deux facteurs furent déterminants pour l'emporter : le « facteur de charge » et le « mix économique » (Hughes 1983, p. 218-221). Le premier facteur consiste à tendre vers une production d'électricité au plus près de la puissance maximale de la centrale en incorporant un nombre croissant de clients. Le second facteur concerne le couplage entre plusieurs sources d'énergie ayant des coûts et des rythmes différents (typiquement l'hydraulique et le charbon à la fin du XIX^e^ siècle) afin d'optimiser les coûts et de stabiliser le réseau électrique. Ces deux facteurs sont liés au stockage de l'énergie.

Si le courant alternatif l'emporte de part et d'autre de l'Atlantique, la tension et la fréquence n'y sont pas normalisées de la même façon. Les oligopoles de la période 1880-1900 ont ainsi établi des normes différentes en fonction des sous-régions du monde dont l'influence dure jusqu'à aujourd'hui : 110 volts et 60 hertz en Amérique du Nord ; 230 volts et 50 hertz en Europe. Cette persistance s'explique par plusieurs raisons : la lourdeur des infrastructures de réseau, qui favorise les choix localisés des premiers entrants (comme dans le cas des transports routiers) ; les ruptures des rivages maritimes, ce que suggère le cas de la Grande-Bretagne en Europe, et l'étirement des distances qui s'oppose à l'intégration des réseaux ; le conservatisme d'associations professionnelles, qui, de génération en génération, assure la continuité de normes nationales et régionales.

Voyons la dimension professionnelle. 1881 est parfois retenu comme une année charnière pour l'essor d'un milieu électricien (Caron et F. Cardot 1991). Le choix est justifié par l'organisation à Paris d'une Exposition internationale de l'électricité qui rend le domaine visible dans l'espace public (Beltran et Carré 2016, p. 53-70). Cette borne symbolique coïncide d'ailleurs avec la mise en fonctionnement des premières centrales électriques ouvertes au public aux États-Unis, en Angleterre ou en Allemagne. Mais, il y a quelque chose d'artificiel à isoler cette date car nombreuses sont les filières commerciales qui s'exposent sous la grande nef de l'Exposition de Paris : éclairage, électro-chimie, électro-métallurgie, galvanoplastie, mécanique, télégraphie, téléphonie, thérapeutique médicale, etc. Dix ans auparavant déjà, le *Grand Dictionnaire universel du XIX^e^ siècle* distinguait les significations scientifique et technique de la profession d'électricien : le « savant qui fait des études spéciales sur l'électricité » et celui « qui s'occupe des applications industrielles de l'électricité » (Larousse 1867-1876, vol. 7, 304, 311). Il mentionnait aussi l'« ingénieur électricien » pour la télégraphie et « l'électriseur », ce « médecin qui emploie l'électricité dans le traitement des maladies ».

Électricien est une profession composite au début des années 1880 (Caron et F. Cardot 1991, p. 9). L'Exposition internationale de l'électricité de Paris réunit près de 1 800 professionnels de l'électricité (Beltran et Carré 2016, p. 61). Elle révèle une multitude de métiers et de milieux professionnels impliqués. Fabienne Cardot (1991, p. 52) identifie « trois noyaux » principaux – savants, inventeurs et industriels – autour desquels gravitent d'autres professionnels, issus des administrations des télégraphes, des sociétés de chemins de fer, des

recherché » (écrit de Thomas Edison cité par Hughes 1979, p. 136).

sphères médicales, militaires, financières ainsi qu'une poignée de vulgarisateurs dont la puissance médiatique est déterminante. Cette analyse historiographique peut être complétée par des classifications professionnelles de l'époque. L'US Patent Office par exemple affiche, en 1885, neuf classes de brevets relevant de l'électricité : génération, puissance motrice, conduction, médical et chirurgical, applications spéciales, éclairage, signalisation, télégraphie, téléphonie (Kintner 1886, p. 379). Dans aucun des deux types de classification, le stockage d'énergie n'apparaît en tant que tel.

Le milieu électricien est partiellement intégré dans le dernier tiers du XIX^e^ siècle. Un premier facteur de convergence est la rapide standardisation internationale des unités de mesure officielles et pratiques. En marge de l'Exposition internationale de Paris de 1881, Allemands, Anglais et Français organisent un congrès scientifique aboutissant à un relatif consensus. « Ainsi, le congrès s'achevait sur le vœu d'adopter le système C.G.S. [centimètre, gramme, seconde], sur la définition des unités pratiques ohm, volt, ampère, coulomb, farad, et sur l'engagement de se réunir périodiquement pour définir de nouvelles unités, car celles qui avaient été adoptées ne représentaient qu'une infime fraction d'une longue liste. » (Ramunni 1991, p. 115). Un second facteur d'intégration est l'édition en Europe de l'Ouest et en Amérique du Nord de nombreuses revues techniques, professionnelles et généralistes, dont la circulation contribue à « la construction d'une communauté internationale de pratique technologique » dans l'industrie électrique (Bouvier 2008). De plus, le domaine commence à faire système car des filières électriques différentes interagissent entre elles. Ainsi, l'essor d'une filière peut en stimuler une autre : « Ce fut la machine dynamo qui créa la demande pour la batterie de stockage et celle-ci fut à nouveau présentée à un large public et au capitaliste en grande pompe et enthousiasme » (A. Reckenzaun 1887, p. 9903). La période 1880-1882 est ainsi marquée par un enthousiasme pour les batteries au plomb. Le procédé Faure, présenté en mai 1881 par Émile Reynier à la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, suscite de grands espoirs. Il trouve un écho important aux États-Unis, en rivalité avec le procédé similaire de Charles Brush, entrepreneur de Cleveland. Articles de vulgarisation et publicités commerciales pour ces nouvelles batteries de stockage fleurissent de concert dans des magazines grand public (*Scientific American*, *Scientific American Supplement*) et des revues spécialisées (*Nature*, *Journal of the Franklin Institute*).

Outre la complémentarité des filières se développent une compétition économique entre des artefacts pouvant assurer la même fonction sociale. L'intérêt des batteries pour l'éclairage est ainsi affaibli par l'expansion des réseaux de distribution de courant électrique. Jugée trop chère, trop longue à charger, trop encombrante, trop lourde, la batterie Faure se trouve marginalisée pour l'éclairage urbain (Lockwood 1894, p. 346-347). Elle alimente néanmoins les ampoules à incandescence lorsque le réseau montre ses limites, si les dispositifs sont mobiles (bateaux à vapeur, omnibus, trains, tramways) ou isolés (balises maritimes) (Science 1889, p. 1889). Le réseau électrique, qui distance la batterie pour l'éclairage urbain, la stimule par d'autres usages. La batterie de stockage est indispensable au bon fonctionnement des centrales électriques à travers la régulation des systèmes électriques. Le surplus de puissance électrique suggère l'idée d'une traction par batteries dans le cas des tramways, des yachts, chaloupes et bateaux de plaisance, mais également des ascenseurs [10]. Innombrables sont les applications où se niche une batterie de stockage : alarmes et sonneries ; appareils dentaires et chirurgicaux ; bijoux, montres et gadgets électriques ; galvanisation et générateur de laboratoire ; opérations électrochimiques, métallurgiques et soudures électriques ; petits moteurs, phonographes et machines à coudre ; télégraphie et

10. Les directeurs de centrales électriques refusent souvent de prendre en charge les ascenseurs des immeubles de bureaux à cause de variations de puissance très rapide : répétition d'une vingtaine de créneaux de 0 à 600 ampères en une dizaine de minutes à peine à certains moments des heures ouvrables. D'où installation locale de batteries de stockage, dont certaines installations permettent une recharge à la descente de l'ascenseur (Treadwell 1898, p. 181-183).

téléphonie ; etc. (Salom 1893, p. 335-338).

Le stockage électrique de l'énergie se trouve ainsi au cœur du système électrique durant le processus d'électrification de l'Amérique du Nord (Nye 1990) et de l'Europe (Lagendijk 2008). Des effets systémiques, d'entraînement ou de compétition entre filières, induisent des alternances entre euphorie et déception provoquée par les batteries de stockage (A. Reckenzaun 1887, p. 9903).

3.2.4 Imagination et modulations des sociétés électriques

L'articulation entre les trois modulations électriques retenues sur la période 1860-1890 – relations, accumulations, normalisations – précise un problème historiographique central de cet essai. Elle montre comment l'histoire du problème est indissociable du problème de l'histoire. La première modulation, ou *relations électriques*, enchevêtre le geste reliant des artefacts et la geste relatant des histoires. Les récits de la fin du XIX^e^ siècle, forgés par des électriciens, inscrivent l'électricité dans une continuité séculaire tout en présentant leur époque comme « un moment charnière » entre passé et futur (Elster 1978, p. 180). Lorsqu'en 1887 Thomas Mendenhall avertit que le deuxième siècle de l'électricité sera moins extraordinaire que le premier, ne dit-il pas que ses contemporains possèdent déjà une technicité électrique et que leur société est en partie régulée par l'électricité, sinon en acte du moins en imagination.

La deuxième modulation approfondit la réflexion en dédoublant la signification des *accumulations électriques*. D'abord synonyme d'un cumul d'effets instantanés, l'accumulateur porte désormais la capacité de stockage d'une puissance et de son utilisation différée dans la durée. Le stockage d'énergie assouplit la gestion des flux de puissance par rapport aux temps. Ce faisant, il induit de nouveaux rythmes et de nouvelles temporalités dont l'historiographie ne peut plus faire l'économie pour penser les régimes d'historicité.

La troisième modulation, des *normalisations électriques*, impose des contraintes d'infrastructure et de superstructure aux sociétés contemporaines pour reprendre le jargon marxiste. La stabilité jusqu'à aujourd'hui de certaines normes systémiques de l'électricité et la domination persistante des premières compagnies qui se sont implantées en Amérique du Nord (General Electric, Westinghouse) et en Europe (Siemens, RWE, Schneider, Compagnie générale d'électricité) confirment l'intuition de Mendenhall que le XX^e^ siècle adopte un ordinaire électrique, déjà présent dans les années 1880. Cette forte dépendance au sentier orientée par les macro-systèmes techniques de la période 1870-1900 a été soulignée par les historiens de l'électricité et de l'automobile (Kirsch 2000, p. 11-28). Mais, la période façonne également la superstructure des sociétés contemporaines à travers l'imaginaire technicien.

Généralisant les conceptions saint-simoniennes basées sur les systèmes bancaires et ferroviaires de la première industrialisation, la deuxième industrialisation ancre *la figure du réseau* dans l'imaginaire technicien pour penser l'interdépendance matérielle. La mise en réseau est l'une des caractérisations de la modernité. Elle déborde largement l'espace technicien car, par un processus courant de transfert sémantique, les humanités reprennent ce schéma de pensée à l'ingénierie. Le spectre du réseau hante, par ses nervures généralisées, les imaginaires du XX^e^ siècle. En témoignent, entre autres, au début du XXI^e^ siècle, le succès de la théorie de « l'acteur-réseau » en sociologie, le large recours à des outils clés en main (de type R par exemple) pour figurer des « réseaux d'acteurs » en sciences humaines et sociales, la banalisation de l'expression « réseaux sociaux » pour désigner des communautés virtuelles groupées par des dispositifs numériques. En reliant artefacts et normes électriques de manière aussi solide, les techniciens et les technocrates de la fin du XIX^e^ siècle obligent les technologues du XX^e^ siècle à passer par la grille d'analyse du réseau.

Voici donc, extraites des modulations électriques, les trois premières manifestations du régime technicien :

des images du social encadrées, voire normalisées, par la figure du réseau ; des gestions différées dans le temps, de l'usage instantané d'une puissance à une opération de stockage à durée indéfinie ; des enchevêtrements d'artefacts (systèmes) et de temporalités (récits) en vue d'une administration du réel. Relier, relater, rythmer, figurer deviennent autant d'opérations de contrôle des objets et des humains dans l'espace et le temps de l'électricité industrielle. Concluons l'analyse de ce « moment charnière » qu'est la fin du XIXe siècle en élargissant le propos de l'électricité à l'énergie. La conclusion dégage ainsi l'introduction de plusieurs structurations socio-culturelles relatives à l'énergie dans la modernité industrielle de la fin du siècle.

3.3 Conclusion : convertir, cumuler et convoquer l'énergie à la fin du XIXe siècle

Ce chapitre analyse l'interaction entre les « strates » anciennes révélées par une *Archéologie du savoir* (Foucault 1969, p. 10) et les forces sociales qui, au présent, reconfigurent l'épaisseur d'une société. Il s'est focalisé sur les trois « composantes du complexe humain » (Camps 1982, p. 55) formant le thème de cet essai : le stockage, le problème, l'énergie. Un demi-siècle d'observation (1850-1900) montre que les strates sociales et culturelles sont profondément ancrées à un terreau capitaliste et industriel. Celui-ci est structuré par la gestion de stocks de matière, de matériaux et de marchandises, à travers leur « recueillage » et leur « emmagasinement ». Les modulations électriques et l'économie industrielle du charbon modifient la donne énergétique dans le dernier tiers du XIXe siècle en mettant sur le devant de la scène le problème du stockage de l'énergie. L'emmagasinement de l'énergie constitue une promesse crédible à la fin du siècle pour améliorer la maîtrise de l'énergie et la régulation des flux énergétiques. Il rend possible trois opérations majeures de transformation de l'énergie : la conversion des formes d'énergie (3.3.1), l'accumulation d'énergie (3.3.2), le désir de puissance (3.3.3).

3.3.1 Conversions à l'énergie : tendances générales en Europe et Amérique

Explicitons la notion de « conversion » pour dissiper les malentendus. Elle recouvre deux sens dans cette conclusion. Le *Dictionnaire de l'Académie française* donne, avec une remarquable constance depuis le XVIIIe siècle, un sens général de « simple changement de forme » qui s'applique à du matériel (conversion des métaux, des écus) ou de l'idéel (conversion d'actes juridiques, de propositions logiques). Dans le champ de l'énergie, le mot désigne le changement d'une forme d'énergie (chaleur) en une autre forme d'énergie (travail). La conversion des formes d'énergie permet d'établir une typologie des modes de stockage (cf. 2.3.1). Les historiens de la deuxième moitié du XXe siècle en ont tiré le concept de « convertisseurs » pour désigner aussi bien une machine à vapeur ou un moteur à explosion qu'un cheval ou un être humain (cf. 1.6.4). Les praticiens de la deuxième moitié du XIXe siècle parlent quant à eux plutôt de « transformation » de formes d'énergie.

J'insiste ici sur le deuxième sens du mot « conversion » issu du champ religieux. La conversion exprime alors « un changement de croyance » (*Dictionnaire de l'Académie française*, 1878) ou le « retour à une bonne conduite » (*Dictionnaire de l'Académie française*, 1935). Les reconfigurations de la fin du XIXe siècle induisent une conversion culturelle majeure à l'énergie. Entre thermodynamique et économique, entre métaphysique et mystique, émergent une doctrine cohérente et une bonne conduite à l'égard de l'énergie et de son emmagasinement. Cette conversion à l'énergie joue sur les registres du savant, du sacré et du moral. Elle recouvre quatre tendances générales qui prennent corps en Europe de l'Ouest et Amérique du Nord durant les dernières décennies du XIXe siècle.

La mise en magasin de l'énergie

La première tendance est la généralisation, dans le champ de l'énergie, d'une approche opératoire et utilitaire de la nature durant le XIXe siècle. La sémantique du stockage, l'économie du charbon et l'épistémologie des réserves d'énergie partagent portent la même conception extractive des sources d'énergie. Les deux citations épigraphiques du chapitre rendent compte de cette évolution fondamentale à un demi-siècle de distance (1839-1887). Vivant dans la première moitié du siècle, Antoine Andraud est simultanément technicien, technocrate et technologue avant l'avènement de la thermodynamique et des réseaux électriques. Dramaturge amateur et ingénieur civil, il travaille comme administrateur à l'Inspection générale des approvisionnements de Paris (De Vaucher 1851, p. 3). S'interrogeant dans les années 1830 sur le fait que la houille puisse être « une source de richesses qui doit se tarir en peu d'années », il s'intéresse au ressort de l'air pour actionner les trains sur les chemins de fer alors en expansion et fait la démonstration à l'administration française d'un prototype de locomotive à air comprimé en 1844 (De Vaucher 1851, p. 10-15). Cet inventeur original cherche à comprimer de l'air à partir de « forces données gratuitement [...] dans la *marche des eaux* et dans la *course des vents* » (Andraud 1839, p. 14). Il explique ce projet original dans *De l'air comprimé employé comme moteur, ou De la force obtenue gratuitement et mise en réserve*. La production de puissance par des « roues éoliques ou hydrauliques » devra être couplée à l'emmagasinement de forces mécaniques transportables : « les vases remplis d'air comprimé au degré voulu, et que nous supposons d'ailleurs hermétiquement fermés, pourront être facilement transportés d'un lieu dans un autre et gardés en réserve. » Dans le cadre de ce projet convertissant les forces naturelles en travail mécanique qu'Andraud (Andraud 1839, p. 18) invoque une généralisation du stockage d'énergie dans les décennies à venir. « Il faut qu'on arrive à ce point, que chacun puisse avoir des *forces* en magasin comme on a aujourd'hui des chevaux à l'écurie pour le travail du lendemain. » Andraud forge une double image métaphorique. Le cheval est artificialisé : comparé à une réserve de force, il est disponible « pour le travail du lendemain ». L'énergie est domestiquée : comme un cheval à l'écurie, le stockage de puissance entre dans la sphère familiale et quotidienne. Cette double métaphore recompose la frontière entre nature et culture (cf. 5.3). Plus précisément, elle rend compte d'un renforcement de l'approche comptable de l'économie de la nature au cours du XIXe siècle (Deneault 2019). Comme des produits habituels du commerce, les « forces » de la nature sont mises « en magasin ».

Le dictionnaire *Larousse* (1867-1876) incorpore l'évolution des mentalité quelques décennies plus tard à travers les images du Soleil « emmagasiné » dans les houillères et de la Terre *réservoir* d'électricité (cf. 3.1.1). Un peu plus tard encore, de l'autre côté de l'Atlantique, Thomas C. Mendenhall, professeur, expert et administrateur de l'électricité, exprime l'espoir immense incarné par le stockage opérationnel de l'énergie au cours du XIXe siècle.

> Des méthodes pour stocker ou accumuler l'énergie de manière économique afin qu'elle soit facilement transportable a longtemps été l'espoir et l'aspiration de tout ingénieur mécanicien intelligent. Pendant un temps, la croyance que le problème était résolu à travers l'utilisation de l'électricité fut largement répandu ; d'innombrables sociétés par actions, représentant une quantité fabuleuse de capital, furent rapidement organisées avec l'objectif de développer cette nouvelle industrie. Les espérances des promoteurs de ces projets n'ont pas été réalisées (Mendenhall 1887, p. 213-214).

Mendenhall insiste également dans cet extrait sur la déception occasionnée par les batteries électriques vis-à-vis des espoirs de stockage d'énergie. La citation épigraphique de Mendenhall pose les limites de l'industrie électrique dans la maîtrise de l'énergie. Le stockage d'énergie apparaît comme un problème technologique

fondamental des sociétés industrielles tout au long du XIXe siècle. Si l'industrie électrique se construit autour des promesses du stockage d'énergie, les performances des batteries restent décevantes durant les années 1880.

L'approche utilitariste de l'énergie est également très présente dans la cosmologie de William Thomson. Son économie de la nature, tout en s'appuyant sur une loi universelle de dissipation de l'énergie et sur la toute-puissance divine, trahit une logique de boutiquier. La nature y devient un immense entrepôt. Les « sources naturelles d'énergie [telles que] marées, nourriture, combustible, vent et pluie » sont soupesées en fonction des possibilités de conversion en travail et marchandées selon leurs promesses d'emmagasinement pour le futur (W. Thomson 1881, p. 377). Thomson est d'ailleurs salué par l'*Encyclopædia Britannica* de 1910 pour son approche utilitaire de l'énergie : l'entrée « énergie » qualifie de « fondamentale » la distinction introduite par Thomson entre l'« énergie disponible », utilisable pour la production d'un effet mécanique, et l'« énergie diffuse », qui ne peut être convertie (Chisholm 1910, t. 9, 398).

Stocks d'énergie et régulation des flux de puissance

La mise en magasin de l'énergie et l'exploitation des ressources naturelles débouchent sur une deuxième tendance : le désir de réguler le monde par l'administration des flux de puissance et des stocks d'énergie. Une tel schème opératoire trouve une représentation appropriée dans la métaphore hydraulique du cosmos. Celle-ci est ancienne. On la trouve en économie, domestique et politique, en physiologie, en médecine, etc. Dans l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert par exemple, les corps des animaux et des hommes sont couramment comparés à des « machines hydrauliques » (Lafait-Boisson 2016, p. 17) [11]. L'essor de l'électricité renforce l'usage du couple flux-réservoir dans la représentation du monde au XIXe siècle. Le galvanisme d'abord met l'électricité en mouvement en tant que flux de courant ou influx nerveux tandis que la terre devient un réservoir d'électricité. La métaphore hydraulique est ensuite renforcée, du côté des flux, par la conception des courants électriques d'André-Marie Ampère à partir des années 1820, et du, côté des réservoirs, par les accumulateurs électriques de Planté à partir des années 1860. Les modulations électriques renforcent le couplage entre flux et stocks d'énergie à partir des années 1880 (cf. 3.2).

Au couple flux-stocks de puissance répond, pour les techniciens de l'époque, l'articulation entre régulation et mise en réserve de l'énergie. L'idée est exprimée en novembre 1880 dans la revue généraliste *La Nature* par Édouard Hospitalier, ingénieur-mécanicien de formation et électricien de métier. Celui-ci publie un état des lieux de « L'utilisation des forces naturelles et leur emmagasinement » quelques mois avant la tenue de l'Exposition internationale de l'électricité de Paris de 1881, dont il sera l'un des principaux organisateurs. En partant d'une analogie entre le travail dans le domaine de l'énergie et l'épargne dans le domaine de l'économie politique, Hospitalier (1880, p. 354) définit un « accumulateur » par sa double fonction de *régulateur* et de *réservoir*. Il illustre le rôle de régulation par « le volant [d'inertie] des machines à vapeur, emmagasinant le travail sous forme de puissance vive, le restituant ensuite et maintenant la vitesse entre les limites peu éloignées » et le rôle de réservoir par une restitution d'énergie précédemment emmagasinée « au moment voulu, tantôt avec une puissance faible et une longue durée, tantôt, au contraire, pendant un instant très court et avec une puissance considérablement multipliée ». Même s'il est devenu électricien, la pensée d'Hospitalier est fortement marquée par la mécanique comme le montre le choix des exemples. Ceci s'explique par sa formation à l'École des arts et

11. Dans son mémoire de master intitulé « Les machines hydrauliques dans l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert : définition, commentaires et analyses » soutenu à l'université de Nantes, Marion Lafait-Boisson (2016, p. 61) repère la métaphore de la machine hydraulique appliquée aux corps vivants dans les entrées suivantes de l'*Encyclopédie* : Capillaire, Corps, Feu, Fibre, Méchanicien, Valvule, Vessie aérienne des poissons

métiers d'Aix-en-Provence puis à l'École centrale de Paris [12] et par la prédominance de l'ingénierie mécanique au début des années 1880 (Ndiaye 2001, p. 69-93).

Néanmoins, c'est dans le domaine de l'électricité, avec la construction et l'expansion des réseaux électriques, que la double fonction de régulation et de réservoir des accumulateurs et que la pensée des flux et des stocks s'incarnent de la manière la plus nouvelles dans les deux dernières décennies du XIXe siècle. Les réseaux électriques induisent un changement d'échelle de trois ordres de grandeur dans la transmission de puissance, de quelques centaines de mètres à plusieurs centaines de kilomètres. Tout en dilatant l'espace, ils rétractent le temps jusqu'à l'instantanéité. Le courant électrique qui ne cesse d'être déversé en bout de lignes doit être administré en continu, soit stocké systématiquement dans des « batteries d'accumulateurs », soit distribué instantanément sous faibles tensions pour ne pas perdre la puissance. L'impératif d'une gestion instantanée de l'électricité rappelle un autre usage du terme « flux » depuis le XVIIe siècle : le « mouvement réglé de la mer vers le rivage à certaines heures du jour » (*Dictionnaire de l'Académie française*, 1694). La régulation temporelle, comme la normalisation des modulations électriques, deviennent centrales dans la gestion des macro-systèmes électriques à partir de la fin du XIXe siècle.

Une angoisse collective vis-à-vis des pénuries futures de charbon

La gestion de l'énergie par flux et stocks et son inscription dans le temps des sociétés humaines induisent une troisième tendance de la fin du XIXe siècle : une angoisse collective sur les réserves futures de charbon. Le débat est vif en Grande-Bretagne sur la période 1860-1890, notamment après l'annonce de William Jevons d'une pénurie possible à l'horizon d'à peine un siècle. La crainte est jugulée de deux façons au moins. La première façon est du ressort des technocrates : augmenter les estimations de réserves de charbon en ajoutant aux seules réserves prouvées des réserves probables dues au progrès technoscientifique d'extraction minière et à une politique industrielle de prospection minière par les États. La deuxième façon est introduite par les techniciens : généraliser la conversion de la force hydraulique en puissance électrique à d'autres formes d'énergie pouvant se substituer au charbon en cas de pénurie locale ou générale. Thomson prédit que la force du vent, démodée, pourrait ainsi revenir en grâce. Simonin en appelle à la mise du « soleil en bouteille » pour assurer un avenir radieux. Les « forces naturelles » sont agrégées en un domaine visible durant la période 1860-1900 : chaleurs, courants, marées, radiations et vents. En France, elles sont parées de toutes les vertus par la littérature technique : « disponibles, abondantes, gratuites et inépuisables » pour produire un travail mécanique (Marrec 2018a, p. 79-82). L'enthousiasme est plus marqué en France parce que le pays est « la seule des grandes puissances industrielles à devoir importer un tonnage substantiel de charbon », un tiers de sa consommation vers 1900 (Kuisel 1981, p. 68). Mais, il touche l'ensemble de l'Europe de l'Ouest et de l'Amérique du Nord.

La multiplication des possibilités de conversion des forces naturelles en travail utilisable et la souplesse du nouveau vecteur électrique conduisent à une quatrième tendance : la reconfiguration des classifications de l'énergie dans une perspective d'emmagasinement et de mise en réserve. Détaillons cette dernière tendance de manière plus approfondie pour l'importance qu'elle revêt dans l'accumulation d'énergie des sociétés industrielles.

12. D'après la fiche biographique rédigée par Catherine Kounelis sur le site internet de l'ESPCI PSL https://www.espci.psl.eu/fr/espci-paris-psl/bibliotheque/centre-de-ressources-historiques/dossiers-personnels-des-271/edouard-hospitalier-1852-1907-272/

3.3.2 Accumulations : reclasser les effets et les réserves d'énergie

La classification de l'énergie de William Thomson a été prise comme référence pour poser l'épistémologie des réserves d'énergie. Un tel choix est justifié par l'autorité du savant et de l'expert dans l'Empire britannique et par la relative stabilité de sa classification sur la période 1852-1881 (cf. 3.1.3). Thomson construit sa classification à partir de la production d'effets mécaniques et la mise en réserve d'énergie. Il envisage les réalisations opératoires et les potentialités à venir. Il aboutit aux six classes suivantes : nourriture, chaleur, solide en hauteur, mouvements de fluides, combustibles naturels, combustibles artificiels. Une telle classification n'est n'est ni unique, ni suffisante pour comprendre la reconfiguration épistémologique et technologique qui se joue pour le stockage de l'énergie durant la deuxième moitié du XIX^e^ siècle. D'une part, Thomson n'est pas électricien. D'autre part, sa classification est antérieure à l'essor commercial des réseaux électriques de la décennie 1880. Or, les modulations électriques reconfigurent en profondeur le paysage énergétique des sociétés industrielles (cf. 3.2). Ceci rend nécessaire une comparaison. Je retiens deux classifications d'électriciens, l'une française datant de 1880, l'autre états-unienne datant de 1897. La comparaison introduit ainsi des décalages en termes nationaux, temporels et professionnels afin de mieux caractériser le régime technicien de la fin du XIX^e^ siècle.

La première comparaison s'appuie sur le travail d'Édouard Hospitalier (1880) (cf. 3.3.1). Une première différence tient au cadre de publication. Thomson s'adressait aux savants de la Société royale d'Édimbourg tandis que la classification de Hospitalier est publiée dans une revue ayant un public amateur et généraliste. Ce qui est visé ici n'est donc pas une comparaison rigoureuse mais bien une mise en contraste à trente ans d'intervalle de deux approches classificatoires des réserves d'énergie. La classification d'Hospitalier diffère également de celle de Thomson par son esprit. Moins tournée vers les potentialités du stockage, elle se base plus sur les « accumulateurs proposés ou employés dans l'industrie ». Hospitalier exclut ainsi trois classes de Thomson, deux d'ordre naturel (chaleur, combustibles naturels) et un d'ordre artificiel (nourriture).

Hospitalier (1880) identifie cinq types d'accumulateurs d'énergie. Les quatre premiers types sont des dédoublement des classes restantes de Thomson. Les solides en hauteur sont dédoublés en poids et en accumulateurs hydrauliques. Le poids inclut une partie des combustibles artificiels de Thomson à travers la fabrication de gaz d'éclairage par compression gravitationnelle. Les accumulateurs hydrauliques sont des dispositifs installés sur certaines grues de débarquement des docks de Marseille et d'Anvers. La classe des mouvements de fluides est elle aussi scindée. Elle concerne les mouvements de solides tels que les ressorts, qui stocke du travail mécanique en horlogerie ou dans un tournebroche. Elle incorpore aussi l'« air comprimé », mentionné par Antoine Andraud à propos des locomotives, auxquelles s'ajoutent d'autres machines : « les compresseurs et les perforatrices [des tunnels] du Mont-Cenis ou du Saint-Gothard, [...] les tramways Mékarski et les torpilles de M. Thornycroft » (Hospitalier 1880). Le cinquième et dernier type d'accumulateur sélectionné par Hospitalier est bien connu de Thomson en 1881 mais n'existait pas en 1852. Il s'agit des batteries électro-chimiques ou accumulateurs électriques.

En résumé, Hospitalier fabrique une classification moins générale que celle de Thomson parce qu'il se focalise sur les problèmes de stockage d'énergie. Il exclut ainsi les stocks naturels et les produits agricoles. Sa classification est plus industrielle aussi, plus concrète par les nombreux exemples qu'il donne et moins spéculative par rapport à l'avenir. Elle mentionne les batteries électriques, ce qui suggère une prise de conscience de l'essor industriel de l'électricité.

La troisième classification actualise celle de Thomson d'une autre manière. Elle est due à Louis Bell,

électricien de Philadelphie, membre de l'American Institute of Electrical Engineering (AIEE) [13]. Sa démarche est analogue à celle de Thomson. Bell s'intéresse à l'économie des États-Unis de la toute fin du XIXe comme Thomson l'avait fait pour le Royaume-Uni au milieu du siècle. Il sélectionne lui aussi six classes d'énergie : combustible, hydraulique, vent, solaire, marées, chaleur terrestre (Bell 1897, p. 23-24). Trois classes de Thomson ont disparu : nourriture animale, solides en hauteur, combustibles artificiels. La disparition des deux dernières est justifiée dans la logique utilitariste par l'absence d'applications fonctionnelles.

En revanche, la disparition de la nourriture surprend dans la mesure où la traction animale assure une part importante du travail mécanique jusqu'au milieu du XXe siècle (Debeir et al. 1986, p. 244). Les travaux agricoles ne sont pas, loin de là, les seuls concernés. Les manèges à chevaux sont largement utilisés durant l'industrialisation du textile au XIXe siècle en substitution du travail des femmes et des enfants (Kasdi et Jarrige 2020). Au cœur même des capitales européennes les plus modernes comme Londres, Paris et Berlin, les taxis urbains sont majoritairement tractés par des chevaux jusqu'au début du XXe siècle (Mom 2009, p. 36-39). La substitution des taxis hippomobiles par des automobiles ne commence que vers 1905-1915 en Europe. Le choix de Bell de rendre invisible le travail animal dans les zones rurales, industrielles ou urbaines s'explique par l'accent qu'il met sur les nouveautés à la mode au détriment des activités anciennes fussent-elles plus importantes en termes quantitatifs.

Bell insiste donc sur les modulations électriques de conversion et de stockage qui se sont développées depuis une quinzaine d'années. Il scinde, comme Hospitalier, certaines catégories de Thomson. La chaleur est dédoublée en solaire et géothermie. Le mouvement des fluides est recomposé selon trois classes d'énergie : hydraulique, marées et vents (Bell 1897, p. 27). Ces choix correspondent à l'essor des forces naturelles à la fin du XIXe siècle. Parmi elles, l'hydraulique est de loin la première en termes d'application à la fin d'une décennie qui a vu l'équipement hydroélectrique des chutes du Niagara. Cette différence est significative par rapport aux classifications de Thomson et Hospitalier vers 1880. Bell (1897, p. 25) est moins enthousiaste que Thomson et Andraud pour la conversion éolienne. Il s'inquiète de l'irrégularité des vents pour la génération d'électricité même s'il mentionne les résultats encourageants de « plusieurs petites centrales privées [...] à partir de moulins à vent utilisés en connexion avec des batteries de stockage ».

Enfin, ce qui change de Thomson à Bell est la place centrale qui est donnée aux combustibles pour l'« économie industrielle » des États-Unis au moment où ils en deviennent les premiers producteurs mondiaux. Vers 1900, les États-Unis extraient environ 245 millions de tonnes de houille, dépassant ainsi le leader historique qu'est la Grande-Bretagne, qui produit alors 230 millions de tonnes (Rioux 1989, p. 100). Estimant les ressources de charbon supérieures à celles de pétrole et de gaz, Bell prédit une durée d'exploitation plus grande pour le charbon.

3.3.3 Vocations : l'énergie, archétype de la modernité technicienne

Les quatre tendances générales communes à l'Europe et à l'Amérique sur les dernières décennies du XIXe siècle caractérisent la phénoménologie de l'énergie selon plusieurs modalités : une convertibilité entre forces de la nature (classification), une propension à la transmission des puissances par flux, une aptitude au stockage qu'il soit hérité (réserves naturelles) ou organisé (réserves artificielles), une attitude passionnée pour administrer ces stocks, par peur du manque et désir d'accumulation. L'industrie électrique est au cœur de ces

13. Cet institut fondé en 1884 à New York est le principal regroupement professionnel d'électriciens aux États-Unis. Il fusionne en 1963 avec l'Institute of Radio Engineers pour former l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) rassemblant 150 000 membres à sa formation, dont 10 000 étrangers. Voir l'histoire officielle de l'institution sur son site internet : https://www.ieee.org/about/ieee-history.html

évolutions par l'agentivité si particulière de l'électricité : vecteur souple de conversion des forces, vecteur rapide de transport des puissances sur de longues distances et vecteur réticulé pour une distribution localisée.

Administrer et arraisonner le monde : flux et stocks industriels d'énergie

L'administration de l'énergie à la fin du XIX^e^ siècle en Europe de l'Ouest et en Amérique du Nord présente un cas d'« arraisonnement de la nature » au double sens défini par Martin Heidegger (1954, p. 18, 28). Premièrement, l'énergie est perçue comme « un complexe calculable et prévisible de forces ». Deuxièmement, elle constitue « un fonds », c'est-à-dire une ressource pouvant être extraite, stockée, accumulée et distribuée à travers un réseau délocalisé de flux quasi-instantanés. Il y a ainsi « dévoilement » et « pro-vocation » de la nature par la technique moderne. Si le schéma de pensée fonctionne si bien, c'est justement parce que Heidegger a choisi l'énergie comme modèle de la technique moderne. L'extrait suivant, qui repose uniquement sur des cas empruntés à l'énergie à l'exception d'un seul, tiré de l'agriculture, le montre bien :

> la nature est mise en demeure de livrer une énergie qui puisse comme telle être extraite (*heraus-gefördert*) et accumulée. Mais, ne peut-on en dire autant du vieux moulin à vent ? Non : ses ailes tournent bien au vent et sont livrées directement à son souffle. Mais si le moulin à vent met à notre disposition l'énergie de l'air en mouvement, ce n'est pas pour l'accumuler. Une région, au contraire, est pro-voquée à l'extraction de charbon et de minerais. […] L'agriculture est aujourd'hui une industrie d'alimentation motorisée. L'air est requis pour la fourniture d'azote, le sol pour celle de minerais, le minerai par exemple pour celle d'uranium, celui-ci pour celle d'énergie atomique […] Le charbon extrait (*gefördert*) dans le bassin houiller n'est pas « mis là » pour qu'il soit simplement là et qu'il soit là n'importe où. Il est stocké, c'est-à-dire qu'il est sur place pour que la chaleur solaire emmagasinée en lui puisse être « commise ». Celle-ci est pro-voquée à livrer une forte chaleur, laquelle est commise (*bestellt*) à la livraison de la vapeur, dont la pression actionne un mécanisme et par là maintient une fabrique en activité. La centrale électrique est mise en place dans le Rhin. Elle le somme (*stellt*) de livrer sa pression hydraulique, qui somme à son tour les turbines de tourner. […] le fleuve […] est muré dans la centrale. […] Le dévoilement qui régit complètement la technique moderne a le caractère d'une interpellation (*Stellen*) au sens d'une pro-vocation. Celle-ci a lieu lorsque l'énergie cachée dans la nature est libérée, que ce qui est obtenu est ainsi transformé, que le transformé est accumulé, l'accumulé à son tour réparti et le réparti à nouveau commué. (Heidegger 1954, p. 20-22).

Ce qui fait la modernité de la technique, c'est une extraction de puissance – une provocation, une mise en demeure à livrer, dans le langage de Heidegger – couplée à une accumulation et à un stockage de forces. Dans cette perspective, le dispositif électrique de Thomson associant un moulin à vent, une dynamo et un accumulateur symbolise la provocation de la nature par la technique moderne. Heidegger mentionne aussi une « énergie cachée » dans la nature d'une manière similaire aux géologues britanniques évoquant le « charbon caché » sous terre. Le calcul et l'extraction de cette partie cachée de la nature induisent, par couplage d'artefacts, un découplage des temps de production et de consommation de la puissance. Cette opération de dévoilement de ce qui est caché dans la nature rappelle la filiation intellectuelle de Max Weber à Martin Heidegger : « le désenchantement du monde » depuis l'époque moderne est dû, selon Weber (1919, p. 13), à la dissolution des aspects mystérieux et imprévisibles de l'univers par « l'intellectualisation et la rationalisation croissantes » des sociétés modernes et contemporaines (cf. 1.3.1 et chapitre 4).

La deuxième moitié de l'extrait contient une idée supplémentaire. La technique moderne impose à la nature une succession de charges à remplir. Ainsi, la centrale hydroélectrique pousse le fleuve à presser ; la pression hydraulique oblige la turbine à tourner ; (si l'on rajoute une étape à l'argumentation du texte), la dynamo force l'écoulement du flux électrique ; (et à la fin du texte) la force accumulée est « à son tour réparti[e] ». Cette série d'impératifs est rendue par Heidegger par le verbe *bestellen* et ses dérivés (*bestellt*, *stellt*, *Stellen*), qui signifient alternativement : commander, convoquer une personne, nommer à une charge administrative. Ainsi, la technique moderne se caractérise par l'administration d'une chaîne de commandements. Elle impose aux forces de la nature des asservissements (conversions), des accumulations (stockage) et des utilisations à la demande dans le temps et dans l'espace (flux). Le réseau électrique et ses dispositifs de régulation spatio-temporelle me semblent fournir le schéma matériel par lequel Heidegger appréhende la technique moderne. La conversion entre les formes d'énergie concentre l'impératif d'asservissement tandis que le stockage de puissance concentre le découplage temporel entre production et consommation. Ce schéma rationnel est intéressant parce que Heidegger présuppose l'universalité de l'énergie et la choisit comme modèle pour caractériser la technique moderne. En cela, sa pensée technologique est façonnée par les cadres techniciens et technocratiques de la fin du XIX^e^ siècle.

De la masse à l'énergie, l'emprise du naturalisme sur les humanités

William Thomson (1881, p. 376) ne fait-il pas de l'énergie un « principe se répandant partout dans la nature et guidant l'investigateur dans chaque champ de la science » ? Plus radicalement encore, Thomas Mendenhall (1887, p. 222) donne à la conservation de l'énergie à la fin du XIX^e^ siècle le même statut épistémologique que la conservation de la masse au XVIII^e^ siècle. Ce parallèle est important pour caractériser le régime technicien à l'époque contemporaine. L'entreprise des Lumières a contribué à formaliser et à répandre une cosmologie naturaliste, y compris dans les humanités. Denis Diderot définit le naturalisme dans ses *Pensées philosophiques* (1746) comme un « système dans lequel on attribue tout à la nature comme premier principe » (cité par Lefort 2020, p. 569). La « révolution chimique » de la fin du XVIII^e^ siècle est emblématique de ce mouvement. Bernadette Bensaude-Vincent (1992) a montré que l'usage systématique de la balance par Lavoisier, à partir des années 1770, a reconfiguré en profondeur l'épistémologie des savoirs sur la nature. Mais, le Fermier général de l'Ancien Régime qu'était Lavoisier a aussi contribué à standardiser la « méthode des bilans » dans l'administration du royaume.

> Lavoisier retraduit en termes quantitatifs la notion qualitative d'économie de la nature chère aux naturalistes du XVIII^e^ siècle, aussi bien Linné que Buffon. La balance de la nature devient alors un principe idéal, à la fois normatif et régulateur, que l'on pourrait formuler en ces termes : tout – le minéral, le végétal, l'animal, le moral, le social – doit devenir commensurable (Bensaude-Vincent 1992, p. 228) [14]

La circulation intense et la réappropriation large du schème comptable incarné par la balance dessinent un nouveau cadre d'intelligibilité du monde au début de l'époque contemporaine. La masse devient un étalon universel reliant des domaines aussi divers que la chimie, l'histoire naturelle, l'agriculture, le commerce ou la politique. Elle permet de construire une cosmologie de l'« équilibre statique, [n']incluant ni progrès, ni usure » (Bensaude-Vincent 2020, p. 47). Par analogie avec l'hydraulique, la méthode des bilans figure le monde comme un réseau de canalisations où circulent des flux de matière, de force, de chaleur, d'argent et de pouvoir. Le

14. La traduction en français est celle de l'autrice (Bensaude-Vincent 2020, p. 47)

recours systémique à la masse participe d'un jeu politique de construction d'un territoire national uniformisé par la Commission des poids et mesures de l'Académie où siège Lavoisier. La balance rejoint ainsi la notion de « quasi-objet », définie par Michel Serres, pour rendre compte d'un « consensus qui soude un collectif, une culture ou une communauté » autour d'objets circulant entre les frontières sociales (Bensaude-Vincent 1992, p. 234-235). Le principe de conservation de la masse incarné par la balance fait de la masse un étalon politique et un équivalent épistémique durant la première moitié du XIXe siècle. Il rend « commensurables » la nature et la société en créant des équivalences entre les entités minérales, végétales, animales, morales et sociales (Bensaude-Vincent 2020, p. 47).

La conséquence est que l'économie de la nature, qui incluait au XVIIIe siècle des relations sensuelles, psychologiques et sociales au monde, est réduite à la seule comptabilité commerciale alors que l'économie se construit comme un savoir mathématisé au XIXe siècle. Le schème comptable percole au sein des sociétés industrielles. Un demi-siècle à peine après la mort de Lavoisier, un penseur critique de la société états-unienne, parti vivre deux ans dans les bois retirés de Walden dans le Massachusetts, Henry David Thoreau, n'arrive plus à penser et à organiser sa vie sans l'approche comptable de « la balance de la nature ». Alain Deneault (2019, p. 76-77) souligne, avec justesse, l'emprise du régime technicien sur l'imaginaire et les pratiques d'un intellectuel critique comme Thoreau. Depuis Walden, ce petit

> coin de pays toujours épargné par les logiques productivistes, cent ans après les thèses de Carl von Linné, qu'il lit et médite. Depuis ce refuge, pourtant, il adopte inconséquemment le vocabulaire de l'économisme et les critères d'évaluation de la comptabilité marchande. [...] c'est dans les termes comptables propres à l'« économie politique » qu'il vante l'autarcie dans laquelle il s'émancipe. [...] Cet engagement, emblématique, qui consiste à développer son propre potager, construire sa maison, tisser son linge et vivre de ses mains, seul, loin de l'enfer capitaliste, Thoreau n'a de cesse de le chiffrer et de se le représenter selon les équivalents comptables du régime honni. [...] L'idéologie d'un monde qu'il prétend délaisser formate encore son esprit. D'où qu'il conclut sans détour : « J'ai pensé que l'étang de Walden serait un bon centre d'affaires, non point uniquement à cause du chemin de fer et du commerce de la glace ; il offre des avantages qu'il n'est pas de bonne politique de divulguer ; c'est un bon port et une bonne base. » (Deneault 2019, p. 76-79)

Thoreau a intégré la « méthode des bilans » de Lavoisier. Mais, ce n'est plus pour administrer un royaume. Il s'agit désormais de vivre comme un épicier. Il a intégré l'hégémonie technicienne de manière inconsciente. Malgré sa volonté de révolte comme le capitalisme industriel et la bureaucratie d'État, le rebelle solitaire Henry David Thoreau rejoint par ses manières de penser et de s'organiser le puissant entrepreneur, expert et savant qu'est Lord Kelvin. Les différences sociales, nationales ou idéologiques ne font rien à l'affaire. Thoreau et Thomson envisagent désormais tous les deux le cosmos comme un immense entrepôt. Leur sphère domestique ressemble également à s'y méprendre à une épicerie.

Le même processus de colonisation des imaginaires, des pratiques et des affects des Européens et des Américains par la société industrielle est à l'œuvre un siècle plus tard avec l'énergétisme. L'énergie incarne à la fin du XIXe siècle un même projet universel d'une cosmologie cohérente que la masse un siècle plus tôt. Elle officie comme un étalon universel projetant la culture sur la nature. Elle devient l'archétype d'une civilisation industrielle triomphante. L'énergie incarne un désir collectif de puissance et de bonheur à la fin du XIXe siècle. Mais, le discours triomphaliste recouvre un substrat existentiel d'anxiété. Le fait d'envisager une pénurie de charbon à l'horizon d'une centaine d'années provoque une angoisse durable en Grande-Bretagne sur la

période 1865-1890. À l'inverse, l'illumination de Chicago pour l'Exposition universelle de 1893 grâce à l'équipement hydroélectrique des chutes du Niagara distantes de 800 kilomètres transforme une ville grise en pleine dépression économique et financière en une « cité blanche » porteuse de rêves pour le monde entier (Cheney 1987, p. 88-89). Plus généralement, les promesses électriques sont telles que « la fée électricité » devient le nouveau mythe radieux de la modernité, « la religion de 1900 » selon certains observateurs de l'époque (Beltran et Carré 2016, p. 70). En témoigne aussi la devise adoptée par la revue généraliste de l'hydro-électricité, *La Houille blanche*, fondée en 1901 : « La Houille noire a fait l'Industrie moderne. La Houille blanche la transformera. »

La quantité d'énergie disponible est synonyme de civilisation. Gustave Le Bon voue l'Angleterre à redevenir une « île aussi sauvage qu'elle ne le fut à l'époque de Guillaume le Conquérant » si elle devait connaître une pénurie de charbon (cité par Marrec 2018a, p. 79). La fin du XIX^e^ siècle pose ainsi, en termes évolutionniste et matérialiste, l'équation énergie-civilisation (cf. 1.3.4). La croissance et l'accumulation résonnent en Europe de l'Ouest et en Amérique du Nord comme un idéal de civilisation. En découle une série causale constitutive de la civilisation industrielle à l'époque contemporaine : une peur de la pénurie d'énergie (et de marchandises), la volonté de contrôle du fonds restant par le calcul, l'opération indéfiniment répétée de son extraction par la force, un désir de stocker la puissance pour réguler l'anxiété collective.

Chapitre 4

Lieux, réseaux, échelles de l'électricité : stockages et voisinages, 1880-1910

> « La houille noire [...] se transporte par coolies où l'on veut, tandis que la houille blanche [...] a toujours un fil à la patte. Ce fil s'allonge de jour en jour [... mais] il n'y a pas à souhaiter que ce fil s'allonge indéfiniment ».
> Charles Gide, « La Houille noire et la Houille blanche », *La revue technique*, juin 1904.

> « Nous vivons dans un monde où rien n'est à la mesure de l'homme ; il y a une disproportion monstrueuse entre le corps de l'homme, l'esprit de l'homme et les choses qui constituent actuellement les éléments de la vie humaine ».
> Simone Weil, *Réflexions sur les causes de la liberté et de l'oppression sociale*, 1934.

Le chapitre 3 a montré comment l'énergie devient un archétype de la modernité industrielle durant la deuxième moitié du XIXe siècle en Europe de l'Ouest et en Amérique du Nord. Un demi-siècle plus tard, Martin Heidegger (1954) prend l'énergie comme référent implicite de la technique moderne pour définir l'« arraisonnement de la nature » par les technosciences. Il présente l'extraction de l'énergie comme la mise en valeur de la nature et souligne l'importance de la mise en réserve de la puissance pour organiser le travail des sociétés contemporaines. Le chapitre 4 poursuit la réflexion sur la modernité technicienne en partant de la notion de valeur. Max Weber a caractérisé la modernité comme un triple processus de rationalisation, d'intellectualisation et de désenchantement du monde. Rationaliser et intellectualiser le monde reviennent à l'appréhender comme un ensemble de choses transparent, maîtrisable et prévisible (Weber 1919, p. 13). Heidegger (1954, p. 28) précise cette idée en montrant que la technique moderne s'apparente à « un complexe calculable et prévisible de forces » dont l'objectif est l'exploitation des réserves cachées de la nature. La disparition de toute « puissance mystérieuse et imprévisible » des imaginaires humains caractérise, selon Weber (1919, p. 13), le « désenchantement » moderne.

Or, son époque coïncide justement avec la construction d'une fantasmagorie techniciste. La presse ensorcelée chante l'électricien-inventeur comme le véritable « magicien » des temps modernes, même si, comme dans le cas Thomas Edison, c'est un « magicien qui crache par terre » (Hughes 1979, p. 140). La « fée électricité » devient à la Belle Époque la « rivale du soleil » dans une version panthéiste et la « religion de 1900 » dans une version mystique (Beltran et Carré 2016, p. 64, 70). Cette « fée » enchante gestionnaires, techniciens et usagers

parce que, malgré le projet moderniste de l'électricité, elle reste une « servante » de l'ordre social et culturel [1]. La féminisation de l'électricité par la mythologie moderniste légitime ainsi deux fonctions sociales des femmes de l'époque comme auxiliaires domestiques dans la division genrée du travail et comme figures du désir dans l'imaginaire masculin des sociétés capitalistes.

Durant la période 1880-1910, qu'on peut qualifier de « modernité électrique », l'électricité est un puissant facteur de reconfiguration sociale et culturelle. Son effet relativise l'idée avancée par Max Weber d'un « désenchantement » qui caractérisait la modernité occidentale. L'électrification des sociétés européennes et états-uniennes procède, à l'inverse, d'un *réenchantement techniciste* au tournant du XX^e^ siècle. Suivre le problème du stockage de l'énergie permet de confronter la proposition de Weber – maîtrise totale, d'où désenchantement général – aux situations concrètes de l'essor industriel de l'électricité à son époque. Le plus moderne des appareils de stockage de l'époque est la batterie électrique. Sa fabrication et son usage sont pourtant loin de correspondre à une maîtrise totale. La technologie matérielle doit donc être réenchantée par la technologie discursive. Reformulons ainsi la caractérisation de la modernité par Weber : la maîtrise partielle des artefacts électriques nécessite le réenchantement partiel de la modernité par des mythes technicistes. Comment et où tester cette hypothèse de la modernité technicienne dans le cas de l'électricité ?

Des approches culturelles, écologiques, industrielles ou sociales ont été abondamment utilisées dans l'historiographie. De mon côté, je voudrais poursuivre l'exploration de la modernité par le prisme d'analyse à la base de cet essai : faire dialoguer les professionnels de la technique (cf. 1.6) ; sonder la modernité par les projets, les affects et les concepts (cf. 1.5.3) ; mettre en relation Europe de l'Ouest et Amérique du Nord (cf. 1.4.2). Ce qui me paraît très significatif pour la construction de la modernité occidentale sur la période 1880-1910 est le déploiement spatial de l'électricité. La modernité construit des « espaces énergétiques » inédits. Un espace énergétique définit un territoire comme la composition de systèmes énergétiques et de relations sociales (Bridge et Gailing 2020, p. 1038). La contrepartie du réenchantement techniciste est un enchaînement des populations à des systèmes sociotechniques de plus en plus étendus. Femmes, hommes et objets sont enchaînés de manière quadrillée et concentrique. À partir de lieux circonscrits tels le quartier de Manhattan électrifié par l'entrepreneur Edison au début des années 1880, l'horizon électrique englobe graduellement le monde occidental à mesure que s'étendent les réseaux de puissance jusqu'aux échelles des États-nations à la fin des années 1930 (cf. figure 5.1). L'idée de voisinage est intéressante parce qu'elle évoque à la fois une proximité vis-à-vis des artefacts, un entremêlement d'infrastructures et une sociabilité locale. Par « voisinage électrique », j'entends rendre compte de la fabrication d'espaces électriques par mélanges locaux de formes matérielles et de formes sociales, qui s'appuient sur un existant communautaire tout en imaginant un devenir commun. Cette domestication de l'énergie a un prix : les communautés contemporaines troquent le réenchantement du monde par l'électricité contre un enchaînement des usages et des formes de vie à un quadrillage étendu, maillé par des nœuds centralisés de puissance. Ce voisinage électrique change de forme au cours du temps comme en témoignent les deux citations épigraphes du chapitre. Il ressemble d'abord à ce « fil à la patte » dont Charles Gide souligne les limites spatiales et la nécessaire limitation au début du XX^e^ siècle à cette « disproportion monstrueuse » qu'ont pris les réseaux de puissance, que rejette en bloc Simone Weil trente ans plus tard.

1. Les deux termes sont couplés dans le titre de la première édition d'une histoire culturelle de l'électricité écrite par Alain Beltran et Patrice Carré, parue en 1991 : *La fée et la servante : La société française face à l'électricité,* XIX^e^ -XX^e^ *siècle*. Lors de la seconde édition, un quart de siècle plus tard, les deux auteurs ont changé le titre en *La vie électrique. Histoire et imaginaire (*XVIII^e^ -XXI^e^ *siècle)*. Ils expliquent rapidement ce choix par un « clin d'œil » au roman d'Albert Robida intitulé *La Vie électrique : Le Vingtième siècle* (1892) (Beltran et Carré 2016, p. 7, 199). Plus fondamentalement, ce glissement sémantique indique une recomposition de la société et de l'historiographie depuis 25 ans. Si l'analyse féministe est absente de la première comme de la seconde édition de l'ouvrage, la pensée féministe a élargi son audience dans la société du XXI^e^ siècle. Cet élargissement rendait problématique le maintien d'un titre aussi ambigu que *La fée et la servante* sans une analyse de genre plus approfondie, que les auteurs n'ont pas entreprise.

Les principales forces d'expansion des réseaux électriques sont d'ordre économique de part et d'autre de l'Atlantique : augmenter le facteur de charge et le mix économique (Hughes 1983, p. 218-221 ; Lagendijk 2008, p. 18-21). Le stockage d'énergie se situe à la jointure de ces deux forces d'expansion économique dans le cadre d'une optimisation de l'usage des surplus énergétiques (Debeir et al. 1986, p. 32). Il a néanmoins été peu étudié par rapport à l'escalade des tensions et aux interconnexions de réseaux. Il est peut-être moins visible aussi car directement intégré aux modèles des bâtisseurs de systèmes et aux calculs des gestionnaires de réseaux locaux à partir des années 1890. Le concept d'espace énergétique permet d'analyser la variété des problèmes posés par le stockage d'énergie par variation spatiale. Chacune des trois catégories de l'espace énergétique – lieux, réseaux, échelles – structurera une section du chapitre 4.

La section 4.1 aborde la question de la maîtrise technicienne par des lieux de production, de discussion et de démonstration des batteries électro-chimiques. Que ce soit en Europe ou aux États-Unis, la visite des lieux trahit la récalcitrance de la matière à se laisser domestiquer par le milieu électricien et montre que les résistances matérielles dessinent un certain idéal inaccessible de rationalité scientifique et de perfection technique. Puis, la section 4.2 glisse du lieu au réseau. Elle montre la construction d'une sociabilité de l'électricité et d'un voisinage électrique dans le cas de Hartford sur la côte est des États-Unis. Enfin, la section 4.3 passe du réseau à l'échelle. Elle s'appuie sur une controverse insolite mêlant techniciens, technocrates et technologues, entre Paris, Grenoble et Clermont-Ferrand en France, portant sur les mérites respectifs de la houille noire et de la houille blanche. Les dissensus mettent en jeu une multiplicité d'échelles spatiales et sociales, qui permettent de recomposer un « partage du sensible » (Rancière 1998, p. 240-241). Ils aboutissent à une véritable écologie politique de l'énergie au début du XX^e^ siècle en France.

4.1 Lieux de la modernité : rationalité et récalcitrance des batteries, 1880-1900

La modernité se construit à la fin du XIX^e^ siècle par la confrontation de valeurs industrielles et humanistes. Les objets et ensembles techniques en viennent à incarner certaines valeurs dominantes de l'époque au détriment de valeurs humanistes, qui auraient disparu.

4.1.1 Modernité industrielle : enchantement des objets, désenchantement des humanités

L'énergie est conçue par les savants de la deuxième moitié du XIX^e^ siècle selon une double rationalité, spéculative et opératoire. William Thomson, par exemple, s'intéresse autant à la recherche de « lois de l'énergie » dans l'univers qu'à l'utilisation des « réserves » de travail pour les sociétés humaines (cf. 3.1.3). Dans les deux registres, les échecs sont plus courants que les succès. Le cas des piles à combustible est emblématique de la récalcitrance des objets par rapport à l'entreprise technoscientifique. Depuis les premières « batteries voltaïques à gaz » fabriquées par William Grove (1842), cet artefact s'entête à résister aussi bien aux injonctions des savants lorsqu'il est sommé de prouver l'identité des forces électrique et chimique dans les années 1840 qu'aux manipulations des ingénieurs qui s'efforcent de le « mettre en boîte » à partir des années 1880 pour en faire un générateur industriel fiable (Teissier 2017a, p. 73-75).

Le concept de récalcitrance développé par Bruno Latour (1999) dans *Politiques de la nature* souligne l'indifférence des objets naturels aux attentes humaines et la gêne qu'ils occasionnent dans tout projet expérimental [2].

2. « Pour le dire de façon vulgaire, les acteurs humains et non-humains apparaissent d'abord comme des gêneurs. C'est par la notion de récalcitrance qu'il convient de définir leur action. Croire que les non-humains se définissent par la stricte obéissance aux lois de la causalité, c'est n'avoir jamais suivi le lent montage d'une expérience au laboratoire. Croire à l'inverse que les humains se définissent d'emblée par la liberté, c'est n'avoir jamais mesuré la facilité avec laquelle ils se taisent et obéissent, la connivence qu'ils ont

Cette résistance explicite met les sciences de la nature dans la position d'« élever » et d'« enrichir » les faits naturels qu'elles ont isolés, purifiés, transformés, etc. (Stengers et Bensaude-Vincent 2003, p. 334-338), en bref, domestiqués. À l'inverse, les sciences de la société, qui peuvent compter sur l'intéressement des êtres humains à leurs projets, auront tendance à « abaisser [ce à quoi elles ont affaire], à montrer des soumissions là où les acteurs se pensaient actifs ; elles font ainsi rimer progrès du savoir et désenchantement ».

Cette dissymétrie des valeurs portées par les sciences de la nature et les sciences de la société est cruciale pour comprendre la construction de la modernité de la fin du XIXe siècle. L'imaginaire technoscientifique *s'enchante* d'artefacts électriques inédits alors que la pensée sociologique, copiant la mécanique, considérée comme la plus rationnelle des sciences de la nature, « désenchante » l'univers humain en rendant visibles ses rouages et contraintes sociologiques. Les deux tendances prennent de l'importance à mesure que croît la civilisation industrielle. Cette évolution conjointe est exprimée d'une manière convaincante par Anne-Françoise Garçon (2003a, p. 6) à propos de l'automobilisme autour de 1900. « Un rêve s'affirme, un monde technique fait irruption avec ses objets propres, son vocabulaire et ses comportements. La mise au point de l'automobile a coïncidé, on le sait, avec l'émergence économique de l'individu, avec le déplacement des valeurs sociales vers l'hygiénisme, le tourisme, le sport, qui furent autant de réponses au délitement social. »

4.1.2 Récalcitrance des batteries : marché et R&D d'un artefact hétérogène

Durant le dernier tiers du XIXe siècle, se forme « une communauté internationale de pratique technologique » à travers de nouvelles revues professionnelles dédiées à l'électricité (Bouvier 2008). Elle met en place la recherche et le développement (R&D) typiques de la seconde industrialisation (cf. 1.4.3). Néanmoins, la R&D des batteries ne semble pas avoir été étudiée de manière précise jusqu'à présent [3].

L'économie du stockage d'électricité à la fin du XIXe siècle

En 1898, Augustus Treadwell Jr., enseignant à l'Institut polytechnique de Brooklyn, publie un ouvrage de synthèse de 250 pages intitulé *The Storage Battery*. Cet ingénieur électricien souhaite traiter des aspects théoriques et pratiques de la confection et de l'usage des batteries secondaires. Il justifie sa publication par le manque de données fiables sur les produits du marché et la rareté des courbes de fonctionnement des batteries (Treadwell 1898, p. v). La lecture de l'ouvrage suggère un marché multiforme et en expansion du stockage de l'électricité aux États-Unis.

L'essor commercial des batteries de stockage n'est pas seulement dû à de nouvelles fonctions mais également à une substitution d'artefacts. À partir des premiers prototypes de Gustave Planté au début des années 1860, les batteries secondaires sont perçues comme des possibilités de remplacer les piles pour la génération d'électricité dynamique (figure 2.8). La concrétisation commerciale de cette idée est facilitée par les améliorations de Camille Faure et de Charles Brush durant les années 1880. Les cellules électrochimiques de type secondaire remplacent ainsi les piles pour la génération de signaux électriques dans les réseaux télégraphiques et téléphoniques pour (cf. 3.1.3). Vers 1890 néanmoins, beaucoup d'opérateurs télégraphiques ne sont pas convaincus par les batteries secondaires à cause de l'investissement qu'elles nécessitent. Une cellule électrochimique secondaire coûte entre deux et trois dollars pièce contre un demi-dollar pour une cellule primaire. Mais, par sa puissance accrue

pour ce rôle d'objet auquel on veut si souvent les réduire. » (Latour 1999, p. 122)

3. Je ne connais pas d'études sur les fabricants de batteries ou le marché du stockage électrique de manière spécifique dans la deuxième moitié du XIXe siècle. Nulle étude complémentaire non plus n'a été menée dans le cadre de l'histoire des voitures électriques aux États-Unis (Kirsch 2000 ; Mom 2004) ou en France (Garçon 2003b), ni dans le cadre de l'histoire de l'électricité aux États-Unis (Hughes 1983), en Europe (Lagendijk 2008) ou en France (Caron et F. Cardot 1991).

d'un facteur dix, une batterie secondaire est capable de remplacer dix cellules primaires. En outre, les coûts de fret (environ 15 % du prix des batteries) et de maintenance annuelle (environ 1,5 dollar par batterie primaire contre 1,1 pour une secondaire) sont réduits. Ces gains viennent compenser, pour les opérateurs télégraphiques, l'investissement nécessaire, l'achat du courant de recharge et le vieillissement des cellules. Le bilan coût-bénéfice de la substitution semble plus favorable aux batteries secondaires durant la décennie 1890. La Western Union Telegraph C° équipe ainsi deux de ses centrales télégraphiques en batteries secondaires. 7 à 8 000 batteries primaires à gravité sont ainsi remplacés par environ 700 batteries secondaires au chlorure à Atlanta et à Washington (Treadwell 1898, p. 187-189). La substitution concerne également la signalisation électrique : alarmes et signaux sonores de sécurité, police, etc. En deux ans seulement (1896-1898), environ 10 000 batteries secondaires sont déployées dans 47 villes des États-Unis pour des systèmes d'alarme incendie. Les coûts d'équipement et de maintenance sont ainsi réduits et les puissances installées accrues grâce aux cellules électrochimiques secondaires.

En parallèle, la batterie modifie les pratiques du milieu électricien durant la période 1860-1880 (cf. 3.2.2). L'accumulation électrique désigne, non seulement l'effet cumulatif et instantané de génération d'électricité associé à la pile de Volta et au galvanisme, mais désormais aussi la mise en réserve de puissance pendant une certaine durée. Les électriciens distinguent deux types de transformation de l'énergie électrique suivant que l'usage est « instantané ou immédiat » (bobines, survolteurs, dévolteurs, redresseurs, déphaseurs, etc.) ou « différé » dans le temps (accumulateurs) (Hospitalier et Bainville 1901, p. 4, 53). Pour exprimer cette idée du stockage d'énergie, ils forgent l'expression « batterie d'accumulateurs » au début du XX^e^ siècle. Les nouvelles fonctions du stockage d'électricité sont matérialisées par le couplage de deux convertisseurs énergétiques : batteries électro-chimiques et machines magnéto-électrique de type Gramme (ou dynamos électriques) (cf. 3.1.3). Ce double nœud de convertisseurs peut être installé de manière locale dans des installations isolées ou de manière étendue à travers des réseaux de puissance en extension. Trois fonctions du stockage d'électricité prennent ainsi corps dans le derniers tiers du XIX^e^ siècle : régulation des réseaux électriques, concentration et accumulation d'énergie, traction mécanique (cf. 2.3.2).

Dans les réseaux électriques, les batteries secondaires permettent d'augmenter le facteur de charge en décalant dans le temps les rythmes de production pour les faire correspondre de manière quotidienne aux rythmes de consommation (cf. 3.2.2). Ceci induit une économie de charbon, estimée à 15 % sur une année (Treadwell 1898, p. 145). À partir du cas de la centrale électrique opérant le tramway électrique de Zurich, on estime que sa batterie de stockage fait économiser annuellement un kilogramme de charbon par cheval-vapeur compte-tenu du dimensionnement du réseau (Treadwell 1898, p. 3). Ceci correspond à 2 500 dollars par an, ce qui donne, au bout de quatre ans, un bénéfice de 7 400 dollars une fois prise en compte l'achat et la réparation des batteries. L'introduction des batteries de stockage dans les centrales électriques induit aussi une économie d'équipement. À la Boston Edison Illuminating C°, une batterie de stockage, en maintenant le facteur de charge au-dessus des trois quarts du maximum, remplace avantageusement un couple machine à vapeur-dynamo (Treadwell 1898, p. 3). L'économie d'équipement est de 15 000 dollars, la batterie coûtant 50 000 dollars et le couple machine à vapeur-dynamo, 65 000. Mais, le mouvement est plus large. En 1896, la Hartford Electric Light Company fait appel à l'Electric Storage Battery Company de Philadelphie pour équiper ses centrales électriques de 130 cellules électrochimiques secondaires pour assurer la régulation du réseau électrique de Hartford (cf. 4.2.4). En Europe, une part significative des centrales électriques incorporent des batteries de stockage : 47 % des 189 stations d'éclairage électrique en Suisse ; 62 % des 265 centrales électriques en Allemagne (Treadwell 1898, p. 140).

La lecture des discours techniciens de l'époque suggère quatre caractéristiques de l'économie du stockage de l'électricité à la fin du XIXe siècle. Premièrement, le marché est incertain à cause du manque de fiabilité des performances annoncées par les fabricants de batteries. Les promesses surestiment très souvent les capacités effectives (Treadwell 1898, p. 4). L'incertitude la plus grande porte sur le nombre de cycles de charge-décharge avant que l'artefact ne soit périmé. La performance et la longévité d'une batterie donnée dépendent des standards de production mais aussi de la qualité de la maintenance. C'est ce que souligne un expert du Consulting Electrical Engineer de Philadelphie, Carl Hering.

> Si les fabricants garantissent de garder la batterie dans un état satisfaisant pour un certain taux par an, ou s'ils les louent, alors il devient une simple question de calcul pour savoir si c'est rentable ou non. Mais ce calcul doit être fait pour chaque cas spécifique, car le coût des batteries et de leur entretien semble actuellement tel, qu'une estimation pour un cas général peut difficilement être considérée comme concluante, la marge étant dans de nombreux cas trop faible. (Hering 1895, p. 609)

Prenant acte de la forte dépendance des performances aux types de batterie, Hering (1895, p. 614) propose « la location des accumulateurs [comme] une méthode souhaitable pour les introduire » sur le marché. On voit ainsi suggéré le modèle économique du *leasing* sur lequel s'appuie une partie du commerce des voitures électriques aujourd'hui. La deuxième caractéristique du marché du stockage électrique est sa dimension internationale. Plusieurs fabricants de batteries ont une extension commerciale au-delà des frontières nationales de leur siège social : Crompton-Howell, dont le siège social est au Royaume-Uni, fournit la Edison Electric Light Co à New York (Treadwell 1898, p. 161) ; 80 % des centrales électriques en Prusse et en Autriche sont équipées de batteries Tudor, dont l'usine de production est implantée au Luxembourg (Barnett 1896, p. 20) ; etc. Les observateurs états-uniens ont le sentiment d'un « retard » de commercialisation des batteries aux États-Unis par rapport à l'Europe (F. Reckenzaun 1895, p. 616). L'internationalisation peut passer par des licences d'exploitation d'un brevet. Aux État-Unis, l'économie des batteries est marquée par une lutte juridique autour des droits d'invention. Carl Hering (1895, p. 609) la considère comme une entrave au commerce. Mais, la fin de validité des principaux brevets, dus aux innovations de Brush, Faure and Planté, devrait faciliter le commerce des batteries de stockage durant la deuxième moitié des années 1890 (Ludwig Gutmann cité dans Carhart 1895, p. 644).

Ces différentes circonstances font que les promoteurs des batteries attendent beaucoup de la R&D pour améliorer les produits commerciaux. C'est la quatrième caractéristique : la promesse d'un progrès industriel par la recherche et le développement des batteries électrochimiques. Certains électriciens soulignent le moindre développement des batteries de stockage par manque de R&D par rapport à d'autres produits électriques. Dans le *London Electrician*, E. J. Wade écrit que « les batteries de stockage sont [très] loin de la perfection pratique, par comparaison avec la machinerie des dynamos électriques, et des autres appareils pour lesquels le développement de la théorie et de la pratique est allé main dans la main » (cité par Treadwell 1898, p. 109).

Promesses et progrès de la R&D des batteries de stockage

La littérature technique détaille les problèmes posés par les batteries de stockage et suggère des pistes d'amélioration. Elle révèle ainsi les ressorts de la R&D en train de se constituer au moment de la seconde industrialisation. Mais, elle exprime aussi, selon les mots de François Caron (1991b, p. 10), « un projet sociétal cohérent et précis ». Certains critères sont valorisés pour domestiquer les artefacts récalcitrants et les sociabiliser

dans un ensemble sociotechnique. Les efforts de domestication des batteries sont relayés, aux États-Unis notamment, par une économie de la promesse alternant des périodes d'enthousiasme en faveur des batteries (1880-1882, 1894-1896) et de déception (1883-1893, 1897-1900) (cf. 2.2.3). Les qualités reconnues des batteries sont la portabilité, la sécurité (par rapport aux hautes tensions du réseau), la stabilité de production industrielle et la souplesse du maniement (éclairage et traction électriques) (Lockwood 1894, p. 346-347). Elles s'inscrivent dans un cadre plus général d'éloge de la souplesse d'utilisation de l'électricité par rapport aux lourdeurs mécaniques.

> Relativement à la question du coût par cheval-vapeur, le mouvement de l'armature d'un relais dans un bureau télégraphique est très onéreux ; mais les questions de commodité et de disponibilité surpassent souvent celle du coût. La facilité avec laquelle le moteur électrique peut être manipulé et contrôlé, la liberté par rapport au danger d'incendie et le fait qu'il puisse être facilement introduit partout où un courant produit par une dynamo est à portée de main sont des arguments puissants en sa faveur et lui donnent une disponibilité bien supérieure à celle de la machine à vapeur. (Mendenhall 1887, p. 200)

Un article du *Scientific American* (1883) met en garde contre les éloges trop appuyés des batteries de stockage car souvent « mis en avant par des parties intéressées, celles qui ont des intérêts pécuniaires engagés ». C'est le cas par exemple de l'un des managers d'une importante société d'accumulateurs de Boston, The Electric Battery Company, Arthur E. Childs (1895, p. 588) qui affirme, au milieu des années 1890, que les batteries ont atteint un niveau « de grande efficacité et de faible coût de maintenance ». Malgré les promesses des lobbyistes et de certains enthousiastes, la littérature technique présente les nombreuses difficultés posées par les batteries dans « la gestion concrète de l'électricité ».

Les trois types de batterie secondaire commercialisés sont les cellules électrochimiques Planté, Faure et alcaline. Elles présentent un taux de puissance en moyenne dix fois supérieur aux batteries primaires par gravité (Treadwell 1898, p. 184). Mais, leur bon fonctionnement en situation dépend de multiples facteurs. À la fin de son ouvrage, Treadwell (1898, p. 221-245) énumère les bonnes pratiques pour favoriser le fonctionnement des batteries dans un système électrique. Il indique six points d'attention : charge et décharge des accumulateurs, méthodes de comparaison entre types de cellules électrochimiques, installation, opération et maintenance des batteries. La figure 4.1 résume, point par point, les problèmes posés par les batteries, les conseils de Treadwell et les pratiques courantes pour y remédier. La dernière colonne traduit ces règles et ces méthodes en critères de rationalité recherchés par les électriciens de l'époque. La publication de Treadwell faite suite à un contexte de vive critique des batteries de stockage. De l'avis même des experts, « le sujet est assailli de problèmes » (Salomons 1893, p. 158) et les promesses introduites par la batterie Faure en 1880 n'ont pas été couronnées de succès (Lockwood 1894, p. 301). Les batteries sont coûteuses en argent (par unité de puissance), en temps (de recharge) et en poids-volume (Lockwood 1894, p. 301). Elles se montrent aussi récalcitrantes aux enjeux industriels de l'électricité.

Trois défauts inhérents au fonctionnement des batteries sont régulièrement soulignés. Tout d'abord, la batterie est « gaspilleuse » d'énergie car, quel que soit le type, « à peu près la moitié de la puissance qui leur est transmise n'est pas récupérée ». Ces pertes sont dues au mode de stockage, composé de deux transformations d'énergie : électrique vers chimique lors de la charge, chimique vers électrique lors de la décharge (cf. 2.3.1). Chaque cycle de charge-décharge induit « une perte considérable [d'énergie] par stockage » (Lockwood 1894, p. 301). Le deuxième défaut est que la puissance délivrée n'est pas « constante et régulière », notamment lorsque

Éléments d'attention	Problèmes des batteries	Conseils de Treadwell (1898)	Pratiques usuelles	Objectifs de rationalité
Charge	Dégagement gazeux (*boiling*) en fin de charge	Meilleur taux de charge : à tension constante		Coûts de fabrication versus dépense d'énergie
Décharge	25 % de la capacité (énergie) inutilisée en fin de décharge ; manque de régularité de la puissance		Arrêt à 30 % de la capacité	Fonctionnement satisfaisant versus performance par cycle
Méthodes de comparaison	Variétés des types, tailles et voltages des batteries	Tester $W.kg^{-1}$ Pas de pause entre charge et décharge	« courbe constante » de Carl Hering : f(W)=W.h	Rendre comparable par des critères communs
Installation	Évaporations et fuites acides ; artefacts fragiles ; mélanges chimiques délicats	Pièce sèche, bien ventilée, tempérée, sol résistant	Vérifier connexions électriques	Limiter pertes chimiques et électriques
Opération	Fonctionnement dépendant du nombre de cycles ; faible durée de vie ; dépôts chimiques	Surcharge de 25 % pour les 20 premiers cycles, puis 10 %	« système Boese » de protection contre chocs	Normalisation des comportements et standardisation des produits
Maintenance	Variabilité des artefacts ; certaines pannes sans raison	Contrôle hebdomadaire : tensions, court-circuits, hygrométrie	Remplacement des plaques de zinc quand la batterie faiblit	Contrôle systématique et action spécifique (sur les artefacts défectueux)

Figure 4.1 – Problèmes de fonctionnement des batteries et pratiques rationnelles pour les résoudre vers 1900

la décharge est poussée au maximum pour réduire les dépenses d'énergie (Treadwell 1898, p. 228). Enfin, un troisième défaut souvent mentionné est la faible durée de vie des artefacts en opération. Une utilisation optimale est estimée à 500 cycles environ de charge-décharge (Treadwell 1898, p. 229). La détérioration rapide est attribuée aux réactions chimiques qui parasitent les électrodes métalliques, soit par dépôts inopportuns, soit par attaques acides des plaques métalliques. Ces trois défauts – gaspillage, inconstance, vieillissement – traduisent trois critères de rationalité désirés à l'époque : convertibilité, régularité et durabilité des produits commerciaux (cf. figure 4.1).

Pour réduire ces trois défauts majeurs, le milieu professionnel place son salut dans la R&D. Une lutte de territoire oppose chimistes et mécaniciens pour le perfectionnement des batteries. Hering (1895, p. 610) attribue une partie du « retard » de développement des batteries aux États-Unis à la mainmise des ingénieurs mécaniciens sur le stockage de l'électricité vis-à-vis des chimistes. Lors de la discussion générale suivant sa conférence, John W. Lieb, Jr., manager général adjoint de la Edison Electric Light C^{o} arrive à une conclusion opposée. Il place la raison des échecs passés dans « le manque d'attention portée aux détails de construction et à la construction mécanique elle-même » par les chimistes (Duncan 1895, p. 632). De son côté, Treadwell (1898,

p. 109) souligne que « les problèmes chimiques à résoudre sont excessivement difficiles » mais que le manque de connaissances des réactions chimiques aux électrodes est la cause principale des défauts des batteries. Les promesses de résolution portées par la chimie sont importantes. Ainsi, le vice-président de la British Institution of Electrical Engineers, David Salomons (1893, p. 105), défend l'idée que la modification des électrolytes permettrait d'éviter « la formation des arbres à plomb, ou minces aiguilles de plomb ». Or, ces dépôts augmentent l'inconstance de la décharge et réduisent la durée de vie des batteries. Pour améliorer la régularité et la durabilité des artefacts, les espérances sont placées dans un nouveau champ de recherche : la physico-chimie ou chimie physique.

La physico-chimie est une science nouvelle du derniers tiers du XIX^e^ siècle spécialisée, entre autres, dans l'étude des phénomènes d'interfaces et des hétérogénéités de la matière. Or, une batterie, parce qu'elle met en connexion des liquides (électrolytes) et des solides divisés (électrodes), des ions en solution et des électrons dans les métaux, de l'électricité et de la chimie, regorge d'interfaces et de phénomènes de surface. Ces « cellules hérérogènes », autre nom des batteries Faure, constituent un terrain de jeu idéal pour les physico-chimistes. En effet, les plaques d'électrodes peuvent avoir des structures « granulaires ou spongieuses » (type Planté) et « trouées ou striées » (type Faure) (Treadwell 1898, p. 8). Les idées ne manquent pas pour jouer sur les phénomènes physico-chimiques aux interfaces afin d'espérer améliorer les caractéristiques des produits.

À Londres, John H. Gladstone et W. Hibbert suggèrent des traitements de surface d'électrode pour augmenter la diffusion des ions acides et, ainsi, le pouvoir conducteur des batteries (cité par Treadwell 1898, p. 245-246). D'autres savants cherchent à augmenter « la porosité » des plaques afin de valoriser le « matériau actif » au détriment du « poids mort » des cellules (Treadwell 1898, p. 112). La part active des plaques ne représente en effet qu'un quart environ du poids total (Science 1888, p. 309). À Baltimore, Louis Duncan, professeur à l'université John Hopkins, dépose un brevet destiné à augmenter la part active des électrodes. À Bruxelles, l'entrepreneur belge Edmond Julien [4] fabrique et commercialise des prototypes opérationnels ayant de meilleures performances. Il a remplacé l'électrode de plomb de la batterie Faure par un alliage de plomb antimoine et mercure, inoxydable et de bonne tenue mécanique. Alors que la cellule Faure a une énergie de 300 ampères-heure pour 121 livres (soit 5,5 Ah/kg), la cellule Julien délivre une énergie de 150 ampères-heure pour 32 livres (soit 10Ah/kg) (Science 1889, p. 54). La puissance massique de l'artefact a donc été quasiment doublée par rapport au produit commercialisé une décennie auparavant [5].

Résumons les jugements de valeur généraux portés sur les batteries par les praticiens et traduisons ces atouts et ces défauts en termes d'objectifs désirés par le milieu électricien, c'est-à-dire en autant de critères de rationalité sur la période 1880-1900.

- niveau financier : gaspillage d'énergie en fonctionnement et coût en production (malgré une régularité de production), d'où un désir d'économie de matériau et d'énergie dans le sens d'une logique comptable de réduction des dépenses ;
- niveau temporel : vieillissement rapide et imprévisibilité des pannes sur le temps long, inconstance et durée de recharge sur le temps court de chaque cycle, d'où des envies de prévision, de standardisation et de durabilité ;

4. Un fonds d'archives FE 086 constitué en 2007 par Viviane Haanen concernant les frères Julien, Edmond (1838-1894) et Jules (1844-1919), est disponible à l'université de Louvain-la-Neuve. Voir sa description sur le site internet correspondant : https://archives.uclouvain.be/atom/index.php/archives-de-viviane-haanen-concernant-les-freres-edmond-et-jules-julien

5. Ce type de croissance exponentielle – un doublement de puissance tous les dix ans – semble contrevenir à la règle de croissance linéaire mise en évidence par Jean-Marie Tarascon sur un long XX^e^ siècle (cf. figure 2.3). La raison est double : un tel doublement ne se répète pas à chaque décennie mais une seule fois ici durant les années 1880 ; il y a une différence entre la fabrication d'un artefact efficace en laboratoire et une commercialisation réussie sur un marché concurrentiel.

- niveau spatial : lourdeur et encombrement mais portabilité, d'où une recherche de maniabilité au sens où la main doit pouvoir manœuvrer facilement l'appareil dans l'organisation du travail ;
- niveau social : sécurité et souplesse d'utilisation, d'où une visée ergonomique favorisant une technicité sûre et intuitive.

4.1.3 Artefacts en situation : fonctions et raisons du stockage d'électricité

L'accumulateur électrique est loin de la « perfection entendue comme fiabilité totale » à la fin du siècle (Salomons 1894, p. 166). Mais, paradoxalement, bien qu'il soit resté « un outil très imparfait, il répond à un besoin si impérieux qu'en dépit de ses imperfections son emploi s'est généralisé » (Hospitalier et Bainville 1901, p. 53). Outre la génération d'électricité qu'elles partagent avec les piles, les batteries sont chargées de trois nouvelles fonctions dans l'industrie électrique à partir des années 1880 : accumulation, traction et régulation (cf. figure 2.8).

Concentration des forces naturelles dispersées

Pour l'accumulation, la fonction novatrice renvoie à la concentration de forces naturelles dispersées décrite par William Thomson (1881). Celui-ci associait un moulin à vent, une dynamo convertissant le travail mécanique en électricité et des accumulateurs de type Faure pour emmagasiner l'électricité générée (cf. 3.1.3). Vingt kilogrammes de cellules électrochimiques permettaient de disposer, de manière autonome, de cinq à six heures d'éclairage par jour pendant trois à cinq jours, correspondant à la durée maximale entre deux épisodes venteux. Un dispositif similaire de conversion des forces du vent en électricité est présenté par Édouard Hospitalier (1880, p. 379). Celui-ci rajoute un petit moteur électrique pouvant « mettre en mouvement une machine à coudre, un tour, une scie à découper, etc. ». Il considère que de telles installations pourraient rendre accessibles l'éclairage et le travail électriques aux particuliers.

Sont également envisagées des installations publiques opérées par des municipalités. Thomson (1881, p. 380) propose l'association de dizaines d'accumulateurs Faure pour remplacer les becs de gaz utilisés à Londres pour l'éclairage public des rues. Outre la dimension économique qui reste controversée, les enthousiastes de l'éclairage par incandescence défendent ses qualités par rapport au gaz et à l'éclairage par arc électrique. Un article de la revue *Science* (1889, p. 55) souligne ainsi les avantages de l'éclairage électrique par rapport au gaz : intensité, stabilité et distribution isotrope de lumière ; pas de surchauffe de l'air ni de pollution gazeuse (rendant superflue la ventilation) ; sûreté (par rapport aux incendies) et simplicité d'utilisation (un interrupteur plutôt que des allumettes) ; des économies d'usage (moindre coût d'assurance, absence d'usure des plafonds, murs, décorations, livres, peintures). Le journaliste insiste également sur la facilité d'installation et l'économie des lampes à incandescence par rapport aux lampes à arc (Science 1889, p. 54).

Mais, du projet au prototype, il y a un pas difficile à franchir. Les installations locales de production électrique sont chères pour les particuliers et requièrent une certaine technicité. Ainsi, le fonctionnement d'une dynamo s'avère délicat, ce qui pose problème dans les moments de la journée (6h-10h, en soirée) où les opérateurs ne sont pas disponibles (Science 1889, p. 55). Leur opération génère aussi des bruits et des vibrations. Le physicien et inventeur français, Poul La Cour, échoue dans son projet de fabrication d'un moulin « électrique » en 1896 à cause de difficultés de stockage d'énergie (Bruyerre 2017, §15). De manière générale, la concentration des puissances éoliennes et solaires peine à trouver des batteries appropriées à la fin du XIX^{e} siècle. Ainsi, deux décennies après Thomson, un article du *Génie civil* de 1901 relativise les possibilités de généralisation d'un moteur solaire comme celui que l'entrepreneur de Philadelphie, Frank Shuman, a installé

en Égypte. Alors que le moteur convertissant la chaleur solaire en travail mécanique fonctionne, l'accumulateur d'énergie est, quant à lui, récalcitrant. Or, en raison « d'une grande irrégularité », la chaleur solaire « 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 » (cité par Marrec 2018a, p. 94).

Ainsi, vers 1900, les observateurs identifient encore le stockage d'énergie comme un problème central dans l'exploitation des forces naturelles. Si la batterie paraît trop chère et trop imprévisible, elle n'a pas non plus de concurrents sérieux, l'air comprimé n'ayant pas donné lieu à des réalisations fonctionnelles dans le cas de la concentration des forces naturelles.

Automobilisme et traction électrique

Une deuxième fonction novatrice du stockage d'énergie dans les années 1880 est la traction électrique. Elle concerne les locomotives, les tramways, les poids-lourds et les automobiles dotés de moteurs électriques et actionnés par des « batteries d'accumulateurs » (Hospitalier et Montpellier 1902). Celles-ci constituent des réserves d'énergie par la mise en série de plusieurs centaines de cellules électro-chimiques rechargeables, pouvant peser plus d'une tonne pour les plus gros véhicules. Développons le cas des automobiles en lien avec les particuliers, qu'ils soient fortunés ou amateurs de mécanique ou de sport. Plusieurs types de motorisation sont en compétition sur la période 1880-1900 : air comprimé, électricité, essence, gaz, vapeur, etc. Chaque type de motorisation correspond à un système sociotechnique spécifique, impliquant différentes mobilités (vitesse, distance, tourisme), différentes conceptions géographiques (centre ville, banlieue, zones rurales), différents réseaux d'infrastructures (routes, stations de stockage d'énergie), différents contextes économiques et industriels, différents intérêts financiers, etc. C'est donc en termes de systèmes, non d'artefacts, qu'il s'agit de penser leurs déploiements, leurs compétitions et leurs complémentarités dans la construction des mobilités modernes sur un long XX^{e} siècle (Kirsch 2000, p. 11-28).

La traction automobile entre dans les usages et les modes de vie en France durant les années 1895-1905. L'engouement, porté par quelques groupes restreints, est si puissant qu'un ingénieur de l'époque parle, par dérision, d'« automaboulisme » (Garçon 2003a, p. 7). L'automobile s'apparente alors à un « objet-valise » (Patrice Flichy), en tant que « réceptacle où s'accumul[ent] et interf[èrent] les désirs, souhaits, rêves – techniques, économiques, sociaux – de ses adeptes, chauffeurs, constructeurs, conducteurs » (Garçon 2003b, p. 26). Cet objet-valise est construit par ce qu'Anne-Françoise Garçon (2003b, p. 40) appelle très justement une nébuleuse innovante, assemblage hétéroclite d'imaginaires techniciens, de pratiques sociales, de (im)possibilités matérielles et d'identifications collectives. Objet-valise plus spécifique encore que l'automobile, la voiture électrique se construit à la convergence de deux nébuleuses innovantes : l'automobile et l'électricité[6]. La rencontre et l'interaction de ces nébuleuses technologiques définissent un « moment charnière » pour l'automobile et la voiture électrique. C'est aussi un moment intéressant pour observer *in situ* les valeurs portées par ces objets-valises, leurs atouts et limites décrits de manière contradictoire par les acteurs et observateurs du domaine. La voiture électrique, en particulier, permet d'appréhender les valeurs de l'époque à la croisée des nébuleuses de l'automobile et de l'électricité. Son analyse fera ressortir certains critères de rationalité au-delà de la seule filière électrique.

L'essor des concours et courses automobiles durant les années 1890 mettent en compétition les différents

6. « Deux ensembles innovants participaient à l'élaboration de la voiture électrique, l'automobile et l'électricité, chacun avec son lot de représentations, d'espoirs et de malentendus, d'aptitudes et d'inaptitudes techniques. [...] je proposerai d'utiliser ici le terme de "nébuleuse". Deux nébuleuses innovantes confluèrent pour former l'objet "voiture électrique" et il résulta de cette confluence momentanée, un objet contradictoire, une chimère. » (Garçon 2003b, p. 40)

types de motorisation. « Dans ce cadre, chacun des moteurs [connaît] sa défaite : la vapeur, sur la route ; l'électricité, chez les "poids-lourds", l'essence en ville. » (Garçon 2003b, p. 35) La course Paris-Bordeaux-Paris de 1895 montre notamment la supériorité des automobiles à essence sur de longs trajets. La voiture électrique Jeantaud parvient néanmoins à rallier Bordeaux grâce à une logistique de remplacement de batteries d'accumulateurs mise en place par la société électrochimique Fulmen. La batterie de 850 kilogrammes est remplacée une dizaine de fois, tous les 60 kilomètres environ, grâce à un transport par chemin de fer et voiture de poste, chaque opération de substitution nécessitant dix minutes (Garçon 2003b, p. 39). Malgré cette interruption à mi-course, un article d'Édouard Hospitalier dans *La Nature* souligne la réalisation d'un parcours Paris-Bordeaux ainsi que l'élasticité et le mode de transmission du véhicule électrique.

Après l'Exposition internationale de l'électricité de Paris en 1881, Hospitalier a obtenu la nouvelle chaire d'électricité et d'électrotechnique de l'École supérieure de physique et de chimie industrielle de Paris[7]. Il est devenu un membre important du milieu électricien français et un vulgarisateur très actif du domaine. Tout au long de sa carrière, il suit avec bienveillance et espoir les développements de l'automobilisme (Laffargue 1907). Il examine, avec rigueur, « les appareils pour en signaler les avantages et les inconvénients [...] dans l'espoir de voir améliorer l'état des choses ». Durant la décennie 1890, Hospitalier défend une performance moyenne des automobiles, ne roulant pas « à plus de vingt kilomètres par heure, mais qui permettront de monter toutes les côtes et de se transporter économiquement » (cité par Garçon 2003b, p. 32). Il oppose ainsi un usage « respectable » des automobiles par les médecins et les hommes d'affaires à la vitesse « démesurée » des sportifs et des aventuriers. Au concours Paris-Rouen de 1894 organisé par l'Automobile Club de France, les critères de réussite sont la sécurité, la maniabilité et le faible coût des automobiles (Garçon 2003b, p. 34). La revue générale *La Nature*, à laquelle contribue régulièrement Hospitalier, met aussi en garde contre la recherche de « célérité aiguë » pour préserver l'innovation automobile dans un cadre libre et pluraliste (Garçon 2003b, p. 36). En 1894, Hospitalier se dit confiant dans une proche utilisation des « voitures sans chevaux » électriques dans le transport urbain (Garçon 2003b, p. 29-30).

Quelques années plus tard, à nouveau dans *La Nature*, l'ingénieur des Arts et Manufactures, Léon Auscher souligne les défauts de la voiture électrique : lourde, encombrante, coûteuse, difficile à ravitailler et détériorée de manière imprévisible (cité par Garçon 2003b, p. 40). Ces défauts sont tous imputables aux problèmes généraux des batteries d'accumulateurs (cf. 4.1.2). À l'inverse, Auscher (1899, p. 387) qualifie le moteur à essence, qui « incontestablement [...] triomphe [...] pour des tractions non industrielles », de léger, pratique, facile à ravitailler et peu encombrant. Auscher et Hospitalier sont d'accord pour souligner la frilosité de la France vis-à-vis de l'électricité par rapport à l'audace des États-Unis.

Aux États-Unis justement, l'industrialisation de l'électricité stimule la traction électrique des tramways, en premier lieu (Beltran et Carré 2016, p. 75), mais également des automobiles à batteries (Mom 2004). Le chimiste Pedro Salom, qui a développé à Philadelphie en 1894 le prototype Electrobat avec l'ingénieur-mécanicien Henry Morris, trouve 13 atouts à la voiture électrique par rapport aux automobiles à essence : 1°sécurité absolue, 2°pas de bruit, 3°pas de vibration, 4°pas de chaleur, 5°pas d'odeur, 6°simplicité de construction, 7°facilité à manœuvrer, 8°contrôle parfait, 9°propreté, 10°économie de puissance, 11°économie d'opération, 12°coût (« 50 cents par jour », non expliqués), et 13°élégance de conception (*design*) et grande liberté par rapport à l'apparence mécanique (Salom 1896, p. 288).

La plupart des atouts cités par Salom relèvent de ce que je qualifie de *technicité douce* des usages : ni danger, ni bruit, ni vibration, ni chaleur, ni odeur en opération, mais une propreté, une simplicité et une élégance

7. Fiche biographique de Catherine Kounelis disponible sur le site internet de l'ESPCI PSL : https://www.espci.psl.eu/fr/espci-paris-psl/bibliotheque/centre-de-ressources-historiques/dossiers-personnels-des-271/edouard-hospitalier-1852-1907-272/

à la manœuvre. Les atouts restants relèvent du domaine économique de fabrication : simplicité, faible coût, optimisation de la puissance consommée. Sur ce deuxième point, Salom ignore sciemment les défauts bien connus à l'époque des batteries de stockage (cf. 4.1.2). Augustus Treadwell (1898, p. 198-201) est plus mesuré. Il résume ainsi l'équilibre des forces en présence. « La traction par batterie de stockage est, naturellement, la méthode de traction la plus souhaitable [... une sorte de] système idéal, mais, à l'heure actuelle, les désavantages surpassent tellement les avantages que les perspectives pour les accumulateurs sont extrêmement sombres ». Le poids mort des batteries en particulier apparaît comme le principal défaut des voitures électriques (Treadwell 1898, p. 201). Chaque nouvel artefact, dont la batterie développée par Thomas Edison au début du xx^{e} siècle, relance les débats entre sceptiques et enthousiastes sur les capacités d'une innovation isolée à renverser les systèmes sociotechniques en place (Crompton 1905).

Ainsi, la mise en situation des batteries montre que les problèmes prennent une importante différente en fonction des « nébuleuses innovantes » de l'automobile et de l'électricité (Garçon 2003b, p. 40). Le poids apparaît comme le principal défaut des batteries dans l'automobilisme car le poids mort doit aussi être transporté par le véhicule. La rationalité est donc à géométrie variable en fonction des situations concrètes. Cette idée est triviale. Ce qui l'est moins est la manière dont les imaginaires modernes retiennent certains critères de rationalité et construisent des échelles de valeur. La voiture électrique déploie une technicité douce, plus souple que furieuse, plus tactile que huileuse, plus filaire que tubulaire. Elle est perçue par certains comme un « système idéal » de déplacement. Elle valorise une autre forme d'efficacité que celle de la vitesse, de la puissance et de l'autonomie des voitures à essence. Comme le souligne Gijs Mom (2004, p. 301), l'expansion des automobiles thermiques plutôt que des automobiles électriques dit plus sur la « culture de la mobilité » des Européens et États-Uniens des années 1890-1910 que sur une hypothétique « loi de la nature ». Elle réfléchit le désir des modernes à se déplacer vite, loin et bruyamment. La technologie plus souple et plus locale des mobilités électriques joue ainsi le rôle d'un repoussoir de l'imaginaire moderne sous la forme d'une « menace continue sur l'automobile thermique jusqu'à aujourd'hui » (Mom 2004, p. 301). Elle perd de la valeur dans la nébuleuse automobile du xx^{e} siècle mais reste visible à l'horizon, comme une alternative découvrant d'autres futurs possibles. À l'inverse, les caractéristiques électriques comme réservoir et régulateur d'énergie deviennent centrales dans la nébuleuse électrique à mesure que les réseaux de puissance s'étendent leur influence sur la sociabilité moderne par un quadrillage de l'espace et du temps. C'est le thème de section suivante.

4.2 Stockage de l'énergie dans les réseaux électriques aux États-Unis, 1880-1910

Après la concentration d'énergie et la traction électrique, la troisième fonction de la batterie qui émerge durant les années 1880 est la régulation des réseaux électriques. Elle reconfigure la sociabilité de l'époque par la formation de voisinages électriques sur la période 1880-1910. Elle s'appuie sur le stockage d'énergie et, dans le même temps, transforme le problème.

4.2.1 Logistiques industrielles : flux versus stocks de matière et d'énergie

« La question du charbon », attisée en Grande-Bretagne par l'ouvrage éponyme de William Stanley Jevons en 1865, formule le problème de l'énergie en termes de flux et de stocks de puissance (cf. 3.3.1). Deux conceptions d'une telle logistique industrielle coexistent alors en économie. La première conception, discontinue ou discrète, est la plus courante dans l'industrie à l'époque. Elle est la seule utilisée par les industries mécaniques et chimiques jusqu'aux années 1870. Les opérations y sont organisées selon une manutention discontinue, pièces par pièces

en mécanique et fournées par fournées en chimie. Aux États-Unis, le développement des chaînes de montage et de l'organisation scientifique du travail sous l'impulsion de Frederick Taylor en mécanique puis, par analogie, la formalisation du génie chimique au Massachusetts Institute of Technology notamment contribuent à *fluidifier* les opérations mécaniques et chimiques selon une division du travail continue et régulière (Ndiaye 2001, p. 58-83). Ceci correspond à la deuxième conception de logistique industrielle, continue ou ininterrompue, dont la pensée hydraulique, liant canaux et réservoirs, constitue l'archétype (cf. 3.1.1).

Ces deux conceptions logistiques coexistent aussi dans le domaine de l'énergie vers 1880. Elles s'inscrivent dans deux des principaux cadres de pensée de l'économie politique au XIX^e^ siècle et de la mémoire collective au XX^e^ siècle : la manufacture locale du modèle marxiste, la figure du réseau du modèle saint-simonien (cf. 1.3.4). L'économie du bois, à travers ses troncs bruts, s'apparente à la conception discrète des échanges de matière (Levillain 2023). L'économie du gaz au contraire offre l'« image de la station centrale d'usine à gaz (*gashouse*) et de son système de distribution, des conduites principales de gaz passant par des tuyaux de dérivation plus petits et menant à de nombreuses habitations » (Josephson 1959, p. 179). L'exploitation du charbon emprunte aux deux modèles : à une logistique discontinue, par les morceaux de houille arrachés aux sous-sols des mines et entassés en surface ; à une logistique fluidifiée, par le recours croissant aux transports ferroviaires qui transforment les stocks en flux et accélèrent les circulations de matière.

Plus encore que l'économie du charbon, l'industrie électrique emprunte aux conceptions discrètes et continues de la logistique. Dans les fonctions de traction automobile et d'accumulation stationnaire, l'électricité adopte une morphologie compacte, par blocs. L'électricité n'est-elle pas mise en boîte aussi bien par les anciennes « bouteilles de Leyde » que par les « empilements » de Volta ou encore par les « batteries à gaz » de Grove ? Chacun de ces trois dispositifs accumule de l'électricité dans un volume réduit. Plus que tout autre accumulateur, la batterie secondaire, ou « boîte d'énergie électrique », porte les espoirs économiques de la filière vers 1880. Elle devait permettre, selon les propres mots de l'ingénieur Louis Simonin en 1867, de mettre le « soleil en bouteilles » (cité par Jarrige 2010, p. 87).

À sa suite, Hospitalier (1880, p. 380) présente les batteries de stockage comme le meilleur moyen d'amener « chez chacun la lumière et la force motrice ». À l'appui d'une telle promesse, il invoque un convertisseur local de puissance éolienne en électricité via une dynamo et une batterie de stockage, semblable à celui décrit par Thomson (1881). De telles installations auraient, selon Hospitalier (1880, p. 379), « ainsi régularisé, emmagasiné, asservi en quelque sorte, une force variable et inconstante, pour lui faire exécuter, à intervalles réglés, un travail régulier et constant ». Le « caractère irrégulier, imprévisible et "capricieux" » des vents est fréquemment évoqué dans les discours techniciens de l'époque et même reproché à l'ensemble des forces naturelles : éolien, hydraulique, marée, solaire, etc. (Marrec 2018a, p. 125). À l'inverse, la « batterie d'accumulateurs », série ordonnée de cellules parallélépipédiques, apparaît comme un rempart moderne contre les incertitudes de la nature. Elle agit comme un « régulateur de temps » qui découple les rythmes naturels et humains. Ses cycles contrôlés de charge-décharge domestiquent les « caprices » de la nature, emboîtent leur puissance et la rendent disponible pour les rythmes de consommation des populations humaines.

Mais, les forces de la nature ne sont pas les seules sources d'énergie possibles pour les générateurs d'électricité destinés aux riches particuliers. La figure 4.2 montre un dispositif local d'éclairage par batterie de stockage, présenté à l'Exposition 1888 de l'American Institute de New York, par la Julien Electric Company. Cette société d'accumulateurs installée à New York commercialise aux États-Unis les cellules électrochimiques mises au point par Edmond Julien à Bruxelles (cf. 4.1.2). Son stand constitue, selon le reporter de *Science* (1889, p. 55) couvrant l'événement, l'un des « plus intéressants » de cette exposition nationale orientée vers l'agriculture, le

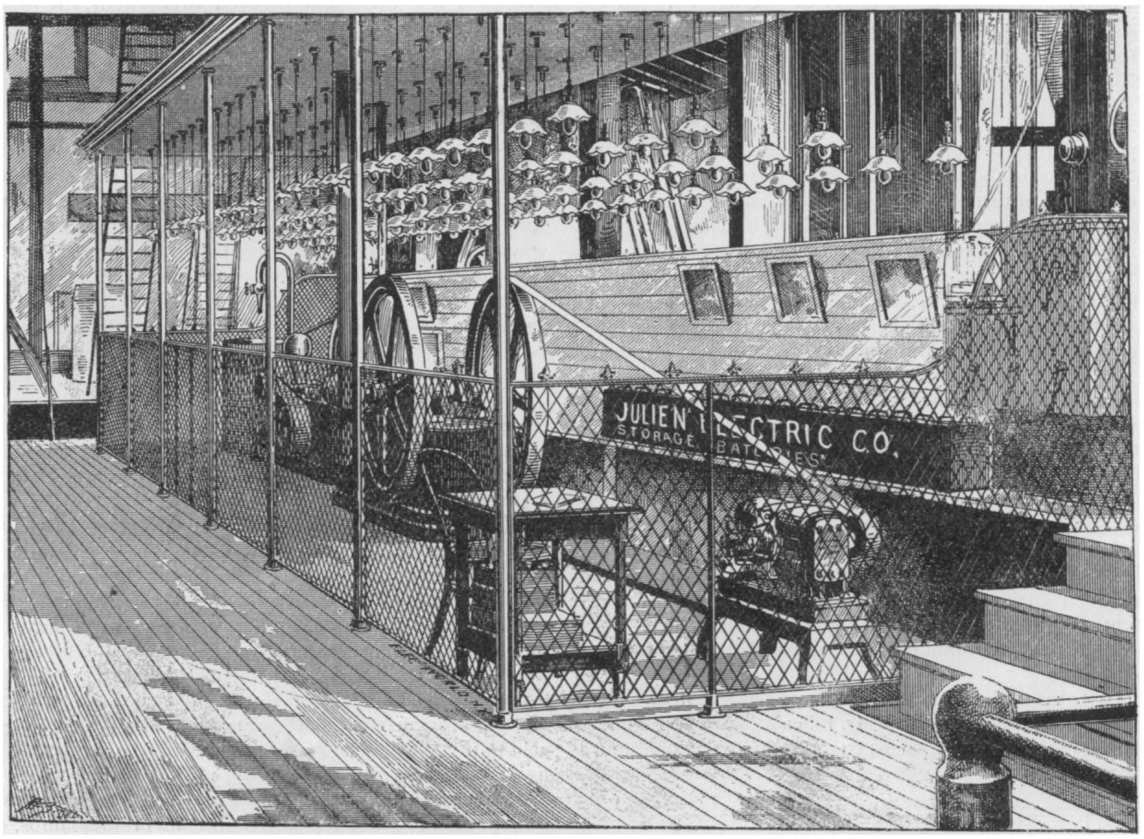

FIGURE 4.2 – Installation d'éclairage par batterie de la Julien Electric Company de New York (Science 1889)

commerce et l'industrie aux États-Unis. Il fait la démonstration du fonctionnement d'un générateur électrique alimentant l'éclairage d'une grande maison et le travail d'un petit moteur électrique.

Le générateur de puissance est un convertisseur de chaleur en électricité. Il est composé d'un moteur à essence d'une puissance de 4 chevaux-vapeur (environ 3 kW) relié à une dynamo (env. 100 W) et à 36 cellules Julien (200 Ah pour 20 kg) (cf. figure 4.2). Il est couplé à 95 lampes à incandescence de 16 chandelles de puissance chacune (env. 16 candelas, correspondant à 3,5 W de puissance électrique) et à un moteur électrique d'une puissance de 2,5 chevaux-vapeur (env. 1,9 kW) actionnant un ventilateur et une machine à coudre (Science 1889, p. 55-56). L'installation a été dimensionnée pour charger les batteries durant la journée afin qu'elles puissent, à leur tour, éclairer 65 lampes chaque soir pendant quatre heures, les 30 lampes restantes étant alimentées si nécessaire par le moteur à essence et la dynamo. Le reporter précise que cette installation électrique pour particuliers n'a pas connu de panne pendant les deux mois et demi qu'a duré l'Exposition et qu'un un seul homme sans qualification particulière a suffi pour s'en occuper (essentiellement pour le moteur thermique). Il mentionne également l'intérêt de la batterie d'accumulateurs comme réservoir d'énergie en cas de panne ou d'urgence et pour réduire la puissance installée du moteur thermique. Un dernier avantage concerne la fonction régulatrice du courant par les batteries, qui réduit le scintillement (*flickering*) des lampes à incandescence [8] et augmente de 25 à 50 % le temps de vie des lampes à incandescence (Science 1889, p. 54-55). En résumé, la « batterie de stockage est, en fait, une égalisatrice et une régulatrice de la dynamo, en plus d'agir comme un réservoir en cas d'accident ».

8. Des dispositifs locaux de régulation sont également nécessaires pour stabiliser le courant d'alimentation d'une lampe à incandescence et permettre une luminosité constante (Higgs 1879, p. 176-183).

Les installations locales d'électricité ont été pensées au début de la décennie 1880, par Hospitalier (1880) et Thomson (1881), comme la future norme de fourniture d'électricité. Mais, à la fin de la décennie, elles constituent seulement un marché de niche pour des lieux trop éloignés d'« une station centrale d'éclairage » tels que les résidences de campagne, les habitations estivales ou les grands manoirs (Science 1889, p. 55). La production locale et individuelle d'électricité n'a pas matérialisé son rêve d'autonomie. Ce qui s'est imposé de manière structurelle et irréversible au début des années 1890 c'est un ensemble étendu de nœuds de distribution d'électricité, organisés en service local autour de centrales électriques, et de plus en plus reliés entre eux par des lignes de connexion (McGuire et al. 1993, p. 234). Une conception plus étendue et plus collective de l'électricité que l'installation locale et particulière domine le marché de la production et de la distribution d'électricité dans les années 1890 : la figure du réseau électrique.

4.2.2 Contextes de l'industrie électrique aux États-Unis

En septembre 1882, le premier réseau électrique ouvert au public aux États-Unis, celui de la Edison Illuminating Company de New York, est construit à Manhattan en prenant les réseaux de distribution de gaz comme modèle (Josephson 1959, p. 179). Il est organisé sur un mile carré autour d'une centrale électrique, Pearl Street Station, distribuant son courant par ramifications à travers un ensemble de fils, vers de potentiels riches clients du quartier (Hughes 1979, p. 136-137). L'expansion de la distribution instantanée de flux électriques est par la suite rendue possible par l'incorporation de batteries de stockage aux centrales électriques. La construction des réseaux hybride ainsi les morphologies fluides et compactes de l'électricité.

La place prise par les batteries dans les réseaux électriques n'est pas celle qu'espérait Thomson (1881). Celui-ci proposait, à l'occasion du projet d'installation d'usine hydroélectrique sur les chutes du Niagara, de déverser les 80 000 volts en bout de ligne dans une batterie d'accumulateurs proportionnée à cette tension : 40 000 accumulateurs de 2 volts de force électromotrice. Une rotation régulière devait permettre de substituer les batteries chargées par des batteries déchargées, par bloc de 50 cellules à la fois. Thomson comparait les batteries à des « boîtes d'énergie électrique » sur le modèle inconscient des seaux de charbon quotidiens dans l'Angleterre victorienne (Mathis 2021, p. 101-109). Il imaginait ainsi la distribution locale d'électricité comme un commerce de détail, d'achat-vente ou de location de boîtes compactes de forces. Cette solution discontinue basée sur un commerce au détail a été supplantée par une deuxième solution continue, que Thomson pensait plus onéreuse et plus dangereuse. Il s'agit de placer en bout de ligne des transformateurs (*step-down dynamos*) pour abaisser les hautes tensions utilisées durant le transport à des tensions de l'ordre de 100 à 200 volts avant la distribution directe des maisons, des ateliers et des usines. La conception continue de l'électricité, sous la forme d'un réseau intégré, s'impose en pratique au début du XX^e^ siècle.

La réflexion de Thomson pose un problème général de phénoménologie de l'électricité qui vient prolonger la discussion sur les logistiques industrielles (cf. 4.2.1). Celle-ci insistait sur la dualité entre des morphologies fluides et compactes de l'électricité opposant réseaux et batteries. Ici, une seconde dualité phénoménologique recoupe la première en opposant les formes alternative et continue de courant électrique. Les dynamos des centrales, qu'elles soient hydroélectriques ou à charbon, produisent des courants dits « alternatifs » parce que leur intensité et leur sens de circulation alternent durant une période donnée. La forme sinusoïdale d'un courant alternatif est fixée, phénoménologiquement, par l'induction électrique générée par la rotation d'une dynamo. Sa période dépend de la vitesse de rotation des dynamos. Son inverse est la fréquence du courant alternatif. Au contraire, les batteries génèrent des courants dits « continus » dont l'intensité, la tension et le sens de circulation sont constants au cours du temps. L'intensité, la tension et la puissance du courant continu

généré sont alors fixées par les caractéristiques des cellules électrochimiques.

Cette phénoménologie particulière de l'électricité pose un cadre matériel dont dépendent les choix économiques. Ainsi, le courant alternatif s'impose, dès les années 1880, pour la transmission de l'électricité sur de longues distances car il réduit les pertes thermiques et donc les dépenses d'énergie lorsqu'il est transporté sous haute tension comme le préconisait Charles Siemens à partir de 1878 puis William Thomson (1881). En revanche, une farouche « guerre des courants » fait rage à travers l'expansion des réseaux électriques. Elle est orchestrée par un secteur manufacturier concentré, où quelques firmes électriques se partagent la production industrielle d'appareils, de dynamos, de moteurs et de lampes à incandescence (McGuire et al. 1993, p. 234). Deux empires industriels et financiers de l'électricité se consolident autour de Georges Westinghouse d'un côté et de General Electric de l'autre, issue d'une fusion en 1892 de Edison General Electric et Thomson-Houston avec l'appui financier de Drexel, Morgan & Company (Hughes 1983, p. 218-221).

La compétition technico-commerciale se traduit par la généralisation du courant alternatif pour la distribution d'électricité aux consommateurs sous 110 volts de tension et 60 hertz de fréquence aux États-Unis. Westinghouse et General Electric parviennent à rendre le marché de la distribution d'électricité très dépendant du secteur manufacturier et à s'imposer comme les acteurs-clés par la création de filiales de distribution électrique à partir de leur métier de fabrication de matériels électriques. Maillage électrique serré, secteur manufacturier concentré autour de Westinghouse et General Electric et forte interdépendance de la production d'appareils et de la distribution d'électricité forment ainsi trois « contraintes structurelles [...] irréversibles » au début des années 1890 (McGuire et al. 1993, p. 234). Elles font de la fin du XIX^e^ siècle un moment charnière dont l'influence profonde contraint le marché de l'électricité aux États-Unis sur le long XX^e^ siècle.

4.2.3 Fonctions et contraintes de la régulation électrique aux États-Unis et en Europe

L'expansion des réseaux électriques est rendue possible par l'usage croissant des batteries comme stocks d'énergie et régulateur de flux. Si ces deux fonctions sont les mêmes que pour les installations locales de type Julien Electric Company, elles sont systématisées par le déploiement des réseaux électriques. C'est par le vecteur de l'électricité que la mise en réserve et la régulation de l'énergie se taillent une place de choix au cœur du régime technicien et de la modernité industrielle.

Le 20 novembre 1895 se tient à New York la 101^e^ session de l'American Institute of Electrical Engineering (AIEE). La soirée thématique, présidée par Louis Duncan, regroupe six communications consacrées aux « applications de la batterie de stockage ». Deux séances plus restreintes ont lieu en parallèle à Chicago et San Francisco. L'analyse des discours est intéressante pour plusieurs raisons : les auteurs sont des experts, techniciens (ingénieurs, professeurs) et technocrates (managers, directeurs) ; leurs présentations traitent de problèmes pratiques, qu'ils soient industriels ou économiques ; elles sont suivies de discussion générale et contradictoire auxquelles prennent part les différents publics de New York, Chicago ou San Francisco ; et, enfin, très souvent, des comparaisons sont faites entre l'Europe et les États-Unis. L'orientation prescriptive des communications et leur diffusion dans le milieu électricien par une institution professionnelle aussi puissante que l'American Institute of Electrical Engineering relèvent d'une conception technocratique du stockage de l'électricité aux États-Unis à la fin du XIX^e^ siècle.

L'essentiel des contributions se focalise sur les usages des batteries comme « auxiliaires » des réseaux électriques. Deux types de centrales sont concernées, celles destinées à l'éclairage (*lighting station*), public et privé, et celles consacrées à la distribution de puissance (*power station*) pour la traction électrique (trains, tramways, trolleys) et les machines électriques en usine. Leur échelle de puissance est de plusieurs milliers

de kilowatts. C. L. Edgar (1895, p. 588), manager général et ingénieur en chef de la Edison Illuminating Company de Boston, se félicite que les discussions sur les batteries soient passées depuis quelques mois aux États-Unis des questions de fabrication à celles des usages par les professionnels dans les réseaux électriques.

L'Europe est citée à plusieurs reprises comme le modèle à suivre pour l'introduction systématique de batteries pour améliorer l'opération des centrales électriques. La Grande-Bretagne et l'Allemagne sont mentionnées en priorité mais aussi l'Autriche, la Belgique, le Danemark, l'Espagne, la France, la Hollande, l'Italie, la Norvège, la Suède et la Suisse. Arthur E. Childs (1895, p. 588), manager de The Electric Battery Company à Boston, s'agace que, malgré « le caractère progressiste bien établi des ingénieurs américains des tramways et de l'éclairage », ces derniers ne suivent pas l'exemple de leurs confrères européens [9]. En Europe, les premières batteries de stockage ont été introduites dans les centrales avant 1890. L'implantation se poursuit ensuite à un rythme élevé car elle ne nécessite pas une modification en profondeur de l'ossature des centrales tout en augmentant l'efficacité du système. Childs recense plus de 20 centrales d'éclairage et plusieurs milliers de centrales isolées équipées en batteries de stockage en Grande-Bretagne ainsi que 15 centrales électriques de traction et 5 000 centrales isolées en Allemagne. 80 % des centrales allemandes et autrichiennes fonctionneraient avec des batteries de stockage contre une proportion très faible aux États-Unis (Childs 1895, p. 589-590). L'installation de batteries de stockage semble en effet rentable selon le bilan économique de deux ingénieurs de la Chicago Telephone Cº, Arthur Y. Abbott et Franz J. Dommerque. Le coût des batteries représente entre 6 % (Hanovre) et 12 % (Düsseldorf) des dépenses matérielles (Abbott et Dommerque 1895, p. 638-639). En contrepartie, l'installation de batteries de stockage permettrait de réaliser des économies de l'ordre de 20 % (chiffre issu de leurs calculs détaillés) à 30 % des coûts d'exploitation hors salaire (issu de témoignages d'ingénieurs allemands) durant une année (Abbott et Dommerque 1895, p. 643-644). La conférence, qui se déroule à Chicago en parallèle de la session de New York, donne lieu à une discussion sur les raisons de la différence entre les choix états-uniens et européens. L'ingénieur électricien, Ludwig Gutmann, explique ces pratiques par la prédominance en Europe du courant continu en basse tension alors que les États-Unis sont plutôt en haute tension et courant alternatif (Carhart 1895, p. 644). Il ajoute que certains théâtres par exemple favorisent les batteries de stockage afin d'éviter les variations de luminosité durant les spectacles.

À New York, deux autres conférenciers, C. L. Edgar et Francis W. Crocker, présentent chacun une classification des fonctions de la batterie de stockage dans le domaine électrique. Ces deux classifications conçues de manière indépendante se complètent. Celle d'Edgar, calquée sur les pratiques d'un manager de centrale électrique, ignore les usages hors réseaux et les solutions spéculatives. Celle de Crocker, conforme au regard d'un professeur de Columbia par sa plus grande généralité, intègre certains usages potentiels des batteries qui n'ont pas été mis en œuvre en pratique. En accord avec l'orientation thématique de la session, les deux auteurs passent sous silence les fonctions de traction et d'accumulation électriques (cf. 4.1.3). Ils ciblent, pour l'essentiel, ce qui a été regroupé sous l'appellation « régulation » dans la partie 2.3.2 et l'un des deux auteurs évoque un usage de génération. Leurs classifications viennent ainsi préciser la typologie générale des fonctions du stockage d'énergie de la figure 2.8 dans le cas important des batteries dans les réseaux électriques. Elles permettent d'identifier quatre modalités de régulation caractérisées par des différences de phénoménologie, de temporalité et de spatialité. Chaque modalité peut être définie comme une sous-fonction de régulation ou comme une fonction spécifique de régulation de l'électricité.

9. L'argumentation militante de Childs sous-évalue certainement les efforts des ingénieurs états-uniens pour introduire les batteries dans les centrales électriques. Ainsi, de manière aussi précoce qu'en Europe, Edwin J. Houston et Elihu Thomson (1879, p. 388), collègues au Central High School de Philadelphie et fondateurs de la Thomson-Houston Electric Company en 1888, défendaient l'usage systématique des batteries de stockage dans les dispositifs électriques les plus modernes.

Fonctions	Classification selon Edgar (1895)	Classification selon Crocker (1895)	Lieux et temps des phénomènes
Transformation de courants		Abaisser les hautes tensions de la transmission vers la distribution (n°6)	Gestion en continu des nœuds du réseau (centrales et annexes) et des lignes de connexion
		Abaisser les tensions pour optimiser le courant triphasé (n°7)	
Régulation instantanée	Égaliser les fluctuations (n°3.a)	Absorber les fluctuations et stabiliser les tensions (n°2)	Faibles variations instantanées dans tout le réseau
	Agir comme réservoir d'énergie (n°3.b)	Rendre plus uniforme la charge sur les dynamos (n°5)	Fortes variations de puissance des réseaux de transport
Déplacement d'énergie dans le temps	Porter le pic de charge durant les heures de pointe (n°1)	Aider la génératrice à porter les charges les plus lourdes (n°4)	Charge et décharge des batteries en centrale pendant quelques heures pour absorber les variations journalières de consommation
	Porter la charge complète en heures creuses (n°2)	Fournir l'énergie à certaines heures et permettre l'arrêt de la machinerie (n°3)	
Déplacement d'énergie dans l'espace	Distribuer la charge dans les annexes autour de la station centrale (n°4)	Réduire l'amplitude de courants et le diamètre des fils des lignes de connexion (n°8)	Charge et décharge des batteries des stations annexes pour servir de relais de puissance à la centrale durant la journée
		Alimenter des lampes portatives (n°1)	Dispositifs compacts et isolés du réseau durant plusieurs heures

Figure 4.3 – Fonctions de régulation électrique des batteries vers 1895

Ces quatre fonctions spécifiques apparaissent dans la première colonne de la figure 4.3. Les deuxième et troisième colonnes résument les différents usages des batteries retenus par les deux auteurs, quatre pour Edgar (1895) et huit pour Crocker (1895). Elles conservent les terminologies et les formulations des auteurs et indiquent l'ordre dans lequel ils rangent ces usages par des numéros entre parenthèses. La quatrième et dernière colonne indique l'étendue spatiale (lieux) et la profondeur temporelle (temps) des phénomènes mis en jeu pour chaque usage. Détaillons chacune de ces quatre fonctions spécifiques des batteries électriques à la fin du XIX^{e} siècle.

La première fonction spécifique concerne la transformation des formes de courant dans les réseaux électriques. Elle est seulement mentionnée par Crocker, et non par Edgar, car elle concerne des usages spéculatifs. Le premier des deux usages cités par Crocker (1895, p. 606) concerne l'abaissement par les batteries des hautes tensions de transmission afin d'organiser la distribution de courant à faible tension pour les clients dans le voisinage des centrales. L'idée est similaire à la proposition de Thomson (1881, p. 385) pour décharger la puissance des chutes du Niagara dans des accumulateurs vendus au détail dans les zones urbaines. Le second usage est le recours aux batteries pour réduire le nombre de dynamos nécessaires à la transformation du courant alternatif en courant continu pour la distribution de proximité (Crocker 1895, p. 607). Pour ces deux usages

morphologiques, ce n'est pas un « transformateur différé » comme la batterie qui l'emporte en pratique mais des transformateurs « instantanés ou immédiats » : redresseurs, permutatrices, commutatrices ou convertisseurs (Hospitalier et Bainville 1901, p. 4). Ces artefacts sont d'ailleurs qualifiés d'« hétéromorphiques » par les électriciens eux-mêmes parce qu'ils modifient la forme des courants et les facteurs de puissance. Mais, les batteries agissent de manière instantanée à travers la fonction suivante.

La deuxième fonction spécifique des batteries concerne la régulation instantanée des instabilités de charge inhérentes au fonctionnement des réseaux électriques. Arthur Childs, à qui a été confié d'introduire la session de New York, explique bien ce rôle auxiliaire de « tampon » (*buffer*) joué par une batterie dans le réseau. Celle-ci assure « l'effacement (*wiping out*) des fluctuations et variations [de charge] qui s'exercent sur les dynamos et les machines » (Childs 1895, p. 586). Les « variations » résultent des évolutions instantanées de la consommation sur le réseau en fonction du nombre de lampes ou de moteurs connectés tandis que les « fluctuations » sont dues aux arrêts ou débuts d'opération des moteurs. En « absorbant le choc des variations sans le répercuter sur les moteurs » et en égalisant les fluctuations, une batterie d'accumulateurs efface en permanence les instabilités de charge, à partir des nœuds du réseau où elle se trouve (stations centrales ou annexes) (Childs 1895, p. 586). Ceci a convaincu la direction de la Edison Illuminating Company de Boston d'incorporer des batteries de stockage au début de l'année 1894 (Edgar 1895, p. 598).

Le lissage des variations de charge par la batterie, qui stabilise la tension du tableau de commande (*switchboard*) d'une centrale électrique, augmente le rendement de conversion des dynamos et le temps de vie de la machinerie. Un autre problème, qui se pose de manière aiguë pour les stations de puissance, est également résolu par l'usage d'accumulateurs. Une station de puissance est soumise à de forts échelons de puissance lors du démarrage ou de l'arrêt d'un tramway ou d'un trolley. Des fluctuations de 50 % à 200 % de puissance requise en quelques minutes ne sont pas rares (Childs 1895, p. 587). La fourniture de surpuissance pendant quelques minutes implique alors le recours à une dynamo supplémentaire. Elle peut également être résolue par l'installation d'une batterie d'accumulateurs qui joue alors pendant quelques minutes le rôle de « réservoir » d'énergie, chargé lorsque la puissance requise est basse et déchargé lorsque la puissance requise, rendant superflue la dynamo supplémentaire. Un gain de 40 % de puissance peut ainsi être réalisé grâce au lissage permis par les batteries durant quelques secondes à quelques minutes (Childs 1895, p. 587).

En passant du rôle tampon, lissant de manière instantanée les fluctuations, à celui de réservoir, absorbant des échelons de puissance pendant quelques secondes à quelques minutes, nous glissons de la deuxième à la troisième fonction de régulation des batteries : le déplacement d'énergie rythmé par l'alternance des jours et des nuits. Ce ne sont plus, comme précédemment, des flux instantanés ou rapides qui sont échangés mais le parcours de cycles de charge-décharge des cellules électrochimiques durant plusieurs heures pour réguler les évolutions de consommation au fil des activités humaines. Childs, Crocker et Edgar soulignent unanimement l'importance stratégique des batteries dans l'économie journalière d'une centrale électrique. Leur raisonnement est rendu plus explicite par la lecture de la figure 4.4. Y est représentée une courbe de charge théorique d'une centrale électrique typique d'une ville des États-Unis comme Boston (Treadwell 1898, p. 142-143). En théorie, une batterie d'accumulateurs bien dimensionnée peut délivrer un surplus de puissance électrique durant les quelques heures de pics de consommation en début de matinée (7h-9h) et fin d'après-midi (16h-20h), se substituer complètement aux dynamos lors des heures creuses de la nuit (minuit-5h) puis se recharger durant les plages de consommation moyenne de la journée (5h-7h, 9h-16h, 20h-minuit).

La courbe de charge rend compte du rythme social d'une journée. Si le niveau moyen de puissance nécessaire peut varier d'une saison à l'autre, en raison de la durée du jour et des conditions météorologiques, la

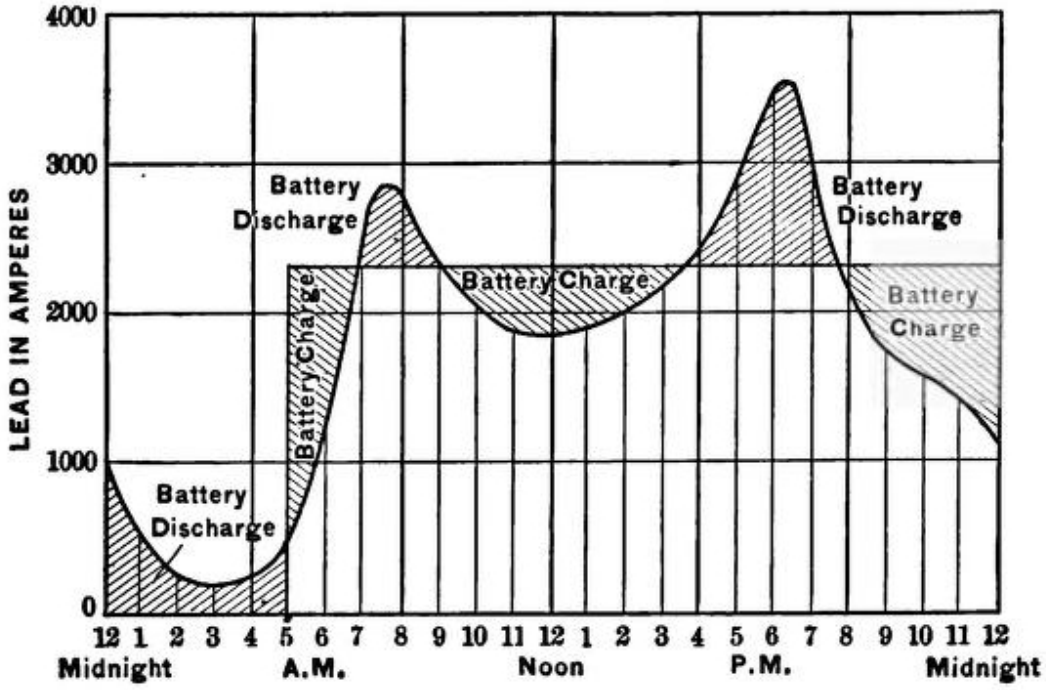

Figure 4.4 – Courbe de charge théorique d'une centrale typique d'une ville des États-Unis (Treadwell 1898, p. 143)

forme générale de la courbe de consommation reste inchangée. Le pic du soir en particulier résulte du fait que la nuit tombe vers 16h30 sur le côte Est au milieu de l'hiver et que les magasins restent ouverts jusqu'à 18h, ce qui requiert un éclairage maximum à ce moment-là (Edgar 1895, p. 592-593). Sa durée varie de deux heures en été à cinq heures en hiver en fonction des saisons. Toutes les stratégies économiques pour « élargir ce pic [en rendant] plus ou moins pénible pour les clients l'utilisation de la lumière à cette heure-là » sont demeurées infructueuses. La courbe de consommation devient un donné pour les managers de centrale électrique. Ces derniers doivent donc adapter la courbe de production en intégrant des batteries de stockage à la centrale pour différer la génération d'électricité aux heures de pointe.

La courbe de charge rend également compte de la structure industrielle d'une société. Ainsi, les conférenciers de l'American Institute of Electrical Engineering sont conscients des différences structurelles entre les réalités européennes et états-uniennes (Edgar 1895). La durée des heures creuses de la nuit est bien plus courte aux États-Unis (de minuit à 5 ou 6h) qu'en Europe (de minuit à 15h parfois) car il y a plus de moteurs en opération dans les zones urbaines via l'équipement important en tramways et trolleys électriques aux États-Unis (cf. 2.2.3). Par exemple, en 1896, 76 % des réseaux de tramways sont électrifiés aux États-Unis contre 2,5 % en France (Beltran et Carré 2016, p. 75).

La quatrième et dernière fonction de régulation des batteries concerne le déplacement spatial d'énergie sur l'ensemble du réseau. L'extension d'un réseau à partir d'une station centrale impose la construction de stations annexes reliées entre elles par des lignes de connexion pour assurer l'équilibre électrique de l'ensemble. La transmission de puissances croissantes requiert des sections croissantes de fils de cuivre et, donc, des dépenses croissantes de matériaux. En particulier, les flux importants des heures de pointe des stations d'éclairage ou des échelons de puissance d'une station de tramways imposent de grosses sections de cuivre. La dépense occasionnée est d'autant plus cruciale que les lignes de connexion sont longues et qu'elles nécessitent plusieurs fils. C'est

pour éviter de trop augmenter la section des fils que les bâtisseurs de systèmes électriques pensent distribuer la charge dans les annexes autour de la station centrale en la stockant dans des batteries d'accumulateurs.

Comme pour la troisième fonction, ce sont ici encore des cycles de charge-décharge de cellules électrochimiques qui assurent des transferts d'énergie entre les stations centrales et annexes pendant plusieurs heures. De tels déplacements spatiaux des stocks d'énergie ont aussi pour conséquence de réduire les pertes de tension, ce qui permet d'économiser de l'énergie et de stabiliser le réseau (Crocker 1895, p. 607). Pourtant, cette idée de distribuer la charge dans l'ensemble des nœuds pour équilibrer le réseau n'a pas été mise en œuvre à la Edison Illuminating Company de Boston malgré un vif intérêt du manager général, Edgar (1895, p. 597). Plus conventionnel et mieux connu est l'usage des batteries comme générateur pour des dispositifs compacts et isolés du réseau pendant plusieurs heures. De tels artefacts peuvent être mobiles comme les lampes portatives (Crocker 1895) ou les automobiles électriques (cf. 4.1.3) ou stationnaires comme les appareils de télégraphie et de téléphonie.

4.2.4 Gestion concrète d'un réseau électrique. Hartford, Connecticut, 1897

Ces considérations pratiques, mais générales, doivent être confrontées à la gestion concrète de réseaux électriques. Hartford, capitale de l'État du Connecticut en Nouvelle-Angleterre, offre un cas intéressant pour inscrire la régulation électrique dans un contexte local, quotidien et en évolution. La Hartford Electric Light Company, principale compagnie d'électricité de la ville, se montre particulièrement innovante pour la production et la distribution d'électricité. La bibliothèque de l'université du Connecticut [10], dépositaire des archives de la compagnie, met en avant quatre « premières » technologiques pour les États-Unis : première transmission d'électricité sur une longue distance (1893) ; première insertion d'une batterie d'accumulateurs dans un réseau hydroélectrique (1896) ; premier incorporation d'aluminium dans une ligne de transmission (1899) ; première utilisation d'une turbine à vapeur (1901). Ces prétentions à l'innovation s'inscrivent dans la construction locale d'une mémoire collective. Celle-ci a été prise en charge par la Connecticut Power Company, qui a racheté la Hartford Electric Light Company en 1958. Elle repose sur l'édition d'une histoire officielle intitulée *The Hartford Electric Light Company* écrite par Glenn Weaver, professeur associé d'histoire au Trinity College de Hartford. Weaver (1969, p. 257-258) revendique 13 « premières techniques » et 12 « premières organisationnelles » pour la compagnie. L'historiographie a évolué depuis la fin des années 1960. Elle a relégué la revendication de *premières* du domaine de l'histoire académique à celui de la mémoire collective. L'histoire des techniques étudie désormais des processus structurés et contextualisés – qui impliquent par définition des étapes et des acteurs multiples en interaction – plutôt que des événements glorifiés et singularisés sur une flèche du temps conduisant au présent.

Ceci dit, la Hartford Electric Light Company présente un intérêt historique pour sa position innovante sur le front technologique de l'époque. Elle dispose d'un système hybride de production couplant hydroélectricité et thermoélectricité et gère plusieurs réseaux de distribution, dont certains sont en courant alternatif et d'autre en courant continu. Ce qui la rend particulièrement pertinente dans le cadre de cet essai est qu'elle est la première compagnie états-unienne à installer une grosse capacité de stockage d'électricité par batteries couplée à une usine hydroélectrique (Weaver 1969, p. 257). En cela, c'est une exception aux États-Unis en 1895, mais elle suit, avec un décalage de quelques années, la gestion de nombreuses centrales électriques en Europe (Carhart 1895, p. 645).

La Hartford Electric Light Company donne ainsi à voir un cas typique de régulation électrique par stockage.

10. Voir le site internet correspondant https://archivessearch.lib.uconn.edu/repositories/2/resources/422

La régulation spatio-temporelle consiste à transférer l'énergie collectée par le barrage hydroélectrique vers les batteries de stockage situées à 17 kilomètres de là durant les heures creuses puis utilise la décharge des batteries pour réduire le pic de charge en heures pleines. Elle fait d'ailleurs l'actualité à l'époque. Un reporter du *Scientific American*, magazine populaire et de qualité, lui consacre un article détaillé dans le numéro mensuel du 9 octobre 1897. Il a soigneusement interviewé l'expert électrique de la compagnie, professeur de physique à Trinity College de Hartford, William Lispenard Robb [11], et le superintendant des centrales électriques, Robert W. Rollins. L'article du *Scientific American* (1897) sert aussi à Augustus Treadwell (Treadwell 1898, p. 151-181) pour décrire le cas de Hartford parmi la vingtaine d'exemples de réseaux électriques incorporant des batteries de stockage en Amérique du Nord et en Europe de l'Ouest. La lecture croisée de ces deux sources primaires donne une idée détaillée de la gestion du système électrique de Hartford. Elle sera complétée par l'ouvrage *The Hartford Electric Light Company* de Glenn Weaver, dont le contenu empirique est pertinent, et par quelques informations extraites de la bibliothèque de l'université du Connecticut [12].

La Hartford Electric Light Company, mieux connue sous l'acronyme HELCO, a été fondée en 1881-1882 à partir d'une souscription publique menée par un groupe d'hommes affaires locaux. Parmi eux, Austin Cornelius Dunham prend la tête de la compagnie et la préside pendant 30 ans (1882-1912) (Weaver 1969, p. 256). Son règne correspond à une période de croissance continue de consommation électrique. Il se pourrait que HELCO ait joué un surdimensionnement de l'offre par rapport à la demande initiale puis stimulé l'essor de nouveaux modes de consommation électrique, gonflant ainsi la croissance électrique. Ceci restera à l'état d'hypothèse sans consultation des archives administratives de la compagnie. Néanmoins, cette stratégie du surdimensionnement de l'offre a été pratiquée en 1910 par la Consolidated Gas Electric Light and Power Company de Baltimore lors de la construction du barrage de Holtwood sur la rivière Susquehanna, à 60 kilomètres de Baltimore (Jones 2014, p. 178-188). Au moins trois facteurs extérieurs à HELCO peuvent expliquer la croissance de consommation électrique durant la période 1881-1901 : l'accroissement des parts de marché de l'électricité par rapport au gaz pour l'éclairage urbain ; la multiplication des applications électriques (traction, moteurs stationnaires) ; la forte poussée démographique de Hartford due à des flux migratoires. La population de la ville double quasiment en vingt ans, passant de 42 500 habitants en 1880 à près de 80 000 en 1900 [13]. L'éclairage extérieur au gaz comprenant un millier de lampes réparties sur 120 kilomètres de rues à Hartford en 1881 a été complètement remplacé par l'éclairage électrique de HELCO sept ans plus tard (Mirecki 2020).

Détaillons l'organisation structurelle du système électrique HELCO autour de 1895-1897 [14]. Des employés de la compagnie au milieu du XX^e^ siècle racontent combien les effectifs sont réduits à la fin du XIX^e^ siècle : outre la direction, 1-2 employés de bureau, 4-5 opérateurs des chaudières des machines à vapeur, 3-4 ouvriers installant et réparant les lampes, 5 hommes construisant et réparant les lignes électriques, etc. (Weaver 1969, p. 56). Leurs salaires journaliers sont plus élevés que la moyenne des techniciens de l'époque, de l'ordre de deux dollars et demi pour 10 à 12 heures de travail par jour, six jours par semaine. La capitalisation de la compagnie est alors de 500 000 dollars en 1895 et ses bénéfices de l'ordre de 100 000 dollars (Weaver 1969,

11. W. L. Robb est aussi mentionné comme l'un des directeurs de HELCO de janvier 1895 à février 1906 (Weaver 1969, p. 254).

12. L'analyse des archives de la compagnie, une trentaine de cartons couvrant la période 1876-1973, offrirait une recherche stimulante, qui déborde largement les limites de cet essai. Les archives sont décrites dans le *Guide to the Hartford Electric Light Company Records* consultables à l'adresse suivante : http://hdl.handle.net/11134/20002:19960010. Également intéressant un court texte chronologique couvrant les 20 premières années de la compagnie par Zac Mirecki (2020), un étudiant de master en sciences de l'information et des bibliothèques ayant consulté certaines archives de la compagnie.

13. Recensements officiels de l'État disponibles à l'adresse internet https://portal.ct.gov/SOTS/Register-Manual/Section-VII/

14. Sauf mention contraire, cette partie est basée sur l'article du *Scientific American* du 8 octobre 1897 et les témoignages de William Robb et Robert Rollins.

p. 68). La Hartford Electric Light Company prospère et ne ressent pas la crise financière de 1893. Elle s'appuie sur l'expertise de William Robb qui a passé l'année 1892 à l'institut fédéral polytechnique de Zürich dans le laboratoire du physicien Heinrich Friedrich Weber. Robb reçoit alors un salaire de mille dollars par an comme consultant de HELCO, équivalent à la moitié de son salaire à Trinity College (Weaver 1969, p. 68). Il redessine le système électrique de la Hartford Electric Light Company pour intégrer l'usine hydroélectrique au reste du réseau électrique et pour passer au transport triphasé entre Hartford et la rivière Farmington située à 17 kilomètres de la ville. En octobre 1897, le système électrique de HELCO est formé par une usine hydroélectrique de production, la Farmington River Station [15] à Rainbow, une ligne de transport d'électricité entre Rainbow et Hartford, deux stations urbaines, l'une Pearl Street Station en courant alternatif, l'autre State Street Station en courant continu, et deux réseaux de distribution autour des stations urbaines. Il distribue l'électricité à environ 650 clients (Weaver 1969, p. 61). L'usine hydroélectrique de Rainbow sur la rivière Farmington produit une puissance de 0,4 MW depuis 1889. En 1896, le barrage en bois de 5,5 mètres de haut est surélevé d'un mètre et demi et renforcé par des blocs de granit, ce qui permet de doubler la puissance disponible et ainsi augmenter le nombre de clients. La figure 4.5 représente l'usine hydroélectrique en 1897.

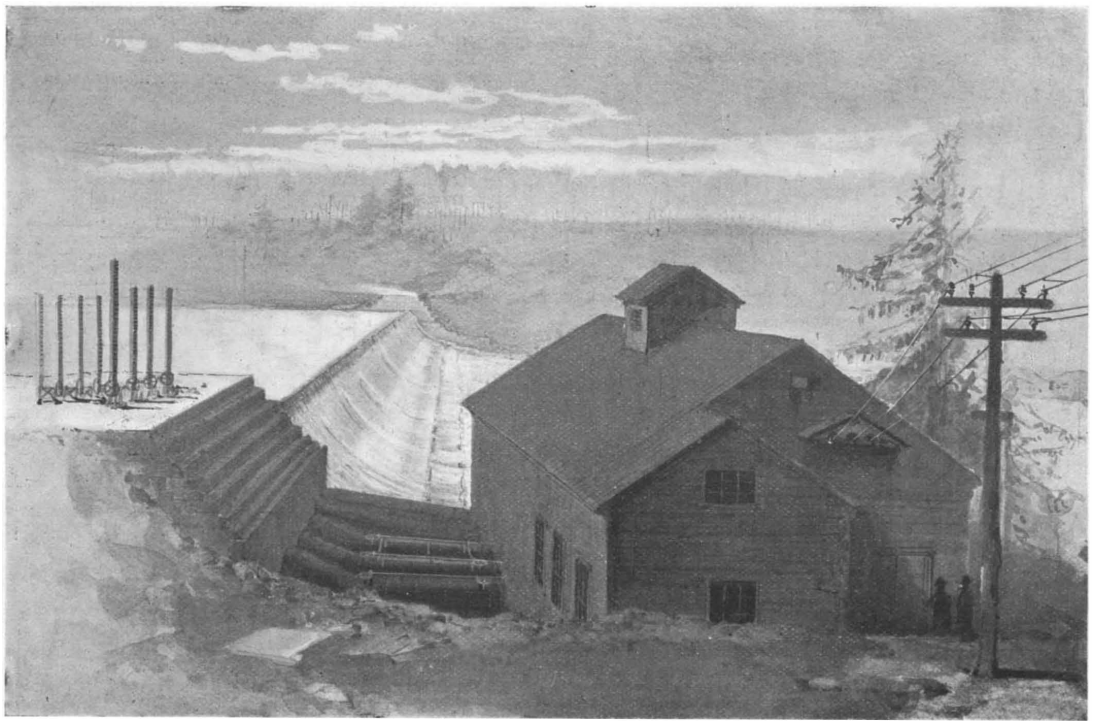

Figure 4.5 – Dessin de la Farmington River Station géré par HELCO (Scientific American 1897, p. 233)

Elle peut être lue en termes heideggeriens d'arraisonnement de la nature par la technique moderne (cf. 3.3.3). La rivière Farmington, « muré[e] dans la centrale », est « somm[ée] de livrer sa pression hydraulique » par les tuyaux au premier plan (Heidegger 1954, p. 22). Une fois canalisée, la pression « somme à son tour les turbines de tourner » à l'intérieur du bâtiment, qui asservissent les générateurs. Ceux-ci produisent un flux ininterrompu d'électricité, sommé de s'écouler dans les lignes de transmission, en bas à droite de la figure. Ainsi, l'usine hydroélectrique enchaîne les forces de la nature par une suite de conversions forcées d'énergie :

15. En réalité, l'usine de production de Farmington est détenu par la Farmington River Power Company, société établie en 1890 par un associé de Dunham, E. C. Terry, avec un capital de 80 000 dollars. Sa puissance de 600 chevaux-vapeur est achetée 12 000 dollars par an par HELCO (Weaver 1969, p. 65-66).

du courant de la rivière à la pression canalisée dans les tuyaux, de la pression hydraulique en travail mécanique dans les turbines, du travail en puissance électrique dans les générateurs. La *chaîne de conversions forcées*, qui transforme le courant fluvial en courant électrique, est rendue visible par la machinerie de la figure 4.6.

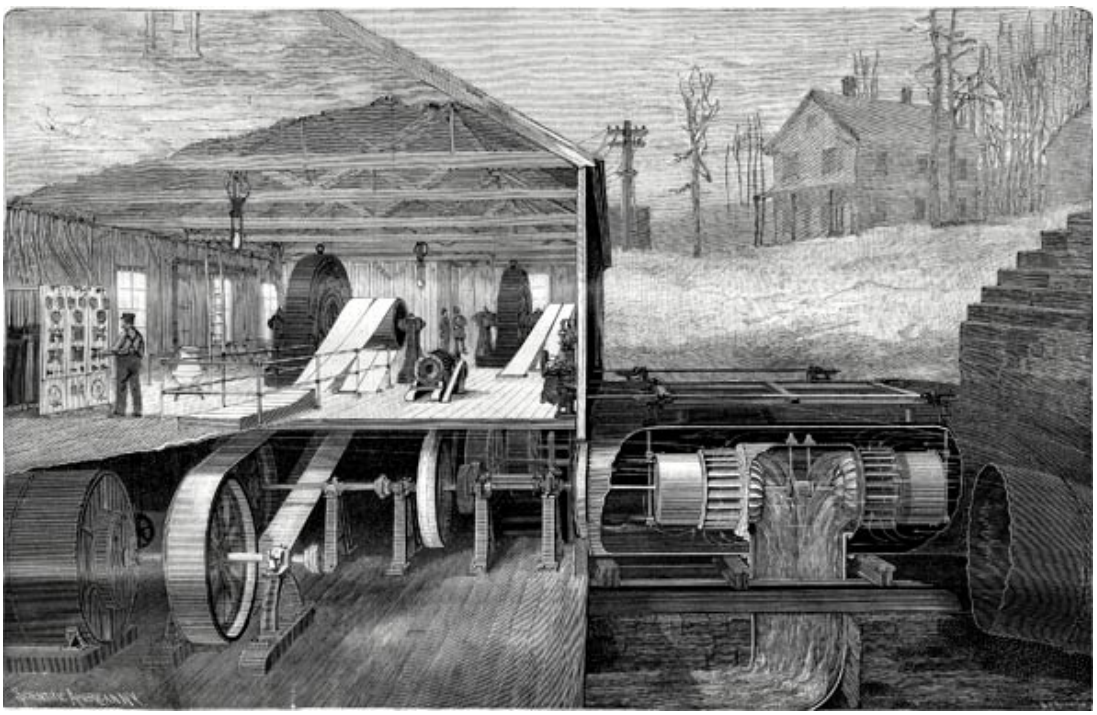

Figure 4.6 – Chaîne de conversions de la Farmington River Station (HELCO) (Scientific American 1897, p. 233)

Un ensemble sophistiqué d'arbres de transmission, de courroies, d'engrenages et de rouages relie les machines entre elles (turbines, générateurs) afin de transmettre la force de la rivière au générateur. Des régulateurs mécaniques sont également nécessaires en cas de variation trop brutale de la pression hydraulique. Le couple turbine-générateur fait l'interface entre l'ensemble mécanique et l'ensemble électrique. Il remplace, dans les centrales les plus modernes, les « dynamos » parce qu'il permet de convertir de plus fortes puissances. À Farmington River Station, quatre turbines de type McCormick & Rodney Hund d'une puissance unitaire de 300 kilowatts (dans le tuyau en bas à droite) sont couplés à deux générateurs produits par Westinghouse Electric and Manufacturing Company, d'une puissance de 600 kilowatts chacun (deux grandes roues noires dans le bâtiment). Ces générateurs produisent un courant alternatif triphasé, c'est-à-dire trois courants alternatifs de même intensité, même tension et même fréquence, mais décalés dans le temps, ou « déphasés », d'un tiers de période. Le courant triphasé est plus fréquent que le monophasé dès cette époque car il assure une plus grande stabilité et une plus grande efficacité énergétique au système (Hospitalier et Bainville 1901, p. 21). Le courant sortant des deux générateurs Westinghouse a les caractéristiques suivantes : alternatif et triphasé donc, avec 60 hertz de fréquence, 500 volts de tension et 0,8 mégawatt de puissance moyenne. La tension est ensuite élevée à 10 000 volts par des transformateurs (au niveau du tableau de commande à gauche du bâtiment) afin de réduire les pertes par effet Joule lors de la transmission vers Hartford. Ces pertes thermiques sont estimées à 10 % de l'énergie totale pour un parcours de 17 km. C'est le même taux de perte qui est acceptable sur un parcours de 65 km entre le barrage de Holtwood Dam et Baltimore (Jones 2014, p. 181). Le courant alternatif triphasé est transmis entre Rainbow et Hartford par une ligne aérienne, formée de sept fils de cuivre (deux fils

pour chacun des trois courants triphasés et un fil neutre, relié à la terre). Il est enterré en zone urbaine, à 800 mètres de Pearl Street Station, pour des raisons de sécurité et de commodité.

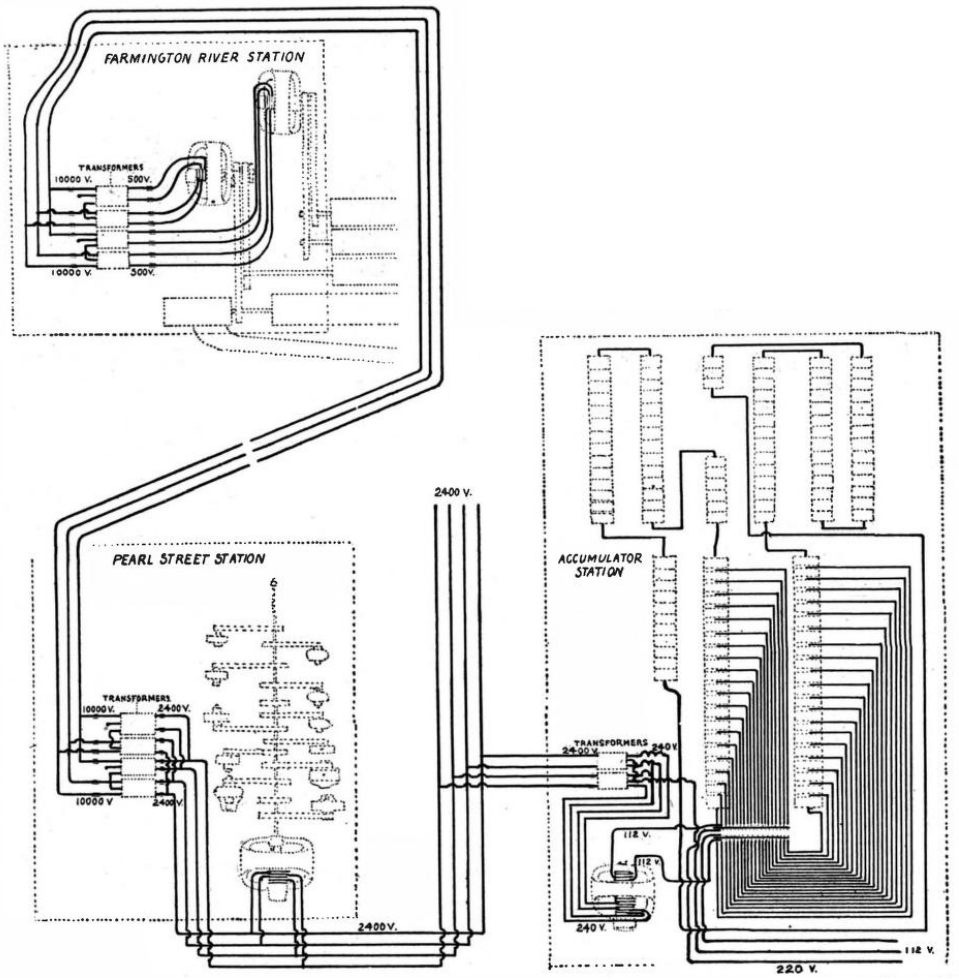

Figure 4.7 – Schéma du système électrique géré par la Hertford Electric Light Company (Scientific American 1897, p. 234)

Le schéma du système électrique géré par HELCO a été fourni au reporter du *Scientific American* par le superintendant des centrales, Robert Rollins. Il forme trois blocs reliés par des lignes de connexion, reproduit sur la figure 4.7. Les trois blocs correspondent aux trois stations électriques : l'usine hydroélectrique (en haut à gauche), la centrale de distribution de Pearl Street Station en courant alternatif (en bas à gauche) et la centrale de distribution de State Street Station en courant continu (en bas à droite). Les réseaux de distribution urbain ne sont pas dessinés. Pour chaque station, le schéma figure les fils électriques en traits foncés et le reste du système en pointillés. Dans le bloc correspondant à la Farmington River Station, on reconnaît en pointillés la machinerie (turbines, générateurs, axes et câbles) et l'appareillage électrique (transformateurs élevant la tension de 500 V à 10 000 V comme indiqué sur la figure).

Une fois arrivé à Pearl Street Station, le courant subit de nouvelles transformations avant d'être distribué. Des transformateurs abaissent sa tension à 2,4 kV et des déphaseurs le font passer de triphasé à diphasé (Hospitalier et Bainville 1901, p. 21). Pearl Street Station est doublement *centrale* dans le système HELCO, géographiquement par rapport au réseau physique, stratégiquement par rapport à la distribution électrique. Ce nœud central est multifonctionnel. La station centrale peut recevoir, générer, transformer, stocker, réguler et

distribuer de l'énergie électrique. Pearl Street Station reçoit l'électricité de l'usine hydroélectrique de Farmington mais en génère également. Pour ce faire, elle couple une machine à vapeur Copper-Corliss de 1,2 MW de puissance couplée à une dynamo génératrice Westinghouse de 0,6 MW. Le couple machine à vapeur-dynamo est relié au tableau de commande de la centrale. Il est activé comme auxiliaire de l'usine hydroélectrique dans trois cas de figure : chaque jour, en heures de pointe, lorsque la puissance nominale du barrage n'est pas suffisante pour répondre à la consommation maximale ; en été, lorsque le faible débit de la rivière ne permet qu'une production de douze heures par jour ; en cas d'urgence imprévue si l'usine hydroélectrique stoppe sa production pour faire face à un problème technique. La machine à vapeur peut actionner, en outre, deux générateurs de 200 kW pour alimenter une ligne de tramway en banlieue. Toute cette machinerie (machine à vapeur et générateurs) est rangée le long de l'arbre de transmission comme le montre le dessin en pointillés, à droite dans le bloc Pearl Street Station de la figure 4.7. Le courant principal sortant de la centrale sert à alimenter deux réseaux commerciaux de distribution, le premier en courant alternatif monophasé sous 1,2 kV pour l'éclairage à lampes et à arc électriques et le second en courant alternatif diphasé sous 2,4 kV pour le travail des moteurs électriques.

On le voit sur cet exemple : la régulation des réseaux électriques a d'abord été assurée par des couples auxiliaires, machine à vapeur-générateurs, mis en marche à la demande lorsque la génératrice principale ne produisait pas assez de puissance pour suivre la courbe de consommation. Par la suite, à partir de 1890 en Europe et de 1895 aux États-Unis, les gestionnaires de centrales commencent à incorporer des batteries de stockage pour assurer la régulation électrique des réseaux de distribution (Treadwell 1898, p. 140-144). Si son ami Thomas Edison ne croit pas aux batteries de stockage, A. C. Dunham est plus enthousiaste et suit la tendance européenne. Dès 1883, il « avait rêvé, écrit Weaver (1969, p. 72), du jour où la puissance hydroélectrique pourrait être produite tout autour du cadran (*'round-the-clock*) et stockée durant les "creux" pour un usage durant les "pointes" ». Le stockage d'énergie part bien d'un désir de production permanente pour un capitaliste comme Dunham. Il rend compte d'une optimisation des temps de production et d'une synchronisation de la production sur la consommation. Sa fonction est double. En cas d'urgence, le stockage lisse les effets négatifs d'une panne de génératrice. Au jour le jour, il répond plus rapidement aux incertitudes de la courbe de charge et optimise ainsi les réserves d'énergie en termes économiques. Il répond également aux désirs des ingénieurs et des techniciens d'avoir plus de souplesse d'opération et de tranquillité de gestion dans le quotidien d'une centrale électrique (Edgar 1895).

C'est le rôle de la troisième station, la State Street Station, d'assurer la régulation électrique du réseau HELCO à partir de 1896. Elle a été conçue et fabriquée par la Electric Storage Battery Company de Philadelphie. Elle est équipée de deux circuits équivalents de 65 cellules électrochimiques, formant deux batteries géantes. Ce dispositif de 0,4 MW de puissance et de 2 MWh d'énergie représente la plus grande capacité de stockage électrique aux États-Unis jusqu'en 1898 lorsque la Philadelphia Edison Company la dépasse (Treadwell 1898, p. 168). Il est représenté dans le bloc de droite de la figure 4.7 par des séries de boîtes contiguës en pointillés. La cellule de base est de type plomb-acide sulfurique de forme rectangulaire (60 cm, 120 cm, 150 cm). Chaque circuit a une capacité normale de 1 700 ampères pendant cinq heures. L'ensemble pèse 300 tonnes dont 90 tonnes pour le seul acide sulfurique. Le rôle des deux batteries géantes est double : régulation instantanée et équilibrage journalier. En heures creuses, elles sont chargées par l'électricité venant de la Pearl Street Station, après un abaissement de tension d'un facteur dix par des transformateurs rotatifs, de 2,4 kV à 240 volts, afin d'adapter les tensions de charge au nombre de cellules électrochimiques en série. Un tableau général de distribution permet de gérer les étapes de charge et décharge des batteries.

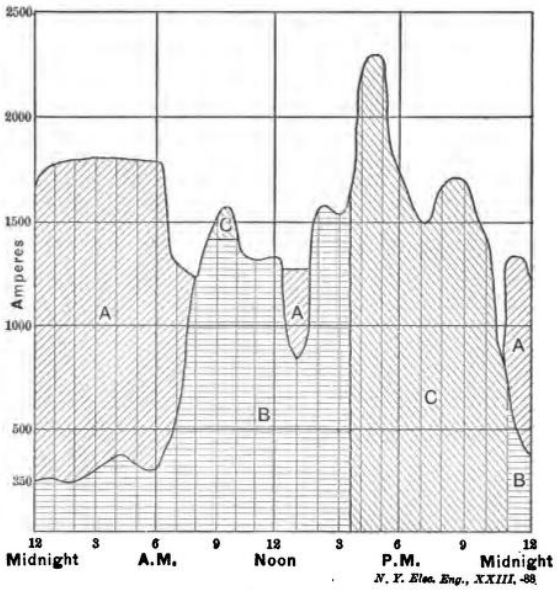

Figure 4.8 – Courbe de charge effective du réseau de Hartford, 12 décembre 1896 (Treadwell 1898, p. 157)

Dans l'article du (Scientific American 1897, p. 234) d'octobre 1897, William L. Robb et Robert W. Rollins expliquent le rôle des batteries de stockage en commentant la courbe de charge d'un jour ouvrable en saison froide, le 12 décembre 1896. Absente de l'article, la courbe de charge est publiée l'année suivante par Augustus Treadwell (Treadwell 1898, p. 156-157) assortie d'une explication du fonctionnement journalier. Elle est reproduite sur la figure 4.8. Durant la plage B, de 23 heures à 15h30, la production hydroélectrique à Rainbow sur la rivière Farmington répond à la courbe de charge. La demande de puissance est faible durant la nuit (350 ampères) puis augmente de 6h à 8h du matin pour atteindre 1 500 ampères en journée. Elle se répartit entre l'éclairage et la force motrice. L'éclairage concerne les habitations individuelles et les rues publiques lorsqu'il fait nuit ainsi que l'éclairage des hangars industriels sombres même en journée. Une puissance motrice de 0,4 MW est réservée pour la propulsion du tramway en ville tandis que le reste de puissance alimente des machines électriques de l'industrie. Lorsque la demande est faible, le surplus de puissance est utilisé pour charger les batteries de stockage de State Street Station. Ceci est représenté par les plages A : la nuit surtout (23h-8h) et durant la pause déjeuner (12h15-13h45). Les batteries entrent en action durant les plages C, pour lisser le pic du matin autour de 9h et pour répondre à toute la demande de 15h30 à 23h, dont le très fort pic de consommation entre 16h et 17h (autour de 2 250 ampères). La réserve d'électricité stockée dans les batteries correspond à environ 2 MWh, ce qui permet d'alimenter plus de 4 000 lampes à incandescence pendant 8 heures. L'introduction de l'hydroélectricité modifie donc sensiblement le profil de la figure 4.4 correspondant à un réseau de production de type thermoélectrique. En pratique, l'économie industrielle de HELCO est rendue plus compliquée encore par les rythmes saisonniers. La courbe de charge d'un jour de décembre correspond à un régime hydraulique de hautes eaux. Durant l'étiage estival (basses eaux), Pearl Street Station sert aussi à générer de l'électricité grâce au couple machine à vapeur-dynamo. On aboutit ainsi à une recomposition des profils des figures 4.4 et 4.8.

Le 6 septembre 1897 un feu détruit l'usine hydroélectrique de Rainbow sur la rivière Farrington et provoque une panne électrique à Hartford (Weaver 1969, p. 74-75). Il semble qu'une vingtaine de minutes seulement sont nécessaires pour que les machines à vapeur prennent le relais. La batterie de stockage n'a, en revanche,

pas pu lisser l'incident. Elle n'est pas ce régulateur infaillible du système électrique. L'incident coûtant 70 000 dollars en frais de reconstruction (en partie couvert par les assurances), A. C. Dunham décide la construction d'une seconde usine hydroélectrique à Tarrifville, cinq kilomètres en amont du barrage de Rainbow. Robb, Rollins et Dunham travaillent à ce projet durant l'hiver 1897-1898. Ils dimensionnent un barrage de 76 mètres de large et 9 mètres de haut en béton produisant 0,75 MW. Le chantier, confié à l'Engineering Contract Company de New York, dure jusqu'à l'automne 1899 et coûte 175 000 dollars. La Hartford Electric Light Company dispose alors de trois centrales de production, deux hydroélectriques à Rainbow et Tarrifville et un thermoélectrique à Pearl Street. Elle produit ainsi et distribue 2,7 MW de puissance alimentant 77 000 lampes à incandescence – environ une par habitant – dans les habitations et un millier d'arcs électriques pour éclairer les rues, les entrepôts et les usines de la ville. Elle peut aussi prendre en charge l'électrification progressive de l'industrie qui se dote de machines électriques de puissance. En vendant l'électricité au prix (modique) de la vapeur, la Hartford Electric Light Company conquiert des clients industriels en journée au moment des heures creuses d'éclairage (Weaver 1969, p. 76). Son système de batteries de stockage lui permet, en outre, d'emmagasiner l'électricité des heures creuses pour les vendre en heures de pointe du début de soirée (cf. 4.4). Le pari économique est réussi puisque la Hartford Electric Light Company passe d'un capital d'un demi-million de dollars en 1893 à deux millions en 1899 (Weaver 1969, p. 77).

Ainsi, le réseau de la Hartford Electric Light Company montre comment la force hydraulique du fleuve et le stockage par batteries peuvent être couplés pour augmenter la production électrique durant les régimes de hautes eaux et pour réduire la consommation de charbon durant les régimes de basses eaux. L'optimisation économique relève ainsi d'une régulation locale sur des rythmes journaliers et saisonniers.

4.3 Écologie politique de la houille blanche au début du xx^e^ siècle en France

À la même époque, de l'autre côté de l'Atlantique, plusieurs débats d'économie politique interrogent le déploiement économique et l'encadrement juridique de la houille blanche dans un contexte industriel dominé par la houille noire. Une controverse implique en particulier un professeur d'économie, Charles Gide, un ingénieur polytechnicien, A. Audebrand, et un professeur de physique amateur de droit, Bernard Brunhes (cf. 1.6.4). Je le prends comme un nœud de « convergences et similitudes signifiantes », selon l'expression d'Annie Petit (1990, p. 75), pour comprendre les ressorts de l'économie politique de l'énergie et de son stockage au tournant du xx^e^ siècle. Ce débat contradictoire et interdisciplinaire sur la production, la distribution et la consommation d'électricité hydraulique rend compte d'enjeux multiples d'ordres économiques, juridiques, politiques et culturels de l'industrie énergétique de la iii^e^ République, dans un contexte dominé par le libéralisme économique (cf. 2.2.3).

La controverse se déroule entre mai 1904 et novembre 1905. Elle présente deux ensembles d'échanges formés par une conférence initiale publiée, Gide puis Brunhes, à laquelle répond Audebrand par une lettre publiée dans les journaux concernés [16]. Je n'étudierai pas cette controverse de manière chronologique ou sociologique. Ce qui m'intéresse plus ici, ce sont les traits saillants qui ressortent de cette controverse en termes

16. La première conférence, intitulée *La houille noire et la houille blanche*, est prononcée par Gide (1904a) à l'université de Paris. Tenue en mai 1904, elle est publiée en juin dans *La revue technique* puis republiée en octobre dans *La Houille blanche* assortie de la lettre d'Audebrand (1904a). La deuxième conférence, intitulée « Houille blanche, déboisement et droit de propriété », est prononcée par Brunhes (1905a) devant la Société populaire d'économie sociale de Lyon. Tenue en février 1905, elle est publiée en mars-avril dans *La Revue de Fribourg*, puis partiellement republiée en octobre dans *La Houille blanche*. Un premier commentaire d'Audebrand est publié en mai 1905 dans le *Bulletin mensuel du Syndicat des forces motrices hydrauliques* publié à Grenoble sous le titre « Usez, n'abusez pas ». Suite à une réponse de Brunhes (1905b) dans *La Houille blanche* d'octobre, Audebrand (1905) effectuer une seconde mise au point dans la même revue le mois suivant.

d'économie politique de l'énergie au début du XXe siècle. J'en identifie quatre qui seront traités successivement : organisation économique et sociale d'une usine hydroélectrique ; réflexions sur la législation et problèmes d'administration des rivières ; constitutions d'espaces politiques de la houille blanche ; construction d'univers mentaux qui reconfigurent les relations entre culture et nature.

4.3.1 Micro-économie et division du travail dans les usines hydroélectriques

Premièrement, la controverse soulève des enjeux de micro-économie et d'organisation du travail au sein d'une usine hydroélectrique. La formulation des enjeux est imprégnée des positions sociales et idéologiques des trois auteurs. Ingénieur à Grenoble, Audebrand a publié de nombreux articles sur le sujet dans *La Houille blanche*. Il adopte une posture d'expert technique, qui cherche à rectifier « certaines assertions erronées » du « savant professeur » dans la « première école de droit » française. Il revendique également un statut technocratique, en indiquant sa formation polytechnicienne et en signant « commandant Audebrand » (étant sans doute officier de réserve après son passage à Polytechnique). Par ses deux postures, technicienne et technocrate, il renforce son capital symbolique en l'absence de reconnaissance sociale plus importante. Gide, quant à lui, est un universitaire reconnu, occupant une chaire d'économie à la faculté de droit de Paris, et un militant socialiste, théoricien et praticien de la coopération et de la solidarité en économie. Il m'apparaît ici comme un technologue, rappelant qu'il n'est « pas technicien » et n'entrera pas « dans des chiffres », mais analysant la technique en société. Sa conférence est qualifiée par Audebrand (1904a, p. 319) de « profession de foi étatiste et communiste ». Le commandant de son côté se dit libéral, se montre nationaliste et défend le progrès technique en société. À propos de leurs échanges, leur contemporain, lui aussi universitaire engagé à gauche, Brunhes (1905a, p. 19) parle d'une « controverse récente » mettant en scène « l'état d'esprit "libéral" opposé à l'esprit "étatiste" ». Ce raccourci est ambigu sur la position politique de Gide, plus intéressé par les associations coopératives que par l'organisation étatique.

Gide (1904a, p. 318) disqualifie la houille noire parce que la combustion du charbon « dépense à la fois le capital et les intérêts ». En écho lointain aux débats sur la pénurie de charbon des années 1860 (cf. 3.1.2), il ajoute : « Un jour viendra où ces coffres qui contiennent nos trésors miniers seront vides ». À l'inverse, la force des rivières n'utilise, selon lui, « que le revenu » parce que « le cycle [...] indéfiniment » recommencé des saisons reconstitue la puissance motrice (Gide 1904a, p. 318). Un parallèle est ainsi tracé entre la phénoménologie de la matière et la pensée de l'économie. Gide oppose le stock limité de charbon, un capital en constante décroissance, et le « réservoir de force » hydraulique, un capital en constant renouvellement. Ainsi, lorsque « le capital de premier établissement est amorti, la houille blanche travaille presque gratuitement ». Gide s'étonne alors que seulement 5 à 6 % du potentiel de puissance hydroélectrique soient installés en France. Mais, rétorque Audebrand (1904a, p. 319), la houille blanche n'est pas une « ressource » gratuite. La conversion hydroélectrique impose des remplacements, réparations, entretiens, impôts et salaires. Ces « dépenses [... sont d'autant plus] lourdes avec des réseaux électriques étendus ». Audebrand explique le faible pourcentage d'équipement par l'aspect récent du domaine : 20 ans à peine. Il lie l'essor industriel à venir à l'entreprise privée si la liberté individuelle est préservée par un *statu quo* législatif (Audebrand 1904a, p. 319).

À l'inverse, Gide voit dans la propriété privée un facteur d'immobilisme, expliquant le faible équipement hydroélectrique de la France. Des « spéculateurs, les uns pisteurs, les autres barreurs » achètent des terrains bons marché à proximité des chutes d'eau et attendent que les prix montent (Gide 1904a, p. 318). Gide comme Brunhes réclament un changement législatif pour limiter la spéculation des « accapareurs » et des « barreurs de chute ». Tous deux font plus confiance dans la collectivité que dans l'intérêt privé. Gide dessine une autre

forme d'organisation des usines que la division du travail capitaliste qu'elle soit libérale ou étatique. À propos de « la petite industrie » en difficulté, à laquelle la houille blanche pourrait fournir une puissance à faible coût, Gide (1904a, p. 318) critique son remplacement par « ce que l'on appelle actuellement le travail à domicile » imposant des « journées interminables ». Ses préférences vont à une « révolution sociale » (Gide 1904b). Une fois que fermes, usines, chemins de fer, banques et magasins seront passés du contrôle de la bourgeoisie à celui du peuple, il faudra travailler en « association coopérative ». Audebrand ne saisit pas la critique radicale de Gide, ni de l'entreprenariat individuel, ni de la bourgeoisie industrielle. Il rapporte son approche coopérative et solidaire à la constitution d'un « monopole exclusif » d'État conduisant « à l'absurdité, au désordre, à la misère pour tout le monde » (Audebrand 1904a, p. 320). Pour lui, l'action de l'État au contraire doit être minimale.

4.3.2 Droit des rivières et rôle législatif de l'État

Le deuxième enjeu de la controverse se situe justement au niveau législatif, arbitré par l'État, d'aménagement énergétique des rivières. De vifs débats se déroulent en France et en Suisse sur « toutes les questions qui touchent au droit d'appropriation et d'exploitation des chutes d'eau » (Brunhes 1905a, p. 1-2). En France, les rivières navigables et flottables concernent le droit public de concession pour une durée déterminée alors que les « cours d'eau ni navigables ni flottables [...] relève[nt] de la propriété des riverains » (Courtecuisse 2012, §23-29). Mais, les conflits d'usage autour de l'équipement hydroélectrique des cours d'eau font prendre conscience à l'administration des Eaux et Forêts des intérêts économiques en jeu. La houille blanche peut même être considérée comme aussi stratégique pour « l'avenir de l'industrie française » que le transport ferroviaire, ce qui légitime l'intervention de l'État (Descombes 1914, p. 335). Elle est orientée, par l'administration des Ponts et Chaussées, vers le régime de concession par référence au secteur des mines et des chemins de fer.

Gide et Audebrand refusent tous deux l'idée d'une concession de l'État mais pour des raisons différentes. Gide y est doublement opposé pour la houille blanche. Il y est opposé de manière générale car il considère toute « richesse » de la nature comme une « propriété collective, publique », qu'il s'agit d'instituer par une loi (Gide 1904a, p. 318). Il y est encore plus opposé dans le cas de la houille blanche que, à l'inverse du processus d'épuisement du charbon, le cycle annuel de renouvellement de la force hydraulique induirait une concession littéralement « perpétuelle » (Gide 1904a, p. 318). Audebrand quant à lui est opposé au système de concession de l'énergie. Il critique le projet de loi Baudin-Dupuy visant la « nationalisation des puissances hydrauliques de 100 chevaux et au-dessus », dont la conséquence serait une « glaciation absolue des cours d'eau actuellement encore non classés » (Audebrand 1905, p. 53). De manière générale, il s'oppose à l'intervention de l'État dans l'administration des rivières : la « mainmise [de l'État] serait une mesure néfaste. Il n'y aurait plus qu'un barreur de chute en France, l'État, qui, en l'espèce, mal outillé pour le bien, serait mieux armé pour le mal. » (Audebrand 1904b, p. 54). Ce jugement de valeur est conforme à l'idéologie libérale. Audebrand (1904b, p. 55) résume ainsi le rôle principal qu'il octroie à l'État en économie : « assurer l'ordre et la sécurité en maintenant chacun dans son droit, sa liberté » afin de protéger l'entreprise individuelle.

Entre la non-intervention de l'État pour Audebrand et sa dissolution dans des coopératives pour Gide, Brunhes occupe une position intermédiaire. Il juge « la conception "libérale" » de Leroy-Beaulieu et Audebrand « insuffisante et incomplète » (Brunhes 1905a, p. 19 , 28). Il suggère qu'une meilleure législation pourrait résoudre « deux problèmes connexes, mais pourtant distincts, celui de la restitution et du maintien des forêts d'une part, celui de la protection des terrains à ruissellement non boisés d'autre part » (Brunhes 1905a, p. 30). Sa réflexion est influencée par la lecture de deux spécialistes français de droit administratif : Pierre Buffault et Léon Michoud. Celui-ci est plutôt favorable à une approche libérale de la production hydroélectrique

(Courtecuisse 2012, §20), mais Brunhes s'inspire surtout de son interprétation des droits autrichien et suisse, où coexistent droit romain et droit germanique. Brunhes (1905a, p. 2) retire de ces lectures une critique de la « conception absolue du droit de propriété » en France, héritée du seul droit romain. Il distingue ainsi un « intérêt public », souvent réduit à celui de l'État, et un « intérêt social », qui renvoie à de multiples intérêts de la société. Il entrevoit ainsi un moyen de dépasser les deux « absolutismes contradictoires » qui sont, en France, « la propriété privée » du côté des libéraux et la puissance de l'État, issue de la République de 1789 (Brunhes 1905a, p. 25-28).

Le régime de concession est adopté en France pour la houille blanche sur le modèle des concessions minières : pour la distribution d'électricité d'abord, par une loi du 15 juin 1906 ; pour la production hydroélectrique ensuite, sur les cours d'eau et les étendues océaniques, par la loi Perrier du 16 octobre 1919 (Caron et F. Cardot 1991, p. 501). Si aucune des positions de Gide, Brunhes et Audebrand ne s'accorde avec le régime de concession retenu, leur controverse montre l'importance des règles juridiques dans l'organisation sociale du travail et l'établissement de rapports de force économiques. En tant que maître du jeu, l'État de droit choisit qui joue en premier.

4.3.3 Espaces politiques de la houille blanche dans l'aménagement rural

La controverse expose au moins quatre options législatives dans l'économie de la houille blanche : la concession par l'État, adoptée par le Parlement ; la non-intervention de l'État, défendue par les libéraux dont Audebrand ; la prise en compte de l'intérêt social, y compris des générations futures, pour les frères Brunhes ; la dissolution de l'État au profit de coopératives productrices et commerciales selon Gide. Malgré leurs différences idéologiques, chaque option situe l'industrie de la houille blanche dans un espace socio-politique au sens d'une « distribution des pouvoirs et des investissements imaginaires qui s'y attachent » (Rancière 1998, p. 38). Malgré des rôles différents octroyés à l'État, aucune option n'échappe au cadre national pour penser l'économie de l'énergie.

Les pays étrangers peuvent être convoqués comme des rivaux économiques : l'Italie et la Suisse dans le domaine hydroélectrique pour Audebrand (1904b, p. 51). Ils peuvent aussi être pris comme des modèles juridiques : le droit germanique de l'Autriche et de l'Allemagne contre le droit romain de la France, selon Brunhes (1905b, p. 247). Les considérations de macro-économie sont ainsi façonnées par le cadre idéologique de l'État-nation. Dans son bilan économique et géographique de la houille blanche en France, Audebrand (1905, p. 51-52) note au passage le potentiel hydraulique d'une dizaine de pays industrialisés en Europe et Amérique, dont certains pourraient concurrencer la France en cas de nouvelles tendances productives dans l'avenir. Plus radical dans son imaginaire de l'économie future, Gide (1904a, p. 318) fait l'hypothèse d'un équipement complet de la houille blanche et un épuisement progressif de la houille noire à l'échelle du monde. Ceci ouvre la possibilité d'un « changement d'équilibre » complet des sources d'énergie et d'un nouvel ordre économique « des puissances sur le marché » puisque « les pays qui ont la plus grande richesse, grâce à la houille noire, sont les plus pauvres en houille blanche et inversement ».

Ces analyses internationales prennent le cadre national comme horizon politique de l'économie de l'énergie. Même le plus libéral des trois auteurs, Audebrand (1904b, p. 39-44) dresse un bilan économique et géographique de la « la houille blanche en France ». Il établit une typologie des massifs montagneux français en fonction des puissances moyennes installées et du potentiel hydraulique. Trois niveaux de puissance des massifs sont retenus : faible, Morvan, Bretagne et Massif central, au-dessous de 2 chevaux-vapeur par kilomètre carré ; moyenne, Vosges, Jura, Pyrénées, entre 2 et 3 chevaux-vapeur ; fort, Alpes, au-dessus de 3. À partir d'une

analyse quantitative précise, Audebrand (1904b, p. 55) insiste sur « le brillant avenir économique réservé » à la France. Il suppose ainsi un doublement de la puissance installée à condition que le gouvernement assure un cadre législatif favorable à l'entreprise commercial et industrielle. Il milite contre l'idée du projet de loi Baudin-Dupuy d'une « nationalisation des puissances hydrauliques de 100 chevaux et au-dessus » (Audebrand 1905, p. 53). Il critique aussi les évolutions législatives avancées par Brunhes et Gide et attend du Parlement le maintien d'un *statu quo*.

Malgré son libéralisme, Audebrand (1904b, p. 55) reconnaît un second rôle à l'État, d'aménagement du territoire rural : « persévérer dans la sollicitude avec laquelle il reconstitue, développe et aménage, par ses forestiers d'une part, par ses agents agricoles de tout rang de l'autre, la forêt, le pré et le champ français ». L'aménagement des montagnes par les forestiers fournit, en effet, aux « industriels de houille blanche du Dauphiné et de la Savoie [...] des eaux toujours plus abondantes, plus régulières, et plus limpides, trois avantages des plus importants pour la nouvelle industrie » (Audebrand 1904b, p. 55). Puissance, régularité, propreté : trois vertus d'une montagne administrée pour l'économie industrielle de la houille blanche.

Ainsi, la question de l'aménagement des territoires ruraux est recomposée au début du XX^e^ siècle par l'essor de la houille blanche dans le cadre de la gestion des forêts et des montagnes. Lorsque Brunhes intervient dans la controverse entre Gide et Audebrand, il est préoccupé par un problème de « dégradation des sols » par manque d'entretien ou surexploitation de terrains ruraux. Il s'intéresse depuis 1903 à la « dégradation des pentes du Puy de Dôme », au sommet duquel se trouve l'observatoire qu'il dirige (Brunhes 1905b, p. 246-247). Il situe la cause de cette dégradation pédologique dans une pâture trop intense des moutons, puis, par rebond, dans un système séculaire de copropriété aboutissant à une surexploitation présente des sols. À partir de l'étude d'un cas localisé, Brunhes formule un problème politique général. Sa conférence de février 1905 à Lyon, intitulée « Houille blanche, déboisement et droit de propriété », défend la thèse qu'une conception trop stricte du droit de propriété entrave à la fois « l'exploitation [des] richesses hydrauliques [et] l'œuvre de conservation et de restauration [des] terrains de montagne » en France (Brunhes 1905a, p. 2). Or, l'essor de la houille blanche dépend également de l'aménagement rural car l'« des conséquences les plus regrettables de cette destruction des forêts et de la dégradation des terrains de montagne a été le trouble apporté au régime de nos fleuves » (Brunhes 1905a, p. 29).

À partir de son expertise de géologue et de son expérience de riverain, Brunhes arpente le terrain juridique pour trouver une solution à ce problème écologique et humain. Il propose d'introduire dans la loi française la possibilité d'une « négation du droit à l'abus » de propriété. Ce « devoir de propriété », symétrique du droit de propriété (Brunhes 1905a, p. 33), préviendrait un propriétaire « de faire de sa propriété un usage nuisible à la société » (Brunhes 1905b, p. 246). Il constitue un meilleur moyen que l'expropriation, seul recours des Eaux et Forêts, pour lutter contre le déboisement (Brunhes 1905a, p. 31-33). Car, malgré « sa compétence, son intelligence et son zèle désintéressé pour le bien public », l'administration des Eaux et Forêts a pu faire de l'expropriation « idéal » alors que c'est une solution très onéreuse. L'enjeu est de taille pour Brunhes. Comment « empêcher, à coup sûr, nos 6 millions d'hectares de forêts privées, et [...] reboiser la plus grande partie, ou de garantir tout au moins nos 6 millions de terrains incultes de montagnes, sans faire acheter toute cette surface immense par l'État » ? Avec le devoir de propriété, Brunhes (1905b, p. 247) étend, de la sphère économique à l'environnement naturel, les notions de « valeur » et d'« utilité générale » pour la société présente et future.

Cette introduction d'une morale collective dans le droit français ne plaît évidemment pas aux libéraux. Comme pour les autres « interventions législatives et administratives », Audebrand (1905, p. 264) interprète la restriction du « droit à l'abus » comme un potentiel « abus de pouvoir » s'exerçant sur les individus au nom de

principes factices, tels que le « salut public » ou le « fait du prince ». Il déplace ainsi la responsabilité collective du cadre législatif vers les pratiques de terrain. C'est, selon lui, aux fonctionnaires d'accentuer la « surveillance » des espaces ruraux et aux juges de faire appliquer le droit existant de manière « équitablement sévère ». Quelles que soient leurs orientations idéologiques, les trois protagonistes de la controverse sont préoccupés par les manières d'habiter un territoire. Ils montrent ainsi la porosité des frontières entre nature et culture en régime technicien que ce soit par l'aménagement concret des montagnes (4.3.4) ou par les imaginaires collectifs (4.3.5).

4.3.4 Espaces culturels et artificiels : éduquer et aménager la montagne

A. Audebrand, B. Brunhes et C. Gide se retrouvent sur une autre idée : la nécessité de transformer les mœurs par un travail d'éducation populaire, pour arrêter la dégradation des sols d'une part, pour mettre en mouvement l'ordre social d'autre part. Mais, ils ne placent leurs recommandations, ni sur les mêmes groupes sociaux, ni sur les mêmes règles éducatives. Pour B. Brunhes (1905b, p. 246), la priorité est à l'« éducation du propriétaire ». C'est l'un des objectifs de la Société forestière française des amis des arbres, dont il est proche à Clermont-Ferrand, d'« inculquer le principe que chacun n'a pas le droit de faire de sa propriété ce que bon lui semble » (Brunhes 1905a, p. 37). Audebrand (1905) souhaite étendre cette « éducation spéciale » à toute la société, en ciblant les milieux administratifs et juridiques d'une part, l'opinion publique d'autre part. Sa conception est celle d'une logique descendante, typique de la « démocratie technique » (cf. 1.3.4). Il s'agit d'« éclairer », d'« endoctriner » et d'« édifier [...] l'opinion publique » afin que « *M. Tout le monde* [... se fasse] une opinion personnelle ». Gide rejoint les deux autres sur l'importance de l'éducation pour transformer les mœurs mais son approche est plus collective. Il préconise l'« éducation économique des travailleurs » à travers les « connaissances techniques » et de « hautes facultés morales » (Gide 1904b, p. 748). L'objectif n'est pas individualiste comme chez Audebrand ou dirigé contre la classe des propriétaires comme chez Brunhes mais destiné à la réappropriation collective et l'émancipation de la « classe ouvrière » vis-à-vis de « l'ordre social » dominé par la bourgeoisie.

Chacun des trois protagonistes participe d'ailleurs à ce travail éducatif devant différents publics : milieux universitaires et socialistes pour Gide et Brunhes, milieux techniciens pour Audebrand. Celui-ci participe à la constitution autour de Grenoble d'un « district industriel » de la houille blanche entendu comme « un mouvement de renforcement réciproque de la ville, de l'université et de l'industrie », selon l'analyse d'Anne Dalmasso (2002, p. 232). Dans cette « atmosphère industrielle » (Alfred Marshall) où circulent savoirs et savoir-faire (Lescure 2002, p. 8), Audebrand côtoie au tournant du XX^e^ siècle des industriels comme Édouard Rey ou Aristide Bergès, qui a forgé le concept de « houille blanche », des technocrates comme René de La Brosse, ingénieur en chef du Service des forces hydrauliques, Louis Barbillon, directeur de l'Institut électrotechnique de Grenoble, ou encore l'ingénieur Dusaugey (Dalmasso 2002, p. 235). Il est également actif dans l'éducation populaire au profit de la houille blanche. Il rejoint l'Association centrale pour l'aménagement des montagnes (ACAM), fondée en 1904 à Bordeaux, par un autre polytechnicien, ancien ingénieur en chef des manufactures de l'État, Paul Descombes (Fabre 1913, p. 331). L'association, financée par souscriptions privées et aides publiques, promeut l'aménagement pastoral et forestier et l'essor de la houille blanche dans les montagnes. Son action est triple : financière, législative et éducative. Elle fédère le capital nécessaire aux reboisements locaux en œuvrant auprès « des associations, des mutualités, des compagnies d'assurances, des caisses de retraites et des caisses d'épargne », lutte contre les « obstacles dressés par la législation civile et par la législation fiscale contre le reboisement et la conservation forestière » et mène un travail d'éducation populaire auprès des

montagnards (Descombes 1914, p. 331-332). Descombes (1914, p. 313) perçoit l'hydroélectricité comme une source d'énergie indéfinie. « La "houille blanche" est devenue la question capitale de l'industrie, car l'homme a trouvé dans le travail hydro-électrique la première solution permanente pour la production des forces motrices nécessaires à son activité, et c'est à juste titre que le XXe siècle est appelé "le siècle de l'Eau" [Maurice Schwob] ». Également convaincu par l'aménagement industriel et énergétique des montagnes, Audebrand établit une antenne dauphinoise de l'ACAM à Grenoble en 1906.

La Société forestière française des amis des arbres et l'Association centrale pour l'aménagement des montagnes s'inscrivent dans un contexte plus large correspondant à la mise en place de « politiques de la nature » au début du XXe siècle à la croisée de l'essor du tourisme rural et de la conservation agro-pastorale des campagnes. Le Touring Club de France, qui revendique 100 000 adhérents en 1907, est particulièrement actif pour la défense des paysages et des forêts (É. Cardot 1907, p. 74). Son action militante passe, comme l'ACAM, par l'éducation populaire, l'action locale et l'activité législative (Schut et Delalandre 2016, p. 232-234). Elle s'appuie sur des initiatives préexistantes telles que les « sociétés scolaires pastorales-forestières » organisées par la figure tutélaire de l'instituteur de la IIIe République. On en dénombre environ 200 au moment où le Touring Club entre en action (É. Cardot 1907, p. 80). Le Touring Club de France met en œuvre une techno-politique de la nature à travers l'alliance d'élus, de technocrates et de citoyens. Sa Commission des pelouses et forêts est composée de deux sénateurs (Auguste Calvet, Jean-Honoré Audiffred) et de plusieurs hauts fonctionnaires des administrations techniques : Descombes, Léon Dabat (directeur Hydraulique agricole), Émile Cardot (inspecteur Eaux et Forêts) et deux anciens conservateurs des Eaux et Forêts. Un *Manuel de l'arbre pour l'enseignement sylvo-pastoral dans les écoles*, écrit par Cardot, est reproduit à 50 000 exemplaires grâce au financement du Touring Club et distribué dans les écoles primaires et normales de la IIIe République pour transmettre des « notions d'économie forestière et pastorale », avec le soutien des ministères de l'Instruction publique et de l'Agriculture.

La représentation spatiale qu'il donne de l'économie montagneuse est frappante. Elle peut être saisie par le concept de « symbiose industrielle » utilisée aujourd'hui pour étudier l'économie d'un territoire de taille moyenne, ou méso, intermédiaire entre la micro et la macro-économie, structuré par des coopérations entre filières industrielles, en partie complémentaires, et par des politiques industrielles, en partie issues de l'État (Diemer 2016, p. 81-83). Cardot (1907, p. 70-71) choisit l'échelle méso d'une vallée de montagne ou d'un massif entier pour indiquer le développement, qu'il voudrait « harmonique », d'industries de transformation des matières premières produites localement par d'autres industries, pastorales (lait, fromages) et forestières (bois, papier). Ceci nécessite une politique d'aménagement du territoire afin de reconstituer les « pelouses et forêts », de mettre en place « une bonne organisation pastorale » et d'exploiter les « réserves de force hydraulique produite par leurs cours d'eau ».

La mise en relation géographique des activités économiques ramène, une nouvelle fois, à la controverse entre Gide et Audebrand. L'un comme l'autre dessine un espace local, formé et orienté par les sources d'énergie. Pour Gide (1904a, p. 317), le « fil à la patte » de la houille blanche, ce réseau électrique de « quelques centaines de kilomètres », est déjà suffisamment étendu et puissant pour faire « remonter » la ville à la montagne. Il imagine ainsi un (re)déploiement de « la grande industrie », dans les vallées de montagne, dans la voisinage des usines hydroélectriques. Audebrand (1904a, p. 320) voit, quant à lui, la houille blanche comme un moyen de « décongestionner les villes » avec un double avantage d'hygiène physique et sociale. Pensant sans doute aux revendications socialistes et communistes qu'il abhorre, il prévoit ainsi que « certains rêves, qui se surchauffent et s'exacerbent jusqu'au cauchemar dans l'atmosphère enfiévrée des grandes villes, de Paris notamment, se

dissiperont au vent des sommets ». Économique, médicale ou sociale, pour Gide et Audebrand, les solutions modernes qu'offre la houille blanche sont multiples pour réenchanter le monde des montagnes et infléchir l'exode des populations rurales. La symbiose territoriale est aussi pensée de manière évolutive par Cardot. La « houille verte », ou bois de chauffage, a jadis fourni la chaleur à de nombreuses usines de transformation qui se sont installées à proximité des forêts : verreries, tuileries, briqueteries, boulangeries, pâtisseries, métallurgie, etc. (É. Cardot 1907, p. 23 , 66-67). Elle a été remplacée au XIX^e^ siècle par l'extraction de « ces forêts souterraines enfouies dans le sol pendant les anciennes périodes géologiques », ou « houille noire », puis, plus récemment, par l'exploitation de la « houille blanche ». Cet *arc-en-ciel des houilles* n'est donc pas synchronique comme celui qui sera dessiné par les techniciens des années 1920 (cf. 5.1), mais diachronique. La métaphore modélise un processus de substitution en histoire industrielle. Le charbon succède au bois avant d'être lui-même remplacé par la force des torrents. Vert, noir, blanc, l'arc-en-ciel aligne sur la flèche du temps trois sources d'énergie caractérisant trois époques successives.

Dans son tableau idyllique des bois et des campagnes, Cardot (1907, p. 62) suggère néanmoins quelques conflits d'usage. La circulation des troupeaux, en particulier lors des transhumances, peut dégrader les sols et les forêts. Pour Audebrand (1907b, p. 171), la transhumance relève d'un déséquilibre économique exogène. C'est « l'exploitation du pré montagneux par un mouton étranger, mouton gascon pour les pâturages des Causses cévenois et quereynois, espagnol pour le pâturage pyrénéen, provençal pour le pâturage alpin ». Le gain financier à court terme pour les communes d'« hospitaliser ces intrus [...] cette armée vorace » dégrade, à long terme, les ressources sylvo-pastorales locales. Aussi, le jugement est sans appel pour le responsable grenoblois de l'Association centrale pour l'aménagement des montagnes. « Nous avons donc le devoir de combattre la transhumance partout où elle se manifeste. » (Audebrand 1907b, p. 172) Son homologue bordelais, Descombes (Descombes 1914, p. 329-331), est aussi très direct dans sa critique des habitants des montagnes : « les montagnards qui vivent de leurs troupeaux sont restés hostiles au reboisement ». Il souligne également les procès induits par les multiples « servitudes indéterminées et occultes » des terrains ruraux : « droits de dépaissance [pâture], de passage, d'affouage [bois de chauffage], de marronnage » lui semblent comme autant d'entraves au reboisement et au déploiement industriel. Ceci justifie une conversion de la « défiance primitive » des montagnards par des « leçons de choses » transmises, avec succès selon Descombes, par sa propre association (ACAM).

Deux autres tensions sociales augmentent en montagne depuis le milieu du XIX^e^ siècle, sous l'effet du transport ferroviaire. Cardot (1907, p. 66 , 70) parle, sans ambage, d'une double « invasion » des montagnes : par l'industrie, à travers l'acheminement des produits manufacturés vers les centres urbains de consommation ; par le tourisme, dû au transport en sens inverse, « des habitants des villes qui viennent chaque été y chercher l'air pur, le repos, la santé, la vue des beaux sites ». Deux associations, dérivées de modèles étrangers, ont renforcé en France le « goût des voyages » (É. Cardot 1907, p. 72-74). La première est issue des montagnes : le Club alpin, établi en 1874, par Xavier Blanc, avocat et homme politique de Gap, et Ernest Cézanne, ingénieur X-Ponts et homme politique d'Embrun. La seconde est fondée en 1890 en région parisienne, par un groupe de cyclistes autour de Paul de Vivie, commerçant et journaliste : le Touring Club de France. L'activité législative du Touring Club aboutit au vote le 3 juin 1913 d'une loi, portée par Audiffred, en faveur de la protection des forêts (Schut et Delalandre 2016, p. 239).

Le rôle de la houille blanche peut paraître ambigu dans ces politiques de la nature. En effet, l'extraction de la force hydraulique fait disparaître certaines des « cascades les plus pittoresques pour les coiffer d'une conduite forcée métallique dévalant la montagne jusqu'à une turbine » (Schut et Delalandre 2016, p. 232). Mais, la filière

hydroélectrique, par son importance économique, est un puissant prétexte pour l'aménagement sylvo-pastoral des montagnes. Audebrand, par exemple, éduque les élèves-ingénieurs de l'Institut électrotechnique de Grenoble aux enjeux agricoles, économiques et esthétiques de l'industrie hydroélectrique dans les montagnes. L'un des couplages centraux est la régulation hydrographique des terrains ruraux : « la forêt et le pré sont déjà un puissant régulateur et que, aidé par le barrage, ils sont un régulateur presque parfait ». Avant même l'édification d'un réservoir, le reboisement et l'engazonnement des vallées de montagne contribuent à la régulation hydraulique des rivières et améliorent d'autant l'extraction de houille blanche au niveau du barrage-chute. Le problème paraît si crucial et urgent à (1904b, p. 55) que ce libéral convaincu n'hésite pas à en confier la gestion à l'État. Il s'agit de « persévérer dans la sollicitude avec laquelle [l'État] reconstitue, développe et aménage, par ses forestiers d'une part, par ses agents agricoles de tout rang de l'autre, la forêt, le pré et le champ français ».

L'aménagement des montagnes par les forestiers et les paysans fournit aux « industriels de houille blanche du Dauphiné et de la Savoie [...] des eaux toujours plus abondantes, plus régulières, et plus limpides, trois avantages des plus importants pour la nouvelle industrie ». L'abondance des eaux indique, en effet, une quantité totale d'énergie exploitable, leur régularité une puissance moyenne commercialisable et leur propreté une durée de fonctionnement utilisable (Descombes 1914, p. 316). Puissance, régularité, propreté sont les trois vertus d'une nature artificialisée pour répondre aux exigences économiques de la civilisation industrielle. Là encore, le libéral Audebrand (1904b, p. 55) réclame une politique publique. À partir du cas exemplaire des Alpes pour l'aménagement des prés et des forêts, il désire que « l'État dirige [... les autres régions] dans ce travail » afin d'augmenter, de régulariser et de nettoyer les régimes hydrauliques des autres massifs et d'intensifier l'exploitation de la houille blanche en France.

Un deuxième mode d'artificialisation de la nature est envisagée pour régulariser l'écoulement fluvial : creuser des réservoirs le long des rivières. Il est envisagé pour prévenir les inondations. Dans ce cadre, la commission dirigée par Alfred Picard (X-Ponts), formée pour réfléchir à la grande crue du bassin de la Seine de 1910, conclut que les travaux d'excavation de plusieurs réservoirs en amont de Paris « entraîneraient une dépense qui paraît en général hors de proportion avec le but à atteindre » (rapport de L. Dabat cité par Descombes 1914, p. 327). Un risque d'inondation future ne constitue donc pas une raison suffisante pour construire un réseau de rétention alors même que les effets de la crue de Paris de 1910 sont juste sous les yeux des rapporteurs. En revanche, l'extraction présente de la houille blanche justifie le coût de construction de réservoirs : « plusieurs réservoirs ont-ils été construits déjà pour régulariser les débits, et leur construction a parfois coûté plus de francs qu'ils n'emmagasinent de mètres cubes » (Descombes 1914, p. 327). Ironiquement, Descombes perçoit la dépense occasionnée par les réservoirs de houille blanche « comme la rançon de l'imprévoyance forestière des générations antérieures » alors qu'il ne fait pas mention d'imprévoyance dans le cas de la commission technocratique dirigée par Picard.

Au début du xx^{e} siècle, les actions publiques et privées d'éducation des populations, d'aménagement des terrains et de développement des usines façonnent une modernité des territoires de montagne. Cette *modernité de la montagne* masque un mépris de classe pour les montagnards eux-mêmes, parfois même une peur pour ces populations incontrôlables, derrière trois images renouvelées des massifs alpins : la forêt bienfaitrice, le paysage touristique et la puissance de la houille blanche. Elle s'organise autour d'un désir de régulation des régimes hydrauliques par l'aménagement des forêts et des prairies et le creusement de réservoirs d'eau. Cette recomposition socio-politique stimule l'essor de complexes industriels dans les Alpes d'abord, puis dans les Pyrénées durant la période 1920-1940 (cf. 5.1.1). Elle rend également compte d'une transformation des univers de la montagne comme espaces naturels artificialisés et comme espaces culturels aménagés. Ce processus déplace

certaines lignes de fracture entre nature et culture et fabrique de nouvelles conceptions de la solidarité, de la géographie physique vers l'écologie sociale.

4.3.5 Économie morale : harmonies et solidarités entre nature et culture

La controverse opposant Gide, Audebrand et Brunhes dessine une économie morale plus large que la houille blanche. Elle révèle les valeurs et les images de l'énergie des sociétés industrielles dans la construction du couple nature-culture. Quels que soient leur statut social et leur posture initiale, les trois protagonistes glissent vers un discours général, une *technologie* dans la mesure où ils inscrivent la technique dans une multitude de sphères d'activités humaines : administrative, artistique, culturelle, économique, éducative, esthétique, historique, juridique, ludique, morale, politique, etc. En cela, ils discutent d'une « économie de la nature » au sens large du XVIII^e^ siècle, analysé par Alain Deneault. Ils portent ainsi un double regard sur le monde, d'une part sur les « relations bonnes entre éléments, entre gens, entre sèmes, entre choses » du monde sensible, et, d'autre part, les « relations escomptées, au sens des finalités, au sens de délibérations sur les fins » du monde psychique (Deneault 2019, p. 9).

Cycle cosmique de la houille blanche

Physicien de formation et enseignant de thermodynamique à l'université de Clermont-Ferrand, Brunhes se place sur le terrain d'une phénoménologie de l'énergie. S'il recourt à des arguments économiques, hygiénistes et esthétiques, sa valorisation de la houille blanche est d'abord justifiée par une cosmologie naturaliste. La « raison plus profonde » de préférer la houille blanche par rapport à la houille noire est que « [l]a combustion du charbon précipite et accélère la *dégradation de l'énergie* dans notre univers » (Brunhes 1905a, p. 3). Au premier principe de la thermodynamique, de conservation de l'énergie, Brunhes ajoute l'idée d'une qualité de l'énergie dans les transformations de chaleur et de travail. Il s'appuie là sur le second principe de la thermodynamique qui, à travers le concept d'entropie, rend compte de l'évolution spontanée de tout système isolé vers plus de désordre. L'énergie « a une tendance invincible à prendre les formes sous lesquelles elle est le moins utilisable » (Brunhes 1905a, p. 4). Par cet énoncé, Brunhes relie la *naturalisation* de l'utilité – via l'entropie et le second principe – à une *moralisation* de l'énergie. La houille blanche est préférable à la houille noire car sa conversion ne dégrade pas l'énergie cosmique mais la renouvelle à l'identique tandis que la combustion du charbon dégrade une partie de l'énergie cosmique. La science thermodynamique flirte ici avec des principes métaphysiques et cosmiques rappelant ceux de William Thomson deux décennies auparavant (cf. 3.1.3). Cette moralisation de la nature justifie son asservissement par l'industrie pour lutter contre son naturel de gaspillage (cf. 5.3.2).

Gide parvient au même choix de la houille blanche mais par un tout autre raisonnement qui rompt avec la cosmologie naturaliste. Dans une conférence aux élans épiques à la faculté de droit de Paris, il se fait poète de l'énergie et chantre de la conversion hydroélectrique (Gide 1904a). Sa politique de la houille blanche au service d'une société solidaire et coopérative est construite sur des métaphores et des analogies, sur des considérations poétiques et magiques. Elle part d'une comparaison des houilles noire et blanche comme deux types de « mines » aux verticalités inversées : « l'une gît à quelques milliers de mètres au-dessous de nous et qu'il faut la remonter, tandis que l'autre tombe de plusieurs milliers de mètres en cascades ». Cette opposition, courante à l'époque, n'est pas seulement poétique. Elle est aussi politique puisque, deux ans plus tard, le parlement français insère la houille blanche dans le même cadre légal et administratif que les mines selon le principe de concession d'exploitation octroyée par l'État. Dans un texte antérieur de 1901, Gide développe une autre comparaison de la houille noire et de la houille blanche conduisant à une analogie entre nature

et culture. « [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 » (cité par Marrec 2018a, p. 89). Les houilles noire et blanche sont ainsi réduites à deux accumulateurs d'énergie. Dans cette vision panthéiste de l'univers, nature et culture sont solidaires l'une à l'autre. Les forces de la nature sont accumulées dans les mines ou les glaciers puis converties par les dispositifs de la culture industrielle. On retrouve la mise en magasin des énergies naturelles des dictionnaires de la deuxième moitié du XIX^e^ siècle (cf. 3.1.1).

Mais, Gide transforme la métaphore en valorisant la houille blanche par rapport à la houille noire. Il introduit une image vitaliste pour qualifier la supériorité de la première sur le seconde comme la vie sur la mort : la houille blanche, par « la force vive qu'elle contient par sa chute [, ...] est vivante, elle nous fait vivre, elle est semblable à nous » tandis que la houille noire est « une chose morte, plus que morte, fossile ; quand elle est brûlée, il ne reste rien d'elle que des cendres, des scories, des gaz ». L'une est une force bondissante, l'autre est une chose enfouie ; l'une est un flux vital, l'autre est un stock fossilisé. Gide souligne ainsi la finitude du charbon, semblable à « un trésor que la nature aurait caché en terre [... et dont les] coffres [...] seront vides » un jour, contrairement à la houille blanche qui devient l'égale des « dieux » : « elle se donne sans se dépenser jamais ; quand elle a fini son travail, elle est intacte, pure et prête à recommencer [...] le ciel va se charger de la redonner en évaporant l'eau pour la faire retomber sous forme de neige sur les montagnes, et le cycle peut recommencer indéfiniment ». Le rapport aux flux et aux stocks d'énergie est ici central. Les réserves de force hydraulique sont reformées de manière continu par les cycles naturels alors que celles du charbon sont dépensées de manière irréversible. La métaphore vitaliste est redoublée par une analogie entre énergie et magie. L'analogie, qui s'appuie sur des identités de couleur, transmet des valeurs morales. À la houille noire est associée « la magie noire ». Or, l'évocation des « esprits souterrains [... a] quelque chose d'un peu diabolique [... et] les forces qui sont en elle sont un peu des revenants [...] des âges préhumains » (Gide 1904a, p. 318). À l'inverse, « la magie blanche », qui « évoqu[e] les esprits familiers, [...] donne un peu de sérénité, de calme : cette paix qui descend des neiges éternelles ».

Comme Brunhes, Gide socialise la nature en moralisant l'énergie. Le vitalisme transféré à la houille blanche de manière métaphorique et sa socialisation positive par analogie avec la magie blanche encadrent un raisonnement analytique d'ordre économique. Là encore, la houille noire est discréditée parce que la combustion du charbon « dépense à la fois le capital et les intérêts » alors que la force hydraulique n'utilise « que le revenu » (Gide 1904a, p. 318). « Lorsque le capital de premier établissement est amorti, la houille blanche travaille presque gratuitement ». Gide s'étonne alors que seulement 5 à 6 % du potentiel de puissance hydroélectrique soient utilisés en France. Il impute la responsabilité aux « accapareurs », achetant les terrains en bord de rivières avec des vues spéculatives, et réclame, pour y mettre fin, une intervention législative afin « que cette propriété collective, publique, soit utilisable » parce que « cette richesse appartien[t] à tous ».

Alors que Gide (1904a, p. 317) rappelle qu'il n'est « pas technicien » et n'entrera donc pas « dans des chiffres », Audebrand, technocrate par formation et par métier, organise son commentaire critique en termes technique (d'ingénierie) et idéologique (progrès et libéralisme). Il récuse la gratuité de la houille blanche comme « ressource » car son industrie impose remplacements, réparations, entretiens, impôts et salaires, des « dépenses [... d'autant plus] lourdes avec des réseaux électriques étendus » (Audebrand 1904a, p. 319). D'autre part, il explique le faible équipement des montagnes françaises, non par des logiques spéculatives, mais par

le caractère récent de l'activité, 20 ans à peine. En enrôlant Jean de La Fontaine, le commandant militaire défend avec vigueur le libéralisme économique : « Que la propriété privée soit seulement menacée, l'eau se figera, et alors : adieu veau, vache, cochon, couvée ! » Quelque mauvais « *barreur de chute* » ne doit pas justifier la remise en cause de « la propriété individuelle » de la *Déclaration des droits de l'homme et du citoyen* de 1789. Une intervention du ministre de l'Agriculture et un vote parlementaire ont avalisé en janvier 1904 un nouveau texte de loi donnant, se réjouit Audebrand (Audebrand 1904a, p. 320), « une solution rationnelle, équitable et libérale » à la gestion des rivières. Au contraire, une gestion de l'industrie par l'État induirait « un monopole exclusif » de production et de consommation, conduisant « à l'absurdité, au désordre, à la misère pour tout le monde ». Ce cauchemar étatique, pour un ingénieur aussi convaincu par « la manière douce, sagement libérale », Audebrand (1904b, p. 55) ne pouvait imaginer qu'il adviendrait seulement dix ans plus tard, dans un situation de crise militaire majeure : la Première Guerre mondiale (cf. 5.2.2).

Habiter en voisins : solidarités sociales et naturelles

Il est possible de repérer un dernier trait saillant partagé par les protagonistes de la controverse sur la houille blanche : celui d'une ligne de solidarité qui se déploie le long des bassins versants, du haut des montagnes aux estuaires océaniques et deltas méditerranéens. La solidarité est d'ordre écologique et économique, même pour un libéral comme Audebrand (1907a, p. 165). « Il y a une solidarité entre tous les riverains d'un cours d'eau et elle ne se limite pas aux cantons où la fantaisie de nos aïeux a changé le nom d'un cours d'eau, elle va du point le plus haut au point le plus bas sans aucune exception. » Ce principe de solidarité est élargi à l'échelle de la planète par Émile Cardot dans *Le Manuel de l'arbre pour l'enseignement sylvo-pastoral dans les écoles*. Le cinquième et dernier chapitre de l'ouvrage, intitulé « Résumé général et applications pratiques », est basé sur l'énoncé d'une « loi de solidarité mondiale » permettant d'assurer l'« harmonie générale qui doit régner à la surface de notre terre ». Cardot présente un schéma de la planète Terre comme ensemble régulé de relations de causes à effets écologiques, solidaires les unes aux autres.

> La régularité du climat, celle du régime des pluies, du débit des sources, du régime des cours d'eau, peuvent être gravement influencées par la destruction des forêts. — Bois et pelouses de montagnes sont également solidaires et la destruction des uns entraîne la dénudation et le ravinement des autres. La ruine des montagnes appelle à son tour la dévastation et la ruine des plaines. L'homme enfin est solidaire de ces transformations. Il en est la victime. Ses cultures, son bien-être, sa santé, son existence même sont compromis ou menacés par elles. (É. Cardot 1907, p. 76)

Cet ensemble régulé ressemble beaucoup à l'image d'un système muni de boucles de rétroaction. L'homme joue un rôle ambigu. Il est dépendant du système – pouvant devenir une « victime » – mais il est aussi agissant et responsable de dégradations environnementales majeures. Cardot (1907, p. 76) rappelle aux élèves des écoles françaises cette mise en garde du poète Chateaubriand : « Les forêts précèdent les peuples. Les déserts les suivent ». Son propos imbrique de manière étroite les solidarités sociales et écologiques. Dans les « paroles à retenir », on trouve la citation suivante de J. Reynard, représentant à Clermont-Ferrand de la Société forestière française des Amis des arbres. « La conservation des arbres, bois et forêts qui assurent l'équilibre climatique du milieu social est une application du principe de la Dette sociale, et de la loi de solidarité qui lie toutes les générations. » (cité par É. Cardot 1907, p. 86). Brunhes (1905a, p. 25-28) reprend cette notion de « dette sociale » à son ami Reynard pour penser « un devoir plus large et plus étendu » de la politique et dépasser le dualisme entre individualisme et étatisme. Il défend ainsi l'action politique comme une « œuvre utile » à la

société dans un sens général, incorporant une solidarité avec les « générations futures ». Brunhes élargit ainsi les notions de valeur et d'utilité de leur signification strictement économique à une acception nouvelle basée sur une écologie humaine. Ce glissement, il le doit notamment à J. Reynard qui lui découvrir Joseph Proudhon qu'il cite à plusieurs reprises dans ses écrits (Brunhes 1905b, p. 246).

> C'est ce droit d'user et d'abuser que le siècle s'efforce de retenir et avec lequel il ne peut plus vivre, qui produit de nos jours la désertion de la terre et la désolation sociale. La métaphysique de la propriété a dévasté le sol français, découronné les montagnes, changé les rivières en torrents, empierré les vallées, le tout avec autorisation du Gouvernement ; elle a rendu l'agriculture odieuse au paysan, plus odieuse encore la patrie, elle pousse à la dépopulation. (Texte de Proudhon de 1868 cité par Brunhes 1905a, p. 37).

Au socialisme libertaire de Proudhon, Brunhes reprend la critique de la propriété privée qu'il applique aux sociétés rurales. Mais, son intérêt pour les collectifs territoriaux le rapproche également de la pensée conservatrice de Maurice Barrès. Il cite un éloge du penseur nationaliste en faveur de la législation allemande car elle favorise les « autorités sociales » de la famille et, à travers la propriété terrienne, « cherche à allonger vers l'avenir les pensées fortes de ses citoyens » (Texte de Barrès de 1904 cité par Brunhes 1905a, p. 38). Des pensées de Proudhon et de Barrès, Brunhes retire l'idée d'une solidarité entre les générations et d'un enracinement des pouvoirs souverains dans les communautés villageoises. Cette pensée rendant solidaires la nature et les riverains le rapproche de son frère géographe Jean Brunhes, avec qui il partage une forme de socialisme écologique au début du xx^{e} siècle [17]

Bernard Brunhes (1905a, p. 41) reste convaincu qu'un équilibre législatif est possible entre le « pouvoir de construire » du propriétaire et la sévère limitation de son « pouvoir d'obstruction et de destruction ». Il inscrit, par son approche économique, écologique et sociale, la société industrielle dans une multiplicité de temporalités. Il distingue ainsi trois temps dans la gestion de la houille noire : le temps géologique, nécessaire à sa « mis[e] en réserve » ; le temps économique, d'« épuisement des mines » d'ici « quelques siècles » ; le temps politique, d'une possible substitution par la houille blanche (Brunhes 1905a, p. 5, 10). Le temps politique a le choix entre deux rythmes de « dégradation d'énergie », l'un qui l'accélère en « puis[ant], sans compter, dans cette provision de charbon », l'autre qui le ralentit, en ne considérant les « mines que comme un trésor de guerre où l'on ne touche qu'en cas de circonstance grave ». Cette deuxième option est un pari sur un avenir apaisé. Elle permet « une lenteur suffisante pour que nos descendants puissent compter sur de longs siècles de jouissance paisible et sage de notre monde » (Brunhes 1905a, p. 5). La sérénité des sociétés futures est au prix d'une restriction présente des désirs de consommation.

4.4 Conclusion : querelles de voisinage et disputes cosmologiques

Chacune des trois sections du chapitre 4 a montré un type d'espace électrique modifiant l'appréhension de l'énergie par les sociétés industrielles contemporaines. Leur succession rend compte d'une extension spatiale et sociale de l'électricité dans les régions occidentales : des lieux de recherche et développement des batteries de stockage (4.1), des réseaux urbains de production, de stockage et de consommation d'électricité (4.2), des échelles superposées de structuration sociotechnique du cosmos (4.3).

17. La mort prématurée de Bernard Brunhes en 1910 fait qu'il est moins connu et cité que son frère. Juan Martinez-Alier (1992) mentionne les travaux des deux frères, en soulignant l'influence sur Bernard de Proudhon et l'influence sur Jean des géographes allemands de « l'économie de pillage des ressources » (*Raubwirtschaft*). Geneviève Massard-Guilbaud (2018, p. 6) souligne les travaux de Jean comme géographe mais ne dit rien du rôle joué par son frère.

4.4.1 Promesses, récalcitrances et mythes de la technique

Le voisinage électrique qui se construit sur la période 1880-1910 renvoie aux notions de distance et de forme. La distance entre les êtres humains et les êtres électriques se réduit. L'électricité occupe les usines, meuble l'habitat et forge les imaginaires. En termes de forme, l'électricité reconfigure le social. Elle modifie les rythmes diurnes et habitue à des plages d'éclairement plus larges. Sa coupure inopinée fait scandale. Car, le voisinage électrique transforme les rapports sensibles au monde au tournant du XX^e^ siècle : attraits pour la lumière électrique durant la nuit et, à l'inverse, renouvellement des peurs de l'obscurité (*thriller*) ; valorisation des lumières nettes que ce soit pour les publicités, les intérieurs mais aussi les saisons, l'été s'affirmant au-dessus des lumières de mi-saison ; essor des formes nettes que ce soit pour l'ameublement d'intérieur mais aussi pour les silhouettes humaines par opposition aux trompe-l'œil des modes élaborées au XIX^e^ siècle ; etc. (Corbin 1991) Voir et être vu deviennent l'alpha et l'oméga de sociétés où la lumière électrique révèle, au sens photographique du terme, le primat de la vue sur les odeurs et les bruits. La féerie électrique réenchante le monde urbain avec ses néons tubulaires et ses incandescences ampoulées.

Dans le même temps, la récalcitrance des objets électriques à se laisser sociabiliser irrite le milieu technicien. L'électricité ne tient pas toutes ses promesses. Les performances annoncées par les fabricants de batteries sont surestimées et prises dans des conditions optimales de maintenance. Les problèmes en opération sont nombreux : arrêts imprévus, fragilité des cellules, fuites d'électrolytes, manque d'endurance, etc. (cf. figure 4.1). Les batteries sont jugées gaspilleuses, inconstantes et trop pressées de vieillir. Les améliorations de performances ne sont pas considérées comme satisfaisantes par les ingénieurs malgré d'intenses financements de recherche et développement des industries électriques. Cette incapacité à accroître le stockage d'électricité par batteries est un trait permanent d'insatisfaction des technosciences des années 1860 à aujourd'hui (cf. figure 2.3). Électriciens, chimistes, mécaniciens, eux qui se voyaient comme les *démiurges* de la seconde industrialisation, sont mystifiés par la récalcitrance des batteries, ces *créatures* réfractaires au technocosme moderne. Les valeurs techniciennes sont mises à mal par des réalités terre-à-terre. Les batteries devraient être économes, mais gaspillent l'énergie ; elles devraient être standardisées, mais vieillissent de manière imprévisible ; elles devraient être portatives, mais sont trop lourdes ; elles devraient être ergonomiques, mais manquent de souplesse et de sécurité.

La défection des artefacts par rapport aux promesses triomphantes conduit à reformuler la caractérisation de la modernité par Max Weber. Sans maîtrise totale de la science, il n'y a plus de désenchantement général des sociétés industrielles. La relativité de la maîtrise technoscientifique se traduit au contraire un réenchantement du monde par les mythes techniciens. Dans l'édification de la cathédrale de la modernité, les mythes techniciens sont des arcs-boutants symboliques qui soutiennent les réalisations approximatives et incomplètes de la technologie matérielle. L'idéel étaye le matériel pour conserver l'image d'un appareil tout puissant. Nous avons déjà rencontré cette alliance entre symboles et artefacts. Thomas C. Mendenhall, professeur et administrateur, reliait les artefacts dans un ensemble électrique tout en relatant leur expansion d'une manière épique (3.2.1). Les pratiques électriques, incomplètes ou en échec, sont ainsi réanimées par une histoire glorieuse de l'électricité dans le temps et dans l'espace des hommes. Les technologies matérielles des infrastructures sont relayées par les technologies discursives des contes de fées électriques et des promesses de progrès. Un tel « caractère performatif du langage » replace ainsi, selon l'analyse d'Ernst Cassirer, la modernité occidentale dans un cadre de « pensée mystico-magique » dont les sociétés industrielles ne se sont pas affranchies malgré leurs façades naturalistes (Cérézuelle 2011, p. 152-153).

4.4.2 Mystifications et compétitions entre voisinages électriques

Le cas de la Hartford Electric Light Company informe sur la manière dont les discours symboliques peuvent renforcer l'ordre social en régime technicien. Par deux fois, à 70 ans d'écart, cette entreprise productrice d'électricité réenchante son monde techniciste par l'étincelle du verbe. Elle forge une première image triomphante d'elle-même à la fin du XIX^e^ siècle dans la presse. Dans l'article du *Scientific American* du 9 octobre 1897, l'expert de la compagnie, William L. Robb, et le superintendant des centrales, Robert W. Rollins, détaillent le fonctionnement fluide d'un réseau de puissance, malgré la complexité de l'ensemble sociotechnique : trois centrales électriques, dont une hydroélectrique et deux thermoélectriques ; des infrastructures sous haute et basse tensions, en courants alternatif et continu ; des batteries de stockage assurant des fonctions de régulation, d'optimisation et de gestion d'urgence (cf. 4.2.4). Or, à aucun moment, ils ne mentionnent la panne électrique du 6 septembre 1897 qui, suite à un incendie de l'usine hydroélectrique de Rainbow, provoque une coupure d'électricité à Hartford, sans prise en charge du relais par les batteries de stockage. Lorsque la technologie matérielle marque le pas, la technologie discursive prend le relais pour réenchanter le régime technicien.

Un deuxième transfert symbolique est réalisé par la Hartford Electric Light Company à la fin des années 1960. L'entreprise soutient la publication de sa propre histoire en 1969, sous le titre transparent de *The Hartford Electric Light Company*, en s'appuyant sur un universitaire du voisinage, Glenn Weaver, professeur associé d'histoire au Trinity College de Hartford. Elle recourt ainsi au capital symbolique du milieu universitaire comme elle l'a fait 70 ans plus tôt en s'attachant l'expertise du physicien Robb, lui aussi professeur au Trinity College. Malgré un travail empirique qui semble de bonne qualité dans les archives institutionnelles, Weaver (1969) construit un récit progressif et orienté. Il choisit une métaphore filée d'ordre biologique pour organiser l'histoire de la compagnie comme les moments d'une existence humaine. L'histoire débute par une « naissance » (§1) et se clôt par un mariage (§16) après être passée par les « premiers pas » (§3), l'« excitation de la jeunesse » (§5) ou encore une « saine croissance », avant d'atteindre une « maturité » (§10) basée sur la « prospérité » (§13) mais entrecoupée par plusieurs « services militaires » (§11, 12, 15) et des « temps difficiles » (§14). Les métaphores biologiques appliquées aux sociétés humaines sont critiquables car les institutions sociales ne sont pas formées et mues de la même manière que les êtres vivants. Rien n'est plus culturel et moins naturel que la croissance d'une institution. La métaphore biologique vient ainsi *naturaliser* des phénomènes qu'il s'agit au contraire d'expliquer en termes socio-historiques. Elle participe d'une « mystification » par le signe pour reprendre l'analyse structurale de la société que Roland Barthes introduit dans *Mythologies*. Car, « ce-qui-va-de-soi » et se donne comme naturel relève du mythe (Barthes 1957, p. 7-9). Cette histoire de la Hartford Electric Light Company est doublement mystificatrice. Premièrement, elle transforme un processus socio-historique complexe en une suite d'étapes imposées par le schéma d'une existence humaine. Deuxièmement, cette existence est recadrée dans « la culture petite-bourgeoise » états-unienne menant de la naissance de l'individu à son mariage. L'histoire industrielle devient une histoire familiale, dont la linéarité est inéluctable, et cette famille, un archétype de l'incontournable bourgeoisie.

Le voisinage électrique peut prendre une autre dimension dans le cas de la recherche et du développement. La filière électrique est marquée au tournant du XX^e^ siècle par une compétition économique entre États-nations. Ce qui est singulier alors est la fascination réciproque de l'Amérique du Nord et de l'Europe de l'Ouest. En diverses occasions, chacune des deux sous-régions considère l'autre comme « en avance » par rapport à elle. Le voisin outre-atlantique est convoqué dans la défense d'un argumentaire *pro domo*. Commentant l'Exposition universelle de Paris de 1889, l'électricien de métier, Édouard Hospitalier, fustige les atermoiements de « la vieille Europe » vis-à-vis des tramways électriques, par opposition à l'audace de « la jeune Amérique, moins

gênée par les habitudes et la tradition » en train de construire « la preuve irréfragable de sa supériorité » (cité par Beltran et Carré 2016, p. 74). Quelques années plus tard, une note du *Journal of the Franklin Institute* déplore, au contraire, le « retard » des États-Unis dans l'usage des batteries de stockage pour la traction des tramways électriques. Elle argumente en prenant exemple sur plusieurs métropoles européennes : Hanovre, Dresde, Copenhague, La Haye, Paris, Berlin (Franklin Institute 1897).

De manière significative, la plupart des conférenciers de la 101e session de l'American Institute of Electrical Engineering (AIEE), qui se tient à New York le 20 novembre 1895 sur le stockage de l'électricité, mentionnent les « retards » des États-Unis par rapport à l'Europe. Arthur E. Childs (1895, p. 585) rappelle que les électriciens européens utilisent des batteries de stockage dans les centrales électriques depuis plus de cinq ans alors la pratique débute seulement aux États-Unis. Frederick Reckenzaun (1895, p. 616) fait chorus en affichant son incompréhension du fait que les Américains restent « si loin derrière pour le stockage par batteries » alors qu'ils n'auraient qu'à copier l'Europe. Les succès de l'Angleterre et de l'Allemagne dans ce domaine sont réaffirmés par un troisième conférencier, Carl Hering (1895, p. 609). À nouveau, Childs (1895, p. 589) incite les ingénieurs américains à « suivre les lignes tracées par leurs confrères européens » dans l'usage des batteries de qualité déjà existantes plutôt que d'attendre un « développement merveilleux dans la fabrication des batteries de stockage ». Le gain d'argent dû aux batteries de stockage dans l'équilibrage de la charge et le sous-dimensionnement de la puissance semble justifier le choix européen selon certains experts états-uniens (Abbott et Dommerque 1895). Sur un sujet connexe, Nelson W. Perry (1895, p. 602) cite l'Angleterre, l'Allemagne et la France comme modèles de développement pour l'utilisation du gaz et de machines à gaz pour l'éclairage de sites isolés. Dans la discussion qui suit la conférence, J. Appleton, nuance cette position mais réutilise l'image du retard pour souligner que les fabricants de machines à gaz ne sont pas, aux États-Unis, « très loin derrière » les Européens.

Une telle rhétorique de l'avance-retard entre territoires aux niveaux technique, économique, social, politique, etc., est une mystification idéologique. L'autre, qu'il soit allié, concurrent ou ennemi, est présenté comme l'image déjà réalisée d'un futur souhaitable chez soi. L'argumentaire entraîne souvent la conviction à l'époque contemporaine grâce à deux présupposés largement répandus dans les sociétés capitalistes : un jugement positif de la compétition entre États-nations ; un schème temporel de l'histoire comme objectifs à poursuivre (téléologie). Comme l'a montré Reinhardt Koselleck en comparant les régimes politiques de type fédéral ou national, le discours de l'avance-retard par rapport à d'autres territoires constitue un mythe bien ancré dans les pratiques et les imaginaires contemporains. Car, « nulle part il est écrit que la nation est un but de l'histoire et que l'atteindre est un devoir temporel qui ne tolère point de retard » (Koselleck 2000, p. 159). De tels discours mythiques sont courants en régime technicien. Ils permettent, comme l'a montré l'analyse du problème du stockage d'électricité sur la période 1880-1900, d'adoucir les récalcitrances de la technologie matérielle et de présenter les promesses d'avenir comme des réalisations d'à-côté. La spatialisation de l'histoire est d'ailleurs l'un des puissants ressorts de la mémoire collective aux États-Unis (cf. 6.4.1).

4.4.3 Du voisinage au cosmos : (dé)régulations de l'existence

Le voisinage électrique se construit à la croisée d'infrastructures partiellement fonctionnelles et de discours partiellement mystificateurs. Il induit, en retour, des adaptations des modes d'existence collective. Étonnamment pour nous qui sommes habitués depuis un siècle à vivre dans le technocosme électrique, C. L. Edgar (1895, p. 593) considère comme des données importantes du problème le décalage entre les rythmes naturels – la nuit tombe sur la côte Est à 16h30 en hiver – et les rythmes sociaux – les magasins ferment à 18h aux États-Unis. C'est aux batteries d'accumulateurs de prendre en charge les besoins d'éclairage pendant cette heure et demi-là

et de fournir la puissance nécessaire en heures de pointe. Le stockage d'énergie doit réajuster les écarts de rythme entre nature et culture. La technologie matérielle n'est pas perçue comme force de changement social. Ce constat rejoint la conclusion de Gijs Mom au sujet des voitures électriques au début du XX^e^ siècle. Les qualités spécifiques de la voiture électrique – souple, tactile, silencieuse et locale – constituent un « système idéal » de déplacement qui heurte la « culture de la mobilité » dominante des sociétés européennes et américaines des années 1890-1910 (Mom 2004, p. 301). Si la proximité électrique est acceptée pour l'éclairage privé et public, la localisation des déplacements individuels qu'induirait la traction électrique des automobiles est jugée trop restrictive. L'individu occidental de 1900 rêve d'une étendue illimitée, « sans fil à la patte » pour reprendre l'expression de Charles Gide (1904a, p. 317).

Le technocosme électrique a transformé les cadres spatio-temporels des sociétés industrielles et les rapports de l'humain au monde sensible. Ces transformations traversent les échanges entre Charles Gide, A. Audebrand, Bernard Brunhes et Émile Cardot au début du XX^e^ siècle. Plus qu'une économie industrielle comme pour la gestion du réseau électrique de Hartford, la controverse révèle une véritable économie de la nature dans un sens très proche de l'écologie politique qui émerge dans la deuxième moitié du XX^e^ siècle. Elle reconfigure la hiérarchie des valeurs culturelles. La valeur est d'abord, en économie capitaliste, le prix commercial, qu'un libéral comme Audebrand ne cesse de convoquer. Mais, la valeur prend d'autres formes selon les participants de la controverse : organisation coopérative de la société pour Gide ; organicisme entre nature et société à travers la « dette sociale » pour J. Reynard et l'« utilité générale » pour Brunhes. Cet organicisme très présent sur la période 1860-1940 pour appréhender les sociétés humaines mélange naturalisme et moralisme. Il permet de rendre solidaires les générations humaines, présentes et futures, et les espaces naturels. L'aménagement agro-pastoral et industriel des montagnes est présenté comme une reconfiguration harmonieuse des frontières entre nature et culture. Les imaginaires sont retravaillés par ces opérations d'artificialisation et par des mouvements d'éducation populaire. Les actions publiques et privées d'éducation des populations, d'aménagement des terrains et de développement des usines façonnent une *modernité de la montagne* autour de quatre images entrelacées : un effacement des montagnards du tableau général ; une forêt bienfaitrice ; un tourisme galopant et invasif ; la puissance de la houille blanche.

Ce qui se dégage aussi de la controverse française est l'image d'une nature régulée (Cardot), proche d'un système muni de boucles de rétroaction. La nature, dont la stabilité peut être mise en péril par les dégradations des sociétés humaines, doit donc être organisée et artificialisée autour de ce principe de régulation. Les protagonistes, malgré leurs différences politiques, envisagent tous la stabilisation des régimes hydrauliques par l'aménagement des forêts et des prairies et le creusement de réservoirs d'eau. Il y a donc un consensus autour de la régulation de la nature par l'activité humaine dans un voisinage qui s'étend progressivement des vallées aux montagnes puis à l'ensemble du cosmos. Cette recomposition socio-politique rend compte d'une transformation des univers de la montagne comme espaces naturels artificialisés et comme espaces culturels aménagés. Ce processus déplace certaines lignes de fracture entre nature et culture et fabrique de nouvelles conceptions de la solidarité, de la géographie physique vers l'écologie sociale. Brunhes est le plus convaincu par l'idée d'un continuum nature-culture.

Ces notions de système naturel, de solidarité nature-culture, d'harmonies cosmiques de l'énergie, débouchent, me semble-t-il, sur la construction d'un paysage mécanique de la houille blanche au début du XX^e^ siècle par la superposition d'images de chaînes sociotechniques. La chaîne de montagne, administrée par des chaînes de commandement (Heidegger), abrite, en contrepartie, une chaîne de solidarités entre générations, entre espaces le long du fleuve. Lointain écho à la chaîne de montage (F. Taylor), les chaînes de valeur se

déploient dans les vallées alpestres couplant les activités qu'elles soient agricoles, industrielles, touristiques, etc. et les chaînes de conversion d'énergie assorties aux couleurs de la houille. Nervures centrales, les chaînes de régulation de flux et de stock de puissance dessinent un quadrillage électrique aux embranchements sans fin, dont le « fil à la patte » de Charles Gide trace des infrastructures sans limite, bien au-delà des cadres habituels de l'humaine condition.

Ce monde technicisé en cours d'électrification est celui dans lequel grandit, vit et travaille Simone Weil durant sa courte existence (1909-1943). Son « Journal d'usine » décrit l'abrutissement de l'ouvrière qu'elle a choisi d'être durant de longs mois à la Compagnie générale d'électricité (alors Alsthom) puis à Renault en 1934-1935 (Weil 1935, p. 77-204). De longues litanies d'actions et de chiffres traduisent l'expérience des cadences de manufacture des pièces électriques ou mécaniques, les fatigues et les douleurs de gestes répétitifs, la violence des rapports de hiérarchie et de genre, l'épuisement quotidien et hebdomadaire, l'aliénation permanente de *La Condition ouvrière*. Mais, l'emprise croissante du régime technicien se fait aussi sentir à l'extérieur de l'usine, dans la vie privée et sociale. Weil (1934, p. 158) dit le déséquilibre existentiel qu'elle éprouve dans sa vie de jeune femme dans ses *Réflexions sur les causes de la liberté et de l'oppression sociale*. « Nous vivons dans un monde où rien n'est à la mesure de l'homme ; il y a une disproportion monstrueuse entre le corps de l'homme, l'esprit de l'homme et les choses qui constituent actuellement les éléments de la vie humaine ». Placée en épigraphe du chapitre, cette citation souligne l'inquiétude et le malaise de la philosophe-ouvrière vis-à-vis d'un quadrillage croissant à son époque du milieu de vie auquel contribue l'électricité. Alors que le voisinage électrique est en train de faire monde, Weil oppose la démesure et l'étrangeté de la technique au corps et à l'âme humaine.

La régulation spatio-temporelle de la vie sociale par des infrastructures technoscientifiques se généralise au XX^e^ siècle au sein du régime technicien. La multiplication de réseaux industriels et commerciaux à l'échelle planétaire est portée par la formalisation de plusieurs schèmes techniciens, qui circulant entre les milieux professionnels et le reste de la société (1.3.2). L'enjeu du chapitre 5 est d'analyser trois de ces schèmes liés au stockage de l'énergie : un imaginaire régulé des flux et des stocks d'énergie (5.1), une techno-politique du futur basée sur la mise en réserve de la puissance 5.2), la renégociation des frontières entre nature et culture autour des espaces énergétiques (5.3). La construction des mondes hydrogène au début du XXI^e^ siècle achève le quadrillage spatio-temporel de l'espace social par une synchronisation généralisée des systèmes d'énergie, de transport et d'information. Elle matérialise un *système de systèmes* à l'échelle du globe (chapitre 6).

Chapitre 5

Structuration des imaginaires énergétiques, 1900-1990

> « Le même esprit qui construit les systèmes philosophiques dans les cerveaux des philosophes construit les chemins de fer avec les bras des ouvriers. »
> Karl Marx, *Rheinische Zeitung*, juillet 1842.
>
> « Ce n'est pas nous qui roulons en chemin de fer ; c'est lui qui roule en nous. »
> Henry David Thoreau, *Walden ou la vie dans les bois*, 1854.

Le stockage d'énergie remodèle, au XX^e^ siècle, les manières d'agir, de penser et de sentir des sociétés humaines vis-à-vis du temps et de l'espace. Le chapitre 5 se focalise sur les manières de penser des techniciens et des technocrates à travers leurs imaginaires. Cet « outillage mental » circule et s'implante au-delà des milieux professionnels. Les imaginaires techniciens reconfigurent ainsi la culture contemporaine en profondeur. Ils imposent, de manière plus ou moins consciente, de nouveaux schèmes d'intelligibilité du monde. Leur adoption est facilitée en démocratie technique par le positionnement des experts, qui sont en charge de la formulation des problèmes de politique publique et de leur résolution (cf. 1.3.4). Cette acculturation technicienne ne relève pas d'une action magique mais d'un processus techno-politique. Les technocrates et, dans une moindre mesure, les techniciens par leur situation de pouvoir, ou d'influence des décisions, déploient leurs manières d'agir et de sentir via des artefacts et des dispositifs techniques, qui façonne les manières de penser de leurs contemporains.

L'idéel n'est donc pas seul impliqué mais s'articule au matériel de manière indissoluble, comme l'écrit Maurice Godelier (1984, p. 21) : « nulle action matérielle de l'homme sur la nature [...] ne peut s'accomplir sans mettre en œuvre dès son commencement dans l'intention des réalités "idéelles", des représentations, des jugements, des principes de la pensée ». La formulation et l'adoption d'imaginaires techniciens par les profanes contribuent ainsi à étendre et renforcer le régime technicien dans les sociétés contemporaines. Elles renouvellent « le cadre des anciens schémas » de pensée en « transformant les relations sociales » (Dockès et Rosier 1991, p. 208). Institués, les imaginaires deviennent instituants. Ceci reconfigure les schémas de pensée existants et en impose de nouveaux, qui sont progressivement perçus comme *naturels* par les nouvelles générations.

Le chapitre 5 s'essaie à une sociologie des imaginaires modernes. Dans *Les formes élémentaires de la vie religieuse*, Émile Dukheim fait de « la faculté d'idéaliser [de l'humain...] la condition de l'existence en tant qu'être social » (Galey et Lenclud 2010, p. 208). Cette idéalisation mêle les registres matériels et symboliques,

rationnels et affectifs, savants et religieux. Simultanément fée et servante, rationnelle et magique, l'électricité incarne le bonheur moderne promis par le régime technicien. Un article de l'hebdomadaire britannique *The Spectator*, intitulé « L'électricité comme facteur de bonheur », s'enthousiasme pour le foisonnement d'attentes et de sensations suscitées dans le public par les premiers déploiements de l'électricité. L'auteur anonyme écrit avec emphase que « le trait le plus marquant à cette heure, en dehors de la politique, est l'attention pleine d'angoisse et d'espoir portée aux applications de l'électricité » (The Spectator 1881, p. 1162). Il en appelle ensuite aux philologues pour trouver une appellation adaptée à un tel enthousiasme : *electricity*, trop long ; *amberishness*, trop stupide ; etc. Il choisit la divinité « Indra » de la tradition védique parce que ce roi des dieux, écrit-il ironiquement, est capable de « faire beaucoup de choses, bien qu'il les fasse toutes de manière imparfaite, chère ou avec une certaine hésitation gauche, comme si un Démiurge ne savait pas trop s'il était légitime à donner un tel pouvoir à une telle race que celle de l'Homme ». Aussi rapidement qu'il a vanté la nature divine de l'électricité, l'auteur souligne ses limites afin d'exprimer une insubordination vis-à-vis de la technique. L'expansion et la densification des techniques dans les sociétés industrielles provoquent une angoisse collective que les sociétés modernes jugulent en forgeant de nouveaux discours sur la technique. Ces discours résultent, pour une large part, de la structuration des imaginaires techniciens.

J'ai repéré trois schèmes de pensée et d'opération du régime technicien croisant le problème du stockage de l'énergie au XX^e^ siècle. Le premier schème concerne la gestion et la régulation des flux et des stocks d'énergie. Il prend place durant la phase d'interconnexion des réseaux régionaux d'électricité sur la période 1920-1940 (5.1). Conséquence du premier, le second imaginaire touche aux expériences du temps et contribue à déployer les outils de prévision en démocratie technique. Le Commissariat général du Plan incarne profondément cet imaginaire dans le cas de la France (5.2). Le troisième imaginaire revient sur l'un des problèmes constitutifs de la modernité occidentale à travers le schème nature-culture et la manière dont les frontières entre nature et culture sont renégociées par les enjeux et pratiques du stockage de l'énergie (5.3).

Ces trois imaginaires techniciens seront appréhendés successivement, en relation étroite avec les contextes de leur déploiement par le milieu technicien. S'ils sont pris dans le cas particulier de la France, ils circulent de manière transversale dans les sociétés industrielles. Ils reflètent une anxiété commune liée à une perte de contrôle vis-à-vis du milieu social et environnant. Ils sont tous trois marqués par l'une des solutions à ce sentiment de dépossession collective qui est l'entreprise de modélisation du monde qui se construit au XX^e^ siècle. Michel Armatte et Amy Dahan (2004, p. 255-256) ont daté l'essor des modèles et de la modélisation d'ordre technologique durant les années 1930. Cette périodisation est pertinente pour le déploiement traçable des trois imaginaires techniciens du chapitre. Je garderai néanmoins la possibilité d'explorer aussi les débuts du XX^e^ siècle pour saisir certaines reconfigurations sociotechniques. Les schèmes techniques se construisent souvent à partir de strates profondes de la pensée humaine et ont des ramifications culturelles anciennes (cf. 3.1). Une autre similitude entre ces trois imaginaires techniciens est leur commune source d'inspiration, issue des sciences de la nature, et leur transfert partiel, vers les sciences de la société. Chaque entreprise de modélisation ordonne le macrocosme à partir de blocs quantitatifs, mesurables et opératoires, qu'elle agence grâce à des machines de calcul. Elle minimise, en contrepartie, les aspects insaisissables et floues des espaces critiques et interprétatifs de la pensée humaine et du langage. En d'autres termes, elle opte pour « la pensée calculante » plutôt que pour « la pensée méditante » selon l'alternative posée par Martin Heidegger. En cela, ces imaginaires techniciens rendent compte d'une rationalité symbolique, logique et quantitative issue des sciences de la nature. Celle-ci a été incorporée en partie par les sciences sociales. L'économie et la gestion sont deux exemples de disciplines enthousiastes pour formaliser les sociétés humaines à partir de modèles et de réductions calculatoires, oubliant

parfois certaines réalités qualitatives [1].

« La spécificité de la culture moderne et plus spécialement de ses fondements technico-économiques, écrit Max Weber dans *Économie et Société*, exige cette extrême calculabilité » (cité par Nizard 1973, p. 206). Le succès de l'approche technico-économique au XX^e^ siècle est dû, en grande partie, à la dimension opératoire de ses résultats de modélisation. Il s'agit habituellement de réduire une situation complexe à l'expression d'un problème, de mettre ce problème en équations et de résoudre ce systèmes d'équations pour fournir un résultat sous la forme d'une comparaison chiffrée de type coût-bénéfice (Gérard 1972, p. 487). Le premier imaginaire technicien concerne justement la réduction de la sphère énergétique à une régulation de flux et de stocks de puissance (5.1). Il met en scène Pierre Massé, un ingénieur polytechnicien qui gravit les échelons de la technostructure au moment de l'interconnexion interrégionale de l'électricité en France (5.1.1) tout en devenant un économiste internationalement reconnu dans le milieu universitaire (5.1.2).

5.1 Imaginaires régulés des flux et des stocks d'énergie

À la fin du XIX^e^ siècle, William Thomson plaçait les accumulateurs électriques au cœur d'installations autonomes de production électrique par couplage de moulins à vent et de dynamos (cf. 3.1.3). De manière plus générale, l'une des principales modulations électriques des années 1880 transforme les accumulateurs électriques en « batteries de stockage » (cf. 3.2.2). Elle pose ainsi le principe d'une régulation temporelle de l'électricité, dissociant les moments de production, intermittents et aléatoires dans le cas des forces naturelles, des moments de consommation, en théorie à la demande, en pratique dépendants de l'organisation sociale des journées et des semaines. Mon hypothèse de travail est que la fonction régulatrice du stockage d'énergie (cf. 2.3.2) gagne en importance dans les sociétés industrielles au cours du XX^e^ siècle. Cette fonction régulatrice est stimulée par l'expansion des réseaux interconnectés et son modèle d'équilibrage des productions entre centrales au charbon et usines hydroélectriques. Elle sous-tend l'imaginaire d'un contrôle technicien des aléas naturels et la maîtrise calculée des risques énergétiques.

5.1.1 Mouvement d'interconnexion en France et mixtes des Suds électriques

Au début du XX^e^ siècle, la couverture électrique est fragmentée en France (Lacoste 1986, p. 110). Le Sud-Est fait exception avec l'interconnexion provençale gérée par la société Énergie électrique du littoral méditerranéen (EELM). Cette entreprise privée couple les barrages hydroélectriques des Alpes, les centrales thermiques des plaines et les zones de consommation côtière et urbaine (Bouneau 1985, p. 80). Plus grand réseau français, EELM représente 12 % de la production nationale d'électricité en 1912 (Lacoste 1986, p. 110). La phase d'intégration régionale porte un modèle de régulation où la houille noire assure la production de base et la houille blanche une production d'appoint lors des pics de consommation (cf. 4.2.3).

Désirs et pratiques d'interconnexion aux échelles régionales

Le « développement rationnel des sites hydro-électriques et des réseaux à haute tension [justifie la création à partir de 1919] de "sociétés d'économie mixte" » dans la filière électrique (Kuisel 1981, p. 128-129). Si, en pratique, les gouvernements des années 1920 sont plutôt opposés à l'actionnariat d'État dans le domaine

1. Dans une perspective critique, un économiste hétérodoxe, John Kenneth Galbraith (1967, p. 154) remarque ainsi qu'aucun facteur qualitatif « ne se prêt[e] aisément à la mesure ou à la comparaison, contrairement aux salaires : de sorte qu'il est difficile de les soumettre aux simplifications des mathématiques et des symboles logiques. Or, la vérité scientifique en économie n'est pas toujours ce qui existe : c'est souvent ce qui peut être traité par des méthodes apparemment scientifiques. »

de l'énergie, à l'exception du Nord-Est qui est reconstruit de manière cohérente après les destructions de la Première Guerre mondiale, ils n'excluent pas une gestion économique « mixte » des réseaux électriques. Olivier Coutard défend une thèse séduisante pour expliquer ce qu'il considère comme un sur-investissement de l'État dans l'électricité par rapport à d'autres industries de réseaux. En effet, « le volontarisme politique remarquable dont a bénéficié le développement des réseaux électriques [...] n'allait pas de soi et ne répondait à nulle nécessité » que ce soit en France ou aux États-Unis (Coutard 2001, p. 78-79). Il « s'explique par l'existence d'un imaginaire politique modernisateur porté essentiellement par des élus et des modernisateurs sociaux et qui reposait, d'une part, sur l'idée d'une interdépendance forte entre électrification rurale et agriculture électrique et, d'autre part, sur l'idée que l'on pourrait enrayer l'exode rural par l'électrification des campagnes. » Coutard prend ainsi la modernité électrique comme une utopie dans le sens que lui a donné Thomas More en 1516. Le titre complet de la célèbre fiction est : *Du meilleur état de la chose publique et de l'île nouvelle d'Utopie, un précieux petit livre tout aussi salutaire que plaisant* (Macherey 2011, p. 17). Traduit en termes contemporains, ce titre présente l'utopie comme le projet d'un gouvernement idéal des populations dans un espace fermé. L'électrification de la France revient est un projet de régulation des parcs électriques par la complémentarité des centrales thermiques et hydrauliques dont l'objectif principal est une régulation des mouvements de populations entre villes et campagnes.

Le désir d'interconnexion électrique est stimulé par deux facteurs, l'un plus matériel, l'autre plus idéel. Le facteur matériel est le développement du pompage hydraulique. Ce mode de stockage joue sur la réversibilité de la conversion mécanique-électrique dans la turbine hydroélectrique et électrique-mécanique par pompage proprement dit (cf. figure 2.7). De petites installations non commerciales de pompage fonctionnent en Italie et en Suisse à la fin du XIX^e^ siècle (Chen et al. 2009, p. 295). Des réservoirs sont creusés, lorsque cela est possible en termes géographiques et géologiques, et couplés aux centrales hydroélectriques pour assurer un stockage saisonnier (rythme mensuel) ou d'éclusée (rythmes journalier à hebdomadaire) (Remenieras 1956, p. 1-2). Ce couplage local permet de « régulariser » la force hydraulique par accumulation de réserves d'eau pendant les hautes eaux ou les heures creuses puis leur déversement aux moments de basses eaux (étiage) ou d'heures de pointe. Les premières installations commerciales apparaissent aux États-Unis et en Allemagne, dans les années 1920 (Chen et al. 2009, p. 295).

Il existe alors deux types de technologie par pompage hydraulique : par *accumulation* d'énergie, qui stocke la force hydraulique pendant une durée donnée avant déversement ; par *transfert* d'énergie, qui implique une seconde source d'énergie pour actionner les pompes élevant les flux d'eau (Ract-Madoux 1972, p. 483). L'usine du Lac noir dans les Vosges offre un exemple du premier type. Elle fournit une « puissance significative » de 100 MW à partir des années 1930 (Courier 1982, p. 408). Le complexe industriel rhénan est un exemple emblématique du second type. Des centrales thermiques alimentées en lignite (Herdecke, Niederwartha) fonctionnent la nuit afin de remonter l'eau dans des barrages hydroélectriques, qui restituent cette puissance emmagasinée durant la journée (Remenieras 1956, p. 1-2). Le gain financier est réalisé sur une économie de combustible de bonne qualité (charbon ou fuel), qui aurait été nécessaire en heures pleines, remplacé par un combustible bon marché en heures creuses. « On transformait ainsi systématiquement de l'énergie de base en énergie plus noble » (Ract-Madoux 1972, p. 484). Ceci institue une échelle de valeurs des puissances produites dépendante d'une valeur financière (coût brut), d'une valeur matérielle (qualité du combustible) et d'une valeur d'usage (disponibilité temporelle).

Le transfert d'énergie peut également prendre la forme d'un transfert de chaleur, d'une usine source où elle est produite et serait perdue si elle n'était envoyée une usine récupératrice. Ce mode de « régularisation »

quotidienne est appliqué au cours des années 1930 dans plusieurs complexes industriels : Munich, Hambourg, Milan, Beautor, etc. (Remenieras 1956, p. 21). Plusieurs filières industrielles l'expérimentent : usines électriques d'abord, puis papeteries, raffineries, industries chimiques, textiles, etc. Un phénomène de « symbiose industrielle » entre plusieurs industries complémentaires et interdépendantes à proximité les unes des autres (Diemer 2016) facilite de tels transferts thermiques. Des économies de consommation de l'ordre de 3 à 5 % ont pu ainsi être obtenues (Remenieras 1956, p. 21).

La période 1920-1940 correspond à une densification des infrastructures régionales par la multiplication d'opérateurs régionaux d'électricité. On en dénombre une quarantaine en 1930 (Lacoste 1986, p. 124-125). La figure 5.1 schématise, de manière approximative mais visuelle, la jonction progressive des territoires intra et inter-régionaux, par des lignes de transport d'électricité à 150 kV (traits épais) et à 60 kV (traits fins) [2]. Selon Denis Varaschin (1996, p. 66), le passage de « l'interconnexion régionale à l'interconnexion interrégionale demeura un choix entrepreneurial » mené par huit groupes inter-régionaux plus importants, de transport d'électricité, « attachés à consolider leur indépendance mais conscients des apports de l'intégration ». La densification des parcs électriques à l'échelle régionale et la multiplication des jonctions interrégionales conduisent à la formation d'un « super-réseau » national (Lacoste 1986, p. 110-118). Contrairement aux connexions interrégionales, l'intégration nationale du réseau électrique sera décidée et conduite par l'État français pendant et après la Deuxième Guerre mondiale (Varaschin 1996, p. 66).

L'interconnexion électrique a des raisons économiques : l'élargissement des infrastructures et, donc, des marchés accroît la rente en créant « un surplus de productivité globale » (Lacoste 1986, p. 112). La recherche de fortes productivités favorise les compagnies privées « qui ont joué l'escalade des tensions ». Les raisons sont aussi géographiques et technologiques : les potentiels inégaux des régions françaises en termes d'énergie (charbon au Nord, montagnes au Sud) et les différences phénoménologiques entre l'exploitation de la houille noire et de la houille blanche suscitent un désir d'accoupler deux territoires perçus comme complémentaires. Lacoste (1986, p. 112) parle d'un projet de « marier la France thermique et industrielle du Nord et la France hydraulique et rurale du Sud ». Malgré la préférence de Colombine, Pierrot l'emporte effectivement sur Arlequin. L'arc-en-ciel des houilles est noir et blanc en économie, pas multicolore comme dans l'imaginaire des forces naturelles. L'union est aussi politique. En juin 1938, le gouvernement d'Édouard Daladier, sous l'impulsion de Pierre Simon, directeur des Forces hydrauliques et des distributions du ministère des Travaux publics, fait adopter un décret-loi assorti d'un budget de trois milliards de francs pour construire « de grands aménagements hydroélectriques [... et des] lignes d'interconnexion à très haute tension » entre les parcs électriques régionaux (Beltran et Bungener 1987, p. 61-62). L'interconnexion nationale est quasiment achevée au début de la Seconde Guerre mondiale, à l'exception de régions éloignées de la houille blanche et de faible consommation : Bretagne, Normandie, Champagne (carte 4 de la figure 5.1) (Bouneau 1994, p. 817).

La modernité électrique a un versant moins économique et plus utopique. Sur la période 1920-1940, elle construit un imaginaire technicien autour de l'« arc-en-ciel des houilles ». L'image est basée sur la principale source d'énergie de l'industrialisation : la « houille noire » ou charbon. Une première analogie a nommé « houille blanche » la force des barrages et des retenues d'eau (cf. 4.3). À partir de ces deux réalisations effectives au tournant du XX^e^ siècle, toute une palette de potentialités sont convoquées par des techniciens et technocrates après la Première Guerre mondiale : la « houille verte » des rivières et torrents, la « houille bleue » des marées, des courants marins et de la houle, la « houille azur » des vents, la « houille jaune » ou « d'or » des rayons du soleil, etc. Certains inventeurs imaginaient même une houille « rose » résultant du stockage des forces

2. Le premier gestionnaire régional à avoir été constitué, la société Énergie électrique du littoral méditerranéen (EELM), n'apparaît pas sur le schéma en 1921.

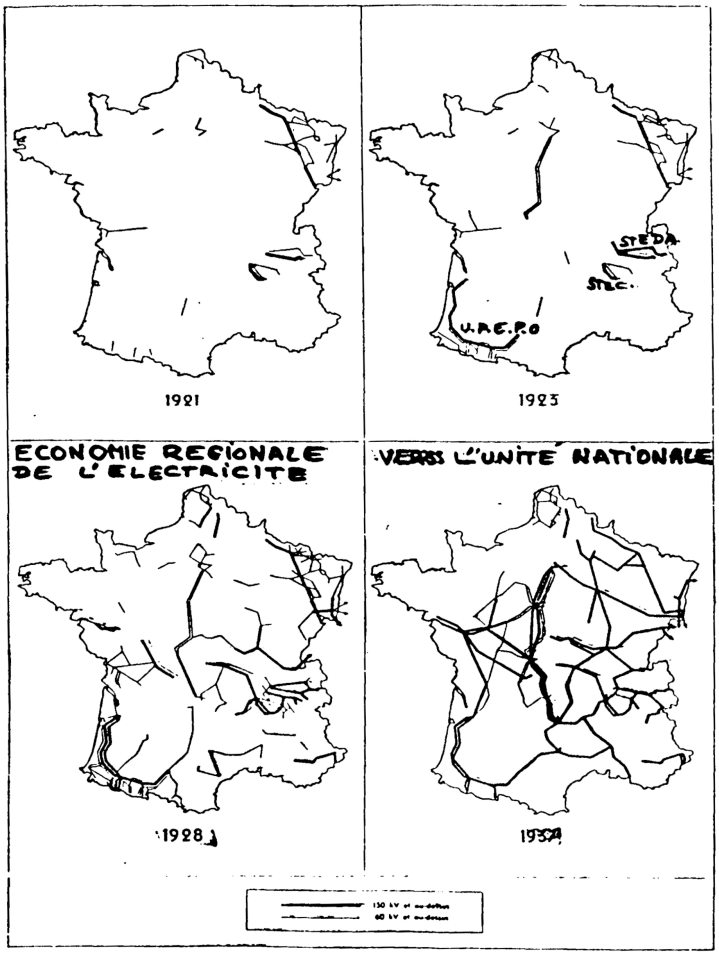

FIGURE 5.1 – Schématisation de la construction de lignes de transport d'électricité en France, 1921-1939 (Lacoste 1986, p. 118)

mécaniques durant les activités sportives, les réunions politiques ou les pérégrinations amoureuses (Marrec 2018a, p. 166). Cet épisode inconnu des historiens a été mis en évidence par Anaël Marrec dans son *Histoire des énergies renouvelables en France*. Marrec (2018a, p. 148) a très bien analysé la fonction argumentative de la métaphore : projeter la « complémentarité spatiale » des différentes « forces naturelles » pour générer de l'électricité. Elle a aussi montré que, plus qu'une métaphore, l'arc-en-ciel des houilles était un programme politique de développement des énergies de manière différenciée en métropole et dans les territoires coloniaux d'Afrique de l'Ouest notamment. Le programme débute par la Commission de la houille bleue (1919-1943) sur l'extraction des flux de marée, des courants océaniques et de la houle marine (Marrec 2018a, p. 252-259). Même si le programme marémoteur n'aboutit pas en termes de quantité notable d'électricité produite, l'arc-en-ciel des houilles traduit un imaginaire technicien porteur de valeurs. Cette économie morale valorise « les grandes puissances, la régularité, et le passage par l'électricité » (Marrec 2018a, p. 308). Elle projette le raccordement de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel des houilles pour combler ce qui est considéré comme une faiblesse du parc électrique par les technocrates : la trop faible synchronisation des temporalités de production et de consommation de l'électricité à travers les territoires. Le projet d'élargir le mix énergétique à tout l'arc-en-ciel des houilles traduit un phénomène de « compensation » psychanalytique par la technostructure. Il permettrait de gommer le déficit de puissance du parc électrique en heures de pointe et de synchroniser la production et la

consommation d'énergie.

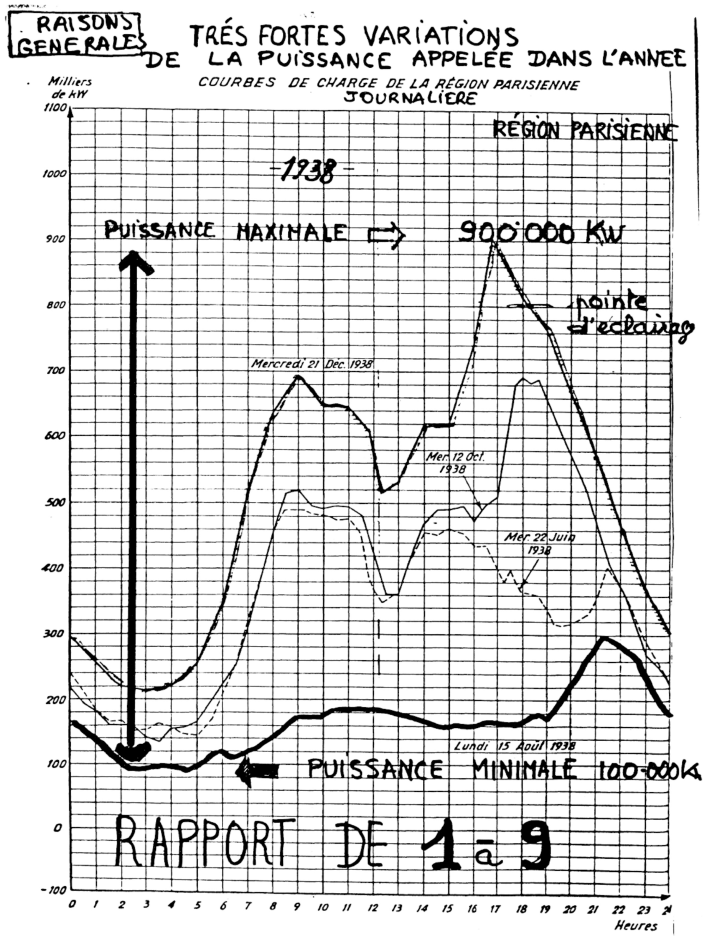

FIGURE 5.2 – Variations de la courbe de charge journalière de la région parisienne en fonction des moments de l'année 1938 (Lacoste 1986, p. 118)

En effet, malgré l'optimisme des discours de la modernité électrique, il ne faut pas surestimer la capacité d'optimisation matérielle du régime technicien. Les rythmes de la technique restent distincts des rythmes sociaux, qu'ils soient journalier, hebdomadaire ou annuel. Le décalage est mis en évidence par la figure 5.2, due à Jacques Lacoste, expert et technocrate de l'électricité. La courbe de charge de la région parisienne montre de fortes variations de demande de puissance à la fin des années 1930. Ces variations dépendent des moments de la journée, des jours de la semaine et des périodes de l'année. La figure 5.2 prend l'année 1938 comme cas d'étude. Pour de très faibles consommations par rapport à la moyenne annuelle, un jour férié et estival (15 août 1938), les variations sont dans un rapport de un à trois entre le minimum de consommation des clients à l'aube (100 MW) et la demande maximale pour l'éclairage en soirée (300 MW). Pour des consommations annuelles moyennes, un jour ouvré du début de l'été (mercredi 22 juin), les variations sont dans un rapport de un à trois et demi entre le minimum de l'aube (140 MW) et la demande maximale de puissance (industrielle) en matinée (500 MW). Pour des consommations annuelles fortes, un jour ouvré au début de l'hiver (mercredi 21 décembre), les variations sont de un à quatre et demi entre le minimum à l'aube (200 MW) et la demande maximale de puissance pour l'éclairage à la tombée de la nuit, vers 17h (900 MW). De l'été à l'hiver, la ligne de base de la consommation augmente d'un facteur deux, de 100 à 200 MW, pour des besoins de chauffage

notamment. Des basses aux hautes moyennes annuelles, le rapport entre maximal et minimal augmente de 3 à 4,5 rendant ainsi compte d'une baisse de rendement d'exploitation. Enfin, sur une année complète, pour un dimensionnement identique du parc électrique, le rapport maximal/minimal grimpe jusqu'à 9. Au vu de telles différences, on comprend bien la démarche gestionnaire qui cherche à optimiser le déplacement d'énergie dans l'espace et dans le temps. L'interconnexion entre le charbon du Nord et l'hydraulique du Sud est un premier moyen de régulariser les écarts annuels (Lacoste 1986, p. 114).

Coordination électrique en noir et blanc dans le Sud-Ouest, 1920-1940

Avec un décalage de deux décennies par rapport au sud-est de la France, le Sud-Ouest offre un symétrique intéressant pour l'interconnexion régionale et le couplage entre houilles noire et blanche. Son électrification tardive stimule une « seconde industrialisation » autour de la rationalisation du travail et le développement des filières électrométallurgique, électrochimique et des engrais. Dans un contexte politique libéral, le directeur de la Compagnie du Midi, Jean-Raoul Paul, et « son équipe d'ingénieurs modernisateurs X-Ponts », prennent l'initiative d'électrifier le réseau ferroviaire de la Compagnie de 1902 à 1914 (Bouneau 1990, p. 101-105). Cette initiative privée est relayée, durant la Première Guerre mondiale, par le ministère de l'Armement qui dirige la construction de plusieurs usines hydroélectriques dans les Pyrénées entrant en activité de 1917 à 1920. La Compagnie du Midi reprend la main après la période dirigste de la guerre en réorientant les excédents énergétiques de la houille blanche vers l'électrification des zones rurales et l'industrialisation du piémont pyrénéen sur le modèle du Sud-Est. Son action s'appuie sur l'Union des producteurs d'électricité des Pyrénées orientales (UPEPO), que Paul contribue à créer en 1922 avec son ami et camarade X-Ponts, Jean Maroger, qui présidera l'union jusqu'à sa dissolution en 1946 lors de la fondation d'EDF.

L'UPEPO réunit cinq adhérents fondateurs dont la Compagnie du Midi et la Compagnie électrique industrielle (CEI), partiellement détenue par le groupe suisse Elektrowatt, sont les plus importants. Son premier directeur, Monsieur Laporte (1922-1927), est l'ancien directeur d'EELM. Ce qu'il organise est plus une « entente technique et commerciale » des producteurs d'électricité du Sud-Ouest qu'une alliance financière, le capital de l'union, initialement à 2 millions de francs restant faible par la suite (Bouneau 1985, p. 75). L'UPEPO poursuit trois objectifs : « réalisation de l'interconnexion, cartellisation des ventes, concertation des adhérents sur le développement d'un parc de production régional ». Une démarche de rationalisation commerciale établit « deux catégories de fournitures » pour les clients : A) une souscription suivie correspondant à la fourniture d'électricité de manière quotidienne sur une longue durée ; B) une souscription ponctuelle correspondant à la fourniture d'excédents saisonniers, notamment aux industriels de l'électrométallurgie (Bouneau 1985, p. 81-82). Les tarifs (B) sont en moyenne trois fois moins chers que les tarifs (A) parce qu'ils impliquent des excédents qui seraient perdus s'ils n'étaient pas vendus alors que les tarifs (A) imposent le dimensionnement même du parc électrique. L'UPEPO assure à chaque producteur adhérent un prix stable du kWh modulé par le type de fourniture. Elle s'octroie des frais de gestion et impose des pénalités financières aux producteurs ne pouvant fournir l'électricité promise.

À la fin des années 1920, l'UPEPO est confronté à deux problèmes majeurs : une croissance continue de la demande qui risque de saturer le parc de production et de transport d'électricité ; une faiblesse de rendement des usines de production « à cause de l'apport insuffisant d'énergie de régularisation », c'est-à-dire un manque de bassins de stockage d'eau pour la production hydroélectrique (Bouneau 1985, p. 86). Ce second problème, d'irrégularités journalières et saisonnières des productions, nécessite la rationalisation du parc. Pour ce faire, Paul défend l'idée d'une « interconnexion financière » entre adhérents au-delà d'une

coopération commerciale et technique. La constitution d'un budget d'investissement commun permettrait ainsi de financer les aménagements stratégiques de l'UPEPO (Bouneau 1985, p. 87-88). La mutualisation budgétaire en holding rencontre des résistances des adhérents : sur les 70 millions de francs espérés, Paul n'en réunit que 24. Elle permet la transformation du lac de Caillaouas en bassin de stockage sur fonds commun. Mais, c'est essentiellement sur fonds propres que les adhérents de l'UPEPO aménagent de nouveaux bassins de stockage pour constituer des réserves journalières (Le Hourat, Miègebat) ou annuelles (Artouste, Estaens, Oô, Orédon, Oule). La Compagnie du Midi et la Compagnie électrique industrielle (CEI), « dont le principal actionnaire est le groupe suisse Elektrowatt » (Beltran et Bungener 1987, p. 60), jouent là un rôle stratégique car chacune possède près de 40 % de ces réserves d'eau de régulation. La gestion des irrégularités de production est également en partie résolue par l'extension du parc vers le Massif central. Ce second massif montagneux introduit un levier supplémentaire de régulation car son régime hydraulique est complémentaire de celui des Pyrénées : les hautes eaux du premier sont hivernales, celles du second printanières.

Cette union d'intérêts privés coopère de manière étroite avec le service des Forces hydrauliques du Sud-Ouest (FHSO) dépendant du ministère des Travaux publics et avec l'Office régional d'énergie électrique pour l'administration du parc électrique. La collecte et le partage de statistiques d'exploitation sont stratégiques pour la gestion coordonnée d'infrastructures de plus en plus étendues. L'UPEPO connaît une croissance typique à l'époque de l'ordre de 7 % à l'échelle nationale (cf. figure 2.4). De 5 adhérents et une production électrique de 0,2 TWh en 1924, l'union passe à 16 adhérents et 1,1 TWh en 1937, soit 6 % du bilan national. Les principaux clients sont des industriels (électrochimie, électrométallurgie, papeterie) au début de la période, puis de plus en plus des particuliers. La Compagnie du Midi représente 30 % de la production en 1937 et la traction ferroviaire 12 % de la consommation (pour un réseau électrifié à 45 %) (Bouneau 1990, p. 103). Le parc électrique de l'UPEPO dépasse alors en étendue et puissance toutes les autres interconnexions régionales.

La stratégie coopérative de la Compagnie du Midi et de l'UPEPO favorise la création d'un « complexe industriel pyrénéen ». Ce complexe est centré sur les industries ferroviaire et électrique avec « en amont [des sociétés de] constructions électriques et mécaniques fournisseurs du réseau, en aval [des] sociétés de distribution d'électricité et entreprises d'électrochimie et d'électrométallurgie, consommateurs des excédents d'énergie du Midi » (Bouneau 1990, p. 104). Ce cas d'industrialisation participe d'une forme « mixte » d'économie, où des intérêts privés, fédérés en oligopole avec l'aval des administrations nationales et régionales, mènent « une entreprise d'intérêt général » visant à développer la région Sud-Ouest (Bouneau 1985, p. 101). Le rôle de l'État est double. D'une part, il réglemente de manière importante, dans la tradition minière des Ponts et Chaussées, ce qui donne lieu à une « hyper-réglementation » de l'électricité (Lacoste 1986, p. 123). D'autre part, il collecte et rend publiques, sous l'égide du ministère des Travaux publics, les statistiques d'exploitation afin d'améliorer les prévisions et la gestion des réseaux.

Ce « capitalisme organisé » est incarné dans l'entre-deux-guerres par deux sociétés d'économie mixte d'envergure nationale : du côté de l'énergie, la Compagnie française des pétroles (CFP) créée en 1927 et, du côté des transports, la Société nationale des chemins de fer français (SNCF) créée en 1937 (Kuisel 1981, p. 138, 220). Dans les deux cas, l'État prend en charge les frais d'infrastructures, maritimes et portuaires pour la CFP, ferroviaires pour la SNCF, et les éventuels déficits budgétaires des sociétés privées [3]. Dans les deux cas également, le corporatisme des technocrates formés par l'État et embauchés par les compagnies – ingénieurs

3. « Le déficit du réseau était devenu si gigantesque que l'État fut obligé de venir à son secours. Plutôt que de les nationaliser purement et simplement, le gouvernement choisit de réorganiser les réseaux privés dans un ensemble, afin de réaliser des économies et de coordonner l'exploitation. La loi de 1937 sur les chemins de fer transféra à la SNCF les actifs et les passifs des compagnies privées : l'État était propriétaire de la nouvelle entreprise à 51 % et le Trésor fournit des crédits pour faire face à la dette. La SNCF devait jouir des concessions jusqu'en 1983, date à laquelle celles-ci reviendraient à l'État libres de toutes charges. » (Kuisel 1981, p. 220)

X-Ponts dans le cas de l'électricité et du ferroviaire – facilite la mixtion d'intérêts hétérogènes, publics et privés, pour former des quasi-monopoles d'exploitation économique.

5.1.2 De l'hydraulique à l'économie, la pensée modélisatrice de Pierre Massé

C'est dans ce contexte d'économie mixte et d'équilibrage des réseaux entre houilles noire et blanche que Pierre Massé rencontre l'industrie électrique. Fin 1927, à 29 ans, cet X-Ponts prend le poste de directeur général de la Compagnie électrique industrielle (CEI). Apprenti technocrate, qui vient de quitter le service des Ponts et Chaussées de la Seine où il s'ennuyait, il partage les valeurs technocratiques d'optimisation pour résoudre les problèmes d'organisation (Beltran et Bungener 1987, p. 60). Il ne pense pourtant pas de manière routinière. Pour reprendre la métaphore du sport comme « processus social en miniature » (Elias et Dunning 1994, p. 70), Massé connaît les règles du jeu mais sait en jouer en dribblant avec les règles ou en jonglant avec d'autres jeux. Son imaginaire est toujours plus raffiné que son *habitus* technocratique ne le laisserait supposer.

Expériences professionnelles de la gestion hydroélectrique

Massé réfléchit aux potentiels des techniques en situation (cf. 1.2.2). Dans le cadre de la Mission interalliée de contrôle des usines et des mines (MICUM) de l'Allemagne vaincue, il a visité en 1924 une usine de pompage hydraulique en Rhénanie (Beltran et Bungener 1987, p. 61). Une décennie plus tard, il voudrait en construire une semblable sur la Seine alors qu'il est responsable de la branche hydroélectricité de la CEI, mais son patron de l'époque, Ernest Mercier, trouve l'idée trop spéculative. De sa mission en Allemagne, il retient pourtant « deux éléments essentiels dans son cheminement intellectuel : la régulation des flux et l'élément liquide ». Il s'affirme peu à peu comme un technologue fasciné par la phénoménologie de l'eau et de l'électricité. Leur commune « fluidité » et « divisibilité » l'interpelle (Beltran et Bungener 1987, p. 60). Concepts et affects l'attirent vers ces fluides divisibles et mouvants qu'ils projettent dans ses réalisations professionnelles.

Son embauche à la CEI conduit Massé vers les aménagements hydroélectriques du sud-ouest de la France. Il met son expertise et son enthousiasme au service de la régulation du parc électrique vis-à-vis des « aléas climatiques ». Il supervise un chantier pyrénéen, qui s'étire sur la décennie 1930, en amont du barrage d'Oô (alt. 1 500 m.) alimenté par la Garonne : l'équipement hydroélectrique et le couplage du lac du Portillon et du lac Glacé d'Oô, sensiblement à la même altitude (2 600 m.), mais séparés par une dénivellation importante (Beltran et Bungener 1987, p. 61-62). Massé distingue les rôles du barrage du Portillon, « appel[é] en principe à assurer la base du diagramme » de production, et celui d'Oô, prenant en charge « les pointes de peu de durée ». Il défend donc l'interconnexion pour des raisons technologiques d'optimisation du parc.

L'UPEPO est un acteur important en France du mouvement d'interconnexion interrégionale des années 1930. Au début de la décennie, elle « réalis[e] les jonctions avec les trois régions où l'union veut se créer des débouchés rémunérateurs : pays de Loire, Massif central-région parisienne et Provence » (Bouneau 1985, p. 90). Une gestion centralisée des infrastructures est cruciale. Paul et Laporte ont fait installer, dès 1927, un « centre répartiteur ou dispatcher » à Lannemezan, dans les locaux de la Compagnie du Midi, pour réguler l'ensemble du parc. Le *dispatcher* « assure le fonctionnement en parallèle des centrales : il répartit équitablement la charge, règle tension et fréquence avec un système de pénalités pour les contrevenants, supervise les manœuvres [... en donnant souvent le] rôle de synchronisateur [...] à l'usine du lac d'Oô de la CEI » (Bouneau 1985, p. 80). Si le problème est technique, il est aussi économique. Il s'agit de gérer des flux et des stocks d'énergie dans un environnement aux variables multiples (coûts, distances, puissances, rythmes) dont certaines sont contraintes (réserves de charbon) et d'autres partiellement aléatoires (régime hydraulique). La solution paraît simple :

réaliser des économies de charbon en utilisant à bon escient le fil et la réserve d'eau tout en assurant la demande contractuelle de puissance.

Le dilemme opérationnel est aussi ancien que le mixte des houilles noire et blanche. « Le problème qui se pose à chaque instant à l'exploitant est d'arbitrer un flux contre un stock, un profit immédiat et certain contre une espérance » (Massé 1946, p. 27). Selon Massé (cité par Beltran et Bungener 1987, p. 62), jusque-là, « les exploitants fonctionnaient selon une logique empirique qui préconisait d'utiliser d'abord le fil de l'eau, en réservant, mais sans priorité évidente entre eux, l'eau de lac et le combustible stockable ». Une telle affirmation est difficile à croire si on la confronte à l'organisation centralisée, à la collecte de données statiques et aux démarches d'optimisation de l'UPEPO durant les années 1930. Sans doute, exagère-t-il ici son originalité par rapport à sa génération [4]. Car, l'énoncé du problème d'optimisation par la régulation des réservoirs a bien une base collective, issue des pratiques d'interconnexion et de gestion centralisée des parcs mixtes de l'entre-deux-guerres. Son expérience de guerre a rendu plus aiguë, par ses aspects dramatiques, l'idée d'une contrainte sur les réserves de charbon.

L'originalité de Massé se situe dans la manière dont il résout le problème de gestion d'un parc électrique : par une approche modélisatrice et calculatoire. Ses aptitudes mathématiques, ses appétences à la fois pratiques et théoriques ainsi que son parcours intellectuel [5] lui permettent de traduire ce problème d'opération en un problème d'analyse fonctionnelle. Massé définit ainsi un parc d'exploitation comme un système fermé, en partie contraint (réserves de houille noire), en partie aléatoire (réservoirs de houille blanche), dont le fonctionnement variable présente des maximums et des minimums de production, c'est-à-dire des *optimums*. Ce faisant, il transforme un problème complexe de variations en un système d'équations fonctionnelles ayant au moins une solution calculable. Au-delà d'aptitudes intellectuelles certaines, sa créativité s'ancre à la culture technocratique d'X-Ponts. Car, les « Grands Corps transforment les problèmes *a priori* difficiles en modes opératoires réalistes » (Thoenig 1987, p. 313). Ce qui qualifie Massé comme technocrate ici, et le distingue d'un technicien qui aurait su poser et résoudre le calcul, c'est sa ferme conviction que la détermination d'optimums peut servir l'organisation sociale *et* son désir assumé de l'appliquer à la rationalisation de la société.

Flux, stocks, optimums : une régulation des aléas futurs

La modélisation des flux et des stocks (d'énergie) que Massé développe à partir des années 1940 se construit ainsi à la croisée d'un problème opérationnel (interconnexion), d'une conceptualisation mathématique (optimisation de variables) et d'un engouement pour les morphologies fluides (hydraulique et électrique). De fait, il élargit la modélisation flux-stock-optimum d'énergie, de l'hydraulique à l'économie. En 1946, il publie un ouvrage intitulé *Les Réserves et la régulation de l'avenir dans la vie économique*, qui synthétise et approfondit la pensée modélisatrice qu'il a développée depuis son entrée dans la filière hydroélectrique en 1927. Cet ouvrage, qui le fait connaître à l'époque, le classe rétrospectivement parmi les modélisateurs en « recherche opérationnelle, analyse des systèmes et gestion », un « champ composite » de la modélisation datant des années 1940 et dont « la notion majeure [est] celle d'optimisation » (Armatte et Dahan Dalmedico 2004, p. 256-257). Une telle interprétation est trop rapide. Si Massé est effectivement un expert en économie mathématique, il redistribue, une nouvelle fois, les cartes du jeu social : la modélisation quantitative et le calcul d'optimum sont

4. Dans son premier ouvrage de synthèse, Massé (1946, p. 38) reconnaît pourtant une dette à certains « pionniers » (Pendariès, Malterre, Eydoux) dans la compréhension de la régulation hydroélectrique par les réservoirs, aux travaux d'« amis de [sa] génération » (Varlet, Boulinier, Giguet, Gibrat, Bourla, Schuhl, Halphen, Richard, Tissier, Le Brun) ainsi qu'à E. Mercier, R. Boutteville et ses autres « collaborateurs de tout rang » à la CEI.

5. En parallèle de son travail à la CEI, Massé réalise une thèse de mathématiques sur la modélisation de certaines ondes hydrauliques de surface (appelées « intumescence »), qu'il soutient en 1935.

certes importants mais elles doivent être associées à la philosophie et à la morale pour saisir la complexité de l'économie. Technicien et technocrate, Massé est aussi technologue. Selon quelles modalités combine-t-il les pensées calculante et méditante que Heidegger opposait ?

Une analyse épistémologique des *Réserves et la régulation de l'avenir dans la vie économique* permet de répondre précisément à cette question. Massé justifie la validité des transferts disciplinaires qu'il opère par l'analogie entre phénomènes : les aléas des marchés financiers correspondent aux aléas climatiques ; les circulations et entreposages de produits (ou de monnaies) correspondent aux débits et réservoirs hydrauliques ; etc. Ceci le conduit à repérer des invariants entre domaines. Ainsi, la mise en réserve des énergies n'est qu'un autre nom pour l'« arbitrage dans le temps », pilier de l'économie classique de Vilfredo Pareto (Massé 1946, p. 6-10). L'analyse qui en découle, en termes de stocks et de flux, est donc généralisable à une variété de phénomènes (énergies, matériaux, capitaux) par échange de variables. Il faut ensuite ordonner les variables en un système d'équations, dont la forme symbolique se prête bien à l'exercice, puis le résoudre par analyse fonctionnelle pour déterminer des optimums d'exploitation et d'équipement, d'un parc hydroélectrique par exemple.

Massé (1946, p. 15) construit des modèles successifs de l'économie en « séri[ant] les difficultés pour les surmonter ». Son cadre théorique reste celui d'une « théorie individuelle » d'acteurs isolés (personnes, compagnies) plutôt que le cadre interdépendant et global d'« une théorie générale » à la manière de John Maynard Keynes (1936). Mais sa portée est « générale » car « sous tous les régimes [économiques], il y a une gestion des réserves qui est meilleure que les autres » (Massé 1946, p. 18). Peut ainsi être ouverte une voie nouvelle par l'intégration de « l'aléatoire » dans les modèles économiques. Ceci est d'autant plus crucial pour Massé (1946, p. 11) qu'« une nature sans hasard, une économie sans risque [...] paraissent terriblement schématiques », délaissant par exemple des mécanismes de compensation des aléas aussi importants que la sécurité sociale et les assurances. D'autre part, la plupart des acteurs de l'économie (industriels, commerçants, financiers, consommateurs, épargnants) estiment avant d'agir une « fourchette » d'éventualités et d'évolutions en essayant de prévoir les aléas futurs. Pour modéliser l'aléatoire, il procède à nouveau par analogie en rapprochant les phénomènes économiques du mouvement (brownien) des particules microscopiques de nature probabiliste (Massé 1946, p. 13-14). Il distingue ainsi deux types d'aléas : faibles ou de « premier degré », ils suivent des « répartitions de probabilités définies et stables » (climats, récoltes) ; forts ou de « second degré », ils ne se prêtent qu'à « de vagues appréciations de probabilité » (troubles sociaux, guerres). Son ouvrage considère d'abord un « avenir déterminé » basé sur le principe de « maximisation du profit », puis, en seconde partie, un « avenir aléatoire » basé sur le principe de « maximisation de l'espérance » où le profit lui-même devient « aléatoire » (Massé 1946, p. 24). Chaque principe d'optimisation permet une résolution du système d'équations pour obtenir un optimum. Dans les deux cas, il s'agit « d'un optimum entendu en probabilité » (Massé 1946, p. 229). Ceci fait écrire à Roger Boutteville (1946, p. iv), qui préface l'ouvrage, que Massé se pose en « probabiliste convaincu ». L'incertitude probabiliste augmente à travers la montée en complexité du profit à l'espérance : la recherche de l'optimum conduit à un *résultat* dans un « avenir déterminé » et à une *règle* dans un « avenir aléatoire » (Massé 1946, p. 27). La différence d'hypothèses induit une discontinuité ontologique entre les deux cas, « de la régularisation du connu à la *régulation du hasard* ».

Au-delà de sa maîtrise technicienne, l'appréhension de l'économie par Massé est fascinante par une subtile combinaison d'audaces technocratiques et de prudences technologiques (cf. 1.6.1). À travers son projet modélisateur, Massé endosse les trois traits caractéristiques des technocrates repérées par Richard Kuisel (1981, p. 144-145) : la détermination technique d'une « bonne solution » pour prendre une décision – ici le calcul d'un optimum économique – ; la valorisation de « l'efficacité » technicienne – ici la modélisation analytique et formelle

– ; « la promesse d'une société d'abondance » grâce à la technologie – ici, par « régularisation » et « régulation » des aléas économiques. À l'inverse, en chercheur consciencieux, il souligne les limites des hypothèses et des résultats. Son dernier chapitre relativise la deuxième partie de l'ouvrage basée sur la maximisation de l'espérance en testant un nouveau principe d'optimisation, *la limitation du risque*, qui introduit un « point de vue radicalement différent » (Massé 1946, p. 35). De même, le « temps de corrélation » de l'ordre de 5 à 10 ans des phénomènes économiques prévient, selon lui, toute prétention sérieuse à des prévisions de 30 ou 50 ans (Massé 1946, p. 14). Enfin, il pense souvent en technologue. Il se dit honnêtement embarrassé parce que ses travaux « posent plus de problèmes qu'ils n'en résolvent » (Massé 1946, p. 37). Il doute, contre Maurice Allais, d'une possibilité de réalisme en économie : contre l'idée exprimée par Allais d'une d'« prévision parfaite » cachée sous l'« apparence » des phénomènes, Massé (1946, p. 11) ne considère pas la modélisation « comme représentation adéquate du réel » et adopte une épistémologie instrumentale des modèles. Ceci le convainc de combiner l'économie mathématique à des principes moraux et sociaux pour aborder, sinon résoudre, « le problème très général de la régulation du hasard » dans les économies industrielles.

La pensée calculante de Massé est sous-tendue par une réflexion anthropologique à laquelle l'auteur voudrait donner une portée universelle : « C'est par la mise en réserve que l'homme se libère du hasard. Libération qu'il faut entendre au sens le plus large, intellectuel, biologique et social. » (Massé 1946, p. 3) Cet énoncé sur l'émancipation humaine par la constitution de stocks est justifié par des citations de savants aussi différents qu'un philosophe (Paul Valéry), deux écrivains (Francis Jammes, André Gide), un biologiste (Pierre Vendryès) et un sociologue (André Siegfried). Mais, la définition que Massé (1946, p. 6) donne à « réserves » montre sa conviction d'en faire une loi générale de l'histoire humaine : « une accumulation de biens susceptibles de garantir et d'améliorer la condition humaine ». Une telle définition porte simultanément un jugement de valeur qui fait de la réserve un bien existentiel et une démesure intellectuelle qui fait d'un énoncé situé un principe universel d'évolution humaine. Sur la démesure de la recherche d'un principe universel, qui a été, depuis, balayée par la critique post-moderne (Lyotard 1979), Massé ressemble fort à son contemporain états-unien, l'anthropologue évolutionniste, Leslie White, qui, trois ans plus tôt, en 1943, égalait le développement culturel d'une société au produit de l'énergie consommée par l'efficacité d'utilisation (cf. 1.3.4). Sur la valeur existentielle de la mise en réserve, le désir de Massé est celui de la population européenne qui, sortant de cinq ans de pénurie, s'apprête à embrasser, à la suite des États-Unis, « la société de consommation » orientée par la croissance indéfinie de la production et l'expansion illimitée du « système des objets » (Baudrillard 1968).

Le projet de Massé est techno-politique dans la mesure où son approche interdisciplinaire de l'économie fixe des objectifs politiques à la société industrielle et que ses modélisations économiques leur donne formes, au moins en imagination, à travers des outils de prévision. Les résultats du modèle économique indiquent une direction générale à la politique – celle d'une régulation des flux et des stocks selon une optimisation mathématique – que « la raison commande ». Mais, l'incertitude des résultats, due notamment aux aléas futurs dont certains ne peuvent être modélisés ou prévus, justifie l'ajout de règles morales. Massé (1946, p. 229) suggère « non de renoncer aux avantages de l'optimum, mais de subordonner ce qu'il y a en lui d'incertain à des exigences sociales simples et majeures, comme la sécurité de l'emploi, la stabilité des prix, la continuité de l'investissement. » Il souhaite donc rectifier le laissez-faire du libéralisme – « "Tout est pour le mieux", disaient les économistes classiques, (abstraction faite d'écarts secondaires) » – par une régulation politique de l'économie – « *ce mieux ne nous convient pas* » – informée par des calculs de prévision.

Ainsi, ce texte de 1946 se situe à la jointure de deux formes de capitalisme en France : le « capitalisme organisé » de l'entre-deux-guerres et la « planification du capitalisme » de la période 1940-1980 (cf. 2.2.3).

Si Massé hérite de la première forme avec ses premières expériences professionnelles du stockage de l'énergie durant les années 1930, il contribue à forger la seconde forme à travers ses modélisations économiques de l'avenir et ses postes d'administrateur de l'État : ministère de l'Équipement (1946-1948), Électricité de France (1948-1959), commissariat général du Plan (1959-1966). La génération de technocrates français à laquelle il appartient produit ainsi les outils de prévision et met en œuvre la planification à partir des années 1940.

5.2 Expériences du temps et techno-politiques du futur

Ce deuxième imaginaire technicien se situe à l'intersection de pratiques politiques – la planification – et d'outils technologiques – la prévision. S'il est très visible durant les Trente Glorieuses, ses soubassements sont plus anciens. Déjà, la « Première Guerre mondiale [induit] une rupture avec le passé » en termes de planification industrielle (Kuisel 1981, p. 21). Elle correspond à « une crise du temps » au sens défini par François Hartog (2003, p. 37-38), c'est-à-dire un moment où « perd[ent] de leur évidence les articulations du passé, du présent et du futur ». Les ruptures du présent ayant dépossédé le passé des « leçons de l'histoire », le futur devient le guide principal en politique. Ce « régime moderne » d'historicité ne débute pas cependant avec la « Grande Guerre » même si celle-ci « provoque un de ces moments d'arrêt que Hannah Arendt a nommés brèches (gaps) dans le temps » (Hartog 2013, p. 240). C'est la Révolution française qui ouvre cette modernité temporelle en fermant l'Ancien Régime. Hartog formule ainsi « la clé d'intelligibilité du monde depuis 1789, où c'est désormais l'avenir qui éclaire le passé et le chemin de l'action » (Hartog 2013, p. 228).

La grille d'analyse de Hartog, forgée à partir de textes littéraires et des humanités (Hérodote, Chateaubriand, Tocqueville, etc.), s'applique au registre technicien. Le problème du stockage d'énergie montre que le futur accroît son emprise par la mise en réseau électrique des sociétés occidentales d'abord, du reste du monde ensuite. En stimulant l'essor des outils de prévision et leur mise en œuvre politique par la planification, il transforme en profondeur l'expérience du temps des habitants du XX^e^ siècle. En d'autres termes, le problème du stockage de l'énergie déploie une techno-politique du futur.

5.2.1 Expériences et espérances en régime technicien

Reinhardt Koselleck (1997) a introduit une conceptualisation heuristique de l'époque contemporaine comme l'accroissement de tensions entre le champ d'expérience et l'horizon attente d'une génération. À sa suite, Hartog (2003) caractérise le « régime présentiste » de la fin du XX^e^ siècle comme la réduction radicale de l'expérience humaine et la dilatation, par contrepartie, des horizons mémoriels et patrimoniaux. C'est le contraire d'un dépassement de la modernité au sens de Koselleck : « Plus grande est l'expérience, plus prudente et ouverte l'attente » (Koselleck cité par Hartog 2003, p. 40). Le régime présentiste ressemble plutôt à ce qu'Anthony Giddens appelle la « modernité radicale » et Jean-François Lyotard la « post-modernité » (Nizet 2007, p. 64). La dissymétrie entre expérience et attente est un facteur explicatif du foisonnement d'économies de la promesse au XX^e^ siècle portées par les technosciences. La grille d'analyse, que Hartog applique à toute une société, devrait néanmoins être testée plus en détails au niveau des stratifications sociales. Il serait intéressant de comparer le rapport entre expérience et attente pour des catégories professionnelles et disciplinaires différentes. Dans un régime technicien en expansion, le rapport augmenterait-il pour les métiers opératoires (techniciens) et diminuerait-il pour les métiers aux prises avec les symboles et les significations (philosophes ou artistes) ? Quelle que soit la réponse à cette question et la possibilité de trouver un indicateur quantitatif pertinent, la tension entre expérience et attente offre une perspective de lecture des enjeux de la technologie à l'époque

contemporaine.

« Expérience » prend deux significations dans la culture technique. D'une part, elle correspond à l'ensemble de connaissances acquises durant une existence, notamment au cours d'un parcours professionnel. C'est le sens commun retenu par Koselleck dans l'expression *champ d'expérience*. D'autre part, l'expérience renvoie à un ensemble de méthodes et de schèmes créatifs permettant de résoudre des problèmes de manière opératoire. Elle se rattache alors à un *champ d'expérimentation* caractéristique des technosciences. Avoir l'expérience et faire une expérience sont les deux dimensions de l'expertise scientifique et technologique [6]. Ces deux aptitudes sont convoquées en « démocratie technique » pour légitimer le statut social et justifier le rôle politique des experts (cf. 1.3.4). Elles peuvent être utilisées, dans une perspective techno-politique, pour qualifier les « experts », dont l'expérimentation est survalorisée, au détriment des « profanes », dont l'expérience est dévalorisée.

La double expérience technicienne s'efforce de combler les attentes capitalistes. Il en est ainsi dans les années 1860 lors de la controverse initiée par William Devons en Grande-Bretagne concernant une possible pénurie du charbon à l'horizon d'un siècle (cf. 3.3.1). Sa prévision, en suggérant la baisse de la production industrielle, génère une vague d'anxiété car l'espérance des milieux d'affaires est une croissance sans limite. Pour raffermir cet horizon d'attente productiviste, technocrates et techniciens agissent sur le champ d'expérience de deux manières. C'est le rôle social de la technologie : organiser le monde contemporain. D'une part, les géologues modifient les méthodes de prévision en ajoutant aux « réserves prouvées » de charbon les « réserves probables » ; d'autre part, les ingénieurs proposent la diversification des sources de puissance par conversion de forces naturelles. En d'autres termes, ces techniciens britanniques font deux promesses à leurs contemporains, celle d'une *découverte* due à de nouveaux moyens d'exploration et d'exploitation et celle d'une *invention* de nouveaux dispositifs de conversion. Pour eux, comme pour leurs héritiers technocrates du XX^e^ siècle, « le potentiel productif de la technologie contient la promesse d'une société d'abondance » (Kuisel 1981, p. 145).

Lorsque ces promesses sont faites, elles trouvent une légitimité dans le statut professionnel des techniciens qui les défendent. Mais, en l'absence de réalisations concrètes, elles s'apparentent à une profession de foi soutenue par un idéal de « progrès ». Elles sont d'autant mieux acceptées que la culture technicienne déborde des milieux professionnels pour imprégner le reste du social. Les trois décennies d'inquiétude sur la pénurie de charbon (1860-1890) suggèrent que les milieux d'affaires et le public n'ont pas alors cru à ces promesses. Cette méfiance fut justifiée *a posteriori* puisque la promesse d'inventer de nouveaux convertisseurs n'a pas été tenue pendant un siècle et demi. Ce n'est qu'au début du XXI^e^ siècle que les machines éoliennes et les panneaux photovoltaïques se constituent en filières industrielles.

Or, dès le derniers tiers du XIX^e^ siècle, William Thomson (1881) prédisait que la force du vent, démodée, allait revenir en grâce. Louis Simonin réclamait la mise du « soleil en bouteille » pour façonner un avenir radieux. Ces promesses technologiques, par la foi progressiste qu'elles incorporent et par le temps long de leur concrétisation, sont analogues à des prophéties modernes. C'est le rôle culturel de la technologie : ordonner le monde contemporain et donner une signification à ses changements. Mais, ces promesses ont également une puissante fonction heuristique. Elles stimulent l'expérimentation technoscientifique et raffermissent l'expérience professionnelle des techniciens et des technocrates. En prenant comme perspective la maîtrise du futur, les techniciens se donnent *une contrainte créative*. En effet, ils renouvellent leurs imaginaires en

6. J'ai rencontré de manière plus spécifique la notion d'expertise dans le cadre d'une unité d'enseignement intitulée « Sciences et sociétés : expertise, risque, éthique » que j'ai mise en place et coordonnée (2017-2020) dans le master Épistémologie, histoire des sciences et des techniques de l'université de Nantes. À cette occasion, je reprenais l'idée exprimée par Isabelle Stengers et Bernadette Bensaude-Vincent (2003, expert) que le sens traditionnel d'expert (celui qui a de l'expérience) a été éclipsé au profit du sens moderne de spécialiste d'une discipline scientifique ou technique. Mais, je crois plutôt que le sens moderne incorpore également l'idée d'une accumulation d'expériences passées.

explorant une dimension temporelle inédite à la manière des auteurs de science-fiction. Lorsque Thomas Mendenhall (1887, p. 225) prédit ce que pourrait être la place de l'électricité au XX^e siècle en conclusion de *A Century of Electricity*, sa démarche créative, quoique moins audacieuse, est semblable au travail de Jules Verne (1860) extrapolant et systématisant les traits mécanisés de son époque pour former l'image de *Paris au XX^e siècle*.

Mais, contrairement à la créativité littéraire, l'extrapolation technicienne est projetée dans le monde physique. Thomas Edison et de nombreux inventeurs-entrepreneurs électriciens de son époque considèrent les « modèles mécaniques et électriques » comme le meilleur moyen de tester la faisabilité d'une idée et de convaincre les financiers d'investir dans leurs projets commerciaux (Hughes 1989, p. 43-52). Si une promesse n'est pas tenue en termes économiques, l'entreprise technologique y gagne néanmoins en prototypes et procédés nouveaux. Lorsque William Thomson (1881, p. 384-385) imagine un réservoir de 40 000 batteries Faure pour recueillir la puissance des chutes du Niagara transmise par le réseau électrique, il a tort au regard de la solution qui s'étend et verrouille les réseaux électriques en Europe et aux États-Unis par des transformations de tension (cf. 4.2.2). Mais sa réflexion s'incarne dans le développement de batteries-tampon pour la régulation de charge des premières centrales électriques (Hospitalier et Bainville 1901, p. 54). Elle enrichit également, par son « système méthodique » de substitution de blocs de batteries, la logistique industrielle de gestion des flux et des stocks de puissance (cf. 4.2.1). Or, l'intermittence des « forces naturelles » pose de sérieux problèmes aux techniciens de la fin du XIX^e siècle pour leur conversion en travail utile et leur stockage sous forme de réserve de puissance (Marrec 2018a, p. 82-85). Ceci explique, en partie, pourquoi les forces naturelles demeurent à l'état de « nains énergétiques » jusqu'au début du XXI^e siècle dans les sociétés industrielles (Teissier et Marrec 2019, p. 317). La première promesse en revanche a été tenue à moyen terme. Les « réserves probables » de charbon ont été matérialisées par le repérage de « charbon caché » dans des houillères jusque-là inconnues et par l'exploitation de filons difficiles d'accès grâce à des améliorations technico-économiques.

5.2.2 Rivages et horizons techniques de la modernisation industrielle, 1900-1930

Certains observateurs décèlent, au tournant du XX^e siècle, un renforcement de l'intervention économique des États industriels que le social-démocrate allemand Rudolf Hilferding qualifie de « capitalisme organisé » (cf. 2.2.3). Intervention de l'État, concentration industrielle, planification économique, coordination public-privé, ces tendances préexistantes sont dramatiquement accentuées durant la Première Guerre mondiale (Kuisel 1981, p. 19-21, 91-93). La France est un cas d'école par le degré de centralisation, la rapidité de la mise en œuvre à l'échelle du territoire, l'ampleur et la diversité des matières premières (métaux, charbon, coton, laine, cuir, pétrole) et des produits manufacturés et alimentaires. Du fait de l'urgence et de la pénurie, la gestion des flux prime largement sur la constitution de stocks (Jeanneney 1984, p. 9).

La Première Guerre mondiale constitue une rupture en terme de planification. Voyons un cas emblématique : la réfrigération des produits alimentaires. Celle-ci renvoie simultanément au conditionnement et à l'emmagasinement. Le conditionnement transforme la matière biologique en matériau hybride)organique-inorganique) et comestible. L'emmagasinement met en réserve les matériaux transformés et conserve leur état comestible au cours du temps. Il y a une analogie structurelle entre la réfrigération et l'énergie. Le conditionnement alimentaire s'apparente à la conversion énergétique et l'emmagasinement des aliments au stockage d'énergie. En outre, la « chaîne du froid » joue le rôle des chaînes d'approvisionnement de l'énergie. Toutes deux ont pour fonction de réguler l'espace et le temps.

Alors que la viande congelée est quasiment inconnue en France au début de l'année 1914, les ministères de la

Reconstruction industrielle, du Commerce, des Affaires étrangères et le commandement militaire construisent en quelques mois à peine une chaîne du froid « militaire » [7]. Une riche alimentation carnée a été jugée stratégique par l'état-major. À partir de février 1915, 20 000 tonnes de viande congelée sont transférées, chaque mois, à travers un réseau maritime et ferroviaire reliant l'*hinterland* argentin, sous domination britannique, aux entrepôts frigorifiques des frontières de l'est de la France (Delaire et Teissier 2020, p. 59-63). Ce flux massif est régulé par des zones de stockage frigorifique : ports, villes, fronts. Pour faire fonctionner ce complexe agro-industriel à une échelle transocéanique, l'administration française enrôle des acteurs privés – fermes argentines, sociétés maritimes, ferroviaires et frigorifiques – et gère un nombre croissant de navires, de wagons, d'entrepôts frigorifiques et de matériels industriels. Par cette planification de l'approvisionnement alimentaire, l'État procède à une double rationalisation du monde.

La première forme de rationalisation consiste en une « systématisation » ou mise en réseau du transport et stockage frigorifiques de produits alimentaires. Dans la terminologie pertinente d'Alain Gras (Gras 1997, p. 30), ce système frigorifique est qualifié de « secondaire » parce qu'il repose sur des systèmes préexistants, en l'occurrence les réseaux électriques et ferroviaires. Cette superposition d'infrastructures rend les systèmes secondaires moins fluides, moins centralisés et moins homogènes que les primaires. Les uns comme les autres sont tissés d'hétérogénéités sociotechniques que nous avons appelées « rivages techniques » avec Ronei Clecio Mocellin [8]. Ces rivages techniques importent car ils interrompent, sans les supprimer, les logiques d'intégration et les chaînes de commandement des systèmes sociotechniques. Ils entravent ainsi la fluidité de circulation des produits et des êtres et s'opposent à l'expansion continue des systèmes sociotechniques. À l'inverse, les sociétés transnationales sont aptes à coupler les zones de production et de consommation sur des distances planétaires en contrôlant les rivages techniques tels que ports et aéroports (Clecio Mocellin et Teissier 2020a, p. 12). Elles participent de la « généralisation » des mondes contemporains au XX^e^ siècle par l'imposition du modèle productiviste-consumériste aux territoires sous domination des États européens et nord-américains (Balandier 2004, p. 168). Mais, le phénomène est aussi ancien que le capitalisme marchand des économies-mondes de Gênes et Venise à la Renaissance. Comme le montre Fernand Braudel (1985, p. 115-117), le niveau capitaliste de l'économie ouvre les « marchés extérieurs [...] en chaîne, l'un après l'autre [... par] zones successives » et impose, par des effets de seuil, des oligopoles maîtrisant les chaînes commerciales longues jusqu'à « tend[re] vers le monde entier ».

La seconde forme de rationalisation renvoie encore une fois à l'« arraisonnement de la nature ». De même que « l'écorce terrestre se dévoile aujourd'hui comme bassin houiller, le sol comme entrepôt de minerais », les plaines argentines sont forcées (par la Grande-Bretagne) de devenir un « réservoir » de viande et mises en demeure de livrer leurs « stocks » aux armées alliées (Grande-Bretagne, France) (Heidegger 1954, p. 20-22). Cet arraisonnement ne porte pas seulement sur l'énergie (cf. 3.3.3) mais englobe toute forme de matière, y compris le vivant. L'animal, domestiqué, est parqué ; le bétail, tué, est débité ; le stock, congelé, est livré. La nature est arraisonnée en trois temps. Mais, chacun temporalité peut être découplée des autres par un moment d'attente : le parcage du bétail d'une part ; l'entreposage de viande équarrie et frigorifiée d'autre part. Comme pour l'énergie, la rationalisation est un désir de découpler les moments de production et de consommation afin

7. L'écriture de la section 5.2.2 est dérivée de mes articles avec Étienne Delaire (2020) et Ronei Clecio Mocellin (2020a), publiés dans un numéro thématique des *Cahiers François Viète*, que j'ai proposé d'intituler *Rivages et horizons techniques des mondes atlantiques au vingtième siècle* (Clecio Mocellin et Teissier 2020b).

8. « Le "rivage technique" est un concept intéressant par son dualisme : comme rivage, il marque une frontière, qui peut pourtant être franchie ; comme technique, il agence des éléments naturels (géologiques, climatiques, botaniques, etc.) et des ensembles artificiels (génie civil, machines, échanges, etc.) [...] Zone de passage et de contrôle, le rivage rompt les flux et impose des temps d'arrêt et de stockage. Il fragilise en outre la chaîne de commandement au sein des réseaux contigus et impose aux jointures des concertations politiques et juridiques entre parties prenantes du système. » (Clecio Mocellin et Teissier 2020a, p. 5-6)

d'éviter tout retard ou rupture d'approvisionnement. Le premier découplage est aussi ancien que les sociétés agricoles sédentarisées du néolithique. Le second découplage est propre à la seconde industrialisation. « Clé du dispositif, le frigorifique est un puits spatio-temporel permettant d'ajuster la variable durée-du-stockage. » (Delaire et Teissier 2020, p. 85) La réfrigération stoppe la corruption des denrées et fige artificiellement le temps. Les semaines de navigation atlantique, les journées de circulation ferroviaire et les heures de manutention aux passages des rivages techniques sont comme suspendues dans une relation immédiate de la production à la consommation. La « chaîne du froid » dilate l'espace de commercialisation des produits frais sans altération (en principe) du goût alimentaire jusqu'à l'échelle planétaire (Delaire et Teissier 2020, p. 58).

Alors que la systématisation enchaînait des rivages techniques (stocks) à des réseaux de transport (flux), administrés par un complexe industriel public-privé, l'arraisonnement de la nature pointe vers un « horizon technique ». Si le rivage était une manière de faire et d'administrer, l'horizon est une façon de voir et de représenter. Il dessine, dans le cas du système frigorifique, un imaginaire technicien marqué par la puissance des machines (thermiques), la concentration des puissances (entrepôts de stockage), une croissance industrielle (transformation et flux de produits congelés) et la maîtrise des temporalités (production-consommation). La systématisation et l'arraisonnement de la nature incarnent, pour certains techniciens, militaires et administrateurs de l'époque, une *modernisation* désirable qu'ils s'efforcent de poursuivre dans les années suivant la Première Guerre mondiale alors que le contexte n'est plus ni à l'urgence ni à la pénurie. Cette entreprise modernisatrice s'efforce d'étendre le système frigorifique aux marchés civils et halieutiques. Elle est conduite dans le cas de la pêche par l'État en concertation avec les industriels du froid et les professionnels de la mer au cours des années 1920 (Delaire et Teissier 2020, p. 63-72). La modernisation frigorifique projette ainsi l'horizon technicien sur les rivages de l'Atlantique nord.

L'extension frigorifique au monde de la pêche s'inscrit dans un mouvement modernisateur plus vaste. Étienne Clémentel est l'une des figures les plus emblématiques du mouvement. La continuité de sa fonction de ministre du Commerce et de l'Industrie (1915-1919) pendant et après la Première Guerre mondiale lui donne la possibilité de promouvoir une planification techno-politique du pays au-delà de situations d'urgence et de pénurie, une économie « orientée par l'État » selon ses mots (cités par Letté 2011, p. 181). Ce programme utopique de Clémentel au sens d'un « gouvernement idéal des populations » s'apparente à l'intervention de l'État pour électrifier le territoire national à partir des années 1920 (cf. 5.1.1). Quatre siècles séparent ainsi la formulation littéraire par Thomas More d'une *Utopie* à sa mise en œuvre politique par l'État français. En 1917, Clémentel « mobilise » les experts de la Direction des études techniques et du Comité consultatif des arts et manufactures du ministère pour établir un bilan industriel de la France et proposer des réformes structurelles de l'industrie française (Letté 2011, p. 167).

Le *Rapport général sur l'industrie française, sa situation, son avenir* formule en 1919 l'ambition modernisatrice de Clémentel. Il hérite des rapports de guerre par sa recherche de « solutions pour l'avenir » mais s'en démarque par « l'ampleur, la cohérence et l'ambition de synthèse » (Letté 2011, p. 169). Il identifie trois problèmes d'approvisionnement de la France, en capitaux, en matières premières et en énergie, pour lesquels il propose des solutions. Pour les capitaux, il en appelle à la poursuite de la coopération (entre Alliés) pour aider « à régulariser et à stabiliser [la] situation financière » des pays les plus touchés par le conflit (France et Belgique) (Letté 2011, p. 186). Pour les matières premières, il défend, outre le recours aux colonies, la densification des réseaux maritimes, fluviaux et ferroviaires et la multiplication des connexions internationales de la métropole avec l'Europe centrale, l'Orient et l'Atlantique (Letté 2011, p. 193). Pour l'énergie, il conçoit « une solution plus large » que les optimisations de prix et de consommation par l'« aménagement » hydroélectrique. Une

estimation prévoit qu'il est possible d'ajouter au « million de chevaux » installés, environ « 7 millions disponibles qui doivent entrer en activité sans tarder » (Letté 2011, p. 186) [9]. La « houille blanche » est alors parée de toutes les vertus par rapport à la « houille noire » : « elle accomplit des merveilles auxquelles ne peut prétendre sa rivale » (Letté 2011, p. 186).

Il ne faut pas pour autant surestimer l'impact du rapport Clémentel. L'approche dirigée de l'économie suscite de nombreux débats dans la France des années 1920 entre « défenseurs de la "normale" [libérale] et partisans de la modernisation » (Kuisel 1981, p. 21). La modernisation industrielle n'est pas non plus toute puissante comme le montre l'échec économique et administratif de la construction d'une « ligne du froid » pour la pêche à la morue entre Saint-Pierre-et-Miquelon et Lorient (Delaire et Teissier 2020, p. 72-83). La planification de la morue congelée (cabillaud) ne rencontre alors ni le goût des consommateurs pour le poisson frais, ni les intérêts des entrepreneurs de la pêche. L'ambition du système frigorifique de subordonner l'ensemble des temporalités de la pêche maritime – courants marins, saisons, cycles de vie de la flore, migrations et reproductions de la faune, calendriers de pêche, navigations et transports, débarquements, transformations, dégustations – à un temps temps unique – celui de la consommation sans délai – est ainsi réfutée par les consommateurs et gens de mer. L'attente technicienne est entravée par le champ d'expérience sociale. Mais, malgré cet échec, elle n'en reste pas moins latente à travers l'horizon modernisateur. Son idéal réductionniste des temps multiples de la nature et du social au temps unique de l'économie traduit une démesure du capitalisme industriel, portée, de manière conjointe, par l'industrie du froid et les États-modernes comme les États-Unis, la France et la Grande-Bretagne au XX^{e} siècle.

Suite à la Première Guerre mondiale, l'entreprise technocratique gagne en « légitimité pour prévoir, organiser et agir en matière d'économie sous l'égide de la rationalisation » (Letté 2011, p. 186). Plusieurs expériences de « capitalisme organisé » sont ainsi menées dans les années 1920 par la création de « sociétés d'économie mixte » pour la reconstruction du réseau électrique du Nord-Est, l'équipement du Rhône et de la Saône et l'exploitation du pétrole en Irak (cf. 2.2.3). Les interventions politiques sur l'économie gagnent en popularité après la crise de 1929 et le modèle interventionniste du New Deal aux États-Unis (Nizard 1973, p. 219). Le « planisme » devient quasiment une mode en France. La « planification économique capta momentanément la faveur de l'opinion vers le milieu des années trente. La CGT, la CFTC, les radicaux, chacun adopta sa variété de plan ; nombre de revues, de groupes d'études et de conférences, dont certaines à l'échelle internationale, épousèrent la même cause » (Kuisel 1981, p. 180).

5.2.3 Du nouveau en économie politique : prévoir et planifier le futur, 1946-1970

Plus encore que la Première, la Seconde Guerre mondiale met le futur au cœur de l'économie politique en France. Le régime de Vichy exprime, à défaut de la mettre en œuvre, la nécessité d'une « modernisation des houillères » et veut imposer une répartition des ressources aux différents secteurs industriels (Rousso 1985, p. 242, 248). Plus largement, le champ d'expérience d'une population « occupée » est orienté vers un ailleurs, projeté dans l'avenir [10].

9. Les estimations du rapport correspondent à 0,74 GW en 1919 et 5,1 GW dans un avenir proche. Le total de 6 GW est atteint en pratique à la fin des années 1940 (Lévy-Leboyer et Morsel 1994, p. 20). Le « sans tarder » préconisé par le rapport Clémentel a donc nécessité trois décennies d'aménagement hydroélectrique du territoire.

10. Haut fonctionnaire dans le domaine de l'électricité pour le régime de Vichy (Frost 1991, p. 30), Roger Boutteville (1946, p. iii), ancien collaborateur et proche de Massé, écrit à la sortie de la guerre : « Le malheur des temps de pénurie a fait apparaître à tous, avec une évidence aveuglante, que la vie économique – et la vie tout court – sous leurs formes les plus rudimentaires comme les plus évoluées, postulent la formation, la conservation et l'utilisation de réserves, reliant le passé et l'avenir ».

Le Commissariat général du Plan : un ordre symbolique et politique

Après guerre, l'« économie planifiée » passe sous influence états-unienne alors que les crédits du plan Marshall financent la reconstruction de l'Europe occidentale. Le Commissariat général du Plan (1946-2006) fait de la planification « une réalité sociale, économique, mentale » en France (Rousso 1985, p. 241-244). La projection politique du futur recompose le partage symbolique du temps dans la société. Car vouloir organiser le temps, c'est redéfinir l'articulation des temporalités [11]. La planification nationale présuppose et impose une rupture entre passés et futurs.

La France fait le choix original de créer une structure planificatrice en-dehors de l'administration classique. Le corps politique charge ainsi des technocrates de mener une « concertation multilatérale » plus large et plus transversale que l'approche sectorielle par ministère (Nizard 1973, p. 218). Mais, le Commissariat général du Plan « ne peut se passer du concours des bureaucraties » car il n'a aucun pouvoir contraignant au-delà de son action coordinatrice. « [D]eux moments forts » marquent la période 1946-1970 « l'ère Monnet [1946-1952] et l'ère Massé [1959-1966] » (Rousso 1985, p. 241).

Jean Monnet place le premier plan (1946-1952) sous le signe de « la concertation entre patronat, syndicats, représentants de l'État et experts de tous bords » (Rousso 1985, p. 242-246). Il dispose d'une indépendance forte vis-à-vis du gouvernement de Pierre Mendès France dans le contexte de reconstruction d'après-guerre et du plan Marshall. Si le premier plan n'a « qu'une valeur indicative », le second (1953-1957) intensifie la « modernisation » de la France sous l'égide du ministère des Finances, le ministre Edgar Faure imprimant plus sa marque que le commissaire Étienne Hirsch. En mai 1957, Gaston Berger et André Gros créent le Centre international de prospective, qui réunit techniciens, technocrates et technologues. Ils conçoivent le projet prospectif comme une action collective articulant les registres opérationnel, organisationnel et réflexif (Durance 2008, p. 19). G. Berger définit alors « l'esprit prospectif » par « six vertus fondamentales » : « le calme, nécessaire à la prise de recul », « l'imagination, complément utile de la raison [... induisant] un regard différent, original », « l'esprit d'équipe », « l'enthousiasme, qui [...] rend l'homme capable de créer », « le courage [...] pour sortir des chemins déjà tracés », « le sens de l'humain » (Durance 2008, p. 21-22). Avec l'arrivée au pouvoir de Charles de Gaulle, Pierre Massé devient commissaire au Plan. Il coordonne deux plans (1959-1966) qui constituent « une espèce d'apogée du projet planificateur » et se caractérisent « par le perfectionnement des méthodes de planification » (Rousso 1985, p. 241, 247). Il introduit une approche plus prospective et plus universitaire. En témoigne la formation en 1964 du Groupe 1985 réunissant R. Aron, J. Bernard, P. Guillaumat, C. Lévi-Strauss, etc. Sa « mission [est] de donner une image aussi fidèle que possible de la France en 1985 » dans le cadre de la préparation du cinquième plan (1966-1970).

Le Plan institue un double ordre social à travers l'organisation matérielle et la représentation symbolique de ce qu'est la société. Son action peut être saisie par le modèle tripartite que le politiste Lucien Nizard (1973, p. 214) applique à l'administration. La société, ou « l'environnement » perçu par l'administration, est structurée en trois systèmes, politique, économique et social, respectivement « producteurs » de cohésions, de choses et d'hommes. L'administration agit par « ajustement-régulation » de ces trois systèmes, de manière hétérogène en tant que sous-système de chacun d'eux. Le Plan fonctionne mieux lorsque les conditions politiques (projet soutenu par le gouvernement) et économiques (croissance et contraintes) sont réunies (Rousso 1985, p. 248-249). Mais, il peine à engager un dialogue social. Même les syndicats les plus modérés dénoncent une « mystification » technocratique.

11. Lucien Nizard (1973, p. 199, 203), analysant « la planification comme révélateur des relations complexes et contradictoires qui se nouent entre administration et société », souligne qu'« étudier la planification, c'est toujours étudier autre chose que la planification, ce donné qu'elle révèle en prétendant l'organiser ».

C'est sur la production des choses que le Plan porte son regard en priorité. Les deux premiers plans se focalisent sur six « secteurs de base », considérés comme les plus critiques en termes de flux : le charbon, l'électricité, l'acier, les transports, le ciment et le machinisme agricole (Kuisel 1981, p. 384-385). Si « les planificateurs s'attrib[ent] aussi le mérite de toute une série de réformes spécifiques » (Kuisel 1981, p. 435), leur principale contribution pour le charbon, la sidérurgie et les travaux publics est surtout d'ordre épistémique : avoir transmis leurs méthodes de prévision et de planification aux entreprises publiques et privées (Rousso 1985, p. 248).

Les méthodes de prévision sont fortement dépendantes des modélisations de type flux et stocks, dans lesquelles « la notion majeure [est] celle d'optimisation » (Armatte et Dahan Dalmedico 2004, p. 257). Pierre Massé en est un exemple emblématique dans le secteur électrique (cf. 5.1.2), Marcel Boiteux pour la tarification des services publics. Ces modèles sont « transposés ensuite à l'épargne et à la consommation dans le cadre de la planification ». La recherche d'optimums est guidée soit par « une maximisation des avantages », soit par une « une minimisation des risques » (Puiseux 1982, p. 609). Elle participe du projet modernisateur par une volonté de rationaliser le système économique. La démarche s'appuie sur l'idée, caractéristique de la technocratie, qu'il est possible de trouver une *bonne* solution, ici, en « articula[nt] des décisions individuelles supposées rationnelles et des choix collectifs placés sous une règle explicite d'optimisation » (Armatte et Dahan Dalmedico 2004, p. 256).

Nationaliser l'électricité : donner le pouvoir aux imaginaires techniciens

Le domaine de l'énergie est marqué par cette rationalité technicienne à travers l'idée d'une possible maîtrise des flux, des stocks et des risques. Si les notions d'aléa et d'imprévu inquiètent et menacent la pensée technicienne, les énergéticiens s'efforcent de les encadrer par des opérations d'optimisation et de dimensionnement des infrastructures. Le stockage joue alors un rôle central de régulation. L'imaginaire technicien rêve de garder le risque dans les limites du « calculable », caractéristique de la société industrielle et bureaucratique, sans basculer dans la « société du risque » où les risques deviennent « incalculables et imprévisibles » selon les mots d'Ulrich Beck (1998, p. 16). La constitution de stocks disponibles à tout instant et en tout lieu est censée prévenir tout risque majeur d'effondrement, que ce soit un *blackout* électrique ou une rupture d'approvisionnement d'hydrocarbures [12].

Comme pour la prévision, le secteur électrique adhère à la planification. S'il est un unique domaine où le Plan a réussi à enrôler le secteur industriel dans son projet modernisateur, c'est bien celui de l'électricité. La circulation « des hommes et des méthodes » rend compte d'une « symbiose » entre le Plan, l'administration centrale et Électricité de France (Rousso 1985, p. 249). Là encore, la Deuxième Guerre mondiale introduit des pratiques plus dirigistes dans un souci d'optimisation de la production nationale d'électricité. Au début de la guerre, la Direction de l'électricité met en place « un dispatching central » pour coordonner l'ensemble des parcs privés interconnectés (Beltran et Bungener 1987, p. 62). Elle transfère ainsi à l'échelle nationale la fonction d'arbitrage effectuée par les « centres répartiteurs » des réseaux régionaux d'électricité. Ce *dispatcher* national devient un centre névralgique distribuant les « ordres de marche aux différentes usines [...] en vue de l'économie maximum de charbon ». Pierre Massé y est affecté durant « la drôle de guerre ». Après la défaite, le régime de Vichy établit rapidement un Comité d'organisation de l'énergie électrique, placé sous la direction

12. La filière nucléaire est une exception notable à cette maîtrise de l'aléa par la prévision et le calcul dans le domaine de l'énergie puisque, du côté de la production, elle a généré au moins deux débordements majeurs imprévues à Tchernobyl (1986) et à Fukushima (2011), et en aval de la production, elle génère des quantités massives de déchets radioactifs dont le stockage sur le temps millénaire de leur activité radioactive est impossible à contrôler et à prévoir.

d'un X-Mines, Robert Gibrat, et rattaché au ministère de la Production industrielle et du Travail (Lévy-Leboyer 1994, p. 117-127). Son rôle consiste à « gérer la répartition de la pénurie » et à intensifier le développement du réseau électrique et la production hydroélectrique. Plusieurs sociétés publiques de transport d'électricité sont également créées (Lacoste 1986, p. 138).

Après-guerre, le pouvoir politique accentue la centralisation et l'intégration des réseaux de distribution d'électricité. Jean Monnet institue une Commission de l'électricité sous la direction de Roger Boutteville (Beltran et Bungener 1987, p. 64). Entre février et mars 1946, la Commission à laquelle participe Massé fixe des objectifs de production et d'organisation qui servent de base à l'établissement d'Électricité de France (EDF) en avril. EDF dispose d'un monopole public de distribution d'électricité sur l'ensemble du territoire et d'un quasi-monopole de production. La nationalisation de l'électricité peut être interprétée comme l'élargissement du « capitalisme organisé » dont deux sociétés d'économie mixte offrent un modèle dans l'entre-deux-guerres : la Compagnie française des pétroles (CFP) depuis 1927 et la Société nationale des chemins de fer français (SNCF) depuis 1937 (Kuisel 1981, p. 138, 220). Mais, elle n'a rien de nécessaire. Aux États-Unis par exemple, un maillage serré d'entreprises privées (*utilities*) assure la production et la distribution d'électricité sur l'ensemble du territoire fédéral dans le cadre d'une régulation publique des tarifs et des investissements (Marty 2007, p. 92). En France, le gouvernement d'après-guerre opte pour le transfert de responsabilité technique et financière des infrastructures électriques à l'État, que les gouvernements d'entre-deux-guerres laissaient à des oligopoles privés régionaux et inter-régionaux.

La période 1944-1951 est considérée comme un « épisode a-économique » dans la production d'électricité, durant lequel « les quantités et non plus les prix serv[ent] de variables d'ajustement » (Pierre Massé) (Beltran et Bungener 1987, p. 64). Dans ce contexte de croissance, les planificateurs se félicitent « d'avoir persuadé l'EDF d'investir moins dans l'hydro-électricité et davantage dans les centrales thermiques » durant le plan Hirsch (1953-1957) (Kuisel 1981, p. 435). C'est un moment important durant lequel la technostructure d'Électricité de France réorganise le réseau national et administre la production et la consommation d'électricité dans le cadre d'optimisation de type coût-bénéfice. En hybridant sociologie de l'innovation (Bruno Latour) et histoire du bio-pouvoir (Michel Foucault), Guillaume Yon (2014, p. 48) montre de manière fine et convaincante comment Marcel Boiteux, disciple de Maurice Allais, contribue à faire du « coût marginal à long terme » une règle de « bon gouvernement » à partir de la fin des années 1940. Il interprète ainsi l'un des ressorts du régime technicien : « prépare[r] des mondes [futurs], et les conditions de leur réalisation » par des « outils de papier » (Yon 2014, p. 63). Les ingénieurs-économistes d'EDF façonnent ainsi l'idée d'« intérêt général » par une politique tarifaire basée sur le coût marginal, c'est-à-dire en fixant « un prix de vente du kWh égal au coût de sa production » (Yon 2014, p. 44). Ainsi, la pensée technocratique encadre la construction des mondes futurs, notamment la croissance exponentielle de la consommation d'électricité durant les Trente Glorieuses. Ainsi, la « symbiose » entre le Plan, l'administration centrale et Électricité de France (Rousso 1985, p. 249) concrétise le déploiement des imaginaires techniciens dans la politique énergétique de la France. Au tournant des années 1950, le stockage de l'énergie ne fait pas encore partie du bon gouvernement de l'électricité.

5.2.4 Techno-politique du stockage de l'électricité, 1953-1986

Mais, l'imaginaire technicien est déjà fasciné par le problème hydraulique des flux et des stocks, mis en forme par la « pensée calculante » (cf. 5.1.2). Le déploiement techno-politique du stockage de l'électricité se concrétisera à travers la crise énergétique des années 1970.

Recherche opérationnelle : variables et paramètres du système électrique

Pierre Massé et Robert Gibrat portent dans les années 1950 une réflexion sur la fonction des réservoirs hydrauliques dans la gestion du réseau électrique français (Beltran et Bungener 1987, p. 66-67). Après un exil en Suisse en raison de sa collaboration sous Vichy, Gibrat devient ingénieur-conseil pour EDF. Il travaille au développement de l'énergie des marées, qu'il considère comme « complémentaire » de l'énergie atomique aux niveaux techniques et économiques (Marrec 2018a, p. 345).

Massé de son côté est directeur général-adjoint d'EDF depuis 1948. Il exprime une opinion très favorable à l'énergie marémotrice : « 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 » (cité par Marrec 2018a, p. 351). Plus fondamentalement, Massé fait face au problème classique de la gestion d'un réseau électrique. Comment optimiser les résultats d'un système électrique en s'adaptant à des contraintes fortes portant sur l'offre globale, la puissance maximale et un plafond d'investissement (Beltran et Bungener 1987, p. 66) ? L'imaginaire technicien d'EDF oriente la réponse vers l'« analyse rationnelle des choix budgétaires », exprimée, depuis 1953, par la *Note bleue* d'EDF (Gérard 1972, p. 488). Des débats subsistent, dans le cadre idéologique du calcul rationnel, sur la valeur de certains paramètres du modèle. La Commission de l'électricité et EDF s'interrogent par exemple sur le « taux d'actualisation », indicateur du niveau de rendement attendu d'une centrale. Il met en balance les coûts de production (construction, opération, maintenance, combustible) et les bénéfices dépendants de la durée d'exploitation. Un taux fort valorise la houille noire (construction bon marché puis coût du charbon) alors qu'un taux faible valorise la houille blanche (fort coût initial puis exploitation bon marché). Massé plaide pour un taux moyen (Beltran et Bungener 1987, p. 66). Le Commissariat général du Plan fixe finalement ce paramètre à 4 % pour les deux premiers plans (1946-1957) et à 8 % pour le troisième (1958-1961). Le taux semble avoir varié entre 8 et 12 % sur la période 1953-1972 (H. de Maublanc cité par Gérard 1972, p. 497).

Par formation, par profession et par goût, Gibrat et Massé partagent un même intérêt pour l'optimisation calculatoire à des fins opératoires. Ils s'inscrivent ainsi en « recherche opérationnelle », un champ de modélisation de la société initié aux États-Unis durant la Deuxième Guerre mondiale (Armatte et Dahan Dalmedico 2004, p. 255-258). En 1955, ils formalisent un modèle du système électrique dans lequel ils donnent une valeur différente à la force hydraulique suivant son rythme d'écoulement : instantané dans une usine au fil de l'eau, alterné dans une usine marémotrice, régularisé dans un barrage hydroélectrique. Les six variables du modèle correspondent à « six usines schématiques : une usine au fil de l'eau, une usine-réservoir, une usine d'éclusée avec petit réservoir de nuit, une usine marémotrice, une thermique standard [charbon] et une turbine à gaz » [13] (Beltran et Bungener 1987, p. 67). Le calcul d'optimums est d'abord réalisé à la main. En 1956, Gibrat et Massé rencontrent Georges Dantzig lors d'un congrès de recherche opérationnelle à Los Angeles. Dantzig les sensibilise à « la programmation linéaire » dont il est l'une des principales figures aux États-Unis avec Albert Tucker et Richard Bellman (Armatte et Dahan Dalmedico 2004, p. 256). Les premiers ordinateurs permettent d'augmenter la vitesse de calcul de manière significative, ce qui augmente le nombre de variables en programmation linéaire. Pour modéliser un réseau électrique, on passe de 6 à 200 variables. Alexis Dejou et Jean Carteron, de la Direction des études et recherches d'EDF, résolvent ainsi un système d'équations à 70 variables établis par Gibrat et Massé (Beltran et Bungener 1987, p. 67).

Si le rythme d'écoulement hydraulique (instantané, périodique, régularisé) est intégré au système élec-

13. Gibrat et Massé écartent le nucléaire du modèle en raison d'une trop grande incertitude sur les coûts d'exploitation, qui ne sont pas rendus publics par la Direction des études et recherches d'EDF.

trique en termes calculatoires (variables, paramètres) et opératoires (*dispatching*), la constitution de réserves hydrauliques n'est pas cruciale dans la gestion du réseau. Les énergéticiens considèrent jusqu'aux années 1960 le pompage hydraulique durant les heures creuses comme « un moyen de pointe » pour réduire, durant les heures de pointe, la puissance maximale nécessaire (Gérard 1972, p. 488). Le stockage d'énergie par pompage joue un rôle analogue pour le réseau national des années 1950 à celui des batteries de stockage pour les centrales électriques des années 1890 (cf. 4.2.3) et pour les métropoles urbaines des années 1930 (5.2). L'eau est accumulée dans des bassins supérieurs, stockée pendant une durée connue, puis déversée aux heures de pointe pour amortir le surplus de demande par rapport à la puissance installée. Cette accumulation d'énergie dans le temps permet de sous-dimensionner les installations permanentes de production et, ainsi, d'optimiser l'offre d'électricité.

Dans le même temps, une politique tarifaire joue sur les paramètres de la demande électrique. Pour réguler la consommation et limiter la durée et l'intensité des pointes, EDF met en place une offre tarifaire différenciée à partir des années 1960. Cette « gestion de la charge par le signal tarifaire », pour reprendre le jargon technocratique actuel, s'adresse aux consommateurs individuels et industriels (Ademe, Consultants et al. 2017, p. 14). En 1965, un tarif « bleu », « heures pleines-heures creuses », incite les clients individuels à décaler la nuit le chauffage électrique de l'eau afin de « lisser la courbe de charge nationale ». Le dispositif est élargi à partir de 1982 à travers la tarification « effacements jour de pointe » (EJP) sur l'ensemble de l'année. « Ces options tarifaires, compensant un prix élevé du kWh lors des pointes hivernales par un prix réduit le reste de l'année, [ont] pour objectif l'incitation à l'effacement de consommation lors des pointes hivernales. » (Ademe, Consultants et al. 2017, p. 14) Le contresens du mot « effacement » est intéressant dans la perspective d'une exploration des imaginaires techniciens. Il suggère une suppression de consommation là où il n'y a qu'un déplacement. Une même action est décalée dans le temps. Un ensemble de consommations est redistribué sur une échelle quotidienne, hebdomadaire et annuelle. Quoiqu'il en soit, le dispositif EJP atteint ses objectifs. Il représente jusqu'à 6 GW d'effacement à son maximum de contractualisation en 1997.

Modélisation du stockage dans le cadre coût-bénéfice

Le stockage de force par pompage prend de l'importance au début des années 1970. EDF organise un colloque pour faire un état des lieux sur deux modes mécaniques de stockage d'énergie : par pompage hydraulique et sous forme d'air comprimé. Un numéro spécial de *La Houille blanche* publie en octobre 1972 les contributions à ce colloque. Les deux modes de stockage avaient été identifiés comme prometteurs en 1956 par le Service des études et recherches hydrauliques dirigé par Gaston Remenieras (1956, p. 41). Ils étaient perçus comme applicables « sur une assez grande échelle pour emmagasiner de grandes quantités d'énergie pendant des périodes pouvant dépasser plusieurs mois ». Le pompage hydraulique était considéré comme applicable dès à présent [1956], l'air comprimé devenant intéressant dans un proche avenir. Quinze ans plus tard, les intervenants du colloque de 1972 expriment la même prévision de décalage dans le temps : une application immédiate du pompage hydraulique ; une application différée de l'air comprimé. J'analyse ici les discussions relatives au premier mode en raison de son importance pour la techno-politique du stockage de l'électricité dans la deuxième moitié du XX^{e} siècle.

Le transfert d'énergie par pompage hydraulique est dominé par la technostructure d'EDF [14]. X. Ract-Madoux, chef du du Département des études et projets hydroélectriques (EDF), ouvre le colloque par un

14. Sept des dix articles sur le stockage hydroélectrique sont dus à EDF. Les trois autres sont issus d'Alsthom, de la compagnie nationale italienne (ENEL) et d'une société privée luxembourgeoise.

« Exposé introductif sur les usines d'accumulation et de transfert d'énergie par pompage ». Il rappelle la distinction classique entre l'« accumulation d'énergie » par pompage, qui ne concerne que la force hydraulique à deux moments différents, et le « transfert d'énergie » par pompage, qui implique une source d'énergie thermique (charbon, gaz, fuel, nucléaire). La figure 5.3 schématise le principe classique du pompage hydraulique entre deux bassins reliés par des conduites souterraines d'adduction et équipés de pompes-turbines fonctionnant de manière réversible au sein d'une centrale. Une dénivellation d'au moins 200 mètres est jugée nécessaire.

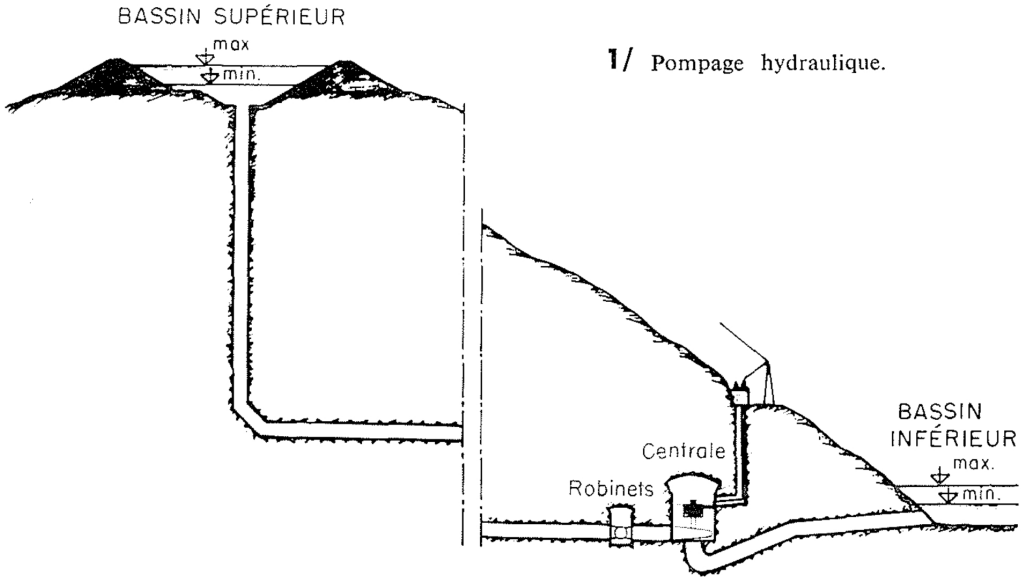

Figure 5.3 – Schéma du transfert d'énergie par pompage hydraulique (Ract-Madoux 1972, p. 483)

Ract-Madoux (1972, p. 483) donne une estimation du prix moyen de production favorable au pompage : 500 francs par kilowatt (dus aux équipements de pompage et d'exploitation) contre 1 200 francs pour un barrage hydroélectrique et 3 000 pour une centrale au fil de l'eau. La fréquence du stockage peut être journalière, hebdomadaire ou saisonnière à mesure que la taille du bassin supérieur croît. Elle est associée à un seuil de « rentabilité » limite : « 30 F/kWh pour des bassins journaliers, 6 F pour des bassins hebdomadaires et moins de 1 F pour des bassins saisonniers » (Ract-Madoux 1972, p. 483). La « pensée calculante » construit une analogie de forme entre le stockage par pompage et par batterie en comparant le prix du kilowattheure stocké, une usine de pompage n'étant au fond qu'un « accumulateur d'électricité de taille inhabituelle ». Des ordres de grandeur comparables et une durée de vie de la batterie bien plus courte (2 à 8 ans) militent, selon Ract-Madoux (1972, p. 484), en faveur de l'accumulation d'énergie par pompage hydraulique en montagne.

P. Gérard, chef de la Division projets et prospection d'EDF, prend la suite de son collègue Ract-Madoux. Il offre une seconde analyse à valeur générale. Sa conférence, intitulée « Moyens d'estimer la valeur économique des installations de transfert d'énergie par la simulation mathématique d'exploitation. Application de ces données à l'aménagement et au choix des sites », permet de décrypter l'imaginaire technicien en action. Elle souligne un déplacement de la manière dont EDF envisage le transfert d'énergie par pompage hydraulique depuis la première *Note bleue* de 1953. Dans les années 1950, le thermique reste le pivot de la politique énergétique en France en raison du rôle historique de la houille noire, du faible coût de construction des centrales thermiques et de la croissance rapide des importations de pétrole (cf. figure 2.2). La symbolique du

passé et le champ d'expérience présent pèsent plus lourd dans l'imaginaire technicien que l'horizon d'attente formé par les nouvelles sources d'énergie industrielle : atome, éolien, solaire. « On définissait la valeur du service rendu par le projet hydraulique que nous offre la nature, par référence au thermique de main d'homme qu'on aurait toujours pu construire à la place » (Gérard 1972, p. 487). Au début des années 1970, les multiples types de centrales électriques (charbon, fuel, gaz, hydraulique, nucléaire) rendent moins évident le choix de l'« étalon » de référence, d'autant plus que certains paramètres et variables du système sont interdépendants. Fixer le taux d'actualisation revient à influencer le résultat de la modélisation.

Ces incertitudes conduisent à repenser le contenu et le rôle de la programmation linéaire. Le système n'est plus considéré par rapport à un centre (étalon) ni dans l'absolu (une meilleure solution) mais en termes d'*assemblage* et de *variations* d'un parc préexistant. Gérard (1972, p. 487) repose ainsi le problème d'optimisation : « quel est le meilleur assemblage de tous les moyens de production possibles pour faire face à une demande elle-même constituée d'un assemblage de besoins de natures diverses » ? La solution est obtenue « par une méthode de retouches successives et de substitutions marginales ». La simulation d'un système électrique virtuel sert de guide aux ajustements d'équipement du parc électrique réel. Elle montre en particulier comment l'équilibre des coûts est modifié par le raccordement de différents types d'usines génératrices au réseau.

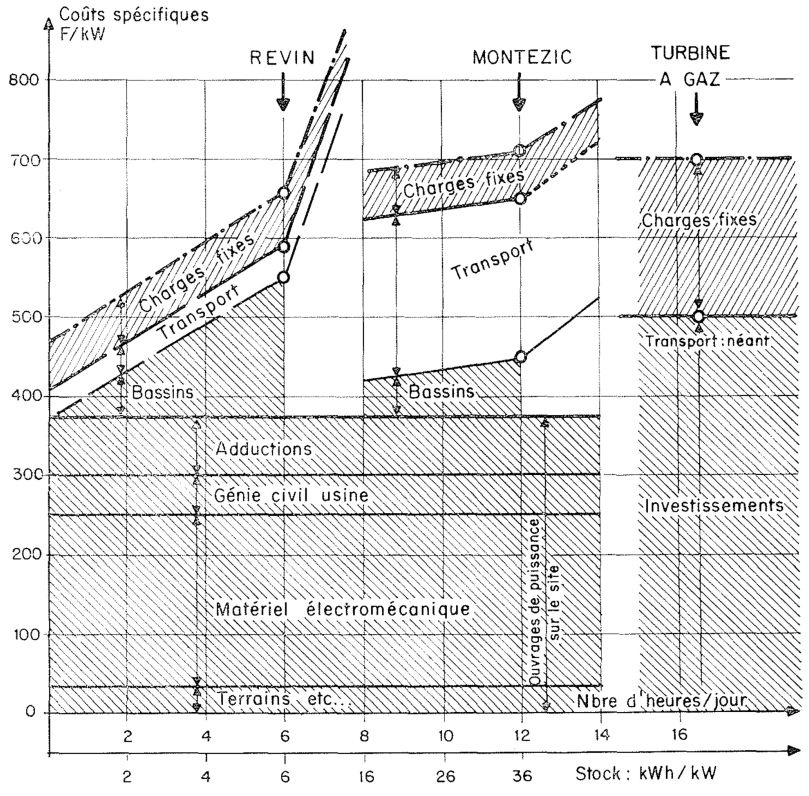

FIGURE 5.4 – Comparaison des coûts du pompage hydroélectrique et d'une centrale à gaz (Gérard 1972, p. 488)

La figure 5.4 compare les coûts de production d'électricité en fonction du temps (fréquence et durée) d'opération pour deux stations de pompage (Revin, Montezic) et une centrale classique au gaz. Elle présente les deux principaux coûts d'une centrale thermique, quasiment fixes pour la construction de l'usine (investissements) et son exploitation (charges fixes : carburants et salaires), le prix du transport étant jugé négligeable puisqu'une centrale thermique est située à proximité des nœuds de consommation. Si une station de pompage

a aussi des coûts fixes de construction (terrains, matériel, génie civil, adduction) et d'exploitation (charges fixes), elle se différencie par des coûts variables de transport (éloignement de la consommation) et d'aménagement des bassins de stockage. C'est ce dernier paramètre qui est « significatif » : « le coût des bassins [...] varie de zéro si les lacs existent, à près de 50 F/kWh pour des cuvettes entièrement artificielles et des hauteurs de chute assez faibles » (Gérard 1972, p. 488). Le coût du bassin, le volume d'eau stocké, la hauteur de la chute sont autant de critères d'estimation de la valeur du stockage hydraulique par pompage. Un calcul comparatif montre qu'une station de pompage est bon marché si elle fonctionne quelques heures par jour ou plus de la moitié des jours de l'année alors qu'une turbine à gaz est rentable pour de longues utilisations par jour seulement quelques dizaines de jours dans l'année (Gérard 1972, p. 489).

La « réoptimisation » du système virtuel sert de guide pour l'aménagement de nouvelles installations de production en fonction de l'évolution des besoins de la consommation. Ce qui est recherché est le « coût minimum » de fonctionnement dans le cadre théorique coût-bénéfice : « enlever de la turbine à gaz à laquelle le nouveau pompage se substitue partiellement, [...] rajouter un peu de thermique de base qui fournit l'énergie d'heures creuses, [...] changer les durées de fonctionnement d'un grand nombre de moyens », etc. Cette optimisation des coûts de proche en proche a une valeur opératoire. Mais, elle présente aussi un sérieux défaut ontologique qui, exprimé par Gérard (1972, p. 487), résonne comme un aveu d'impuissance : « on ne comprend plus bien ce qui se passe ». Le résultat de la modélisation est heuristique mais non figuratif. Il doit être complété par des raisonnements « partiel[s] et un peu simplistes » pour que « le projeteur » puisse se faire une image de « ce qu'il doit rechercher et imaginer ». Cette tension entre l'opérativité de la prédiction et son manque de représentativité travaille toute pratique modélisatrice. Un réductionnisme strict opte pour l'une seulement des alternatives [15].

Au début des années 1970, le milieu professionnel des modélisateurs est peu convaincu par le réductionnisme car les pratiques sont diverses. Des théoriciens et modélisateurs de la chimie par exemple manipulent plusieurs critères de performance pour fabriquer un modèle : représentativité *versus* prédictivité certes, mais également exactitude théorique, rapidité de calcul ou encore extension du domaine de validité (Wieber et Hocquet 2020, p. 175). Ils sont conscients de la forte dose de « bricolage » et de « cuisine » de leur travail, même pour les modélisations les plus performantes. Outre la sélection de variables et de paramètres, la modélisation incorpore « les métaphores et les analogies, les concepts et les techniques mathématiques, les faits stylisés mais aussi les impératifs politiques ou les objectifs d'action » (Armatte et Dahan Dalmedico 2004, p. 288). Ceci n'empêche pas Gérard (1972, p. 487) d'afficher en public une confiance admirative pour le « modèle de simulation d'exploitation » d'EDF. Il qualifie la Gestion du réservoir avec thermique aléatoire (GRETA) de méthode « merveilleuse ».

Mise en œuvre d'une politique de stockage par pompage hydraulique, 1972-1986

Confronter la prévision prospective à la réalisation historique est intéressant. François Plassard (2004, p. 9) assigne trois objectifs à une « approche rétrospective de la prospective » : « mieux caractériser [...] la démarche prospective », repérer « les lieux de "porosité" où se sont amorcées de véritables innovations qui ont fait s'écarter l'avenir réel de l'avenir "prospecté" », interpréter ces écarts en termes de « modes de fonctionnement de la société contemporaine et déboucher sur une analyse des caractéristiques sociales actuelles ». L'écart entre le prévu et le réalisé résulte ainsi de facteurs endogènes au cadre méthodologique (sélection de variables, modes de calcul,

15. C'est le cas par exemple du physicien Paul Dirac. Il écrivait en 1930 que la physique n'avait plus pour objectif premier de « fournir des images » du monde mais de « formuler des lois gouvernant les phénomènes » dans une perspective heuristique (cité par Balibar 1985, p. 304).

etc.) ou de facteurs exogènes imprévues (inflexions de tendances lourdes) ou imprévisibles (surgissements, irruptions, ruptures, etc.) du processus historique (cf. 1.5).

P. Gérard (1972, p. 491, 496) est bien conscient de cette double incertitude. Il mentionne *l'imprévu* dans le cadre de la modélisation et *l'imprévisible* dans le cadre de l'histoire. D'une part, le modèle de Gestion du réservoir avec thermique aléatoire (GRETA) d'EDF ne prend pas en compte le court terme car son pas de temps est une semaine. D'autre part, l'échéancier d'installation de pompage hydraulique sur la période 1972-1990 doit être considéré avec « prudence » à cause d'évolutions incertaines de « la structure de la demande », notamment pour la « prospective lointaine (au-delà de 1985 ou 1990) ». Cet imprévisible dépend des « progrès techniques ». Il dépend aussi des fluctuations futures de trois secteurs économiques : le chauffage à accumulation, la voiture électrique, la dispersion géographique de la demande en électricité. Ces trois secteurs sont des sujets d'intérêt pour EDF au début des années 1970. L'un d'entre eux, la voiture électrique, a été au cœur de la stratégie de développement d'EDF sur la période 1966-1969 dans une perspective de multiplication des usages de l'électricité (Callon 1979, p. 435). En influençant les deuxième et troisième « cercles de la décision » au sens de Pierre Muller (2018, p. 30-49) – administration technique et entreprises de l'énergie – EDF fait de la voiture électrique un objet de politique publique sur la période 1970-1977 (Callon 1979, p. 443).

Il est étonnant, après-coup, de relire la conclusion de l'exposé de Gérard (1972, p. 496) confrontant les résultats de la prévision GRETA et les réalisations du futur. « Ces facteurs [imprévisibles] nuanceront les conclusions actuelles ; il est cependant peu probable qu'ils les bouleversent ». Aucun participant du colloque ne met en doute cette confiance dans la prévision calculée ou ne mentionne l'importance du hasard en histoire, durant la discussion qui suit. Il y a donc consensus, au sein du milieu électricien français, sur la puissance prédictive de la modélisation par calcul d'optimum. Or, un an à peine après la publication du colloque, une crise énergétique majeure surgit sur la scène internationale et modifie certaines séries matérielles de la deuxième moitié du XX^{e} siècle. Notamment, la figure 2.5 montre comment la crise pétrolière de 1973 accélère le déploiement du nucléaire en France avec le plan Messmer de 1974. La puissance électronucléaire est décuplée en dix ans, de 1,4 GW installé en 1970 à 14 GW en 1980 (Morsel 1996, p. 338, 775). Son taux annuel de croissance est de 18 % durant deux décennies (1974-1993). En 1993, la puissance électronucléaire de 60 GW dépasse la somme de l'hydroélectrique (26 GW) et du thermoélectrique (23 GW). La figure 2.5 montre aussi une corrélation temporelle, ou au moins une coïncidence, entre la croissance de l'électronucléaire et du stockage d'énergie par pompage hydraulique (dont les chiffres sont multipliés par dix pour faciliter la visualisation). 1,7 GW de pompage hydraulique a été installé sur la période 1974-1978 (9 % de l'hydroélectrique total) puis encore 2,2 GW sur la période 1976-1986 (Courier 1982, p. 411).

La figure 5.5 ajoute par rapport à la figure 2.5 l'échéancier d'installation de pompage hydroélectrique prévu par EDF (Gérard 1972, p. 496). Cet échéancier sur-estime de 50 % la puissance de pompage installée par rapport à la réalisation historique sur la période 1980-1985. Cet écart est d'autant plus grand que la crise énergétique a eu tendance à accélérer l'installation électronucléaire et, donc, à stimuler le transfert d'énergie par pompage par génération d'un surplus d'heures creuses. La superposition de l'échéancier d'installation du pompage et de la courbe effective d'installation électronucléaire est troublante parce qu'elle suggère une synchronicité du processus historique issu d'une crise pétrolière imprévisible et de la prévision établie avant cette rupture. Le hasard seul peut-il rendre compte d'une même temporalité de déclenchement et d'un même rythme de croissance ? J'interprète plutôt cette coïncidence de forme comme un symptôme du régime technicien. La réalisation matérielle *a posteriori* est ici isomorphe de la pensée prédictive *a priori* au sein de la technostructure d'EDF. La série matérielle et l'intention technicienne ont, dans ce cas précis, retiré le hasard du processus

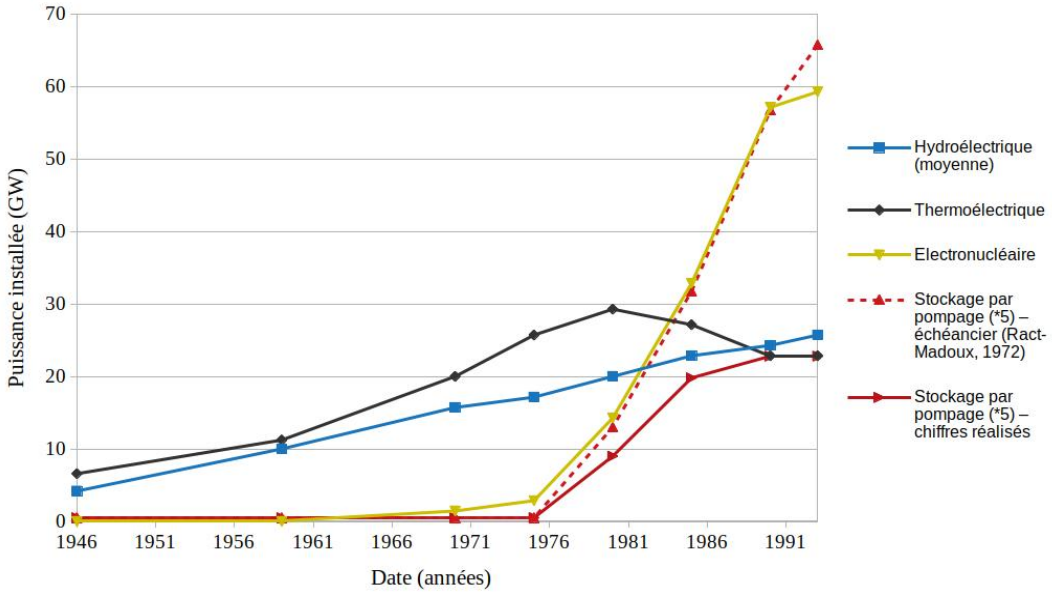

FIGURE 5.5 – Évolution du transfert d'énergie par pompage hydraulique en France

historique. Une telle correspondance entre prédiction et réalisation contredit la perspective holiste de Paul Veyne (1971, p. 134) vis-à-vis du processus historique. Étonnamment donc, la « crise » énergétique de 1973 ne fait pas « s'écarter l'avenir réel de l'avenir "prospecté" », pour reprendre les termes de François Plassard (2004, p. 9). Elle n'est pas un lieu de « porosité », d'où aurait surgi une « véritable innovation », pour le stockage d'électricité. La non-prise en compte de l'écart entre ce qui a été prévu et ce qui sera réalisé caractérise l'un des « modes de fonctionnement de la société contemporaine » (Plassard 2004, p. 9). Le présent n'est pas vécu comme une brèche temporelle faisant émerger de possibles bifurcations de société. Il ressemble plus au présentisme de François Hartog : un régime temporel saturé par les traces mémorielles et matérielles du passé et sans horizon vers une échappée future. Le régime technicien (ou la technostructure) parvient ainsi à organiser des « politiques conservatrices » des « énergies alternatives » (Marrec et Teissier 2020, p. 247-248).

Plutôt qu'une contingence liée à la crise énergétique, j'interprète la politique de stockage par pompage hydraulique comme le déploiement dans le parc électrique français de l'imaginaire régulateur des flux et stocks d'énergie (cf. 5.1). Cet imaginaire s'est forgé de manière empirique dans la gestion quotidienne des réseaux régionaux alliant houilles noire et blanche au début du XX^e^ siècle (cf. 5.1.1). Il se « rationalise » ensuite par l'introduction de la modélisation prédictive (cf. 5.1.2) et de la planification industrielle en économie politique (5.2.3) dans la gestion du réseau national de la deuxième moitié du XX^e^ siècle. Ce mouvement participe de la « modernisation » de la France (Kuisel 1981) au sens d'une « rationalisation » des forces productives et des modes de pensée. En l'occurrence, cette rationalisation se donne pour objectif d'administrer l'aléatoire futur. Elle suit deux chemins parallèles. D'une part, elle s'efforce de « traduire en espérance mathématique », grâce la modélisation, « toute la gamme des situations aléatoires possibles » (Gérard 1972, p. 491). C'est le cadre coût-bénéfice déjà évoqué. D'autre part, elle incorpore progressivement les différents niveaux de variation temporelle de la gestion d'un parc électrique : heures, jours, semaines, saisons.

Jusqu'à la fin des années 1960, le pompage hydraulique a été mis en œuvre de manière limitée comme « moyen de pointe » pour réduire les besoins en puissance maximale (Gérard 1972, p. 488). Les discussions du colloque de 1972 suggèrent un *tournant STEP* autour de 1970 par la manière dont les électriciens modifient

leurs conceptions du transfert d'énergie par pompage dans la gestion du réseau. Son domaine d'application s'étend en quantité et se transforme en qualité [16]. La figure 5.6 montre comment l'installation des stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) superpose deux nouvelles temporalités au cycle saisonnier de stockage (mai-août) et déstockage (octobre-mars) des barrages de montagne. La STEP, alimentée en électricité bon marché, remonte l'eau durant les heures creuses pour augmenter le niveau du lac supérieur : durant les heures nocturnes en semaine (« pompage de semaine » et « pompage des nuits de semaine ») ; durant les jours non travaillés en fin de semaine (« pompage de week-end »).

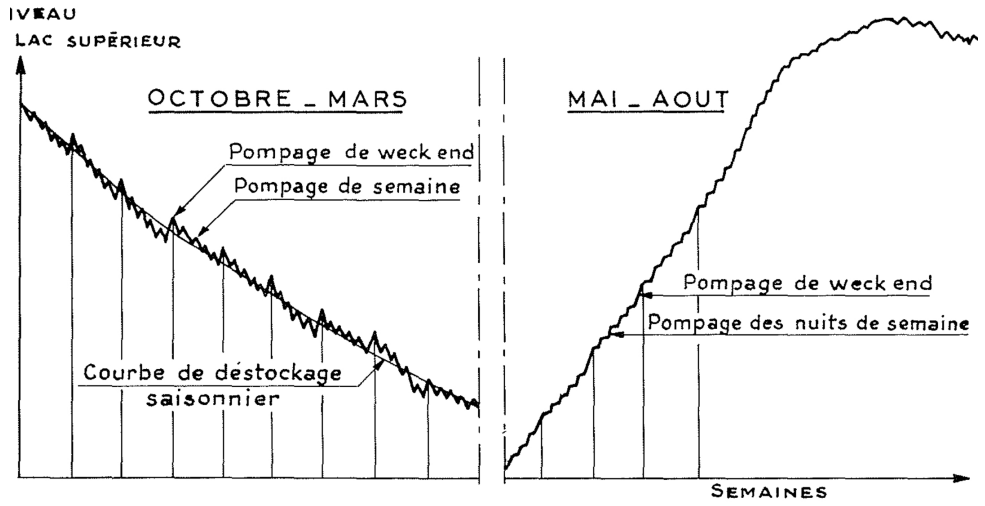

FIGURE 5.6 – Temporalités du transfert d'énergie par pompage au sein du cycle saisonnier de stockage-déstockage des barrages de montagne (Gérard 1972, p. 490)

Ces deux cycles de pompage ont des amplitudes et des périodes faibles par rapport au cycle saisonnier. Leur fonction est de réguler l'aléatoire. Les aléas sont de plusieurs types : la demande (impliquant des facteurs conjoncturels et climatiques), l'hydraulicité et la disponibilité des centrales thermiques (Courier 1982, p. 406). Ils sont maîtrisables si leur degré d'aléatoire est faible, c'est-à-dire s'ils suivent des « répartitions de probabilités définies et stables » (Massé 1946, p. 14). Plus précisément, ils sont variables pour un pas de temps donné mais leurs variations suivent des schémas récurrents au pas de temps supérieur. Ainsi, les « aléas d'une heure à l'autre » sont « statistiquement voisins d'un jour à l'autre » (Gérard 1972, p. 490). Il en est de même des aléas journaliers, « statistiquement voisins d'une semaine à l'autre », et des aléas hebdomadaires, « statistiquement voisins d'une année à l'autre ». Pour chaque pas de temps, P. Gérard (1972, p. 490) préconise l'utilisation successive des trois cycles hydrauliques de la figure 5.6 : « pompage des nuits de semaine » pour les aléas horaires, « pompage de week-end » pour les aléas journaliers, cycle saisonnier pour les aléas hebdomadaires. En principe, chaque bassin a été dimensionné pour que le volume d'eau en réserve puisse fournir ce surplus

16. Viennent à l'appui de ce « tournant STEP » au moins trois interventions faisant suite à l'exposé de P. Gérard. Le président de séance, H. de Maublanc, « retien[t] de l'exposé de M. Gérard que, finalement, l'hydraulique trouvera dans le pompage un deuxième souffle ». M. Lefoulon est plus explicite encore : « Il y a quelques années, on envisageait les centrales de pompage pour la production de la puissance de pointe d'une utilisation journalière de 3 à 4 heures (au maximum 10 heures). L'exposé de M. Gérard montre qu'actuellement les centrales de pompage, en particulier Montezic, sont conçues pour produire, non seulement l'hiver mais toute l'année, de l'énergie "d'heures pleines" correspondant à une utilisation d'au moins 2 000 heures. ». Enfin, un participant italien, M. Paris (ENEL-CNSP), surenchérit : « J'ai suivi avec intérêt le rapport de M. Gérard que je considère d'une importance fondamentale pour la détermination de l'évolution du parc des aménagements de pompage dans un système électrique, et il est sans doute un des rapports les plus complets et approfondis que j'ai eu la possibilité de connaître. » (Gérard 1972, p. 496-497)

aléatoire d'énergie. En revanche, Gérard (1972, p. 490) souligne que les aléas de consommation d'une année sur l'autre (souvent liés aux aléas climatiques) ne peuvent être pris en charge par le régime hydraulique, d'où l'importance des centrales au gaz pour les années les plus froides ou les plus sèches. Néanmoins, le transfert par pompage paraît comme un élément crucial de la gestion du parc électrique car il manque à EDF « davantage d'énergie en réserve que de puissance installée » (Gérard 1972, p. 498).

Dix ans après le colloque de 1972, M. Courier, chef-adjoint des Services études EDF de la région Alpes-Lyon, fait un nouvel état des lieux du transfert d'énergie par pompage. La puissance STEP installée atteint alors 1,8 GW, la puissance hydroélectrique 20 GW et la puissance électronucléaire 14 GW. Courier (1982, p. 408) détaille les trois fonctions du transfert d'énergie par pompage pour le réseau d'EDF. La première fonction concerne la stabilisation du réseau et son bon fonctionnement (cf. 2.3.2). En effet, les « avantages cinétiques » du transfert d'énergie par pompage lui permettent de contribuer à équilibrer la charge du réseau d'EDF (Courier 1982, p. 408). Alors que les centrales nucléaires sont « difficiles à moduler et longues à démarrer », les « groupes mixtes pompe-turbine » peuvent être lancés en quelques minutes en cas de déséquilibre de l'offre et de la demande (Cassaz 1992, p. 287). Leur fonctionnement réversible comme pompe et turbine améliore la souplesse du réseau. La discussion suivant l'exposé de Courier (1982, p. 418) rapproche deux modalités de régulation du réseau. Elle confirme que le pompage est un bon moyen pour « maintenir la qualité du réseau électrique » par ses effets d'équilibrage (M. Devoiselle). À l'inverse, le stockage d'énergie par volant d'inertie est perçu comme trop localisé dans l'espace et trop rapidement amorti dans le temps pour contribuer à la stabilisation du réseau national (M. Sturlesse). Il pourrait convenir pour « atténuer les appels de puissance » dans le cas d'un site industriel par exemple.

La deuxième fonction articule des enjeux de régulation et d'économie. L'énergie emmagasinée par pompage est utilisée comme « moyen de pointe » lors des périodes de consommations maximales. C'est la fonction classique du pompage depuis l'équipement du Lac noir et de l'usine de Kembs sur le Rhin en 1938. Courier (1982, p. 408) parle d'une « économie de défaillance » parce que le pompage permet « ne pas prendre des risques de défaillance inacceptables » tout en économisant l'équipement des centrales à gaz qui auraient été nécessaires sans lui. Il appréhende le risque de défaillance du réseau en termes d'espérances mathématiques dans la tradition d'optimisation quantitative initiée par Pierre Massé à EDF. « Le problème à résoudre est le choix de la marge d'équipement, qui est l'espérance de la puissance disponible en production, moins l'espérance de la puissance appelée par la consommation. » (Courier 1982, p. 406)

La troisième fonction du transfert par pompage est devenue la plus importante pour EDF : l'« économie de combustible ». Le pompage actionné par les « kWh d'origine nucléaire ou charbon » en heures creuses diminue les consommations de fuel. La logique s'est inversée ici par rapport aux années 1950 lorsque Électricité de France investissait moins dans l'hydroélectricité que dans le thermique (cf. 5.2.3). L'augmentation du prix du baril de pétrole et la disponibilité de l'électricité nucléaire expliquent ce changement d'attitude de la technostructure d'EDF au cours des années 1970. L'enjeu économique est d'autant plus important au début des années 1980 qu'il existe une différence de consommation électrique de 70 % environ entre le maximum mensuel (décembre ou janvier) et le minimum mensuel (août) (Courier 1982, p. 404).

Aussi, le pompage saisonnier est le plus intéressant car il permet d'économiser le plus de combustibles fossiles nécessaires au chauffage hivernal. Il a, en outre, l'avantage d'être moins sensible que le pompage hebdomadaire aux aléas climatiques – donc mieux prévisible – et de constituer une réserve de puissance permettant de « de diminuer le risque de défaillance en hiver » (Courier 1982, p. 411). Les transferts hebdomadaires sont seulement rentables en hiver et demi-saison pour pallier des aléas climatiques de quelques jours. Le pompage

journalier quant à lui n'est rentable que dans les cas de « régions excentrées sur le réseau de grand transport et dépourvues de moyens propres de modulation ». Dans la discussion qui suit l'exposé de Courier (1982, p. 418), J. de Beauregard suggère d'élargir la réflexion à des considérations extra-économiques car, précise-t-il, « l'hydroélectricité est une source d'origine nationale, renouvelable, propre et silencieuse ». Ce technicien raisonne en technologue. Il voudrait intégrer à la techno-politique du transfert d'énergie par pompage des réflexions d'ordre stratégique, écologique et psycho-sociale. Une telle approche est minoritaire au sein de la technostructure d'EDF. Au moment du contre-choc pétrolier de 1986, le prix du baril étant revenu à son niveau des années 1960, EDF freine (ou ferme) sa politique d'installation de transfert d'énergie par pompage. La puissance installée, de l'ordre de 4 GW en 1986 (17 % de l'hydroélectricité), augmente faiblement pour atteindre 4,3 GW en 2013 (17 %) (Ademe, Artelys et al. 2013, p. 12). La techno-politique STEP génère ainsi un ordre de grandeur de stockage d'énergie comparable aux 6 GW d'effacement de puissance induit par la politique tarifaire EJP d'EDF.

5.2.5 Mesures et démesures de la technique contemporaine

Les cas de techno-politique de l'énergie précédents indiquent un fort degré de confiance des techniciens et technocrates de l'électricité pour les modélisations du futur et des prévisions par le calculs. Or, l'historien, Louis Puiseux (1984, p. 325), décrit la méthode GRETA comme un « outil comptable somme toute simplet réinventé à l'EDF au début des années soixante pour servir de critère de gestion tant dans les contrats-programmes avec le gouvernement que dans les essais de décentralisation interne ». La critique d'une trop grande confiance dans les résultats des modélisations et des prédictions ouvre une réflexion sur le rapport aux techniques.

La confiance plus ou moins grande dans les modèles s'appuie sur une philosophie plus ou moins réductionniste. Cette dualité est à l'œuvre au sein des sciences de la nature. Ainsi, les physiciens sont souvent plus marqués par l'approche réductionniste du cosmos tandis que les chimistes penchent plutôt en faveur de l'approche pluraliste [17]. Cette première dualité d'appréhension du cosmos se redouble d'une seconde dualité de conception de la technique en société.

Le domaine de l'énergie offre de multiples cas de démesure de la technique en société, ou « hubris technologique » pour reprendre l'expression de Matthias Heymann (1998). Cela est particulièrement net durant la « politique de la grandeur » menée par Charles de Gaulle (1958-1969). L'inauguration en 1967 de la marémotrice de la Rance au nord de la Bretagne fait partie de ces prototypes énergétiques *grandeur nature* dont EDF s'est fait une spécialité dans le monde (Naegel 2018). Dans un autre registre, au cœur des Pyrénées, le four solaire d'Odeillo est, avec 1 MW de puissance thermique, le plus grand four solaire du monde à la fin des années 1960 (Teissier 2015, p. 207-217). Il avait été pensé pour faire converger les logiques de recherche, de développement et d'industrialisation des matériaux stratégiques en un seul et même artefact gigantesque. Son échec économique fut salué comme un succès techno-politique de l'ère gaullienne. Il rend compte d'un croisement des logiques technoscientifiques en un même lieu.

À Montlouis-Odeillo, l'équipe du chimiste Félix Trombe jongle entre le gigantisme des Trente Glorieuses où la France s'efforce de tracer une troisième voie entre les deux superpuissances de la guerre froide et le

17. « En se basant sur la philosophie chimique de deux chimistes célèbres, Joseph Priestley et Michael Faraday, Hasok Chang avance le concept de "pluralisme épistémique". Par là, il défend la nécessité d'une pluralité de systèmes de pratiques dans la construction des savoirs scientifiques. Une telle approche se déploie aux antipodes de l'*hubris* et de la foi qui ont pu animer les savants modernes. Elle ouvre, au contraire, des perspectives d'humilité vis-à-vis de la nature, de tolérance vis-à-vis de la société et d'heuristique vis-à-vis de la connaissance. Que la chimie serve de modèle pour faire de la pluralité une valeur majeure des sciences contemporaines ne surprendra pas les lectrices et les lecteurs qui auront le loisir d'explorer les multiples chemins de traverse de l'épistémologie de la chimie. » (Teissier et Tomic 2020, p. 110).

bricolage de dispositifs de solaire passif. Le plus connu d'entre eux est le « mur Trombe », artefact hybride à la croisée de l'histoire des sciences (Teissier 2007), du patrimoine technique (Pehlivanian 2014) et de l'histoire de l'architecture (Bouet 2017, 2020). En hiver, ce dispositif convertit le rayonnement solaire en chaleur par effet de serre. Il permet ainsi de chauffer des bâtiments durant la journée et de stocker une partie de la chaleur dans un mur réfractaire pour la restituer la nuit. Ce dispositif très simple permet d'économiser entre 50 et 70 % d'électricité de chauffage en fonction du climat en France métropolitaine (Teissier 2013b, p. 18). Il n'a pourtant pas été repris par la techno-politique de l'énergie en France jusqu'aux années 1970. En ce sens, le solaire passif peut être rapproché de l'éolien en France dans les années 1950. Malgré le fonctionnement et l'efficacité énergétique des prototypes, chacune des deux énergies renouvelables est « mise en panne » par EDF (Bruyerre 2019, p. 157). L'une comme l'autre présentent des possibilités de relocalisation de la puissance vis-à-vis du réseau centralisé et de réappropriation, dans une certaine mesure, par les usagers. Favoriser les grandes installations, les dispositifs intégrés au réseau et la haute technologie ont les faveurs de la politique française de l'électricité depuis le milieu du xx^{e} siècle. À l'inverse, la basse technologie est difficile « à vendre » en termes de modernité technicienne par le milieu politique. Elle présente des difficultés de standardisation à l'échelle nationale car elle utilise justement les particularités locales (milieu, climat, architecture, matériaux, etc.) (Teissier 2013b, p. 25).

En revanche, la démesure technologique de projets tels que l'usine marémotrice de la Rance dans les années 1950, le four géant d'Odeillo dans les années 1960 et la centrale solaire de Targassone dans les années 1970 bénéficie du soutien politique et de budgets publics importants. Ces projets relèvent du régime technicien dans la mesure où ils valorisent de grosses unités centralisées de puissance, possèdent un fort capital symbolique de modernité et sont conduits par le deuxième cercle de la décision (administrations centrales) en accord avec les premier (gouvernement) et quatrième cercle (parlement) sans réels débats populaires et décisions citoyennes (Teissier 2013b, p. 24-25). La haute technologie et le gigantisme sont caractéristiques de la modernisation triomphante de la période dite des « Trente Glorieuses » au même titre que les prédictions économétriques.

Le débat sur le réalisme se joue aussi en économie. Maurice Allais est convaincu que la « connaissance exacte de l'avenir » est atteignable alors que Pierre Massé défend que la précision du modèle ne peut aller au-delà d'une « fourchette » de prévisions encadrant « l'évolution future des faits » (Massé 1946, p. 11). Pourtant, Massé est taxé de « complaisance » vis-à-vis de sa confiance dans les modèles technico-économiques d'EDF par Puiseux (1984, p. 325). Une « sorte de magistrature économique », sous-tendue par la prévision et la modélisation, « parviendrait à définir, à force de patience, de sagesse et de neutralité, le meilleur compromis social possible ». Son approche technocratique révèle une « philosophie unidimensionnelle » où l'application de la recherche de l'« optimum » d'un système d'équations justifie le concept de « surplus de productivité » (Puiseux 1984, p. 325). La naïveté de Massé est de croire qu'une solution mathématique à un modèle économique pourrait conduire à la résolution des conflits sociaux.

Vu des humanités, Allais et Massé paraissent proches entre eux et proches du réductionnisme sociétal développé par des techniciens (et technocrates) comme P. Gérard et M. Courier. Alors que le politiste Nizard (1973, p. 214) définit la société par l'articulation et la dissension entre trois systèmes – politique, économique et social –, Allais, Massé, Gérard et Courier s'efforcent de projeter cette multiplicité sur un axe unique, unidirectionnel et quantitatif par un ensemble d'hypothèses simplificatrices et de calculs d'optimisation. Tous trois désirent, au fond, que la meilleure solution technico-économique soit utilisée pour ordonner le social. Le pouvoir octroyé à cet imaginaire technico-économique en démocratie technique contribue à former « l'homme unidimensionnel » dénoncé par Herbert Marcuse (1964). Les habitants de « la société industrielle avancée » sont réduits aux

allers-retours entre production et consommation, non seulement par les sphère médiatique et morale comme le suggère Marcuse, mais également par l'administration technique du monde sensible. L'attitude de Allais, Massé et Gérard peut être ramenée au cadre conceptuel développé par Jacques Rancière (1998, p. 240-241) dans *Aux bords du politique*. Elle s'accommode bien d'une logique de « police » ou de « gouvernement » par laquelle chaque « manière d'être » est assignée à une place identifiée dans l'arrangement du monde. Elle écarte en revanche les effets de subjectivation qui « perturb[eraient] cet arrangement » et provoqueraient un « dissensus » dans l'espace public par redéfinition du « visible et [de] l'énonçable ». À partir de ce dualisme politique, entre gouvernement et émancipation, Rancière invite à repenser le « partage du monde sensible ». La prochaine section, 5.3, entreprend une réflexion sur la recomposition du monde entre sensible et psychique, entre nature et culture.

5.3 Partages du monde entre nature et culture

Le troisième imaginaire concerne le couple nature-culture et la manière dont leurs frontières sont renégociées par les opérations de stockage de l'énergie au XX^e^ siècle. Nous l'avons déjà rencontré lors de la controverse sur l'économie politique de la houille blanche entre A. Audebrand, Bernard Brunhes et Charles Gide au début du XX^e^ siècle (cf. 4.3). J'explore plus avant le couple nature-culture dans cette section en prenant la recomposition des frontières entre nature et culture comme un critère central de la modernité. En effet, les intentions, organisations et productions de la modernité occidentale sont fascinées par le partage du monde sensible entre nature et culture et sont obsédées par le contrôle des modalités de ce partage.

5.3.1 Intentionnalités : réduire les autres cultures

Dans *Nous n'avons jamais été modernes. Essai d'anthropologie symétrique*, Bruno Latour (1991, p. 21) définit la fabrication de la modernité européenne par deux opérations. La première, d'ordre épistémologique, est une démarcation par *purification* entre « deux zones ontologiques entièrement distinctes, celles des humains dune part, celle des non-humains de l'autre ». La seconde, d'ordre technologique, est une prolifération des « hybrides de nature et de culture » par *traduction*. La démarcation entre humains et non-humains est le geste propre à la révolution scientifique du XVII^e^ siècle ; la prolifération des hybrides nature-culture est le geste de l'industrialisation de l'Europe à partir du XVIII^e^ siècle. Latour caractérise la modernité occidentale par une séparation stricte de ces gestes de purification épistémologique et de traduction technologique. Cette idée séduit par sa simplicité mais elle ressemble, selon Daniel Cérézuelle (2011, p. 403) à « une sorte de "tigre en papier", une construction arbitraire très caricaturale et sans grand rapport avec la réalité ». De fait, elle se dissout face aux situations historiques concrètes.

Ainsi, la séparation des gestes de purification et de traduction n'a pas de réalité pour les techniciens de l'époque contemporaine. Des savants-inventeurs comme William Thomson fabriquent des univers hybrides où ils manipulent et métissent en permanence des intentions humaines, des choses naturelles et des objets artificiels (cf. 3.1.3). C'est donc plutôt ensemble que séparément que les opérations de purification et d'hybridation caractérisent la modernité occidentale. Elles servent aux Européens du XIX^e^ siècle à légitimer un sentiment de supériorité sur le temps et l'espace des autres sociétés humaines. « "Moderne" est asymétrique par deux fois : il désigne une brisure dans le passage régulier du temps ; il désigne un combat dans lequel il y a des vainqueurs et des vaincus. » (Latour 1991, p. 20) Les modernes se donnent ainsi un double privilège de domination : ils placent leur époque en surplomb des temps « prémodernes » ; ils place leur monde en position d'asservir les

autres sociétés. Pour le dire rapidement, la société occidentale s'octroie le privilège de réduire doublement les autres cultures, en les simplifiant, en les assujettissant.

Un réductionnisme extrême est pratiqué par la « loi » d'évolution des sociétés formulée par Leslie White durant la Deuxième Guerre mondiale. Héritier de l'anthropologie évolutionniste, White s'efforce de rendre plus systématique la tripartition de la culture élaborée par Edward Tylor et Lewis Morgan à partir des années 1870 (cf. 3.1.3). Soixante-dix ans plus tard, White définit la culture à partir de trois variables qu'il juge universelles : la quantité d'énergie disponible, les moyens de dépenser l'énergie, la production d'objets. Il aboutit ainsi à l'équation suivante : « E*T=P, dans laquelle E représente la quantité d'énergie dépensée par personne et unité de temps, T les moyens techniques de sa dépense, et P l'amplitude de produits par unité de temps ». À partir de cette équivalence énergie-culture et d'un évolutionnisme basé sur la « pulsion de vie » inhérente aux espèces biologiques, White (1943, p. 338-339) oriente l'histoire de l'humanité vers la production d'énergie et l'efficacité énergétique. Il recentre la tripartition culturelle de Tylor et Morgan – sauvagerie, barbarisme, civilisation – sur la seule production de ressources : nourriture sauvage, nourriture domestiquée, machinisme (White 1943, p. 354-355). Il est convaincu que la simplicité de sa loi devrait ébranler les convictions anti-naturalistes de l'anthropologie culturelle. Ce faisant, il ne prend pas au sérieux les résultats de ses adversaires sur l'incommensurabilité des cultures. Mais, il ignore également la définition canonique de la culture par son lointain mentor Tylor (cf. 1.3.2). Il oublie qu'en anthropologie, plus encore qu'en thermodynamique, la « généralité se paie par la mutité quant à ce qui est mesuré » (Stengers 1997, p. 187). La force de son désir de trouver un étalon universel le pousse à ignorer les réalités historiques. Il avance ainsi que les pratiques agricoles des États-Unis en 1850 « diffèrent très peu » de celles de l'Égypte pharaonique (White 1943, p. 344). Cette ambiguïté épistémologique se double d'une ambiguïté ontologique. Convaincu que l'énergie équivaut à « la capacité à effectuer un travail », White ne définit même pas la notion de culture. Le désintérêt de White pour la précision historique est une critique générale que Claude Lévi-Strauss (1958, p. 13-14) adresse à l'anthropologie évolutionniste : une préférence pour la loi générale au détriment de l'« histoire détaillée ». White ne voit pas, enfin, l'ambiguïté anthropologique de sa démarche. Il fait de la croissance énergétique et de la quête d'une « vie plus sûre » le moteur de l'humanité alors que ces valeurs sont précisément celles de sa société productiviste et qu'elles n'ont pas de signification pour « pour l'immense majorité des sociétés humaines » (Lévi-Strauss 1958, p. 12). Or, « ce-qui-va-de-soi » et se donne comme universel ou a-temporel relève du mythe, rappelle une nouvelle fois Roland Barthes (1957, p. 7-9).

La loi de White est une caricature de la modernité occidentale comme grand partage entre nature et culture. Ce grand partage ne résiste pas à l'expérience contemporaine. Dans *Par-delà nature et culture*, Philippe Descola (2005, p. 10-12) compare l'image que la société occidentale se faisait d'elle-même à « une vaste demeure à deux plans superposés » où les sciences de la nature occupent le rez-de-chaussée « noble » tandis que la culture réside à l'étage. Il file la métaphore en soulignant combien « ses défauts de structure apparaissent de plus en plus manifestes à ceux qui l'occupent de façon non machinale, comme à ceux qui souhaiteraient y trouver un logement pour accommoder des peuples accoutumés à d'autres genres de demeures ». Pour ceux qui construisent la maison, qu'ils viennent des sciences de la nature ou de la société, la séparation entre les étages de la nature et de la culture n'est pas tracée de manière durable mais recomposée en permanence sur le front de la recherche. Du côté des sciences sociales, l'un des leitmotivs du constructivisme est bien de dire que la nature n'est pas la *cause* mais la *conséquence* de la clôture d'une controverse scientifique (Latour 1989). Du côté des sciences de la nature, l'idée d'une possible démarcation entre nature et culture ne fait pas consensus. Dans *La Philosophie du non. Essai d'une philosophie du nouvel esprit scientifique*, Gaston Bachelard compare

deux philosophies du monde sensible. Il oppose ainsi la *réalisation* des chimistes à la *réalité* des physiciens puisque « les véritables substances chimiques sont des produits de la technique plutôt que des corps trouvés dans la réalité » (Bachelard 1940, p. 53). La chimie, comme la technique, matérialise un surgissement créatif au sein du monde sensible. Chaque jour, en laboratoire, les chimistes transgressent le grand partage entre nature et culture en fabriquant de petites créatures artificielles telles que les mixtes au XVIII^e^ siècle ou les matériaux au XX^e^ siècle (Bensaude-Vincent 2005, p. 260). Avec le biomimétisme, ils retournent même « à l'école de la nature » pour fabriquer de l'artificiel (Bensaude-Vincent 2005, p. 239-244). Au sein des usines chimiques, au cœur de la modernité industrielle, les chimistes font proliférer les hybrides nature-culture en matérialisant des chimères issus de leurs imaginaires créatifs et de leurs désirs de transgression. La prolifération des hybrides rencontre ainsi et défait le grand partage entre nature et culture. Ceci discrédite l'hypothèse de Latour faisant de la non-rencontre entre la prolifération des hybrides et la démarcation nature-culture la spécificité de la modernité occidentale. Son approche montre, en revanche, l'importance d'articuler le système des objets et le tissu des imaginaires pour comprendre les mondes contemporains.

Entre la prolifération des artefacts et la représentation des mondes se déploie l'espace social de partage du monde sensible. Cet espace est éminemment politique comme le montre Jacques Rancière. Dans *Aux bords du politique*, le politique est défini comme « la rencontre de deux processus hétérogènes », l'un de « police », l'autre d'« émancipation » (Rancière 1998, p. 112). Si la « police est un partage du sensible dont le principe est l'absence de vide et de supplément », c'est-à-dire un ordonnancement adéquat « des fonctions, des places et des manières d'être », l'émancipation au contraire, « perturb[e] cet arrangement » en intervenant sur « le visible et l'énonçable », en manifestant « du dissensus, comme présence de deux mondes en un seul » (Rancière 1998, p. 240-241). Retracer la frontière entre nature et culture par l'introduction (ou la soustraction) d'objets hybrides repartage le monde sensible. Il y a un contrôle aux frontières entre nature et culture partageant les mondes sensibles comme il y a une police des frontières régulant les échanges internationaux. Déconstruire les imaginaires relatifs à la paire nature-culture participe d'une analyse critique du politique. L'énergie, cette forme de « médiation » entre la nature et la société « la plus contraignante, mais non la seule » (Debeir et al. 1986, p. 14), constitue un cas intéressant. La réflexion basée sur le stockage et l'énergie nous fera d'abord considérer les intentionnalités derrière la coupure occidentale nature-culture avant de glisser vers les pratiques de sociabilisation de la nature en régime technicien pour terminer par les aménagements incessants auxquels s'adonne nature et culture au sein de la modernité technicienne.

5.3.2 Sociabilités : moraliser et asservir la nature

Le corpus de cet essai recèle deux façons de mettre la nature en société. La première façon consiste à la doter de qualités et de défauts humains. La moralisation de la nature semble courante au tournant du XIX^e^ siècle, au moment de l'électrification du monde occidental. La deuxième façon consiste à enrôler les forces naturelles dans la production industrielle. Cet asservissement de la nature est exprimé par des techniciens de la première moitié du XX^e^ siècle, puis formalisé par des technologues de la deuxième moitié du XX^e^ siècle.

Cultiver la nature : passions, valeurs et morales

Les dictionnaires des années 1870 effectuent des transferts sémantiques pour caractériser la nature depuis l'économie : la houillère est un magasin d'énergie, la terre un réservoir d'électricité (cf. 3.1.1). Durant la décennie 1880, la nature se voit attribuer des qualités morales, qui, très souvent, sont perçus comme des défauts par le régime technicien. Ainsi, de part et d'autre de l'Atlantique, la nature est jugée « gaspilleuse ».

Anaël Marrec (2018a, p. 81) l'a remarqué déjà pour la France : l'« immense réservoir de force motrice [... de l'océan], dont l'énergie est inutilement dépensée [...] sans profit, à polir les cailloux roulés sur les grèves » (L. Baclé en 1882) ; « liquides ou aériens, les courants déploient en stériles effets mille fois plus de puissance que nos industries n'auront jamais besoin d'en appliquer » (Louis Bourdeau en 1884). Aux États-Unis également, des techniciens et inventeurs déplorent que « la puissance du vent [... soit] aujourd'hui gaspillée (*goes to waste*) partout autour de nous » (Scientific American 1883).

À l'inverse, l'opération de stockage pallie le « gaspillage » de la nature. Batteries électriques et réservoirs d'air comprimé sont d'heureuses mises en réserve. Ceci est vrai aussi d'une éolienne couplée à une batterie (Scientific American 1883) : « l'énergie qui est actuellement gaspillée [*running to waste* pourrait être utilisée pour emmagasiner [*layed up*] une provision pour la nuit » (Science 1889, p. 55). Les dispositifs de stockage moralisent ainsi les forces naturelles intermittentes en les socialisant dans un espace énergétique, qu'il soit local à l'échelle d'une éolienne ou étendu à l'échelle d'un réseau de puissance.

La moralisation de la nature contre ses penchants naturels par la collecte et le contrôle de sa puissance gaspillée justifie son asservissement et son artificialisation. Un auteur anonyme de *The Spectator*, hebdomadaire britannique politique et culturel, vante la « bataille » humaine contre les « forces aveugles de la Terre » qui « produisent seulement par la contrainte sa nourriture et sa boisson » (The Spectator 1881, p. 1162). Il regrette que l'essor industriel ait « peu ajouté au bonheur des millions de gens qui constituent l'Homme, et non les quelques riches » et qu'il n'ait pas réduit« la somme puissante de la misère humaine ». Il espère alors que l'électricité « une force qui n'a pas les limites qui rendent la lourde vapeur si inutile » fera mieux. Si « quelque chose peut rendre l'homme plus heureux, en-dehors de plus de résignation, cela sera une augmentation de la force octroyée à chacun ». Le bonheur humain repose sur la technique. Ce rapport si délicat au monde sensible est ainsi réduit à la quantité de force motrice distribuée à chaque individu. On retrouve, ici encore, une forme de l'équation énergie-civilisation structurant le régime technicien (cf. 1.3.4).

Asservir l'environnement : l'économie marchande de la nature

La technique contemporaine organise la nature par un enchaînement de commandements successifs (Heidegger 1954, p. 22). Dans le cas de l'énergie, cet asservissement prend la forme d'une chaîne de conversions et de stockages à travers laquelle la puissance est distribuée. De la fin du XIX^e^ siècle (cf. 3.3.3) au début du XXI^e^ siècle (cf. 6.2.3), les forces naturelles comme les marées, le soleil et le vent sont jugées sauvages et rétives parce qu'elles n'ont ni le pas régulier, ni la force concentrée du régime technicien. Tout un pan de l'histoire du stockage d'énergie sur la période 1870-2020 est un effort permanent du milieu technicien et technocratique pour enrégimenter les forces naturelles dans le système énergétique productif. L'asservissement économique nécessite l'artificialisation d'un espace naturel circonscrit – barrage d'un estuaire, *ferme solaire*, *champ éolien* – et la constitution d'un fonds de ressources énergétiques par conversion instantanée et stockage durable de ces forces naturelles, qui sont par nature aléatoires et dispersées. François Ost (1995, p. 10) dénonce cet asservissement économique parce qu'il réduit la nature à un simple décor de la tragédie contemporaine :

> La modernité occidentale a transformé la nature en « environnement » : simple décor au centre duquel trône l'homme qui s'autoproclame « maître et possesseur ». Cet environnement perdra bientôt toute consistance ontologique, dès lors qu'il se ramène à un simple réservoir de ressources, avant de devenir un dépotoir de déchets – l'arrière-cour, en somme, de notre technosphère.

Comme Heidegger, Ost recourt à la métaphore des flux et des stocks de matière et d'énergie et à leur transformation polluante : « du réservoir de ressources [... au] dépotoir de déchets ». Comme Hottois avec le

technocosme, Ost rend tangible l'expansion d'une « technosphère » justifiée par un accroissement économique sans fin. Or, le monde n'est pas seulement un espace de gestion et de production mais également un lieu habité de plusieurs façons par des êtres forts divers. Ost rejoint ainsi l'acception large d'une économie de la nature restaurée par Alain Deneault (2019, p. 77-79) au sens d'une économie morale de la nature qui articule une politique de la nature et une économie de la vie. Le monde habité repensé comme un faisceau de relations entre le sensible, le vivant et l'humain révèle les tractations incessantes que la culture entretient avec la nature.

5.3.3 Artificialités : le troc entre natures et cultures

Les représentations sociales effectuent des allers-retours permanents entre nature et culture. La culture est naturalisée et la nature est artificialisée. Ce troc incessant rend compte d'une pluralité des natures et des cultures en jeu dans le régime technicien.

La naturalisation de la culture est une spécificité de la modernité occidentale. Roland Barthes analyse la manière dont les valeurs bourgeoises sont naturalisées au sein des sociétés occidentales comme allant-de-soi à travers une multitude de petites *Mythologies* du quotidien. La « mystification [du verbe] transforme [ainsi] la culture petite-bourgeoise en nature universelle » (Barthes 1957, p. 7). La naturalisation de la culture s'appuie sur une représentation naturaliste du cosmos issue des technosciences. L'hégémonie occidentale a eu tendance à imposer cette cosmologie naturaliste au reste du monde (cf. 5.3.1). Dans *Par-delà nature et culture*, Philippe Descola explique que la force du naturalisme est telle que, au sein même de l'anthropologie la plus contemporaine, les autres types de cosmologie sont considérés d'une manière condescendante comme des *sujets* d'étude, archaïques et sans fondement rationnel. L'empire du naturalisme est aussi réducteur en termes épistémologiques qu'en termes culturels. Descola (2005, p. 226) regrette le manque d'attention et d'empathie avec les trois autres « combinaisons permises par le jeu des ressemblances et des différences entre moi et autrui sur les plans de l'intériorité et de la physicalité » qu'il identifie parmi les sociétés humaines : l'animisme, le totémisme et l'analogisme.

Dans un mouvement inverse, les lieux et les choses ne cessent d'être artificialisés. Le processus d'artificialisation joue sur l'idéel et le matériel. Au niveau idéel, la pensée technicienne pratique avec délectation les rapprochements par analogie. Au début des années 1970, X. Ract-Madoux (1972, p. 483) défend que « [l]'usine du lac Noir n'était autre qu'un accumulateur d'électricité de taille inhabituelle. » Ce responsable d'EDF compare ainsi l'artificialisation d'un paysage naturel des Vosges dans les années 1930 à une méga-batterie de stockage industriel. Ce faisant, il reboucle, à un siècle de distance et à rebours, sur l'imaginaire de William Thomson en faveur d'accumulateurs géants pour déverser la puissance hydroélectrique issue des chutes du Niagara. La proximité des imaginaires ne doit pas surprendre car elle se nourrit de schèmes récurrents liés aux fonctions du stockage de l'énergie sur la période 1850-2020 (2.3.2). De manière récurrente et diverse, les cavernes sont transformés en grenier de puissance pour l'économie industrielle depuis le XIX^e^ siècle (cf. chapitre 3).

Retour à la terre : le stockage d'énergie dans les cavernes

Pour Martin Heidegger (1954, p. 28), c'est justement la spécificité de la technique contemporaine de « dévoile[r] le réel comme fonds » et de faire de « la nature [...] le principal réservoir du fonds d'énergie ». Avec la civilisation du charbon, se généralise l'idée d'une « énergie cachée dans la nature » qu'il faut extraire et accumuler pour la consommer sur commande (Heidegger 1954, p. 22). Dans les années 1880, la houille est imagée par les techniciens français sous la forme d'un « soleil en cave » (Marrec 2018a, p. 98-99). Vingt ans

plus tard, Charles Gide (1904a, p. 318), voulant discréditer le charbon, convoque « les esprits souterrains » et ce « quelque chose d'un peu diabolique » qu'il renferme. Car « les forces qui sont en elle sont un peu des revenants : ces forces sont contemporaines des âges préhumains. Il n'est pas étonnant que ces forces aient voilé le ciel, qu'elles aient couvert de deuil nos travailleurs et qu'elles aient fait payer bien cher la puissance et la richesse. » Par la suite, les cavernes sont envisagées comme de possibles réservoirs souterrains d'énergie. Deux ensembles de dispositifs sont conçus durant la deuxième moitié du XX^e^ siècle [18].

Tout d'abord, la crise diplomatique et militaire du canal de Suez en 1956 fait prendre conscience aux pays européens de leurs dépendances pétrolières vis-à-vis de territoires éloignés, s'affranchissant des dominations coloniales. En France, le ministère de l'Industrie (1959) impose la « constitution de stocks de réserve par l'industrie pétrolière » assurant une consommation d'urgence en cas de rupture d'approvisionnement. Un tel arrêt suggère la dimension stratégique qu'est en train de prendre le pétrole pour l'économie nationale (cf. figure 2.2. Le charbon est encore extrait dans le nord de la France et le gaz « noir » synthétisé à partir de charbon (Williot 2020, p. 3). Le pétrole a les faveurs des cercles de la décision. Contre les mineurs et les syndicats miniers, le « capitalisme privé » et « la majeure partie de la technostructure publique » favorisent l'accroissement de l'importation de pétrole et réduisent jusqu'à peau de chagrin au cours des années 1960 l'extraction locale de charbon (Puiseux 1982, p. 611). Ce choix « productiviste » est motivé contre l'« autonomie » charbonnière par des facteurs technologiques (pétrole liquide plus manipulable que le charbon solide), des facteurs économiques (bloc de développement moteur à explosion-pétrole, faible prix du baril) et des facteurs idéologiques (modernisation par imitation du modèle états-unien et lutte contre les « vieilles torpeurs de l'autarcie ») (Puiseux 1982, p. 611). Le stockage de pétrole dans les cavernes souterraines de la région de Manosque en haute Provence joue un rôle stratégique dans la géopolitique française du pétrole. Le pétrole est ainsi déstocké des gisements géologiques, transporté de manière continue par des infrastructures terrestres ou de manière discrète par des navires océaniques et restocké dans des cavernes vides et aménagés pour l'occasion, à des milliers de kilomètres des lieux d'extraction. Ce bel enchaînement de conversions nature-culture légitime le choix d'une dépendance géopolitique contrebalancée par des dispositifs technologiques de constitution de réserves d'une durée de trois mois considérée comme suffisante. Le stockage d'énergie opère ici un transfert dans l'espace essentiellement : déplacer et emmagasiner des ressources dans l'éventualité d'une rupture d'approvisionnement. La proximité des stocks vis-à-vis des espaces de consommations est primordiale.

À la même époque que la crise de Suez est envisagée le stockage souterrain de grandes quantités d'énergie sous forme d'air comprimé pour réguler les réseaux électriques. « L'air comprimé à haute pression dans des réservoirs en acier, est utilisé depuis longtemps sur certaines locomotives de mine [... comme] réserve de sécurité » pour des opérations mécaniques en urgence (Remenieras 1956, p. 3). Les gestionnaires de mines ont ainsi « aménagé d'assez grands réservoirs souterrains d'air comprimé, en vue de régulariser la charge journalière de leur station de compression ». La technostructure d'EDF imagine, par analogie, le couplage de réserves d'air comprimé au réseau d'électricité pour assurer une régulation journalière de puissance, complémentaire dans l'espace des stations de transfert d'énergie par pompage (STEP). La technologie par « accumulation pneumatique » est affichée comme rentable de manière récurrente : au milieu des années 1950, au début des années 1970, etc. Elle prend des formes impliquant divers degrés d'artificialisation du milieu préexistant. Par ordre d'artificialité, on trouve les réservoirs suivants : couches aquifères en forme de dôme, couches de sel gemme (impliquant une dissolution), gisements d'hydrocarbures exploités, galeries de mines abandonnées,

18. Cette liste n'est pas exhaustive. Ainsi, Gaston Remenarias (1956, p. 3) mentionne que l'aménagement de « zones poreuses aquifères en forme de dôme, comprises entre deux couches imperméables [, ...] en cours de réalisation à Beynes pour le stockage du gaz d'éclairage ».

cavités creusées à dessein dans le rocher et, enfin, cuves en acier disposées en surface (Remenieras 1956, p. 39). Ces aménagements posent des problèmes et imposent des coûts différents en fonction des formes de stockage. Dans le cas d'une caverne géologique par exemple, la « recherche, la vérification de l'étanchéité et l'aménagement du réservoir souterrain constituent des opérations non seulement coûteuses mais toujours quelque peu aléatoires » (Remenieras 1956, p. 40). La figure 5.7 schématise l'installation privilégiée au début des années 1970. Un réservoir supérieur d'eau à l'air libre comprime l'air par pression hydrostatique dans une colonne de 250 mètres de profondeur aboutissant à un réservoir inférieur où l'air est comprimé à 25 bars (un bar de pression s'ajoutant tous les dix mètres de colonne d'eau).

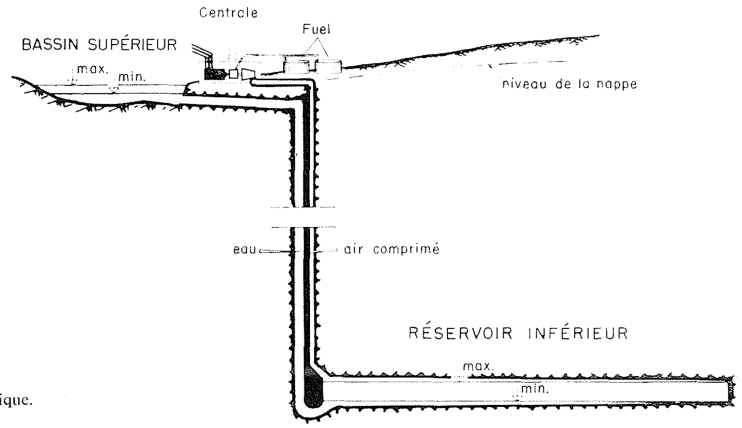

FIGURE 5.7 – Artificialisation d'une caverne pour l'accumulation pneumatique (Ract-Madoux 1972, p. 484)

Si au milieu des années 1950, les responsables d'EDF favorisent plutôt l'aménagement de cavités préexistantes (couches aquifères ou anciennes mines de sel) (Remenieras 1956, p. 3), quinze ans plus tard, la solution plus artificialisée de l'excavation du réservoir inférieur a leur préférence. Plusieurs facteurs expliquent ce choix d'une artificialisation accrue. Il y a d'abord une raison culturelle. L'artificialisation correspond à une imaginaire de la modernisation technologique du pays (cf. 1.3.4). Ensuite, elle paraît accessible en termes économiques. Le prix du kilowatt-heure est estimé à 30 francs dans le cas d'une excavation complète (Ract-Madoux 1972, p. 485). Il a été divisé par dix en quinze ans (Remenieras 1956, p. 38). Les potentialités de stockage dépassent même celle du transfert par pompage : on projette d'« emmagasiner 4 kWh par m^3 d'excavation, c'est-à-dire huit fois plus » que pour une STEP (Ract-Madoux 1972, p. 485). Enfin, le choix de l'excavation répond à une autonomisation par rapport aux vicissitudes géographiques. Il affranchit le gestionnaire de réseau de sites naturels spécifiques : cavernes géologiques dans le cas du stockage par air comprimé ; zones vallonnées dans le cas du stockage par pompage d'eau (STEP) (cf. figure 5.3).

L'artificialisation du milieu souterrain par excavation apparaît comme une forme de « délocalisation de la puissance ». Alain Gras (2003) a forgé ce concept pour désigner le redéploiement géographique de la production manufacturière, y compris loin des cours d'eau, à travers l'utilisation croissante de la puissance de la machine à vapeur. L'excavation dont il est question ici partage, avec la délocalisation de puissance due au charbon, un même surcoût matériel et économique pour artificialiser le milieu par rapport à des solutions plus adaptées aux conditions locales. Ainsi, au XIX^{e} siècle, la moitié du prix du charbon en Europe continentale venait de son transport (Gras 2003). La délocalisation de la puissance requérait de multiples flux d'énergie (charbon brûlé pour l'extraction et le transport) et flux de matière et matériaux pour l'aménagement du territoire

(aplanissement, excavation, explosion) et la construction des infrastructures ferroviaires, impliquant aussi les gares (acier, bois, ciment, fer, pierre, tuile ou ardoise, etc.). De même, le coût d'une excavation complète est estimé à vingt fois celui d'un aménagement de cavernes existantes (Remenieras 1956, p. 38). Ce surcoût économique s'accompagne d'un surcoût matériel en termes de déplacement de quantités énormes de terres, de roches et d'eau et de consommation d'énergie pour l'excavation et l'extraction des matériaux souterrains. En un mot, le coût économique se double d'un coût écologique. Finalement, la filière de stockage par air comprimé sera délaissée en France au profit du déploiement massif de STEP au cours des années 1970 (cf. 5.2.4. L'Allemagne teste d'abord le stockage massif d'air comprimé dans des cavernes géologiques naturelles. L'installation de Hundorf est ainsi opérationnelle à partir de 1978 avec une capacité de stockage de 290 MW et une constante de déstockage de trois heures (Camara 2011, p. 31).

Contre-nature, les déchets à l'ombre des cavernes

Je ne peux abandonner l'imaginaire technicien des cavernes sans un bref détour par le problème des déchets industriels. Krzysztof Pomian (2014, p. 36) fait des déchets l'artefact ultime des sociétés humaines, eux « qui, après avoir eu une fonction, n'en ont plus ». Le déchet dérange d'autant plus qu'il est proche et que ses effets sont sensibles. Ainsi, les utilisateurs européens ou états-uniens d'ordinateurs portables ne s'inquiètent pas des ravages environnementaux de l'extractivisme minier du lithium au Chili ou en Bolivie et des terres rares en Chine (Teissier 2022c, p. 228). Les effets sont trop éloignés. C'est un mécanisme semblable qui fait enfouir les déchets industriels au-delà d'un horizon visuel et olfactif des consommateurs.

Dereck P. Gregory, qui dirige une équipe de l'Institute of Gas Technology à Chicago, pense les déchets industriels en référence aux « emballages » (*containers*) de la filière alimentaire. Il oppose ainsi le « désavantage [... du] "sans consigne, pas de retour" » à l'idée d'une « fonction "retour vide" » sur le milieu (Gregory 1973, p. 14). Selon la première logique (dominante), les emballages sont déversés dans l'environnement parce qu'ils sont chers à collecter et à recycler. Le « fardeau de la récupération et du recyclage » pèse alors tout entier sur les épaules de la nature. À l'inverse, la seconde logique règle les problèmes d'emballages entre la production et la commercialisation, c'est-à-dire en amont de la consommation. C'est cette idée qui prévaut dans l'idée de plus en plus à la mode d'une séquestration du dioxyde de carbone produit par les centrales thermiques au charbon, au gaz ou au pétrole, en amont de la consommation d'électricité. On publicise ainsi le fait de pouvoir « stocker d'ici à 2030 près de 15 % du CO_2 émis à travers toute la planète » (H2-Mobile 2022a).

Une telle promesse sans garantie est typique du régime technicien. Si la capture du carbone est maîtrisée en laboratoire par des procédés de réactions acido-basiques ou d'adsorptions physico-chimiques, son stockage industriel pose problème. Cela reste, pour les chercheurs de la filière hydrogène, « un peu aujourd'hui de la science-fiction » (Roche 2022, p. 10). D'autre part, alors que le stockage de carbone dans des roches poreuses et cavités salines « est encore à l'état de recherche », les effets environnementaux d'un stockage massif ne sont pas connus (Coutanceau 2022, p. 10). Le « CO_2 étant un gaz acide, quels effets [peut-il] avoir sur les roches ou même sur la biodiversité, les micro-organismes ? ». Le déploiement de la capture de dioxyde de carbone à grande échelle aurait un impact incertain et imprévisible sur « la zone anthropique des sols – les 100 premiers mètres de profondeur – avec l'atmosphère » dont l'importance est cruciale pour les régulations du cycle du carbone à l'échelle de la planète (Coutanceau 2022, p. 3).

Or, le Code de l'énergie en vigueur en France légifère sur le « stockage géologique de dioxyde de carbone » et les acteurs économiques qui en assurent la gestion (Ministère de l'Économie 2011, p. 35). Ce qui se joue ici est un nouveau geste de la démesure technicienne. L'industrialisation des sociétés basée sur la combustion des

hydrocarbures « a voulu considérer ces composés carbonés comme de simples réservoirs d'énergie à libérer » alors qu'ils étaient beaucoup plus que cela : des « architectures moléculaires [...] formées au cours des longues durées de l'histoire de la Terre » (Loeve et Bensaude-Vincent 2018, p. 171). L'évolution géologique ayant abouti à l'enfouissement des matériaux fossiles ne visait pas à constituer des stocks de puissance pour les sociétés humaines. Sans finalité, elle a eu pour conséquence de rendre la Terre habitable, par l'homme certes mais aussi et surtout par une foultitude d'êtres vivants. « [T]out énergie fossile est du temps concentré : la consommer, c'est consommer du temps » réaffirment Sacha Loeve et Bernadette Bensaude-Vincent (2018, p. 172). Avec la capture et le stockage massifs de gaz carbonés, l'humanité industrieuse se donne pour mission titanesque en 30 ans de rattraper dans l'atmosphère de la Terre 300 millions d'années de créativité géologique, dilapidés en 300 ans d'industrialisation. Que l'ampleur de la tâche ne paraisse pas démesuré à l'entreprise humaine montre la déraison du régime technicien. Que l'entreprise humaine ne songe pas même à ralentir son agitation compulsive montre l'aliénation profonde opérée par la technique sur la psyché humaine.

5.3.4 Psychés : ordre et désordre énergétiques

L'essor de la thermodynamique reconfigure en profondeur les sciences de la nature durant la deuxième moitié du XIX^e^ siècle (Stengers 1997, §3). L'énergie devient une jauge des phénomènes matériels. L'emprise du naturalisme déborde vers les humanités à partir des années 1860 (cf. 3.1.3). L'énergie devient un étalon de mesure du cosmique, du psychique et du social. En d'autres termes, elle incarne une clé de voûte de la cosmologie occidentale. Analysons deux de ces représentations du cosmos liées au stockage d'énergie, l'une dans la sociologie états-unienne de la fin du XIX^e^ siècle, l'autre dans la littérature française des années 1930.

Le stockage d'énergie comme degré de liberté chez Lester F. Ward

Auteur de la première théorie sociologique d'ampleur aux États-Unis, Lester F. Ward est un savant relativement méconnu aujourd'hui par rapport à sa notoriété d'alors (Finlay 1999, p. 251-254). Comme la plupart des sociologues de sa génération de la fin du XIX^e^ , Ward est « un produit de la frontière, autodidacte » et éclectique (Stern 1933, p. 163). Il a été formé à la géologie, à la botanique, aux langues et au droit. Il mène une carrière de fonctionnaire pour l'État fédéral à Washington tout en publiant à la croisée de domaines scientifiques distincts, de la botanique à la sociologie en passant par l'astronomie. Ainsi, Ward (1877) rapproche et compare la vie d'une plante et celle d'une étoile dans un article de vulgarisation intitulé « Cosmic and Organic Evolution ».

Lorsqu'il aborde la sociologie, il est donc marqué par le naturalisme. D'une part, il recourt à un évolutionnisme hybride entre darwinisme (sélection naturelle) et lamarckisme (« influence rigide de l'économie de la nature ») (Ward 1883, p. 461). D'autre part, athée et moniste, il s'efforce de réduire les forces et énergies de l'univers à des mouvements de matière. Dans cette perspective matérialiste, il construit un schème original d'appréhension du monde à partir du stockage de l'énergie. Il l'expose en 1895 dans un article intitulé « The Natural Storage of Energy » publié dans une célèbre revue de philosophie, *The Monist*[19]. Il part de l'idée que tout « être vivant organisé est un réservoir de force » et que le milieu environnant est traversé par des forces antagonistes du type agrégative (gravitation) ou dispersive (vibration) (Ward 1895, p. 260-262). Chaque entité est définie par sa structure contenant « une sorte de batterie, capable de rendre effectives les forces de ses

19. Je remercie sincèrement Jenny Boucard, collègue du Centre François Viète, qui m'a envoyé cet article de Lester Ward dont j'ignorais tout à fait l'existence. Or, la métaphore de « la batterie naturelle de stockage » que Ward développe ici semblait faite pour confirmer la pertinence d'étudier le stockage d'énergie sur le temps long.

éléments ». Plus la structure de l'entité s'étend, plus l'énergie de la « batterie naturelle de stockage » s'accroît. Plus l'énergie augmente, plus l'entité dispose d'une « différence croissante entre effets et causes » permettant d'agir dans et sur le milieu matériel. Le stockage d'énergie introduit ainsi une asymétrie interne entre cause et effet qui émancipe progressivement les existants de leur environnement. Il établit ainsi des degrés de liberté. Par degré de complexité croissante « dans la série cosmique », les existants ont accès à des phénomènes de plus en plus élaborés : « vibration d'éther, affinité chimique, motilité, vitalité, sensibilité, volonté, intelligence ». Le stockage d'énergie dans les structures matérielles rend ainsi compte, par degrés discontinus, d'une complexité croissante des entités de l'univers et d'une latitude d'action croissante des existants sur le milieu extérieur. Le dernier degré, l'intelligence surpassant la volonté, est celui qui « s'approche le plus près de la liberté » (Ward 1895, p. 263). L'intelligence devient ainsi « la cause finale [non pas] en soi une cause, [mais] la réappropriation de toutes les causes » de la nature.

Comme pour Wilhelm Ostwald ou Herbert Spencer, la généralité du principe de conservation de l'énergie s'adapte bien à une forme d'harmonie nomologique que recherche Ward pour appréhender le cosmos et la société dans un même cadre d'intelligibilité (cf. 3.1.3). Cette approche naturaliste des sociétés est typique en régime technicien (cf. 3.3.3). L'originalité de Ward tient à l'usage précis qu'il fait d'un appareil emblématique de la modernité électrique (1880-1910) : la batterie électro-chimique (4.1. La métaphore des batteries est destinée à inscrire l'universalité de la loi proposée par Ward – l'équivalence entre la latitude d'opération d'une entité naturelle et sa capacité structurale à stocker de l'énergie – dans la matérialité et la quotidienneté de l'un des artefacts les plus fascinants de l'époque. Malgré sa force argumentative, cette métaphore moderniste repose sur une ambiguïté épistémologique. Elle encre dans un dispositif concret et fonctionnel des notions aussi floues que la liberté et l'intelligence, ce qui dispense de les définir. Les discontinuités de qualité, entre minéral et organique, entre inanimé et vivant, entre psychique et social, sont ainsi traduites par des quantités discrètes – d'énergie stockée dans une batterie naturelle – dont l'ascension par échelons discrets matérialise la complexité croissante des existants de l'univers. Le principe d'équivalence de l'énergie permet de lisser des hétérogénéités entre vivant et social par exemple. Mais l'ambiguïté est aussi d'ordre ontologique. La métaphore de la batterie permet de schématiser le théâtre cosmique par un enchaînement d'opérations sur la matière – conversion d'énergie – et de l'animer en distribuant des degrés de liberté – stockage d'énergie – en fonction de la taille et de la complexité des structures observables dans l'univers et dans la société. Cela permet à un matérialiste conséquent comme Ward de ne pas recourir au vitalisme, cette forme d'animisme que Charles Gide utilise peu après pour rendre compte d'une hiérarchie de valeur entre la houille blanche et la houille noire. Il n'empêche, en prenant la batterie comme métaphore de la liberté, Ward transforme un artefact du quotidien en un sémiophore de la Belle Époque.

En pratique néanmoins, Ward se joue du partage entre nature et culture pour construire sa théorie sociologique. Il est beaucoup moins naturaliste que Spencer ou que les anthropologues fonctionnalistes de l'époque. Spencer a systématisé le recours à l'évolutionnisme biologique pour expliquer qu'une « même évolution du simple au complexe par différenciations successives » s'applique également aux agrégats astronomiques et aux institutions humaines (cité par Becquemont et Mucchielli 1998, p. 87). Lorsque le mécanisme par différenciation s'oppose à l'une de ses convictions profondes – le remplacement progressif des « sociétés militaires » centralisées et autoritaires par des « sociétés industrielles » de libre échange par coopération –, Spencer ne se résout pas à abandonner l'organicisme. Un tel choix suggérerait l'irréductibilité du social au biologique et discréditerait le rêve spencérien d'une philosophie synthétique décrivant une cosmologie logique, homogène et naturaliste (Becquemont et Mucchielli 1998, p. 170-175). À l'inverse, Ward ne cesse d'hybrider

les schèmes énergétiques et évolutionnistes avec d'autres schèmes d'intelligibilité issus des humanités pour raffiner le social. Si, d'un côté, il incorpore la liberté individuelle dans une « batterie d'énergie psychique », qui serait propre aux cerveaux des grands mammifères (Ward 1903, p. 137), d'un autre côté, il recourt à la définition de forces de cohésion spécifiquement sociales comme l'affection, la raison et la sympathie (Ward 1883, p. 395). Ward se distingue de Spencer par l'introduction d'un écart ontologique entre biologique et social et par l'octroi d'un rôle éducatif et évolutif aux institutions comme l'école ou la famille qui transgressent ainsi l'ordre du vivant. La fascination naturaliste n'est jamais très loin pourtant. Ward emprunte la notion de synergie à la physiologie pour expliquer la cohésion sociale. Ce transfert est courant à l'époque. En effet, si la synergie désigne depuis le XVIII^e^ siècle en histoire naturelle l'action coordonnée d'organes dans l'accomplissement d'une fonction, elle est appliquée à l'étude de la vie sociale à la fin du XIX^e^ siècle (Rey 2012, t. 3, p. 3556). « La nature, affirme Ward, est créatrice et le principe de la création est la synergie : éléments chimiques, composés inorganiques, composés organiques, protoplasme, plantes, animaux, homme, société. » (Cape 1922, p. 145). La synergie devient ainsi un concept hybride du naturalisme à travers l'énergie et du sociologisme à travers la mutualité. Elle explique la structuration et l'évolution des sociétés humaines (Ward 1903, p. 171, 183).

Dans un autre registre, Émile Durkheim et l'école fonctionnaliste (B. Malinowski, A. Radcliffe-Brown et T. Parsons) défendent la division genrée du travail et la mariage par analogie avec les effets bénéfiques de la division des fonctions dans un organisme biologique (Finlay 1999, p. 262-264). À l'inverse, fort de convictions politiques féministes, Ward utilisent deux arguments pour discréditer la division genrée du travail. D'une part, il critique l'organicisme strict de l'anthropologie fonctionnaliste. D'autre part, il cherche dans les populations animales des comportements égalitaires entre mâles et femelles. Il en déduit, par opposition avec l'« androcracie » (son néologisme) des sociétés contemporaines, une « théorie gynécocentrée » de l'humanité basée sur des comparaisons avec le règne animal (Finlay 1999, p. 254-255). En retour, Durkheim reproche à Ward une approche trop globalisante qui le pousse à vouloir aborder « toutes les questions possibles » (Fabiani 2007, p. 13).

Le pluralisme épistémologique de Ward est intéressant. Il s'explique sans doute par le passage de multiples frontières disciplinaires et son refus de réduire le social au physicalisme ou à l'organicisme. Son projet met en relation des champs de connaissance distincts en respectant leurs hétérogénéités. Il cherche et sélectionne des notions thermodynamiques et biologiques : stockage d'énergie, synergie organiciste, gynécocentrisme animal, etc. Il les rend fécondes par un travail de réappropriation et d'application spécificité aux cadres psychiques et sociaux. Il fait aussi un usage constructif de ses opinions politiques, qu'elles soient féministes ou socialistes. Celles-ci l'affranchissent de l'emprise du naturalisme tout en diversifiant ses perspectives sur la société. C'est ainsi qu'il est reconnu aux États-Unis au début du XX^e^ siècle (puis oublié à la génération suivante) pour avoir introduit, de manière innovante, des facteurs psychiques et affectifs dans les théories sociologiques de son époque. L'analogie énergétique de Ward n'est pas unique. D'autres cas de transfert montrent la percolation des schèmes énergétiques vers les humanités d'une part et vers le corps social de manière plus générale. Durant la période qui sépare Lester Ward de Leslie White, la psychanalyse se saisit du schème énergétique.

L'énergie dépensée comme empreinte du désir chez Georges Bataille

Le naturalisme accroît son emprise sur les humanités à travers la psychanalyse [20]. Sigmund Freud et Carl Jung ont forgé la notion d'« énergie psychique » pour rendre compte de certaines névroses traumatiques (Hiebert

20. Mon intérêt pour les formes psychanalytiques et littéraires de l'énergie a été stimulé par certains commentaires de Dominique Pécaud lors de la soutenance de thèse d'Anaël Marrec en septembre 2018.

1966, p. 1074). À leur suite, Gaston Bachelard rappelle, dans *La Psychanalyse du feu*, que le feu incarne, dans le corpus alchimique, des rêveries de puissance et de destruction liées au désir sexuel. Pour Paracelse et ses héritiers alchimistes, le feu est un principe vital (Bachelard 1934, p. 129). Ce vitalisme croise la tradition expérimentale de transmutation alchimique des métaux vils en métaux nobles. Le feu, comme l'énergie, contient l'idée d'une conversion hétérogène. Cette idée est également présente dans une autre tradition millénaire et mystique : le rituel chrétien de l'eucharistie revient à transformer le pain et le vin de messe en corps et sang du Christ. La transsubstantiation est sans doute, encore aujourd'hui, le plus pratiqué des rites symboliques de transformation de substances hétérogènes.

Au moment où Bachelard fait dialoguer sciences expérimentales et psychanalyse, l'imaginaire du feu travaille aussi l'écrivain Georges Bataille. Celui-ci forge l'idée d'une « consumation de soi » pour réanimer l'existence contemporaine. Sa pensée est singulière. Alors qu'en 1929 Bataille « voulait que l'univers ressemblât à un "crachat" [...] du moins à quelque chose d'"informe" » (Mong-Hy 2012, p. 99-100), il publie vingt ans plus tard *La Part maudite. Essai d'économie générale* afin d'ordonner les domaines inorganique, psychique et social. Il trouve un ordonnancement de son « économie générale » du cosmos en puisant à des domaines distincts : la psychanalyse, l'anthropologie et la thermodynamique. Proche de Jacques Lacan, Bataille invente la notion d'hétérologie pour désigner ce qu'il considère comme irrécupérable et « improductif » dans la société : les ordures, les excréments, les délires (Roudinesco et Plon 2011, p. 1302-1303). Cette « part maudite » de l'homme traverse toute son œuvre. À « la suite des mystiques de tous les temps », Bataille (1949, p. 179) défend que seul un « fou » (comme lui) peut atteindre « la conscience de soi ». Si hétérodoxe qu'elle soit, sa « folie » est profondément savante. Son traité « babélique » fait dialoguer philosophie et mysticisme, histoire naturelle et économie, humanités et physique (Limousin et Poirier 2015, p. 15).

Contre « la fatalité économique » que partagent des idéologies aussi différentes que l'utilitarisme, le capitalisme et le marxisme, Bataille exalte la part maudite de l'homme par « la dépense d'énergie », expérience ambiguë, à la fois destructrice, parce qu'elle consume jusqu'à la mort, et vitale, parce qu'elle exprime le désir insatiable de création. « L'exubérance est beauté » avertit William Blake en épigraphe de *La Part maudite*. Bataille recourt à une anthropologie qui critique l'*homo œconomicus*. Il est fasciné par le rite amérindien du potlatch, identifié par Franz Boas et repris par Marcel Mauss dans sa théorie du don et du contre-don. Comme Boas et Mauss, Bataille retient les aspects spectaculaires et agonistiques du potlatch : la dépense somptuaire de ressources qu'un premier individu offre à son rival pour l'humilier s'il ne parvient pas en retour à dépenser plus qu'il n'a reçu comme l'exige le rite (Mong-Hy 2015, p. 339-341). Ce qui séduit Bataille dans la notion de dépense, c'est qu'elle embrasse des phénomènes sociaux aussi hétéroclites que « le luxe, les deuils, les guerres, les cultes, les constructions des monuments somptuaires, les jeux, les spectacles, les arts » et, enfin, l'activité sexuelle « perverse », dans le sens de non-reproductive (Limousin et Poirier 2015, p. 17). L'excès par et pour l'agrément s'oppose frontalement à la morale utilitaire de White et à l'équation énergie-civilisation qui en découle.

Sa dernière source d'inspiration, Bataille (1949, p. 35) la trouve dans la nature et les sciences de la nature. Il regrette que, pour ses contemporains, « l'acquisition de l'énergie [l'emporte] sur la dépense » alors que la nature enseigne la prodigalité : le soleil « dispense l'énergie – la richesse – sans contrepartie ». Il approfondit sa réflexion grâce à la thermodynamique qu'il découvre grâce à deux de ses amis : l'un, Roger Caillois, est spécialiste de l'étude du sacré ; l'autre, Georges Ambrosino, est physicien des rayons X. Comme Bernard Bruhnes, Bataille se démarque de Spencer, White ou Ward parce qu'il s'intéresse plus au principe d'évolution de l'entropie qu'au principe de conservation de l'énergie. Caillois lui a fait remarquer la contradiction entre

ce principe d'évolution thermodynamique vers le désordre et le principe d'évolution biologique qui oriente le vivant vers un ordre plus grand (Mong-Hy 2012, p. 81-82). Bataille reformule ce paradoxe naturaliste en termes socio-historiques : comment concilier l'agrément individuel de la dépense en « pure perte » et la culture, cette « thésaurisation » collective des productions symboliques ? Il construit sa réponse grâce à Ambrosino, qui le familiarise à la thermodynamique et à la microphysique durant la période 1934-1947 (Mong-Hy 2012, p. 20). Bataille formule ainsi un principe de contradiction entre existence et utilitarisme : « Nul ne peut à la fois connaître et ne pas être détruit, nul ne peut à la fois consumer la richesse et l'accroître. » (Bataille 1949, p. 76-79).

S'il s'inscrit dans un naturalisme en faisant de l'énergie et de l'entropie des principes structurant et dynamique de sa cosmologie, il prend néanmoins le contre-pied du régime technicien en défendant que les « sociétés humaines n'obéissent pas à un principe de conservation de l'énergie par l'économie et l'organisation rationnelle des choses mais plutôt à un principe de dépense irrationnelle de l'énergie, donc de gâchis et de destruction » (Degryse 2004, p. 118). Cette dépense destructrice d'énergie constitue, selon Bataille, « la part maudite » de l'humanité qui, sans cesse, stimule et laisse inassouvis les désirs humains. Les psychologies de l'énergie selon Bachelard et Bataille s'opposent en première lecture à la gestion régulée de l'énergie par le régime technicien. Alors que celui-ci s'efforce de thésauriser l'énergie au niveau collectif en accroissant son stockage et en optimisant sa consommation, celles-là montrent le désir humain comme une pulsion frénétique d'énergie afin d'atteindre le plaisir individuel qu'il soit sexuel, créatif ou destructif. En deuxième lecture, l'accumulation et le stockage d'énergie par le régime technicien peuvent être interprétés comme une stratégie collective efficace pour fournir un surplus d'énergie aux individus, qui assouvissent alors leurs pulsions créatrices et destructrices, synonymes de plaisirs temporaires. L'inassouvissement du désir, en renouvelant l'exigence de plaisir, demande à nouveau une pulsion de puissance. On retrouve un schéma proche de celui que proposait Jean Brun dans *Les Masques du désir*. Ce cycle inassouvi de désir-plaisir entretient l'expansion continue du système énergétique mondial durant un long XX^e^ siècle.

5.4 Conclusion : opérativité des modèles, efficacité des mythes

La technologie est deux fois opératoire, par ses artefacts et par ses discours. En régime technicien, elle s'efforce de répondre aux incertitudes sociales par des modélisations de l'espace et du temps (5.4.1) et aux angoisses existentielles par des récits englobants qui constituent des mythes contemporains de la technique (5.4.2).

5.4.1 Encadrer les incertitudes du présent par des modèles du futur

La pensée modélisatrice est une puissante dorsale du régime technicien au XX^e^ siècle. Une première raison de sa réussite est qu'elle partage un même amour de la chose mesurée avec le scientisme et le capitalisme. Du côté scientiste, on a retenu du physicien et philosophe autrichien Ernst Mach la formule lapidaire selon laquelle n'« est réel que ce qui est mesurable ». Du côté capitaliste, l'éthique bourgeoise est obsédée par tout ce qui se compte (Barthes 1957, p. 94). Une deuxième raison de succès est que la modélisation encadre les incertitudes du monde social et du temps futur par de larges avenues ouvrant sur des perspectives qui, sans être tout à fait réelles, ont la rectitude du réalisme. Elle offre donc un outil de décision à la manière des « Grands Corps [qui] transforment les problèmes *a priori* difficiles en modes opératoires réalistes » (Thoenig 1987, p. 36-37). Une troisième force de la modélisation est qu'elle offre de multiples formes de médiation dans les sociétés

industrielles du XXe siècle (Morgan et Morrison 1999). Cette « forme de colle » colonise ainsi les jointures entre épistémique et social, entre matériel et idéel, entre compréhension et action (Sergio Sismondo cité par Armatte et Dahan Dalmedico 2004, p. 291. Par sa nature polymorphe, la modélisation relie qualités et quantités : métaphores, analogies et concepts enserrent les symboles mathématiques ; styles architecturaux, horizons politiques et leviers d'action orientent en partie les résultats obtenus (Boumans 1999). À force d'hybrider technique et politique, la modélisation devient un discours performatif à travers les scénarios qu'elle produit. C'est la quatrième raison du succès : la construction de récits sur la société, en particulier sur les futurs de la société. Fort de ses espérances mathématiques, le modèle se substitue en partie aux expériences humaines à partir des années 1930 (5.2.1). Suite à la Deuxième Guerre mondiale, le principe d'optimisation coût-bénéfice apparaît de plus en plus comme une bonne solution pour prévoir et planifier le futur de la deuxième moitié du siècle (5.2.3).

La production de scénarios devient une activité à part entière de la modélisation à partir des années 1980 : « Médiateur entre un modèle numérique et la narration que l'on peut extraire de ses résultats, le scénario cristallise pourtant une articulation de plus en plus étroite entre le temps de l'exploration et celui de l'action, entre la dynamique de la science et celle du politique ». (Armatte et Dahan Dalmedico 2004, p. 291). Le couple modèle-scénario devient un passage obligé des politiques de la science et de la technique au XXIe siècle. Le cas des mondes hydrogène le montrera dans le chapitre 6 (notamment 6.2.4). Le stockage de l'énergie au XXe siècle montre la mise en forme, la mise en discours et la mise en politique des dispositifs de modélisation. Chacun des trois imaginaires développés dans ce chapitre en témoigne d'une manière différente. Dans la section 5.1, la régulation des flux et stocks hydrauliques sert de base, aux électriciens, pour fabriquer un schème d'intelligibilité mécanique du monde. Ce schème traduit un réseau de canalisations, réservoirs, surfaces inclinées (vallées), volumes ouverts (ciel) liés les uns aux autres en un système d'équations pouvant être résolu à partir de données (mesurées ou estimées) et de règles d'optimisation de type coût-bénéfice.

La section suivante, 5.2, met en scène une double transgression. Premièrement, la modélisation cherche à atteindre des objets plus complexes qu'un réseau hydraulique à travers le réseau électrique dans un premier temps, l'ensemble de l'économie humaine par la suite. Or, cette montée en complexité accroît drastiquement l'incertitude des résultats. Le travail de Pierre Massé met en œuvre cette transgression du compliqué au complexe. Dans *Les Réserves et la régulation de l'avenir dans la vie économique*, il explique la rupture calculatoire entre un « avenir déterminé » et un « avenir aléatoire ». Dans le premier cas, proche d'un réseau hydraulique, la recherche de l'optimum produit un *résultat* probabiliste ; dans le second cas, proche du marché économique, elle produit une *règle* de probabilité (Massé 1946, p. 27). Le degré d'incertitude supplémentaire induit ainsi une discontinuité ontologique du système considéré, « de la régularisation du connu à *la régulation du hasard* ». La seconde transgression concerne l'élargissement de l'horizon temporel, de quelques semaines à quelques mois dans le cas de la gestion du parc électrique (5.1.1), à plusieurs années ou décennies dans le cas de la planification économique de la France (5.2.3). Cette mise en trajectoire du temps est centrale dans la modernisation de la France durant la deuxième moitié du XXe siècle. Elle s'accentue encore au XXIe siècle par un recours systématique aux « feuilles de route » dans la construction et la mise en œuvre de politiques industrielles (cf. 6.4.1).

À des degrés divers, Pierre Massé et Maurice Allais, de même que la technostructure d'EDF, affichent une solide confiance dans la prévision mathématique du futur et la modélisation quantitative des sociétés humaines. Or, l'une des conclusions générales de la réflexion rétrospective de François Plassard (2004, p. 8) insiste sur « la difficulté fondamentale de la recherche prospective de faire une place à l'imprévu ». Ce n'est pas étonnant vu la force symbolique donnée aux outils de modélisation et de quantification pour saisir la complexité du social et

de l'historique. La prospective et la prévision constituent donc un espace de dialogue tout indiqué pour que les sciences de l'ingénieur échangent, de manière symétrique et attentive, avec les humanités. L'armée française s'y essaye depuis 2019 en enrôlant des auteurs de science-fiction formant une « Red Team » au sein de l'Agence de l'innovation de défense. L'objectif, dérivé d'un projet états-unien, est de « penser le futur de la guerre [... en] "s'affranchi[ssant] le plus possible des moyens habituels de la prospective" » (Poivet 2020, p. 42). L'enjeu sociétal de la construction des imaginaires déborde de beaucoup l'approche étroite de la sécurité nationale. Il touche aux imaginaires de l'humanité toute entière et à la manière dont des populations entières voudraient construire des temporalités plus ancrées à leurs territoires et plus encrées par une diversité individuelle et collective d'expériences vécues du monde sensible. Car les expériences et espérances humaines ne sont pas toutes formalisables en termes d'optimisation calculatoire et d'espérance mathématique.

5.4.2 Mythes techniciens et cultures de la nature

Lorsque le modèle de la réalité est pris pour la réalité, le scénario s'enferme dans un mythe. Le basculement du scénario à l'utopie est d'autant plus palpable que, de l'aveu même de Massé (1946, p. 11), même pour les systèmes les plus simples, la précision du modèle ne peut aller au-delà d'une « fourchette » de prévision encadrant « l'évolution future des faits ». Son rival en économie et en technocratie, Allais, défend en revanche que la « connaissance exacte de l'avenir » est accessible. Ce qui est présenté comme *exact* n'est qu'incertain et la *fourchette* d'incertitude est d'autant plus large que l'horizon à prévoir s'éloigne dans le futur. Ce désir de maîtriser l'incertitude par des techniques de prévision masque mal l'angoisse existentielle des sociétés contemporaines confrontées à l'idéologie du progrès. Ceci explique comment, selon Jean Brun (1981, p. 15), « Histoire et Science sont devenues les deux puissants facteurs mythogènes de notre époque alors qu'elles prétendent ouvertement nous affranchir de toute forme de pensée mythique ». La technique prend la forme du mythe pour soutenir son expansion en régime technicien.

L'imaginaire technicien peut être analysé par analogie avec le mythe de la « négritude ». Dans *Le sacré sauvage et autres essais*, Roger Bastide (1975, p. 117-121) interprète la négritude comme un phénomène de « compensation » stimulé par « le désarroi des Africains en diaspora dans le monde des blancs ». La fonction collective de ce mythe est de dépasser l'« angoisse du changement de personnalité » face à une domination culturelle. Bastide (1975, p. 87) souligne, dans le même ouvrage, l'essor de « la mythologie moderne » consistant à « demander à la machine, qui envahit de plus en plus notre vie, de fabriquer de nouveaux mythes ». En rapprochant ces deux analyses, on peut faire l'hypothèse que les sociétés contemporaines, désorientées par le nombre croissant de machines et de dispositifs techniques, compensent leurs angoisses collectives par de nouveaux mythes techniciens. La technologie matérielle du technocosme est domestiquée par un renouvellement de la technologie discursive. Le projet technocratique d'enserrer les futurs dans des modèles d'optimisation et des scénarios de trajectoires encercle les sociétés contemporaines dans des imaginaires techniciens.

Face à l'angoisse du changement technique et aux effets de subordination de la machine, les contemporains tentent de se réapproprier l'espace, le temps et le lien social en forgeant de nouveaux mythes de la technique. Selon Bastide (1975, p. 117-121), les nouveaux « mythes sociaux ne sont pas de même matière que les mythes [archaïques car ils] sont constitués d'idées et non pas d'images ». Je serai plus inclusif que Bastide. Les mythes modernes me semblent tissés de dualités en tension : images et concepts, utopies et modèles, incantations et prévisions, idéel et matériel. L'imaginaire technicien joue une fonction du sacré : faire accepter une angoisse collective et rendre le monde habitable. Pour les sociétés contemporaines, l'angoisse collective est marquée par trois rapports de subordination vis-à-vis du monde. Premièrement, elle est due à une rupture de temporalité

typique de régime *présentiste* forgé par François Hartog. En rupture par rapport à la tradition archaïque dont elles sont nostalgiques, les sociétés actuelles n'arrivent pas non plus à imaginer un avenir souhaitable. Deuxièmement, elles sont assujetties à la prolifération des machines qu'elles ont désirée et continuent d'acquérir sans pour autant être rassurées par ces artefacts qui leur restent étrangers. Ceci contribue en partie à l'« accélération » du temps présent analysée par Harmut Rosa. Troisièmement, l'angoisse contemporain est marqué par le rapport dépendance vis-à-vis de l'environnement biologique et cosmique de la Terre[21]. Daniel Cérézuelle (2011, p. 222) résume bien la divergence des rythmes techniques et sociaux.

> Ainsi, le changement rapide de l'infrastructure technique et économique rend inopérantes et disqualifie les ressources symboliques qui organisent la vie sociale. En effet, le rythme de la production sociale de cadres symboliques informels est nécessairement lent. Son unité de temps est au moins la génération, et il est douteux que cela puisse changer, comme en atteste l'échec des révolutions modernes à créer un « homme nouveau ».

Au début du XX^e^ siècle, l'aménagement des montagnes et l'éducation populaire à la nature ont montré combien la montagne était soumise à un désir de régulation des espaces naturels (cf. 4.3.4). Cette emprise de l'imaginaire technicien sur la nature est renforcée au cours du siècle par l'appréhension du monde sensible et psychique à travers le schème énergétique (cf. 5.3). L'équation énergie-civilisation justifie l'asservissement des cultures humaines où la disponibilité d'énergie par personne est moindre (cf. 5.3.1) et des espaces naturels au nom de l'optimisation de l'extraction des forces de la nature (cf. 5.3.2. Les espaces les plus reculés, au fond des cavernes souterraines autrefois peuplées de créatures mythologiques, sont artificialisés pour stocker des réserves d'énergie ou des déchets industriels (cf. 5.3.3). Plus fondamentalement sans doute, le schème énergétique ordonne les mondes cosmique et psychique. Comme le montre Gaston Bachelard, l'image du feu alimente une pensée de la puissance et du désir dans la tradition alchimique. Sa version contemporaine, l'énergie, devient un principe organisateur de l'« économie générale » du cosmos selon Georges Bataille et le stockage de l'énergie un principe explicatif de l'évolution biologique selon Lester Ward. Par sa simplicité et son aptitude à s'appliquer à des phénomènes forts divers, l'énergétique apparaît comme un puissant schème d'intelligibilité du monde contemporain. En faisant de l'homme contemporain un alchimiste, le régime technicien a réussi à encercler la « part maudite » de l'humanité dans un cycle ininterrompu de désirs réactivés par des plaisirs incomplets. Cette circularité désirs-plaisirs est animée par une dialectique entre les deux pans de la technologie, matérielle à travers un système d'objets, discursive à travers un réseau de mythes.

Alors que le schème énergétique est constitutif de la modernité depuis la fin du XIX^e^ siècle, l'imaginaire écologiste passe également par un schème de pensée profondément technicien. On a beaucoup souligné la lutte idéologique entre l'économie et l'écologie. François Ost défend l'idée d'une crise de la science économique parce qu'elle n'a pas su prendre en compte la dimension écologique de l'économie, la reléguant à un *environnement* sans importance. Ce qui me frappe pourtant, dans le texte qui suit, est la similitude des modes de raisonnement économique et écologique. À la manière d'Ost, les écologues calquent leurs raisonnements sur le modèle de régulation par flux et stocks, développé par les techniciens et technocrates des années 1930 pour gérer des parcs électriques couplant les temporalités des régimes hydrauliques et les cycles des prix d'approvisionnement en charbon (cf. 5.1).

21. La dépendance à la Terre, ou à une « planète originelle », est un thème récurrent de la science-fiction dans le genre *space opera* notamment. La récurrence du thème suggère une conscience collective relativement forte de la dépendance humaine à l'environnement biologique et cosmique de la Terre.

> La théorie économique classique [...] entre cependant en crise aujourd'hui, dès lors que le développement met désormais en cause non plus des équilibres locaux et ponctuels, mais les mécanismes régulateurs qui conditionnent la survie même de la planète. « Il ne s'agit pas seulement », écrit excellemment R. Passet, « d'accidents ou de dysfonctions, mais d'un conflit entre les logiques qui assurent respectivement le développement économique et la reproduction de la biosphère » [(Passet 1990, p. 86)]. Plusieurs indices illustrent ce conflit des logiques : alors que la nature maximise des stocks (la biomasse) à partir d'un flux (le rayonnement solaire), l'économie maximise des flux marchands en épuisant des stocks naturels, sans que la diminution de ceux-ci, non comptabilisée, n'exerce d'action correctrice sur les flux ; alors que les équilibres naturels s'établissent au cours d'une durée parfois très longue, la gestion économique, quant à elle, introduit la rupture de maximisations brèves (dont les effets sur la nature se feront sentir au cours des générations à venir) ; alors que les écosystèmes présentent une tendance naturelle à se diversifier, garantissant ainsi leur stabilité, la gestion humaine, qui favorise les variétés économiquement performantes, introduit l'uniformisation et l'instabilité. (Ost 1993, p. 29)

D'Émile Cardot (1907, p. 82) faisant des « forêts en croissance [...] de véritables caisses d'épargne » pour les jeunes générations d'écoliers français à François Ost (1993, p. 29) expliquant que « la nature maximise des stocks (la biomasse) à partir d'un flux (le rayonnement solaire) », le schème de pensée flux-stocks des techniciens et technocrates des années 1930 a conquis les imaginaires des écologistes au XX^e^ siècle et contraint leurs méthodes. Une telle philosophie unidimensionnelle est-elle suffisante pour représenter la terre habitée du temps présent ? Prenant conscience du réductionnisme encadré par le calcul et la modélisation probabiliste, l'écologie politique aura besoin de recycler ses imaginaires encerclés par l'idéal d'optimisation quantitative afin de renouveler les luttes sociales et environnementales du XXI^e^ siècle. Car, la psyché contemporaine est profondément aliénée par deux siècles d'industrialisation. En détournant la citation épigraphique de Karl Marx, l'« esprit qui construit les systèmes philosophiques dans les cerveaux » a désormais bien du mal, ne serait-ce qu'en imagination, à sortir du quadrillage ferroviaire, fût-il construit par les bras des ouvriers. Et si aujourd'hui le corps social désirait rejoindre Henry David Thoreau au lac de Walden, son expérience sensible de la vie dans les bois baignerait tout entière dans le milieu technicien. Après deux siècles de banalisation de la technique, « [ce] n'est pas nous qui roulons en chemin de fer ; c'est lui qui roule en nous ».

Chapitre 6

Mondes hydrogène : hériter, habiter ou hasarder le contemporain

> « L'eau est le charbon de l'avenir. »
> Jules Verne, *L'île mystérieuse*, 1875

> « l'homme écoute volontiers les professionnels de la *promesse* qui prétendent le conduire vers des continents futurs ».
> Jean Brun, *Les masques du désir*, 1981

Le chapitre 6 analyse, dans le cas de l'hydrogène, la capacité de la technique contemporaine à créer, à matérialiser et à déployer des mondes habitables dans les espaces imaginaires, sociaux et géographiques. La citation épigraphique de Jules Verne (extraite de Thomas 1988, p. 37) donne une première clé pour pénétrer dans les mondes hydrogène. « L'eau est le charbon de l'avenir », fait dire l'auteur de *L'île mystérieuse* à l'un de ses personnages, Cyrus Smith. Celui-ci est échoué en 1865 avec quatre autres héros du roman sur une île apparemment inhabitée. Une discussion contradictoire anime les cinq protagonistes (Verne 1875, p. 317-318). Smith, adepte des « pronostics », prédit « une progression constante [... au] mouvement industriel et commercial ». Son principal contradicteur, Gédéon Spilett, un reporter, s'inquiète « qu'un jour le charbon sera entièrement consommé », arrêtant ainsi « le progrès de la vie moderne ». Confiant, Smith réplique : « après les gisements d'Europe, que de nouvelles machines permettront bientôt d'exploiter plus à fond, les houillères d'Amérique et d'Australie fourniront longtemps encore à la consommation de l'industrie ». Son estimation est de l'ordre de 300 ans. Le marin Bonadventure Pencroff s'inquiète, malgré tout, pour les générations futures. C'est alors que Smith prophétise, avec des accents panthéistes, que la terre pourvoira à tous les besoins de l'humanité. Il place le salut de la consommation en deux gaz, l'oxygène et l'hydrogène, qui « décomposé[s] sans doute, par l'électricité [... seront] utilisés isolément ou simultanément » pour produire toujours plus de force, de chaleur et de lumière.

Par ces échanges sur l'avenir énergétique de l'humanité, l'œuvre littéraire relaye les débats de société sur le charbon dans l'Angleterre et la France de l'époque (cf. 3.1.2). Cet ancrage au contemporain est caractéristique de toute utopie, selon Pierre Macherey (2011, p. 10) : « tout en fuyant le réel auquel elle se rapporte de façon critique, en dénonçant ce qui lui manque, [l'utopie] reste on ne peut plus matériellement liée à son temps dont elle est une émanation objective et nécessaire ». Jules Verne brasse ainsi des thèmes classiques de l'époque

entre 1865, date supposée de l'intrigue, et 1875, date de publication de l'œuvre : anxiété de la pénurie de charbon, nouvelles méthodes géologiques d'exploration et d'exploitation des houillères, investigation des forces naturelles, essor des batteries et moteurs électriques. Ce n'est pas tant la mention de l'hydrogène qui surprend à 150 ans de distance – un coup de dés dans l'inventaire des possibles dont Verne est coutumier – que la permanence de deux traits caractéristiques du régime technicien : l'optimisme techniciste d'une part, l'invention de mondes habités par la technique d'autre part.

La première permanence est la confiance que les sociétés industrielles place dans la technique pour formuler des solutions aux problèmes de société. Ce conditionnement par le régime technicien est nommé aujourd'hui par un néologisme, le « solutionnisme technologique » (Morozov 2014). Il est notable, dans *L'île mystérieuse*, que le débat contradictoire cesse après que Smith tranche en faveur de l'hydrogène. La conviction de l'ingénieur est sans appel au sein de la petite communauté isolée sur l'île. L'autorité technicienne est caractéristique des sociétés industrielles. En régime technicien, la première réaction collective est un réflexe conditionné : pour résoudre un problème sociotechnique, introduisons encore plus de technique. Un tel réflexe court-circuite toute possibilité de réflexion. Or, il n'est jamais exclu que plus de technique engendre aussi plus de problèmes sociaux. À l'inverse, quels effets sociaux aurait une diminution du nombre et de la puissance des dispositifs techniques au sein des sociétés actuelles ? Une telle question est rarement posée. Elle conduit à prendre au sérieux la notion de « seuils de mutation » introduite par Ivan Illich dans *La Convivialité*. L'« *escalade* de la technique et de la bureaucratie » ne résout pas le mal-être social, mais l'accroît au contraire à partir d'un certain seuil de technique et de bureaucratie (Illich 1973, p. 24-25). Ces seuils ont été dépassés au cours du XX^e^ siècle selon Illich.

La deuxième permanence est l'auto-engendrement des mondes techniciens. Deux mécanismes littéraires sont à l'œuvre. D'abord, l'intrigue générale construit un monde confiné, à la fois confortable et précaire, à l'intérieur de *L'île mystérieuse*. Ce monde est confortable parce qu'il reprend « la posture bourgeoise de l'appropriation : pantoufles, pipe et coin du feu » et précaire parce que « dehors la tempête, c'est-à-dire l'infini, fait rage » dans un espace isolé (Barthes 1957, p. 87). Un milieu extérieur menaçant rend le confort intérieur désirable. Il y a là un ressort général de l'utopie, « la propriété de fonctionner tout seul, de manière autonome », précisément comme une île, en fait une presqu'île dans l'*Utopie* de Thomas More (Macherey 2011, p. 138). Pour Roland Barthes, *L'île mystérieuse* est l'« archétype de ce rêve [...] existentiel de l'enfance » par lequel Verne réduit le monde « à un espace connu et clos, que l'homme pourrait ensuite habiter confortablement ». Fait significatif, cet espace est placé sous l'autorité d'un ingénieur, c'est-à-dire sous le signe de la civilisation industrielle. Au sein de ce premier monde, isolé et confiné, les protagonistes, qualifiés de « colons » de l'île, dessinent, dans leurs discussions au coin du feu, un second monde spéculatif sur ce que pourrait être la société future. Cette mise en abîme est le second mécanisme d'auto-engendrement de mondes habités par la littérature. Si le premier monde, insulaire, est éloigné dans l'espace, le second monde, futuriste, est éloigné dans le temps. Mais, ces deux mondes engendrés par l'écriture de Jules Verne sont organisés par les valeurs de la civilisation industrielle : confort, consommation, croissance, modernité, mobilité, progrès, etc.

Le discours littéraire recouvre ici les incohérences de l'utopie vernienne. L'ingénieur Smith présente, sans vergogne, l'électricité et l'hydrogène comme deux sources d'énergie alors qu'elles sont – et un ingénieur de l'époque le sait bien – deux vecteurs d'énergie. Il recourt à un « mot-écran » pour faire « obstacle à l'usage de son contraire » (Bihr 2007, p. 225). Ceci dispense d'évoquer la source d'énergie pour la production d'hydrogène. Les pièges sémantiques ne sont pas l'apanage de la littérature utopique. Ils tissent aussi le discours politique. Dévoiler le « camouflage » sémantique ou interprétatif d'un projet techno-politique comme l'hydrogène est un

enjeu démocratique du temps présent. Dans *Les masques du désir*, Jean Brun mettait déjà en garde ses lecteurs il y a quarante ans : « l'homme écoute volontiers les professionnels de la *promesse* qui prétendent le conduire vers des continents futurs ».

Attentif à cet avertissement placé en épigraphe, le chapitre 6 débute par une réflexion technologique sur l'hydrogène. La partie 6.1 spécifie l'hydrogène vis-à-vis de champs plus larges : techniques contemporaines, domaine de l'énergie, formes de stockage. Elle inscrit l'hydrogène dans les mondes qu'il rend possibles et qui, en retour, le constituent en acteur de l'époque contemporaine. Depuis les années 1970, les sociétés industrielles se peuplent de *mondes hydrogène* et mettent en chantier certains d'entre eux pour des raisons politiques et industrielles. Elles recourent en priorité aux solutions préconisées par le régime technicien dans le cadre d'une économie de la promesse. Dans la division du travail de recherche qui en résulte, les humanités sont marginalisées. Seules les sciences sociales sont « convoquées » et, encore, de manière étroite, « essentiellement [...] sur la question du calcul des coûts de déploiement [économie], de la réglementation [droit], et de l'acceptabilité sociale des dispositifs [sociologie] » (Kroichvili et Simoncini 2022, p. 1). Comment réinterroger ces « mondes hydrogène » depuis les sciences humaines et sociales au sens large ?

Stefan Aykut, Aurélien Évrard et Sezin Topçu (2017) offrent une réflexion stimulante à partir d'une approche comparatiste de la « transition énergétique » du XXIe siècle. Ils qualifient la « transition énergétique » de « notion écran » parce qu'elle est trop vague dans des discours à géométrie variable ou, au contraire, trop spécifique par la téléologie qu'elle sous-tend : la succession d'« ères énergétiques » aboutit invariablement à une modernité des énergies renouvelables (Aykut et al. 2017, p. 7, 10). Pour sortir des lieux communs de la « transition énergétique », ils suggèrent trois perspectives aux sciences humaines et sociales : décrire l'importance des contextes et « l'influence de l'héritage institutionnel » ; décortiquer « la nature du processus et son contenu » ; déconstruire l'évidence de l'« impératif » de transition énergétique (Aykut et al. 2017, p. 11-13). Ces trois propositions rejoignent l'approche géographique de l'énergie à travers les « espaces énergétiques ». Gavin Bridge et Ludger Gailing (2020, p. 1038) définissent un « espace énergétique » comme la (re)composition de systèmes énergétiques et de relations sociales à travers l'espace. Ils les spécifient par trois ensembles de rapport au monde : des contextes mêlant l'ancien et le nouveau et pouvant conduire à des effets d'accumulation dans un espace donné ; des catégories d'espace – lieux, réseaux et échelles – comme autant de façons d'habiter les territoires ; un processus de fabrication de l'espace par lui-même qui place le territoire dans un devenir (Bridge et Gailing 2020, p. 1040-1043).

Ces approches historique et géographique de l'énergie conduisent à une cartographie des mondes hydrogène en construction au XXIe siècle selon trois perspectives. La section 6.2 aborde les héritages et les contextes en interrogeant la manière dont l'hydrogène est vu comme une solution unique à plusieurs problèmes des territoires riches, le stockage de l'énergie étant seulement l'un des problèmes. Ensuite, la section 6.3 explore certaines façons de bâtir et d'habiter les mondes hydrogène. Ceux-ci ont une aptitude à multiplier les rythmes temporels, à varier les échelles spatiales et à densifier les interconnexions entre systèmes. Enfin, la section 6.4 confronte les injonctions politiques en faveur de la « trajectoire hydrogène » et de la « transition énergétique » aux hésitations du temps présent. Quelle place donner aux suspensions, dissensions et bifurcations dans la construction des mondes hydrogène de demain ? Quelles que soient les réponses, l'histoire d'un devenir démocratique me semble devoir passer par des choix de société (y compris des erreurs collectives) plutôt que par des décrets administratifs. En somme, pour faire société avec (ou sans) l'hydrogène demain, il faut hasarder le contemporain dès aujourd'hui.

6.1 Spécificités de l'hydrogène à l'époque contemporaine

Comme une pile ou une batterie (rechargeable), la pile à combustible est un convertisseur énergétique de type électro-chimique. Elle génère une puissance électrique à partir d'une énergie chimique emmagasinée dans la matière. Alors que piles et batteries incorporent la matière chimique dans leur « la boîte noire », la pile à combustible se nourrit en permanence de combustibles venant de l'extérieur à l'état gazeux. Une réaction chimique d'oxydo-réduction fait réagir les deux combustibles, l'un oxydant, l'oxygène en général parce qu'il est disponible dans l'air, et l'autre réducteur, qui est l'hydrogène ou un hydrocarbure (méthane par exemple). Les sous-produits de cette réaction sont de l'eau et des électrons en mouvement, c'est-à-dire du courant électrique.

6.1.1 La pile à combustible fait de sacrées histoires et des sacs de nœuds

En introduction d'un ouvrage collectif intitulé *L'Énergie et ses usages domestiques. Anthropologie d'une transition en cours*, Nathalie Ortar et Hélène Subrémon (2016, p. 12) soulignaient que l'énergie, par ses multiples étapes – production, distribution, consommation et (j'ajouterais) stockage – est « un objet social par excellence aux multiples biographies ». L'énergie en tant qu'objet social fait des histoires. Elle suscite des intrigues et tisse des récits. En somme, l'énergie réclame des biographies. Sensiblement à la même époque, et sans connaître leur travail, j'allai dans le même sens par une voie plus spécifique, la biographie des piles à combustible. Dans le cadre d'un projet collectif (2012-2016), dont l'ouvrage final s'intitule *Research Objects in their Technological Setting* (2017), les philosophes porteurs du projet, Bernadette Bensaude-Vincent, Sacha Loeve, Alfred Nordmann et Astrid Schwarz, orientaient notre collectif de recherche vers le genre biographique appliqué à des objets technoscientifiques.

Mon chapitre, intitulé « De la naissance des piles à combustible à l'utopie du monde hydrogène », racontait l'itinéraire de la pile à combustible depuis la genèse du mot « hydrogène » par Antoine Laurent Lavoisier à la fin du XVIII^e^ siècle jusqu'aux discours politiques des années 2000 annonçant, de manière souvent messianique, la venue d'une « économie de l'hydrogène » au début du troisième millénaire de l'ère chrétienne (Teissier 2017a, p. 70-72). Encouragé par les éditeurs, je mélangeais les genres discursifs de l'épistémologie historique et du récit religieux de la genèse de *L'Ancien Testament*. La pile à combustible se retrouvait personnifiée par une créature récalcitrante, tournant le dos aux travaux qu'on lui imposait et finalement abandonnée par un créateur introuvable. Le septième jour de la genèse n'était plus synonyme de repos comme dans la parabole judéo-chrétienne car la société industrielle assujettissait encore la pile-créature pour bâtir sur Terre une utopie hydrogène à l'horizon des années 2020. Ce récit parodique encrait l'une des multiples vies possibles de la pile à combustible hydrogène entre les modes d'existence savant et sacré. Il ancrait cet être social dans deux permanences sur le temps long (1780-2010) : une réticence à être fonctionnalisée (récalcitrance) ; un désir indéfiniment renouvelé de mise en relation (inter-connectivité et inter-dépendance).

On peut se demander, à partir du cas de la pile à combustible, si la récalcitrance n'est pas justement ce qui spécifie l'objet même de la recherche et développement (R&D). Car si l'objet est docile et ductile, nul effort, nulle ingéniosité ne serait nécessaire pour l'intégrer à la société préexistante. Il y aurait sans doute un degré de récalcitrance à estimer de manière quantitative (indicateurs d'efforts) et qualitative (nature des efforts). Dans le cas de la pile à combustible, le degré de récalcitrance semble particulièrement élevé puisque 130 ans de R&D séparent l'incarnation de l'artefact « batterie gazeuse de Grove » (1842) de la première application commerciale de niche dans le programme spatial Apollo (1969). Le travail interdisciplinaire de l'équipe de recherche conduite par l'obstiné Francis Thomas Bacon à l'université de Cambridge produit un artefact fonctionnel après 14 ans d'efforts soutenus et de financements industriels (1942-1956) (Eisler 2009,

p. 362). Mais, ce n'est qu'une étape pour socialiser la pile à combustible au xx^{e} siècle. Les efforts de R&D ne sont pas terminés pour autant. Ils sont bien analysés dans le cas de la France par Nicolas Simoncini (2018). Sa thèse de doctorat, intitulée *Histoire de la recherche sur les piles à combustible en France des années soixante aux années quatre-vingt*, montre l'intensité et l'ingéniosité du travail conjoint d'universitaires, d'industriels et de militaires grâce à l'important financement des États contemporains les plus riches. Au début des années 1980, après trois décennies de travail, l'institution centrale dans la politique française des piles à combustible, la Délégation générale à la recherche scientifique et technique (DGRST), juge néanmoins les résultats obtenus « très insuffisants » et les perspectives futures « peu encourageantes » (Simoncini 2018, p. 312). Il y a bien une récalcitrance propre à la pile à combustible. La contrepartie est qu'elle est dotée de toutes les vertus. L'un des membres de l'équipe de Bacon, l'électrochimiste R. G. H. Watson, la qualifie de « pierre philosophale » (cité par Eisler 2009, p. 357). Il souligne ainsi les multiples aptitudes d'une pile à combustible : souple et endurante, réversible (génératrice d'électricité ou motrice), multi-combustible (hydrogène ou hydrocarbures), multi-usage (stationnaire ou mobile), multi-fonction (également productrice d'eau et de chaleur). Matthew Eisler (2009, p. 363-364) reprend ainsi la métaphore de la « pierre philosophale » pour interpréter le statut de « convertisseur universel d'énergie » octroyé à la pile à combustible au cours du xx^{e} siècle. Il approfondit sa réflexion en montrant que l'hydrogène suscite dans le milieu technicien des années 1970 un « futurisme [...] défini par un positivisme technoscientifique élevé imprégné de tonalités quasi-mystiques » (Eisler 2012, p. 99). En effet, sa flexibilité d'interprétation et sa multiplicité d'usage font de l'hydrogène un *couteau suisse de l'énergie*. La tension entre les espoirs que l'hydrogène incarne et les récalcitrances que la pile à combustible exprime sécrète une sorte de ferveur sacrée pour les mondes hydrogène à partir des années 1970, dans les sociétés industrielles nord-américaines et ouest-européennes.

Qu'en est-il de la deuxième permanence, ce désir inassouvi de la pile pour les relations socio-techniques ? Pour la théorie de l'acteur-réseau, la mise en relation est le principe même de l'enrôlement des « collectifs hybrides » humains et non-humains définissant la paire culture-nature (Sayes 2014, p. 140). Ce mécanisme général gomme les écarts phénoménologiques entre techniques. Or, les techniques n'ont pas toutes les mêmes potentiels en situation sociale (cf. 1.2.2). La pile à combustible développe un désir quasi-obsessionnel d'inter-dépendance et d'inter-connexion. C'est le cas des convertisseurs énergétiques en général. Ainsi, la métaphore du « sac de nœuds » forgée avec Anaël Marrec (2019, p. 330-332) pour caractériser les convertisseurs s'applique aux piles à combustible. Elle s'applique à un second type de convertisseur convoqué aujourd'hui pour matérialiser l'économie de l'hydrogène : l'électrolyseur. Ce nœud du système sociotechnique permet de fabriquer de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Le procédé sépare les molécules d'eau en molécules d'oxygène et d'hydrogène par l'énergie électrique. Les machines commercialisées ont des puissances allant de 20 MW à 100 MW [1].

Dans le cas de la pile à combustible et de l'électrolyseur, la métaphore du sac de nœud fonctionne à trois niveaux. Premièrement, elle assimile un convertisseur énergétique à un nœud du territoire où se croisent plusieurs facteurs techno-politiques, d'ordre énergétique certes mais également culturel, économique et social. Le « nœud » est une autre façon de dire, avec Veyne (1971, p. 53) qu'« il n'existe pas de fait historique élémentaire, d'atome événementiel ». Deuxièmement, à travers l'action de faire ou défaire un nœud, la métaphore suggère la difficulté de faire ou défaire un projet énergétique et, plus encore, un réseau énergétique, qui articule un nombre croissant de nœuds énergétiques à mesure qu'il se déploie sur le territoire (ou que le « sac » se remplit). La multiplication des nœuds rend compte du verrouillage de situations qui agrègent, en plus des dispositifs énergétiques, des éléments culturels, économiques, politiques et sociaux (Marrec et Teissier 2020, p. 248).

1. Informations issues du site internet de la région Franche Comté : https://www.invest-in-nord-franche-comte.fr/fr/newsletter-adn-fc/mcphy-bienvenue-nord-franche-comte/

Beaucoup mieux que l'image courante de la « trajectoire » suggérant un mouvement, la métaphore du « sac de nœud » suggère l'ancrage des héritages, la lenteur des changements de société et la « dépendance au sentier » du processus. Troisièmement, la figure informe du « sac » rappelle que l'histoire en général et l'histoire des énergies en particulier se prête difficilement à des généralisations. Le monde social ne peut être collecté que de manière discontinue et agencé par fragments de société. Ces éclats opaques du réel ne sont jamais donnés mais toujours mêlés à l'interprétation. Réinterpréter une situation historique revient à ensacher différemment les nœuds sociaux.

Ainsi, la métaphore du « sac de nœuds » attire l'attention sur les formes et les degrés de mise en relation entre les existants vivants et artificiels. Elle montre l'une des limites de la théorie de l'acteur-réseau. Celle-ci, par son ambition globalisante, fait de la notion d'hybride une forme universelle de mise en relation entre acteurs humains et non-humains, c'est-à-dire entre *actants*. Ce faisant, elle lisse non seulement les différences entre humains et non-humains mais également, au sein des catégories, des humains entre eux et des choses entre elles. Or, la différenciation phénoménologique est essentielle dans le cas de l'hydrogène. Pour en rendre compte, revenons au concept de « modes d'existence » développé par Étienne Souriau (1943) et appliquons-le pour esquisser une cartographie existentielle de l'hydrogène à l'époque contemporaine.

6.1.2 Variations sur les modes d'existence de l'hydrogène, 1780-2020

Des ingénieurs et techniciens ont fait de l'hydrogène un « couteau suisse de l'énergie » au milieu du XX^e^ siècle. Qualifier la pile à combustible de « pierre philosophale » moderne revient à dire qu'elle « signifiait beaucoup de choses pour beaucoup de monde » (Eisler 2009, p. 363-365). L'interprétation de Eisler à partir du cas de l'équipe de recherche de Francis Bacon à Cambridge vers 1950 peut être élargie à d'autres situations. Ceci montre que les milieux techniciens et technocratiques flattent les espoirs sociétés en fabriquant des discours de promesses de manière plus ou moins intéressée et plus ou moins consciente. C'est ce que soulignait ma biographie parodique de la pile à combustible entre les modes d'existence savant et sacré. Je poursuis ici la caractérisation de la technique contemporaine en appliquant le concept de modes d'existence de Souriau à plusieurs situations historiques impliquant l'hydrogène.

L'hydrogène ne cesse de se réinventer depuis deux siècles en diversifiant ses modes d'existence dans les sociétés industrielles. Trois publications récentes de sciences humaines et sociales sur le sujet (Eisler 2012 ; Teissier 2017a ; Simoncini 2018) m'ont permis d'identifier, de manière rapide et non exhaustive, 13 situations impliquant l'hydrogène de son baptême par Lavoisier comme générateur d'eau à la politique industrielle de l'hydrogène du Territoire de Belfort au début du XXI^e^ siècle. Ces cas sont disposés dans l'ordre chronologique, de haut en bas, sur la figure 6.1. Chaque situation est décomposée en modes d'existence. Souriau (1943) traitait cinq modes d'être au monde, comme phénomène, chose, âme, fiction et dieu. Il en évoquait trois autres : la morale (bien et mal), l'esthétique (beau et laid) et l'épistémologie (vrai et faux). Sa typologie était influencée par sa spécialité d'étude de l'art. Elle a été enrichie par Latour (2011, p. 330) vers la technologie, à travers quatre modes d'existence supplémentaires : technique, économie, droit, politique. J'ajoute un dernier mode, la « fonction », car il est essentiel pour le stockage d'énergie. Ces 14 modes d'existence entrent dans trois registres d'interprétation : un rapport à l'empirique ou phénoménologie (phénomène, chose, âme, fiction), indiqué par les cases jaunes sur la figure 6.1 ; un rapport aux valeurs ou axiologie (morale, esthétique, épistémique), les cases rouges ; un rapport aux relations ou politique (droit, économique, politique, fonctionnel), les cases bleues. Certains modes d'existence hésitent entre deux registres : le divin entre phénoménologie et axiologie, le technique entre axiologie et politique.

FIGURE 6.1 – Différents modes d'existence de l'hydrogène, 1780-2020

	Modes d'existence												
Situations historiques	**phénomène**	**chose**	**âme**	**fiction**	**dieu**	**morale**	**esthétique**	**épistémique**	**technique**	**droit**	**économie**	**politique**	**fonctions**
1. Lavoisier, hydrogène, Académie, 1787	réaction chimique	corps matériels	réversible		trans-substantiation		comptabilité	conservation des masses	synthèse		aérostation		genèse de corps
2. Schönbein, Matteucci, Académie, 1838	sens des courants	bricole instable	subtile	artifice ou artefact ?	ordre de la nature		conversion des forces naturelles	expérience cruciale	métrologie				détection phénomène
3. Grove, Royal Institution, 1842		batterie gazeuse	animée (respiration)		savant démiurge		portrait	électro-chimie	mise en série de tubes				oscillations réversibles
4. Swan, Swan Electric Light,1882	rétention	batterie gazeuse	modeste	fiction économique	forme idéalisée du stockage			objet-modèle	effet cumulatif		métaux rares		énergie en magasin
5. Mond, Langer, UK industrie chimique, 1889		boîte noire trouée	récalcitrante (fuites)	désirs économiques	capitalisme				mise en boîte partielle		brevets, prototypes		promesses industrielles
6. Europe, USA, 1920-1935	pression différentielle	aéronef	légère		montée au ciel	risques (flammes)	lenteur et grâce	mécanique	ballons gonflés	diplomatie	aérostation	compétition internationale	suspension aérienne
7. URSS, USA, conquête spatiale, post-1945	combustion hydrogène	astronef	brûlante	coloniser l'espace	défi au ciel	inter-stellaire	démesure	techno-sciences	vitesse et puissance	diplomatie	militaro-industriel	compétition internationale	propulsion aérienne
8. Bacon, ERA, 1946-1959	cycles réguliers	pile à combustible	domestiquée	potentialités économiques		patience	plans d'une machine	inter-disciplinarité	standards : I, W, temps		R & D	stratégie industrielle	génération d'électricité
9. NASA, 1961-1975	stocks d'électricité	astronef habité	docile	utopie inter-stellaire	extra-terrestre	pollution de l'espace	plans d'une usine	techno-sciences	asservie	licences commer-ciales	militaro-industriel	compétition internatio-nale	stockage embarqué
10. économie de l'hydrogène, ca. 1970	conversion électro-chimie	pile à hydrogène	exponentielle	utopie terrestre	créateurs de mondes	réduction pollution	couplage de systèmes	optimisation (flux-stocks)	infrastruc-tures distribution	régime énergétique	transport, chaleur, élec.	politique fédérale	multi-fonctions
11. crises énergétiques, 1973-1986	conversion électro-chimie	voiture hydrogène	errante	promesses de renouve-lables	agnosti-cisme pétrolier	limiter ou accumuler ?		haute technologie		diplomatie de l'énergie	nucléaire	politique de la ville	stocks et traction embarqués
12. Union européenne, 1992-2022	flux d'énergies	objets connectés	continentale	promesses écologiques	religion du marché	réduction gaz carbonique	strates de réseaux	optimisa-tion (intégra-tion)	macro-systèmes techniques	standards de gestion	protection, compétition	continentale et régionale	mélange énergétique
13. Belfort-Montbéliard, Depuis 2000	stocks d'énergies	objets connectés	habitée	substitution, localisation ?	croissance	réduction gaz carbonique	nœuds de connexions	R& D systèmes	méso-réseaux		symbiose et district industriels	échelles de pouvoir	voisinage énergétique

La figure 6.1 décompose 13 situations historiques de l'hydrogène selon 14 modes d'existence et 3 registres d'interprétation. Comment peut-elle être lue ? La figure teste, de manière concrète, la valeur heuristique du concept de modes d'existence sur le cas de l'hydrogène. Le premier acquis est la mise en évidence, conformément à la conception de Souriau, d'une pluralité des modes d'existence d'un être comme l'hydrogène. Cette pluralité correspond, pour chacune des situations historiques, au remplissage des cases d'une ligne. Or, les cases vides, qui révèlent l'absence d'un mode d'existence donné, sont plutôt rares. Les cases écrites indiquent un mode d'existence effectif tandis que les cases colorées suggèrent un mode majeur d'existence de l'hydrogène caractérisant la situation historique. Ainsi, une lecture de la situation n° 8 permet de décrypter les enjeux du programme interdisciplinaire de Francis Bacon financé par la Electric Research Association (ERA) pour développer un générateur d'électricité : régularisation des cycles d'opération de la pile à combustible, réalisation et figuration d'une machine, standardisation des fonctionnalités de sortie (intensité, puissance, durée).

Mais, une lecture verticale de la figure 6.1 est également nécessaire. Elle permet de replacer le projet de Bacon par rapport à des situations connexes (non forcément contiguës en termes de ligne). Ainsi, la pile de Bacon ne devient une usine génératrice (situation n° 9) que dans le contexte de démesure technoscientifique de la guerre froide : surenchères de la conquête spatiale et de l'expansion des complexes militaro-industriels des empires états-unien et soviétique (situation n° 7), logiques de coopération entre les États alliés du Royaume-Uni et des États-Unis dans un cadre juridique de licences économiques d'exploitation d'un brevet d'invention (situation n° 9). Ces lectures verticales traduisent de ce que Souriau (1943, p. 145) appelait des « modulations d'existence » d'un être au cours du temps, plus significatifs pour lui que la composition statique des modes d'existence. C'est pour rendre compte de ces transformations de modes d'existence que j'ai colorié des cases correspondant aux modes les plus caractéristiques d'une situation. C'est un deuxième acquis de ce test empirique du concept de Souriau : (re)construire le processus historique de manière non-linéaire et ouverte. En effet, la figure 6.1 permet de relier les enjeux du stockage de l'hydrogène à d'autres sphères d'activité humaine. L'approche par les modes d'existence est une manière de décloisonner l'histoire de l'énergie, au même titre que la métaphore du sac de nœuds. Elle participe de ce qui a été labellisé, par mimétisme avec d'autres champs historiques, l'« histoire désorientée de l'énergie » avant que cette histoire-là ne soit écrite (Fressoz 2013).

Pour finir, essayons de répondre à la question de l'utilité de la figure 6.1. Premièrement, il y a un intérêt historiographique. La figure permet de relier chaque situation à une pluralité de sphères d'activité humaine de manière synchrone le long d'une ligne et de manière évolutive le long d'une colonne. Elle affiche un degré d'interprétation en coloriant les modes les plus caractéristiques de la situation : jaune pour le registre phénoménologique, rouge pour le registre axiologique, bleu pour le registre politique. Comme aux échecs, circuler entre les lignes, colonnes, diagonales et couleurs peut provoquer une désorientation stimulante par rapport aux récits trop entendus. Comme à la marelle, la répétition de certains mots tels « promesses » invite à des sauts acrobatiques à travers le temps et les thèmes. Cette approche figurative prend ses distances vis-à-vis d'une conception trop académique de l'histoire lorsqu'elle jette des ponts entre fiction et morale de la technique en parodiant les dieux de la modernité (Teissier 2017a). Plus prosaïquement également, la figure 6.1 s'efforce de contenir la multiplication des modes d'existence de l'hydrogène au sein d'un même ensemble. Elle suggère la structuration progressive de plusieurs filières industrielles et commerciales de l'hydrogène depuis le début du xx^{e} siècle : réactifs gazeux pour les laboratoires de chimie en recherche et en industrie, fluides légers porteurs pour les dirigeables à partir des années 1920 (situation n° 6), combustibles de propulsion pour les fusées spatiales à partir des années 1940 (situation n° 7), combustibles de génération électrique à partir des années 1950 (situations n° 8 et 9), etc.

Le deuxième intérêt est d'ordre technologique. La figure 6.1 offre une typologie complétant les cartographies du stockage de l'énergie du chapitre 2. Elle rappelle que l'hydrogène stocke et déstocke l'énergie par conversion électro-chimique, l'un des modes de stockage parmi d'autres (cf. figure 2.6). Cette forme chimique de stockage ne commence pas avec la mission Apollo de la NASA (cf. figure 2.7), mais se construit par étapes depuis la mise en évidence des « courants secondaires » par Christian F. Schönbein et Carlo Matteucci à la fin des années 1830 (situation n° 2). De curiosité métaphysique et artifice expérimental, la pile à combustible devient un artefact (situation n° 3), un objet-modèle pour la conversion des forces de la nature et pour la rétention d'énergie (situation n° 4) avant de susciter des espoirs économiques (situation n° 5). Cette séquence permet de distinguer deux phénoménologies du stockage d'énergie : comme effet d'accumulation (de puissance) d'une part, qui renvoie aux pratiques d'électricité statique du XVIII^e^ siècle couplant machines à frotter et bouteilles de Leyde (cf. 2.3.2) ; comme effet de rétention (d'énergie) d'autre part, qui s'incarne dans les différents types de générateurs électro-chimiques du XIX^e^ siècle : piles de Volta, batteries rechargeables, piles gazeuses de Grove, etc. La coexistence des deux phénomènes dans une pile à combustible rend possible, pour l'hydrogène, la réalisation des quatre fonctions du stockage d'énergie (cf. figure 2.8) : traction mécanique des véhicules hydrogène (situation n° 12), accumulation d'hydrogène dans des réservoirs (situation n° 13), génération d'électricité pour la navette Apollo (situation n° 9), régulation des parcs électriques soumis aux énergies renouvelables (situation n° 11).

En résumé, la multiplication des modes d'existence de l'hydrogène et la diversification de ses fonctions structurent et étendent des filières industrielles et commerciales. La pile à combustible quant à elle a une aptitude à connecter certains de ces modes industriels et de ces fonctions sociales au sein d'un réseau de nœuds sociotechniques. L'hydrogène peut ainsi être qualifié de *système de systèmes*.

6.1.3 Pile à hydrogène, nœud d'un système de systèmes

La « systématisation » est une tendance lourde la modernité technicienne. Elle revêt, pour Thomas Hughes (1989), la forme de « macro-systèmes techniques » et provoque, pour Georges Balandier (2004, p. 168), une « généralisation » des mondes contemporains. Alain Gras (1997, p. 30) a montré que les nouveaux macro-systèmes techniques se construisent en se greffant sur les systèmes préexistants. Ainsi, le système frigorifique peut être qualifié de « secondaire » parce qu'il est bâti sur deux systèmes « primaires » – le parc électrique et le réseau ferroviaire – qui le précèdent (cf. 5.2.2). Cette systématisation du monde est accentuée au temps présent par le développement des technologies de l'information et de la communication (Ellul 1977).

Couplages sociotechniques : strates, rivages et nébuleuses

Si la systématisation des sociétés contemporaines étend la présence du régime technicien de manière capillaire, il ne le rend pas homogène pour autant. Avec le déploiement du numérique, l'usage fréquent de l'expression interopérabilité des systèmes porte à confusion. En effet, lorsque des milieux sont hétérogènes par construction, les échanges entre eux ne sont pas fluides. Ils doivent traverser des interfaces hétérogènes entre les différents systèmes sociotechniques. Ces interfaces, ou « rivages techniques », forment simultanément des zones d'échanges de flux et des zones d'arrêt où s'entreposent des stocks (Clecio Mocellin et Teissier 2020a, p. 6). Reprenons l'exemple du système frigorifique (cf. 5.2.2). Un port de pêche industriel est un nœud de conversion de produits organiques (du poisson frais au congelé et conditionné), d'informations numériques (quantités de marchandises entrées dans le port et sorties vers l'hinterland) et de valeurs commerciales (travail, intérêts). Mais ce rivage interrompt aussi, ralentit, régule ou stocke des flux mécaniques (containers de pêches), des flux

humains (pêcheurs, dockers), des flux financiers (investissements, ventes), des flux législatifs (droits du travail de part et d'autre du quai). Il empile plusieurs systèmes sociotechniques sur un même espace géographique.

La multiplication des systèmes sociotechniques et leur couplage façonnent un ensemble complexe de nœuds équilibrant des flux et des stocks, homogènes et hétérogènes, organisé et administré par des facteurs économiques et politiques. La conversion des flux en stocks et des stocks en flux à la traversée des rivages techniques permet de coupler les systèmes en réduisant les frictions sociales et économiques. Elle assure ainsi une interopérabilité partielle de l'ensemble sociotechnique. Le rivage technique matérialise cette agrégation-intégration d'ensembles sociotechniques hétérogènes. À cette intégration verticale correspond une extension horizontale à travers les territoires. L'interconnexion régionale, nationale puis européenne du réseau électrique dans la première moitié du XX^e^ siècle en est un exemple important (cf. 5.1.1). Fernand Braudel (1985, p. 115-117) caractérise le capitalisme marchand de l'époque moderne par sa maîtrise des chaînes commerciales longues sur des espaces aussi étendus que ceux de la première mondialisation. Cette proposition peut être complétée dans le cas de la mondialisation contemporaine en ajoutant que le capitalisme industriel se caractérise par une maîtrise supplémentaire du couplage entre systèmes sociotechniques et de l'empilement stratifié des rivages techniques avec le soutien des États-nations les plus puissants (Clecio Mocellin et Teissier 2020a, p. 12-13). Tout ensemble sociotechnique couplant des systèmes hétérogènes, stratifié verticalement et étendu horizontalement, constitue ce que j'appellerai un *système de systèmes*. La multiplication des couplages de systèmes sociotechniques me semble caractéristique du capitalisme mondialisé du temps présent.

L'hydrogène et l'agrégation de ses différentes filières industrielles et commerciales forment un système de systèmes fascinant et complexe. D'une part, l'hydrogène est un vecteur d'énergie et, à ce titre, convertit des flux d'énergie et les stocke sous formes hétérogènes. D'autre part, la pile à combustible est un « système multiphysique » dans le jargon de la recherche (Auvity 2022, p. 2 ; Hissel 2022, p. 4). Elle assemble des sous-systèmes, dont l'étude est spécifique : chimie du solide et des matériaux pour les catalyseurs et les réactifs ; électrochimie pour les électrodes et les électrolytes ; énergétique pour les échanges de chaleur des cellules ; génie électrique pour les échanges électriques en fonctionnement ; ingénierie système pour les performances d'usage, etc. Cet objet-valise « a la propension à connecter des choses ensemble : énergies, forces, fluides, réactifs, électrons » (Teissier 2017a, p. 83). Mais, ce n'est qu'un premier niveau de système. L'objet-pile à combustible est intégré à des niveaux supérieurs de système. Il est assemblé à d'autres éléments fonctionnels pour donner un produit commercial (ou de démonstration) comme une voiture hydrogène. Le produit commercial est à son tour intégré à un système de production et de distribution de l'hydrogène : une borne de rechargement standardisé couplée à un dispositif de synthèse d'hydrogène. L'échelle de déploiement peut être celle du territoire régional. On aboutit ainsi à un système-réseau de production, stockage, distribution et consommation d'hydrogène. Cellules, piles, produits, réseaux, cette succession d'artefacts ordonne une superposition de quatre strates systémiques en interaction. Au final, elle forme des « macro-systèmes intégrés et complexes [avec] différentes couches d'interopérabilité, d'une prise ou d'une connexion sans fil à des procédés et des procédures participant à la distribution des transactions financières. » (Institute of Electrical and Electronics Engineers 2015, p. 44) La capacité d'interdépendance de l'hydrogène et la capacité d'interconnexion de la pile à combustible peuvent ainsi potentiellement coupler de multiples rivages sociotechniques.

La R&D des piles à combustible émerge durant les années 1950 en France à l'intersection de trois séries causales : intensification des politiques publiques dans le domaine scientifique ; convergence des milieux académique, militaire et industriel ; renforcement des technosciences (Simoncini 2018, p. 323). Ces trois tendances peuvent être saisies à travers la constitution d'une « triple hélice université-industrie-gouvernement »

alors que les États riches intensifient leurs politiques technoscientifiques en direction de l'industrie durant la deuxième moitié du xx^{e} siècle (Etzkowitz et Leydesdorff 1997). L'une des incarnations françaises de la triple-hélice de l'hydrogène est représentée sur la période 1960-1980 par les deux laboratoires de Maurice Bonnemay dédiés aux piles à combustible, respectivement au Conservatoire national des arts et métiers (CNAM) et au Centre national de la recherche scientifique (CNRS) (Teissier 2015). Mais, l'intérêt pour les piles à combustible s'appuie également sur la mémoire européenne d'une expérience traumatisante de pénurie de pétrole durant la Deuxième Guerre mondiale. Axel Villareal explique cette structuration du champ d'expérience dans sa thèse de science politique intitulée *L'industrie automobile à l'épreuve des voitures électriques. Entre changement et continuité*. « La période de 1940-1945 en France [reste ...] emblématique dans l'histoire des motorisations électriques : pour la première fois depuis son apparition, ce mode de propulsion oublié des ingénieurs [devient] une alternative crédible au véhicule thermique, ouvrant la porte à des développements plus poussés dans le courant des années 1960. » (Villareal 2014, p. 82). Ces quatre séries causales endogènes – triple hélice et pénurie – auraient pu s'ignorer et rester des nébuleuses distinctes sans un puissant facteur exogène de convergence : les financements et les promesses de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) dans la compétition internationale opposant les États-Unis et l'Union soviétique dans la course à l'espace. Cet effet d'aubaine fait cristalliser les recherches sur les piles à combustible dans les pays occidentaux (M. L. Perry et Fuller 2002, S60). C'est un cas parmi d'autres d'« hégémonie états-unienne » typique de la guerre froide : les choix de l'administration fédérale orientent et structurent, par un effet de masse critique, de force symbolique et de diplomatie scientifique, les recherches jugées stratégiques pour le camp occidental (Krige 2006).

La R&D des piles à combustible sur la période 1950-1980 est similaire au cas des voitures à batteries électriques au tournant du xx^{e} siècle. Toutes deux relèvent du stockage de l'énergie et des technosciences. Leur essor suit le même schéma de convergence et d'agrégation d'institutions, de pratiques et d'imaginaires, *a priori* distincts et hétérogènes. Les appellations ne manquent pas pour qualifier ces objets-frontières : « objet infirme » (Nicolon 1976, p. 48), « objet-valise » (Patrice Flichy), « chimère » (Anne-Françoise Garçon), « être de fiction » (Étienne Souriau). Leur matérialisation nécessite l'interaction soutenue de plusieurs nébuleuses technologiques : États interventionnistes, sciences appliquées, industries automobiles, militaires et spatiales, mémoire collective de la pénurie, promesses de mondes désirables, etc. Ces mécanismes de convergence de sphères d'intérêts et de pratiques font émerger de nouvelles filières sociotechniques. Ils caractérisent les technosciences contemporaines comme matérialisation de *chimères* ayant une fonction en société. Dans le cadre contraignant d'un projet R&D – commande d'une pile à combustible ayant des caractéristiques données pour des systèmes mobiles ou stationnaires – l'hybridation d'imaginaires, de symboles, d'outils et d'organisations, issus de milieux professionnels distincts, génère une forme collective de créativité.

Cette création par hybridation sous contrainte produit par exemple la pile à hydrogène Pratt & Whitney de 1,5 kW destinée aux navettes spatiales de la NASA. Cette mini-centrale électrique doit fournir l'énergie aux missions Apollo durant leurs séjours extraterrestres entre la Terre et la Lune (Warshay et Prokopius 1989, p. 3). Rendre vivante cette chimère nécessitât une décennie d'effort et 100 millions de dollars de budget fédéral états-unien pour faire travailler ensemble 10 000 professionnels et des centaines d'entreprises contractantes sous le commandement unifié de la NASA afin d'opérer, dimensionner et régulariser la centrale électrique embarquée (Teissier 2017a, p. 80). Un effort colossal fut nécessaire pour surmonter ses récalcitrances et faire de la pile à hydrogène une machine sur-adaptée à un environnement hostile, l'espace interstellaire. Sa sur-adaptation à un milieu spécifique fit d'elle un objet « hypertélique » dans la terminologie de Gilbert Simondon (1958, §2). Durant les 10 jours de mission vers la Lune et retour sur Terre en 1969, les trois piles à hydrogène Pratt &

Whitney ont fourni environ 400 kW.h d'énergie à la navette. Elles ont matérialisé un premier *monde hydrogène* d'une manière aussi fragile et éphémère que l'habitacle d'une fusée durant un vol dans l'espace intersidéral. Ce monde hydrogène extraterrestre ouvre la voie à d'autres possibilités sur Terre.

Le succès de la mission Apollo, en transformant les piles à hydrogène en usines fiables et régulés, affranchit les imaginaires techniciens. Il convainc des ingénieurs et technocrates de la possibilité de rendre opératoires pour l'hydrogène les quatre fonctions du stockage de l'énergie : traction, accumulation, génération et régulation. Là encore, l'espoir outrepasse la réalité car la pile à combustible de la mission Apollo est une application stationnaire de l'hydrogène. La NASA s'est bien gardée de construire un véhicule hydrogène pour explorer la Lune : le *buggy* lunaire (Lunar Roving Vehicle) est tracté par des batteries non rechargeables (zinc-argent). Peu importe : la conquête spatiale et sa fièvre de démesure font rêver certains administrateurs à une colonisation de la Terre par l'économie de l'hydrogène également dans la version mobile des piles à combustible. Un premier monde hydrogène est ainsi engendré au tournant des années 1970 par l'agrégation de plusieurs modes d'existence de l'hydrogène répondant à des promesses économiques, écologiques et géopolitiques (situation n° 10). Déclinaison de l'utopie extra-terrestre de la conquête de l'espace (situations n° 7 et 9), l'économie de l'hydrogène répond à un désir d'optimisation et d'organisation. Il s'agit de coupler les réseaux de transport, de chaleur et d'électricité conformément à l'imaginaire régulé des flux et des stocks (cf. 5.1). En termes techniques, le monde hydrogène se forme par agrégation et matérialisation de plusieurs modes d'existence de l'hydrogène. En termes sociaux, le monde hydrogène se forme par formalisation d'un récit commun, par ancrage d'une utopie. En termes sociotechniques, le monde hydrogène fait sens, fonction et désir d'objets hétérogènes. D'abord encré comme un défi au régime technicien de la régulation et une conquête politique de la guerre froide, le monde hydrogène extraterrestre s'ancre sur Terre avec les crises énergétiques de la période 1973-1986 (situation n° 11). Celles-ci, en exacerbant le désir d'hydrogène d'agents plus sensibles aux enjeux économiques ou aux promesses écologiques, élargit le territoire et la fonction du monde hydrogène.

6.1.4 L'économie de l'hydrogène des années 1970 : une utopie conservatrice

Le projet d'une économie de l'hydrogène est formulé au tout début des années 1970 aux États-Unis, dans le sillage triomphant de la fusée Apollo mais avant la crise pétrolière d'octobre 1973 (Teissier 2017a, p. 81-82). Alors que la NASA réduit le financement des programmes spatiaux habités, une nébuleuse de gaziers, d'électriciens, de fabricants de machines (United Technologies Corporation) fait alliance avec le gouvernement fédéral autour des piles à combustible comme débouché possible pour la filière des hydrocarbures gazeux (Eisler 2012, p. 98-105). Le contexte d'intégration d'énergies nouvelles – nucléaire, solaire, biomasse – au « système énergétique mondial » dominé par les énergies fossiles (Haefele et Sassin 1970) renouvelle certains imaginaires de l'hydrogène.

Formes et fonctions d'une utopie énergétique

Une utopie, on l'a vu à propos des rivages et horizons frigorifiques de la Première Guerre mondiale (cf. 5.2.2), désigne le « gouvernement idéal des populations » dans la tradition de l'ouvrage éponyme de Thomas More (1516). Elle a un deuxième sens : une idée qui paraît trop ambitieuse pour être réalisée. Cette signification est associée, dans le *Dictionnaire de l'Académie française* (1935), à la notion de « chimère » : un « assemblage monstrueux, objet composé de parties disparates ». La chimère caractérise la voiture électrique des années 1890 et la pile à combustible des années 1950 (cf. 6.1.3). Ces chimères technologiques hantent la mémoire collective des sociétés industrielles (cf. 6.2.1). Par ce mode d'existence quasi-fantomatique, elles influencent la

créativité sociale. En réanimant les assemblages monstrueux des imaginaires, ces chimères peuvent ouvrir de stimulantes perspectives en figurant des *itinéraires* imprévus. Elles déroutent alors « sur un réseau multiple et complexe de chemins qui se chevauchent et s'entrecroisent en des nœuds, sommets ou carrefours, échangeurs où bifurquent deux ou plusieurs voies » (Serres 1989, p. 5). Les promesses des chimères technoscientifiques peuvent, au contraire, faire écran aux transformations sociales. Elles maintiennent alors le collectif sur des *trajectoires* héritées des passés. Dans le premier cas, la chimère fait surgir des brèches dans le temps présent ; dans le second cas, la chimère recycle des matériaux du passé sous la forme illusoire d'un futur novateur. L'utopie peut ainsi renverser ou conserver l'ordre social. Ces deux fonctions de l'utopie technologique sont motrices des projets d'économie de l'hydrogène au début des années 1970.

Matthew Eisler (2012, p. 101-104) recense une poignée de techniciens et de technocrates occidentaux promouvant l'économie de l'hydrogène vers 1970 : en Allemagne, Eduard Justi ; en Italie, Cesare Marchetti ; aux États-Unis, A. J. Appleby, John O'M. Bockris [2], Derek P. Gregory, Lawrence W. Jones, T. Nejat Veziroglu, etc. Tous conservent la perspective d'une croissance énergétique, Eisler (2012, p. 100) parlant de *techno-cornucopia* en anglais. Ils se distinguent en revanche des degrés divers de critique des énergies fossiles et du capitalisme. Jones, professeur de physique à l'université du Michigan, est un exemple de continuité totale. Il considère l'hydrogène comme un « combustible propre, solution à court terme au problème de la baisse des réserves de combustibles fossiles » (Eisler 2012, p. 104). Les autres formulent des formes d'utopie : « utopie socialiste » pour Appleby, Bockris et Gregory ; « millénarisme séculier » pour Marchetti. Plus l'utopie rompt avec l'existant, plus le processus de *transition* est difficile à penser. Ainsi, Jones décrit une « révolution paisible » (*quiet revolution*) par substitution incrémentale des énergies fossiles par des centrales nucléaires. Plus radical, Gregory est miné par son incapacité à répondre aux industriels pour représenter la mutation radicale, qui serait nécessaire selon lui, pour fonder une économie de l'hydrogène (Eisler 2012, p. 104, 108).

L'attitude inquiète de Gregory rend aussi compte d'une pensée technologique approfondie chez ce technicien-technocrate de métier. Détaillons l'univers mental que lui et son équipe partagent au sujet de l'économie de l'hydrogène. Au début des années 1970, Dereck P. Gregory dirige à Chicago une équipe à l'Institute of Gas Technology, centre de recherche à but non lucratif de l'industrie gazière aux États-Unis. Le pays connaît alors une restriction dans l'approvisionnement gazier qui fait penser à une possible remplacement du gaz naturel par de l'hydrogène (Eisler 2012, p. 103). Son équipe réfléchit à ce qui pourrait être le monde hydrogène de l'avenir. Leur approche prospective s'efforce de « soulever des questions et de stimuler une planification à long terme » (Eisler 2012, p. 108), même si comme le suggère François Plassard (2004, p. 8), « la difficulté fondamentale de la recherche prospective [est] de faire une place à l'imprévu ». En janvier 1973, dans *Scientific American*, Gregory (1973, p. 13) présente l'économie de l'hydrogène comme un « régime énergétique » où l'hydrogène, après avoir été produit, est distribué sous forme de « combustible non polluant multi-usage ». Il reformule ainsi l'idée d'une fonctionnalité multiple de l'hydrogène, analogue à la métaphore de la « pierre philosophale » de R. Watson (cf. 6.1.1). À deux décennies de distance (1950-1980), ce qui distingue Watson de Grégory, c'est que le premier parle d'un artefact – la pile à combustible – tandis que le second fait référence à un univers social – l'économie de l'hydrogène. D'ailleurs, si Gregory trace d'ailleurs un parallèle entre son époque et le passé, il ne choisit par les années 1950 mais les années 1930 en Angleterre (situation n° 6 de la figure 6.1).

2. Dans un classique du genre mémoriel, John Bockris (2013) reconstruit la genèse de l'économie de l'hydrogène en énumérant les événements constituant des *premières* : premier énoncé de l'idée, première publication, premier séminaire, première grosse conférence, etc. Il se donne une place centrale en tant qu'acteur à travers le « premier » article dont le titre contient l'expression « hydrogen economy », qu'il a écrit avec son collègue Appleby en 1972.

> L'idée d'utiliser l'hydrogène comme combustible synthétique est loin d'être nouvelle. En 1933, Rudolf A. Erren, un inventeur allemand travaillant en Angleterre, suggéra la production à grande échelle d'hydrogène à partir des heures creuses d'électricité. Il travailla énormément pour modifier des moteurs à combustion interne en moteur à hydrogène et le principal objet de sa suggestion était d'éliminer la pollution de gaz d'échappement de l'automobile et de réduire la pression sur l'importation de pétrole en Angleterre. (Il est intéressant de noter que 40 ans plus tard les États-Unis sont préoccupés par les deux mêmes problèmes : la pollution automobile et une dépendance croissante aux importations de pétrole.) (Gregory 1973, p. 14)

Gregory pense l'économie de l'hydrogène comme une solution aux problèmes de pollution atmosphérique et de dépendance géopolitique. Il souligne aussi l'épuisement à terme des « réserves de combustibles fossiles non renouvelables de la terre ». Son état des lieux ne masque pas de sérieuses difficultés posées par l'économie de l'hydrogène : du côté de la sécurité, l'impossibilité sensorielle de détecter ce gaz inodore et inflammable ; du côté de l'économie, sa moindre valeur calorifique (un tiers) par rapport au gaz naturel, et son prix (huit fois) supérieur (Gregory 1973, p. 16, 21). Son argumentation en faveur de l'hydrogène souligne plusieurs atouts qu'il considère comme significatifs : la maîtrise de la synthèse et du stockage d'hydrogène (grâce au programme spatial) ; sa multi-fonctionnalité (thermique et électrique) ; l'existence d'infrastructures gazières qui deviendraient disponibles (même si les gazoducs devraient acheminer un volume triple de gaz hydrogène à énergie constante par rapport au gaz naturel) ; la « tendance d'accélération vers une économie "tout électrique" ». Il produit un raisonnement classique en économie, du type coût-bénéfice.

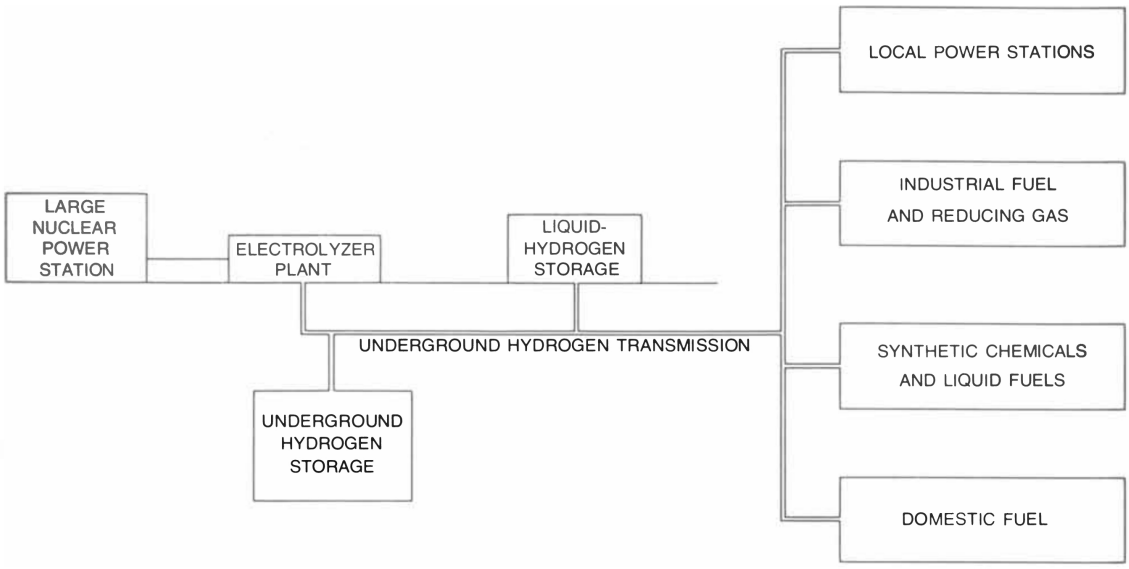

Figure 6.2 – Schéma fonctionnel d'une économie de l'hydrogène (Gregory 1973, p. 15)

Publiée dans l'article de Gregory (1973, p. 15), la figure 6.2 schématise le projet de « régime énergétique » de l'hydrogène. L'hydrogène, produit par électrolyse à proximité de centrales nucléaires, est stocké en surface, sous forme liquide (cryogénique), ou en sous-sol, sous forme gazeuse (sous pression), puis acheminé sous forme gazeuse par les gazoducs souterrains préexistants vers plusieurs centres de consommation : centrales électriques, hauts-fourneaux industriels, usines chimiques de synthèse (d'ammoniac par exemple), centres urbains (chauffage domestique). Porte-parole de l'industrie gazière, Gregory (1973, p. 15) souligne les avantages

des réseaux gaziers par rapport aux réseaux électriques. Contrairement à l'électricité, l'hydrogène est un vecteur d'énergie qui ne connaît de déperdition ni durant son stockage, ni durant son transport en gazoduc. L'existence d'infrastructures souterraines évite la construction de lignes électriques à haute tension onéreuses et susceptibles de générer de « considérables résistances » de la part des riverains. La conclusion de Gregory (1973, p. 21) est catégorique. « Si et quand nous passerons à une économie de l'hydrogène, le monde sera assurément un endroit pour habiter bien plus propre qu'il ne l'est aujourd'hui. »

Ce jugement sans ambiguïté sur la dimension « propre » de l'hydrogène s'appuie sur une analogie des « effets environnementaux » entre les secteurs alimentaires et énergétiques. Dans les deux cas, les « récipients » (*containers*) sont déversés dans l'environnement parce qu'ils sont chers à collecter et à recycler du point de vue économique : bouteilles et emballages pour les boissons et les aliments ; produits de la combustion, ou « récipients d'énergie », pour les énergies fossiles (Gregory 1973, p. 14). « Sans consigne, pas de retour » : cette règle économique déplace le « fardeau de la récupération et du recyclage » sur les épaules de la nature. Ce « cycle de l'énergie » fossile induit une pollution atmosphérique ayant des effets « nuisibles » sur la végétation et une durée de « reformation » des réserves fossiles de plusieurs millions d'années (Gregory 1973, p. 14, 16). À l'inverse, « le cycle de l'hydrogène », parce que son unique sous-produit de synthèse est de l'eau, « ne perturbe[rait] pas l'environnement ». Gregory (1973, p. 14) oppose ainsi le « désavantage [... du] "sans consigne, pas de retour" » à l'idée d'une « fonction "retour vide" » de l'hydrogène sur l'environnement. Cette évaluation des effets environnementaux des énergies fossiles et hydrogène sur la nature est très sommaire. Ni dans un cas, ni dans l'autre, Gregory ne mentionne les problèmes écologiques de l'extraction des quantités industrielles de charbon, gaz, pétrole ou uranium pour la production d'électricité. Il ne souligne pas non plus, dans le cas de l'hydrogène, les coûts environnementaux des nécessaires constructions de nouvelles infrastructures gazières. Ainsi, dans le cas du remplacement du gaz naturel par l'hydrogène trois fois moins calorifique, un volume triple de gaz hydrogène devrait être produit et acheminé. Ceci engendrerait, assurément, des travaux monumentaux d'usines de production, de gazoducs de transport, de bretelles de raccordement et de distribution et, enfin, de lieux de stockage. Il mentionne, en passant, la possibilité de construire des centrales photovoltaïques en plus des centrales nucléaires mais, là encore, sans s'inquiéter des matériaux de construction, des déchets après utilisation ou des surfaces occupées.

Techno-politique des utopies en « démocratie technique »

Ces angles morts écologiques et géopolitiques de l'économie de l'hydrogène s'expliquent par les limites de l'expertise de Gregory. Il n'est pas qualifié en termes professionnels pour l'étude des aspects mentaux, sociaux et environnementaux des mondes contemporains. Technicien et technocrate du secteur gazier, son métier ne consiste pas à penser le « gouvernement idéal des populations ». Or, Gregory se sent légitime – et le *lobby* gazier qui l'emploie le soutient – à proposer une utopie hydrogène. Il le fait à partir des traits fondamentaux de sa culture professionnelle. Il a été éduqué pour considérer l'avenir de manière optimiste et conforme aux canons dominants du régime technicien : croissance, démesure, optimisation, progrès, régulation, etc. Dans quelles mesures la pensée technicienne est-elle alors légitime pour imaginer, dire et représenter les sociétés futures ? Cette question me semble fondamentale pour interroger certains impensés de la politique contemporaine. Rarement posée, elle est déqualifiée en « démocratie technique ». Le régime technicien, qui encadre et verrouille certains imaginaires d'aujourd'hui, contrôle ainsi la forme des utopies, la légitimité à les formuler et leur réalisation formelle. Et en effet, *représenter* signifie bien trois choses à la fois : « replacer devant les yeux de quelqu'un », « remplacer quelqu'un » et « rendre présent » quelque chose (*Dictionnaire de l'Académie française*,

9e édition). C'est pleinement le cas ici. Gregory se sent légitime pour forger un « régime énergétique » qui façonne potentiellement l'organisation sociale et politique à venir. Il incarne un cas d'« hégémonie culturelle » de la bourgeoisie (Antonio Gramsci).

L'utopie de Gregory souligne la dimension politique des espaces de dialogue entre techniciens, technocrates et technologues (cf. 1.6.4). Sa méthode acte des choix de données et de variables pour construire l'économie de l'hydrogène. Or, prendre une variable comme un donné du problème relève autant de l'épistémique du politique. Certains choix de Gregory interpellent à 50 ans de distance. Le plus frappant est la croissance irréversible vers une « économie "tout électrique" » à travers le décuplement de la production électrique entre 1967 et 2000. Il prend la croissance exponentielle de la production électrique comme un invariant du modèle pour penser une transition énergétique vers l'économie de l'hydrogène. Gregory estime qu'il faudrait environ 50 ans pour remplacer tout le gaz naturel consommé aux États-Unis par de l'hydrogène synthétisé par électrolyse. Ceci nécessiterait de quadrupler la production d'électricité, d'environ 360 GW en 1972 à plus de 1 300 GW en 2022 (Gregory 1973, p. 18). Cette « tâche impressionnante » impliquerait la construction d'un millier de centrales nucléaires de 1 GW de puissance moyenne. Ceci donne un « avant-goût de la révolution énergétique qui devra prendre place durant le prochain demi-siècle » aux États-Unis.

Le deuxième choix politique fort de Gregory est de prendre l'électronucléaire comme la meilleure solution au scénario d'électrification. Selon lui, la filière nucléaire offre une perspective écologique « propre ». « Le cycle du combustible s'achève rapidement sans épuiser les ressources limitées ni accumuler de déchets nocifs. » (Gregory 1973, p. 16) Étonnamment, rien n'est dit de l'aspect non renouvelable des réserves d'uranium ni des problèmes posés par le stockage industriel de déchets radioactifs. La dominante électronucléaire est complétée par une part variable de photovoltaïque. Les deux filières, nucléaire et photovoltaïque, sont issues du complexe militaro-industriel : bombe atomique pour le premier, conquête spatiale pour le second. Elles relèvent d'une culture de « haute technologie » (*high-tech*) par la technicité de la chaîne de production des artefacts, par leur opacité fonctionnelle (« boîte noire ») et par la gestion intégrée au système énergétique qu'ils impliquent.

Un troisième choix de Gregory et de son équipe de l'Institute of Gas Technology consiste à éloigner, des zones urbaines, les plus grosses centrales de production d'électricité. Celles-ci sont installées à des distances de l'ordre de 80 kilomètres au moins si elles sont sur terre. Elles peuvent aussi devenir des « plateformes flottant dans l'océan » au-delà de l'horizon maritime depuis les côtes habités (Gregory 1973, p. 15). Cet éloignement continental ou océanique (*off-shore*) fait apparaître la troisième et dernière signification de l'utopie, dérivée du grec ancien, « en aucun lieu ». De fait, l'économie de l'hydrogène décrite par Gregory et son équipe n'ont existé en aucun lieu et en aucun temps. Elle n'a pas été matérialisée malgré les promesses techniciennes dans un contexte de crise pétrolière aiguë.

En conclusion, les projets d'économie de l'hydrogène du début des années 1970 prennent les trois formes de l'utopie. Premièrement, elles s'apparentent à une chimère : un « assemblage monstrueux » qui hante la psyché collective sans être structuré matériellement. Deuxièmement, elles se projettent très loin des centres urbains : gigantesques centrales nucléaires cachées dans les espaces de l'Ouest américain ; barges de puissance dérivant sur l'océan de l'Est états-unien. Troisièmement, elles tracent un gouvernement des populations à partir d'une infrastructure technicienne et énergétique. Toutes les versions proposées partagent la conviction d'une croissance exponentielle de consommation énergétique, notamment électrique. Certaines versions proposent de rompre avec l'ordre social en écho aux révoltes politiques des années 1960. Aucune ne prend en compte la réflexion écologique des années 1970, ni ne reprend l'idée de « limites à la croissance » du rapport du Club de Rome (Meadows et al. 1972). Le projet d'une économie de l'hydrogène se nourrit des crises énergétiques

des années 1970 pour avancer de nouvelles sources d'énergie : nucléaire surtout, renouvelable un peu, par le photovoltaïque. Cette utopie hydrogène promit beaucoup et ne changeât rien. Dans le jeu politique, elle a fait écran en détournant le regard vers un futur fascinant tout en préservant, au présent, les intérêts économiques dominants. Le futur utopique recycle ici le passé en le vernissant de modernité. Point de rupture donc mais une continuité de la croissance exponentielle des consommations d'énergies fossiles et électriques prise comme invariant. L'économie de l'hydrogène a formé un monde hydrogène dans les années 1970. Trois fois utopique, elle n'a pas été matérialisée ni habitée. D'autres mondes hydrogène émergent depuis, certains se présentant même comme réalisables et habitables.

6.1.5 Hériter, habiter et hasarder les mondes hydrogène

Sacha Loeve et Bernadette Bensaude-Vincent (2018, p. 282) concluent leur essai sur le *Carbone. Ses vies, ses œuvres* par une proposition théorique stimulante : « Chaque mode d'existence du carbone prétend "faire monde". » Il me semble qu'un seul mode d'existence ne peut pas prétendre « faire monde ». Pour faire monde, il faut au moins être trois : une relation entre deux fait monde par rapport à un troisième, en altérité. C'est pour rendre compte de cette double relation – de proximité et d'altérité – que j'ai interprété le monde hydrogène extraterrestre comme un assemblage de plusieurs modes d'existence de l'hydrogène. Est-il possible de mieux caractériser un « monde hydrogène » (ou carbone) ?

Le *Dictionnaire de l'Académie française* distingue deux significations générales dans son entrée « monde » : l'univers comme espace matériel des choses, à la fois complexe et total ; le milieu comme séjour des êtres, à la fois habité, limité et changeant. Le monde hydrogène emprunte aux deux significations : c'est un espace physique organisé autour d'objets (piles, hydrogène, infrastructures) et un milieu habité par des humains (techniciens, usagers, citoyens) qui les font fonctionner et leur donnent sens. La notion de monde habité implique une reconnaissance de quotidienneté des modes d'existence : être dans, devant, contre, en dehors du monde (Souriau 1943, p. 156)). Elle implique aussi des limites de peuplement, par déni, par identification ou par subjectivation (Rancière 1998, p. 121). Enfin, elle porte de multiples temporalités (rythmes, régulations, permanences) et des possibilités d'évolution (fantômes des ancêtres, imaginaires des au-delà, recomposition, fin du monde). Sur ces trois points, quotidienneté, limites et potentialité, ils rejoignent ce que les anthropologues de l'art appellent des « univers culturels », ces ensembles « cohérents mais provisoires » de représentations, de pratiques et de goûts à la base de « sentiments d'appartenance » (Guy 2000, p. 18-19). Dans le champ des technosciences, la matérialisation et la fonctionnalisation de machines sont essentielles pour faire monde. C'est ce que montre l'importance de la pile à combustible Pratt & Whitney fabriquée pour la NASA : elle cristallise, à la convergence de nébuleuses technologiques et industrielles, le déploiement d'un monde *extraterrestre* de l'hydrogène des années 1950 aux années 1970.

En résumé, trois actions collectives sont nécessaires pour faire monde : hériter d'ailleurs anciens, éloignés ou chimériques ; habiter ici et maintenant par une expérience collective de territoires, de rythmes et d'identités ; hasarder des futurs par la conservation, le déni, le désir, l'imagination, la lutte, la subjectivation, le rêve. Dans le cas du monde hydrogène en particulier et des technosciences en général, la perception, l'action et la représentation des artefacts (piles, hydrogène) sont centrales dans l'organisation idéelle et matérielle du monde. Plusieurs mondes hydrogène peuvent coexister à une époque donnée. Outre le monde hydrogène extraterrestre de la NASA déjà évoqué, un cas encore convoqué aujourd'hui est l'économie de l'hydrogène héritée des années 1970. C'est une version du monde hydrogène essentiellement définie par des critères industriels, financiers et politiques. Un troisième monde hydrogène populaire concerne l'« électro-mobilité » à l'intersection des

véhicules électriques à batterie et à hydrogène. Ainsi, le contenu, la finalité et les limites peuvent ainsi varier d'un monde hydrogène à l'autre. Les mondes hydrogène ne sont pas isolés mais rendus poreux par les variations des modes d'existence de l'hydrogène (cf. 6.1.2). Ils communiquent entre eux aux trois niveaux collectifs qui les définissent : patrimoines et héritages, expériences d'habitation d'un territoire, ou encore « univers culturels » (Guy 2000) et imaginaires.

La porosité des mondes hydrogène pose un problème ontologique. Ils sont holistes par leur nature-culture. Trois degrés d'holisme se superposent. Au premier degré, les mondes hydrogène sont holistes comme tout « fait » historique, selon Paul Veyne (Veyne 1971, p. 134), par intrication de trois facteurs de causalité : hasard, matérialité et intentionnalité. Au deuxième degré, ils sont holistes parce que ce sont des systèmes de systèmes (cf. 6.1.3) et que la métaphore du « système », issue de l'écologie, présuppose une délocalisation des interactions entre organismes et milieux (Le Moigne 1999). Au troisième degré, ils sont holistes parce que la pile à hydrogène qui les fait exister a une aptitude profonde aux inter-dépendances et inter-connexions (cf. 6.1.1). Ce triple degré de tissage – historique, écologique et technologique – met à distance une approche trop analytique. La décomposition analytique est pourtant inévitable pour expliciter chacun des trois aspects des mondes hydrogène : comme temporalités de l'héritage (6.2), comme séjours d'habitation (6.3) et comme hésitations et hasards du sensible (6.4).

6.2 Héritages de l'hydrogène : spectres et catacombes du temps présent

La mémoire collective structure et reproduit le régime technicien depuis le début du XIX^e^ siècle (cf. 1.3.4). La conception du monde socio-économique par les flux et les réseaux, issue du saint-simonisme, est déterminante pour construire un imaginaire technicien de la régulation au XX^e^ siècle (cf. 5.1). Mais, les mécanismes de transmission-conservation jouent également à un niveau très matériel. Le concept de « dépendance au sentier » (*path dependence*) rend compte des phénomènes de verrouillage et des effets à long terme de certains choix passés sur la structure sociotechnique présente et future (cf. 1.2.3). Les choix des acteurs initiaux de l'automobile et de l'électricité ont des effets durables jusqu'à aujourd'hui en termes de mobilités individuelles et de réseaux centralisés de puissance (Kirsch 2000, p. 12). Ceci pose le problème politique des rapports de force entre la capacité d'agir de manière imprévue et en rupture et la tendance normative de la structure sociale (McGuire et al. 1993, p. 215). L'articulation entre l'instituant et l'institué en société est également un problème épistémique. Pour rendre compte de l'« inertie » des phénomènes sociaux, l'historiographie des techniques utilise presque toujours la métaphore de la « trajectoire », malgré ses limites mécaniques et déterministes [3]. Pour renouveler cette métaphore spatiale du temps, disons que cela pose la question des « itinéraires » de rupture vis-à-vis de la conservation des « trajectoires ».

6.2.1 Les spectres de la mémoire collective

Les sociétés modernes, malgré un long « désenchantement » (Weber 1919, p. 13), vivent à travers des imaginaires surpeuplés de spectres. Ces « entités fragiles et inconsistantes », écrit Souriau (1943, p. 130-133), « fantômes », « chimères », « morganes », ont une vie sociale intense malgré leur « caractère transitif et transitoire ».

3. Avec Anaël Marrec (2019, p. 316-320), nous avons critiqué l'usage de la « trajectoire », de Thomas Hughes (1983, p. 556) à Alain Gras (2003, p. 16-20). Les métaphores mécaniques participent, en effet, à naturaliser les processus socio-historiques. Elles produisent de fausses évidences sur le temps long en *canalisant* les récits sous forme de « lignées » techniques, de « filières » énergétiques, etc. Nous proposions de revenir aux convertisseurs énergétiques comme « nœuds » techno-politiques et nous forgions la métaphore du « sac de nœuds ». Ceci permet d'insister sur le croisement permanent des sphères d'activité humaine de manière synchronique et spatiale, sur les effets de verrouillage du social à long terme, et sur les risques de la théorisation en histoire des techniques.

Ces « êtres de fiction » habitent les catacombes de la modernité. Ils peuplent la mémoire collective, celle des professionnels aussi bien que celle des usagers de la technique. En colonisant les imaginaires contemporains, les spectres techniciens encadrent les intentions et orientent les actions du temps présent.

La mémoire collective est saturée d'images et de mythes formant la légende contemporaine de l'hydrogène : la (dé)composition d'eau en éléments hydrogène et oxygène ; le vol majestueux d'un dirigeable aéroporté et le brasier final du zeppelin Hindenburg ; le « moteur à eau » comme un « moteur perpétuel » automobile ; l'inquiétante bombe à hydrogène dans le ciel de la guerre froide ; le coup d'éclat de la mission Apollo et le coup d'effroi de la navette Challenger dans l'extraterrestre ; le *rover* lunaire Apollo et le Range Rover hydrogène [4] ; etc. Les images légendaires de ces êtres de fiction sont autant de défis à l'ingéniosité des techniciens pour *animer* l'hydrogène : incarner une chimère électro-chimique, la mettre en opération et lui transmettre un mode d'existence sociale. La mémoire collective se nourrit également du champ d'expérience. Plus précisément, elle se recompose, comme l'explique Reinhardt Koselleck (1997, p. 271-280), par « accumulation » et « perte » d'expériences vécues par des groupes humains. Dans le champ technoscientifique, la mémoire collective doit composer avec ce que le régime technicien considère comme les « échecs » du passé. Comment construire au présent une large mobilisation si les échecs passés hantent la mémoire collective ?

Une première réponse est tout simplement d'effacer les traces des échecs passés de la mémoire collective. Ce fut longtemps le cas pour la voiture électrique. « Souvent oubliée par les travaux historiques, la voiture électrique a, pourtant, fait partie intégrante de l'apparition de l'automobile et fait l'objet d'un intérêt renouvelé à plusieurs périodes du xx^{e} siècle » (Villareal 2014, p. 67). Cet « oubli », plus ou moins conscient, plus ou moins construit, concerne également les mémoires techniciennes. Parfois l'effacement des traces est impossible. Lorsque l'échec est trop proche, les populations se souviennent directement. Ainsi, la génération hydrogène d'après-guerre sort de la période 1950-1980 avec un sentiment d'échec. La DGRST, fer-de-lance de la R&D hydrogène en France, qualifie les résultats de « très insuffisants » et les perspectives de « peu encourageantes » (citée par Simoncini 2018, p. 312). Rien n'est fait ensuite pendant toute une décennie. L'oubli se fait par remplacement lent d'une génération de chercheurs et de techniciens par la suivante. L'oubli est également impossible lorsque la mémoire est particulièrement efficace pour faire surnager l'échec dans l'imaginaire collectif. C'est le cas du très médiatisé accident du zeppelin Hindenburg en mai 1937 au-dessus du New Jersey (situation n^{o} 6 de la figure 6.1). La mobilité hydrogène par dirigeable est ainsi durablement grevée par l'image d'une « technique pathologique » (Regis 2015).

Les promoteurs de l'hydrogène sont alors obligés de passer par ce lieu commun du risque. Comme le souligne Nicolas Simoncini (2018, p. 258-260), ils cherchent à « gérer » l'image médiatique de dangerosité de l'hydrogène quitte à « réactiver » la mémoire collective. Plusieurs témoignages d'acteur du domaine confirment cette stratégie de gestion d'image de l'hydrogène. Jean-Pierre Lisse (2009, p. 14), ancien responsable de l'hydrogène de Peugeot-Citroën, relativise les risques liés à l'hydrogène en parlant seulement d'une « image de danger » plutôt que d'un danger effectif. Un universitaire du domaine raconte qu'en 2015, lors de ses conférences, le public revient souvent sur l'inflammabilité de l'hydrogène : il faut alors argumenter pour « remonter la pente », ou mieux, « anticiper » les questions embarrassantes (cité par Simoncini 2018, p. 260). L'une des argumentations consiste à rapporter le risque nouveau à un risque ancien considéré comme maîtrisé au quotidien. Ainsi, Robin Roche, enseignant-chercheur à Femto-ST à l'université de technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM), souligne que le stockage de l'hydrogène n'est pas plus dangereux que celui du pétrole ou du gaz : ces différents modes de stockage sont encadrés par des législations prévenant le risque industriel

4. Un modèle hydrogène du célèbre Sport Utility Vehicle (SUV) de Land Rover est annoncé pour 2024, d'après le site internet H2-Mobile.fr (H2-Mobile 2022a)

telles que la certification Seveso (au-delà de cinq tonnes pour l'hydrogène) (Roche 2022, p. 11). Le discours législatif s'appuie sur des pratiques empiriques de mise à l'épreuve des artefacts. Paul Lucchese (2016, p. 4, 24), ancien responsable valorisation à la Direction des applications militaires du Commissariat à l'énergie atomique (CEA), a participé dans les années 1990 aux tests mécaniques (*crash tests*) et thermiques (incendies) de réservoirs d'hydrogène sous haute pression (700 bars). Ceux-ci ont contenu l'hydrogène stocké malgré ces conditions extrêmes. Des communautés spécialisées en sécurité de l'hydrogène existent, à l'échelle internationale, pour collecter les cas d'« incidents », établir des « recommandations [...] en cas de problème » et apprendre « des erreurs qui sont faites » (Roche 2022, p. 11). Cette technologie, au double sens discursif et matériel (cf. 1.6.4), contribue à réguler les craintes sur l'hydrogène et ses risques industriels dans l'espace public. En effet, si la question du danger de l'hydrogène est immanquablement abordée dans les conférences jusqu'aux années 2000, Marie-Cécile Péra, directrice de la plateforme FC Lab à l'université de technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM), suggère une inflexion depuis une douzaine d'années. « Au niveau du grand public, l'image s'est beaucoup améliorée du point du vue en particulier de la perception du risque vis-à-vis de l'hydrogène » (Péra 2022, p. 15).

L'expansion des techniques de l'information et de la communication contribue à conserver plus de traces de la mémoire collective, même si ces traces sont dispersées par une multiplication des médias d'information. Ainsi, l'Agence internationale de l'énergie (2019, p. 13) rassure les sceptiques : s'il « y a de faux départs pour l'hydrogène dans le passé, cette fois-ci pourrait être différente ». Elle inclut même dans son promotion du *Futur de l'hydrogène* un rappel d'une page sur « les quelques vagues d'intérêt dans l'histoire récente » afin d'expliquer les raisons de l'échec et les leçons de l'histoire dans une perspective simpliste sur le passé et optimiste sur le futur (International Energy Association 2019, p. 19). Les promoteurs de l'hydrogène ont donc désormais plutôt tendance à sur-investir la mémoire collective qu'à la marginaliser. Ils peuvent ainsi contrôler les images qui circulent sur les réseaux d'information et réinterpréter les images négatives des expériences du passé d'une manière plus positive. Cette tendance cadre avec le « régime d'historicité » dominant aujourd'hui, que François Hartog (2003) nomme « présentisme » (cf. 5.2.1). En régime « présentiste » en effet, la mémoire et le patrimoine sont omniprésents dans l'arène publique. Elles servent à légitimer un projet technoscientifique ou industriel. C'est le cas de l'énergie solaire où le patrimoine scientifique et technique est utilisé par les acteurs pour la présenter comme « une filière d'avenir » (Pehlivanian 2014). Dans le cas de la voiture électrique, la fonction de la mémoire s'est modifiée au cours du temps. Il y a deux décennies, Frédéric Fréry (2000) suggérait que l'« amnésie » était une stratégie des acteurs du domaine pour favoriser l'adhésion à une « technologie éternellement émergente » mais toujours perdante. L'analyse empirique dément cette hypothèse dix ans plus tard. Axel Villareal (2014, p. 72) souligne en effet que les acteurs français du domaine, interrogés entre 2009 et 2014, font, de manière quasi-systématique, « rappel d'un événement marquant de l'histoire de la voiture électrique [ou ont...] mentionné son statut d'ancêtre du véhicule thermique ».

Les acteurs et promoteurs de la voiture électrique ont donc remplacé les stratégies d'oubli et d'amnésie par une inflation discursive peuplant la mémoire collective de légendes malheureuses et de spectres échoués depuis la fin du XIX^e^ siècle. Un moyen de s'accommoder d'une mémoire peuplée d'échecs est l'argumentaire du « progrès » scientifique et technique. Les techniciens travaillant en R&D et les politiciens, largement séduits par le régime technicien, relient souvent les échecs passés à l'immaturité technique, et, inversement, leurs succès futurs aux améliorations technoscientifiques en cours. Sur ce point, les piles à combustible sont semblables aux batteries électriques. Un tel argumentaire justifie le financement de projets considérés comme innovants et potentiellement applicables à court ou moyen terme.

Le problème du « solutionnisme technologique » est qu'il ne correspond pas à la réalité sociotechnique. Dans le cas de l'automobile, David Kirsch (2000, p. 12) a montré que, si les motorisations à essence, à vapeur et à batteries étaient en compétition vers 1900, la solution victorieuse d'une part est un hybride de plusieurs technologies et d'autre part l'emporte, non comme artefact discret, mais comme ensemble sociotechnique proposant des modalités de déplacement. En d'autres termes, c'est un système-à-essence intégrant les pratiques, valeurs et représentations de consommateurs, industriels, techniciens et administrateurs qui se déploie sur un territoire. La même analyse est délivrée en 2010 au sujet de la mobilité électrique par un… technocrate, ancien directeur de programme de Renault : « quand on parle de timing ce n'est pas seulement une question de "quand est-ce que la batterie aura des performances qui…", ça ne suffit pas. Ce n'est pas seulement une question technico-économique, c'est une question de société, toute une évolution qui sera relativement lente » (témoignage anonyme cité par Villareal 2014, p. 106). Malgré cette convergence possible entre certains technologues, techniciens et technocrates, Nathalie Kroichvili et Nicolas Simoncini (2022, p. 1) soulignent que « l'engouement pour l'hydrogène » continue de se traduire avant tout en termes de « nouvelle promesse technologique ». Les premiers cercles de la décision mettent en œuvre des stratégies basées sur l'« innovation technique », « la création de la filière » hydrogène et « la levée des verrous techniques » (Kroichvili et Simoncini 2022, p. 1-2). La politique de la recherche des États industriels n'aura donc rien appris des sciences humaines et sociales en un siècle et demi, des soubresauts malodorants des tricycles à essence à la propulsion silencieuse des bus à hydrogène. Certains spectres ont la peau plus dure que d'autres en régime technicien.

6.2.2 Infrastructures des mobilités et des énergies en Europe, 1980-2015

Sortir de l'actualité impose d'élargir le temps présent à quelques décennies afin d'explorer les bas-fonds des mondes hydrogène. Trois raisons justifient une étude de la période 1980-2015. Premièrement, dans le cadre de l'habilitation à diriger des recherches, le début de la période présente un recouvrement avec le chapitre 5 et la fin de la période reboucle sur le présent, ce qui était l'un des objectifs (1.4.3). Deuxièmement, en termes historiographique, cela permet d'éviter l'analyse complexe de la décennie 1970, très dense en termes énergétiques, tout en intégrant les recompositions structurelles qui en résultent après les deux crises pétrolières. D'autre part, la période récente a été peu étudiée pour l'hydrogène. Nicolas Simoncini (2018, p. 325-328) mentionne, dans les toutes dernières pages de sa thèse, le « redémarrage » des recherches sur les piles à combustible en 1990-1991. Il précise que le contexte a changé car l'Union européenne s'est substituée aux États dans la politisation de l'hydrogène. On entre ainsi dans un ordre néo-libéral fortement marqué par des mouvements de libéralisation et de privatisation à l'échelle internationale (cf. dernière période de la chronologie de la section 2.2.3) et par la mise sur agenda politique des problèmes climatiques et la « transition énergétique ». Cette nouvelle configuration institutionnelle, d'impact accru des cadrages européens sur les politiques nationales et d'affichages écologiques des politiques économiques, est une troisième raison qui justifie l'étude de la période 1980-2015.

Héritages et stratégies du secteur automobile

Les technologies automobiles à batteries ou à hydrogène, quoique distinctes, sont poreuses. Un responsable pile à combustible chez Opel (filiale de General Motor) à Rüsselsheim en Allemagne, Jochen Jakowski (2010, p. 2-3) présente un continuum de véhicules selon le degré d'hybridation des motorisations : « 100% hybride » comme la Toyota Prius couplant essence et batteries électriques ; hybrides « plug-in », dont les batteries peuvent être rechargées sur secteur ; électriques à « long rayon d'action » (*electric range extended vehicles*), dont l'énergie

vient majoritairement de batteries ; électriques « pures » ; et, enfin, électriques pile à combustible. Au sein même d'un véhicule, les technologies sont hybridées. Dans une Toyota Mirail, l'une des premières voitures à hydrogène commercialisée en 2015, « il y a une pile à combustible d'à peu près 100 kW et des batteries de l'ordre de 15 kW » : « la batterie pour les appels de puissance par exemple et l'hydrogène pour un fonctionnement plus continu et moins perturbé » (Coutanceau 2022, p. 18). En outre, des dispositifs rapides couplés à des batteries peuvent emmagasiner de l'énergie lors des 2-3 secondes de freinage puis la restituer lors de l'accélération au moment où le besoin de puissance électrique est maximal (M. Winter 2010, p. 4). L'hybridation des artefacts et la complémentarité des usages justifient des développements concertés.

En France, un programme « Voitures propres et économes piles à combustible » (1992-1995) a réuni les deux principaux constructeurs français d'automobiles, Renault et Peugeot-Citroën. Il a été placé sous la responsabilité d'un docteur en chimie appliquée, Jean-Pierre Lisse (2009, p. 1-2). Le poids des héritages est déterminant ici puisque Lisse travaillait sur les générateurs électrochimiques depuis 1972 dans l'équipe véhicules électriques, à la direction de la recherche de Citroën. Mais, les deux sources d'énergie n'ont pas le même capital symbolique en termes de modernité : la technologie batteries (plomb ou nickel-cadmium) est perçue comme classique par « rapport aux idées futuristes de la pile à combustible » (Lisse 2009, p. 5).

Cette projection différenciée dans le futur – proche pour la traction par batteries, lointain pour la traction hydrogène – est une permanence des mondes hydrogène depuis les années 1950 aux États-Unis. Elle s'incarne dans la politique spatiale de conquête de la Lune. Si la NASA choisit l'hydrogène pour la génération d'électricité des navettes spatiales, elle opte pour des piles non rechargeables (zinc-argent) pour la traction du *buggy* lunaire (Lunar Roving Vehicle). Ce conservatisme technologique est justifié par une économie d'efforts. En effet, la R&D et la production des quatre buggys lunaires par Boeing (1971) coûteront déjà 38 millions de dollars à l'État fédéral. La même idée d'un futur lointain de la traction hydrogène est exprimée en 2000-2001 pour réorienter une timide commercialisation des voitures électriques en cours en Californie vers la R&D des voitures à hydrogène pour une potentielle commercialisation dans plusieurs décennies (Paine 2006, 1h10-1h16). Par exemple, George W. Bush, durant son premier mandat à la présidence des États-Unis (2001-2005), adopte cette rhétorique de détournement. On le voit lancer ce slogan « L'hydrogène est la vague pour le futur. » (*Hydrogen is the wave for future.*) dans le documentaire militant de Chris Paine : *Who Killed the Electric Car?* Au cours des années 2000, les administrations européennes expriment un semblable décalage temporel entre les applications automobiles des batteries et de l'hydrogène. Un membre de la direction générale Entreprise (unité Automobile) de la Commission européenne témoigne : « Tout le monde avait déjà commencé à investir dans l'électrique, tout le monde commençait déjà à sentir que l'hydrogène n'était pas une solution à court terme » (cité par Villareal 2014, p. 284). Ce constat s'appuie sur des différences quantitatives. La production de voitures électriques dépasse d'un à deux ordres de grandeur celle des voitures à hydrogène avec un décalage dans le temps. Du côté des batteries, quelques milliers d'exemplaires ont été commercialisés par Peugeot-Citroën en France et General Motor aux États-Unis à la fin des années 1990 (Villareal 2014, p. 75).

Du côté hydrogène, une centaine d'exemplaires a été produite par General Motor à la fin des années 2000 (Jakowski 2010, p. 1). L'Allemagne, la Corée et le Japon sont perçus par les observateurs français comme les pays où l'intervention de l'État est la plus favorable à l'hydrogène (Lucchese 2016, p. 19). L'Allemagne et la Californie sont considérées comme « en avance » pour la construction des infrastructures. Pour ce faire, l'État fédéral allemand a créé un programme interministériel de dix ans (2005-2015) sur l'hydrogène, impliquant quatre ministères : transport, environnement, économie, recherche (Bonhoff 2010, p. 3-4). Les objectifs sont la coordination nationale des activités de R&D et le déploiement d'activités de démonstration. Un service central

est créé au ministère des Transports en 2008, appelé N.O.W., pour coordonner l'ensemble, coopérer au niveau international et assurer la communication sur la filière en émergence. Piloté par un ancien responsable du domaine de Daimler-Chrysler, Klaus Bonhoff (2010, p. 4), N.O.W. traite de manière conjointe et systémique les mobilités électriques et les mobilités hydrogène afin de stimuler les complémentarités entre les deux filières industrielles. À la fin du premier programme (2005-2015), une trentaine de stations de rechargement hydrogène ont été installées en Allemagne. Elles sont environ 80 aujourd'hui, bien en deçà de l'objectif initial de 400 à l'horizon 2023 (Lucchese 2016, p. 14).

Le programme allemand N.O.W. montre la porosité des mondes hydrogène vis-à-vis de multiples sphères d'activité : transport, environnement, économie et recherche. Du côté de l'énergie, électriciens, gaziers et fabricants de batteries travaillent à la réalisation des véhicules électriques et hydrogène depuis les années 1970 (Nicolon 1984, p. 57-58).

Des rivages aux cadrages de l'Europe : les énergies en réseaux

Le deuxième ensemble d'héritages matériels de l'hydrogène concerne donc les réseaux d'énergie. L'intégration du réseau électrique a commencé en Europe à partir des années 1920 (Lagendijk 2008, p. 18). Mais, à partir de 1945, la guerre froide a aussi institué un « Rideau de fer » de l'électricité. L'Union pour la coordination et la transmission d'électricité (UCTE) coordonne les réseaux de l'Ouest tandis que l'Unified Power System of Russia (UPS) ceux de l'Est (Palle 2017, p. 134-136). Depuis la dissolution de l'Union soviétique en 1990, trois décennies de techno-politique de l'énergie n'ont pas suffi à harmoniser les densités d'électrification de chaque zone, ni à les interconnecter de manière synchrone. Le continent est ainsi barré du nord au sud par une frontière énergétique. Ce rivage technique pose un important problème géopolitique à l'Union européenne dans sa stratégie d'intégration économique. La Suisse, autonome vis-à-vis des réglementations européennes, constitue pour sa part un nœud des transferts électriques en Europe (Lagendijk 2008, p. 17). D'autres rivages techniques fracturent l'espace européen de l'énergie. Les échanges d'électricité de la zone UCTE avec les pays baltes et scandinaves notamment imposent des transformations en courant continu. Un deuxième problème géopolitique pour l'Union européenne concerne les approvisionnements de gaz naturel. Ce « gaz bleu », contrairement au « gaz noir » fabriqué localement à partir de charbon, doit être acheminé depuis des gisements souterrains éloignés (Williot 2020, p. 3). Les premiers gazoducs européens sont construits dans les années 1970. Contrairement au réseau électrique, ils traversent bien le continent d'est en ouest pour acheminer le gaz russe. Ceci induit une forte dépendance de l'Europe occidentale vis-à-vis du « gaz rouge » (Per Högselius) jusqu'à aujourd'hui (Palle 2017, p. 136-137). Un approvisionnement complémentaire de gaz naturel se fait par navires méthaniers depuis le Moyen-Orient et l'Afrique du Nord. Alors que le gaz noir recule à partir des années 1950, le gaz bleu endosse une image de modernité (Williot 2020, p. 8). Il justifie la construction de trois ports méthaniers en France : le Havre (1965), Fos-sur-Mer (1970) et Montoir-de-Bretagne (1980). L'approvisionnement de gaz, couplé à l'importation de pétrole, constitue un troisième problème géopolitique pour l'Europe : une forte dépendance vis-à-vis des hydrocarbures du Moyen-Orient. La première alerte date de 1970 lorsque les accords de Téhéran et Tripoli actent la possibilité d'une politique commune de l'Organisation des pays exportateurs de pétrole (OPEP) dix ans après sa création (Puiseux 1982, p. 612). Elle est confirmée par les crises pétrolières d'octobre 1973 et de 1979-1980.

Compte-tenu de ce triple héritage géopolitique de l'énergie, il n'est pas étonnant de voir l'Union européenne se saisir des questions énergétiques dès sa fondation en 1992. En particulier, l'article 129b du Traité de Maastricht promeut « l'établissement et [le] développement de réseaux trans-européens dans les secteurs des infrastructures

du transport, des télécommunications et de l'énergie » pour faciliter la libre circulation des citoyens et réduire les inégalités régionales (Union européenne 1992, art. 129b). Le cadrage européen s'avère un puissant outil administratif d'uniformisation économique au sein de l'Union européenne. En quelques années à peine, entre 1989 et 1996, il fait converger, dans le domaine des télécommunications, des situations nationales aussi contrastées que l'Allemagne, la France et la Grande-Bretagne vers un modèle de libéralisation des réseaux (Bartle 2002, p. 22). Le secteur de l'électricité résiste plus longtemps à la mise en compétition des entreprises de réseaux par l'Union européenne que le secteur des télécommunications (Bartle 2002, p. 21, 14). Les réseaux nationaux d'électricité sont, de fait, les « principales briques de construction » du réseau européen (Lagendijk 2008, p. 18). La première loi européenne de libéralisation de l'électricité date de 1998. L'Union vise là encore une profonde transformation économique de la gestion des infrastructures de l'énergie. Le Conseil européen du 16 juin 2002 à Barcelone fixe l'obtention pour 2014 d'un seuil minimal de 10 % de la puissance électrique de chaque pays en interconnexion transfrontalière avec ses voisins (Palle 2016, p. 19-20). Les investissements nécessaires sont tels pour changer en profondeur la configuration des infrastructures électriques que l'objectif n'est pas encore atteint aujourd'hui.

Ces actions s'inscrivent dans le contexte politique de la période 1990-2010, marqué par deux nébuleuses écologiques. Celles-ci sont qualifiées de « graines de changement » par Aurélien Évrard (2013, p. 236-239). Cette métaphore botanique permet de caractériser une influence « cognitive » quasi-invisible dans le milieu social mais ayant des traductions politiques au fil du temps. La première nébuleuse est le « rapport Brundtland, publié en 1987 et à l'origine d'une réflexion sur les limites de la croissance et du développement durable » [5]. Si, au Danemark, la graine pousse à greffer les ministères de l'énergie et de l'environnement en 1994, en France, la germination est plus lente et n'affecte que les discours (Évrard 2013, p. 238). On observe ainsi un double « verdissement » (*greenwashing* en anglais) de l'énergie au tournant du XXIe siècle : du nucléaire par EDF (Évrard 2013, p. 239), du gaz par GDF Suez (Williot 2020, p. 11).

La deuxième nébuleuse concerne l'articulation politique entre climat et énergie. Elle se nourrit de la médiatisation croissante de l'activité et des résultats du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) établi en 1988. La ratification du protocole de Kyoto en 1997 par une large majorité des États de l'Organisation des nations unies (ONU) matérialise un consensus diplomatique mou autour de l'idée d'un changement climatique à l'échelle planétaire dû à l'émission dans l'atmosphère de grandes quantités de gaz à effet de serre (gaz carbonique, méthane) depuis l'industrialisation de l'Europe au XIXe siècle. Elle se décline dans l'Union européenne par un « paquet énergie-climat », annoncé en janvier 2007 par la Commission européenne et approuvé en mars le Conseil européen (Bento 2010, p. 10). Cette décision européenne fixe un triple objectif à 20 % pour l'année 2020 : 20 % de réduction des émissions de gaz à effet de serre (par rapport à 2005) ; 20 % d'énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie ; 20 % d'amélioration de l'efficacité énergétique (Ortar et Subrémon 2016, p. 9-10). Cette politique énergie-climat est mise en forme par le Traité de Lisbonne. Signé en décembre 2007 et entré en vigueur en décembre 2009, ce traité communautaire pose les cadres juridiques de l'énergie dans l'Union européenne.

Si les objectifs ne sont pas contraignants pour les États, le paquet énergie-climat induit un précédent suivi de plusieurs autres en 2014, 2016, etc. Il recentre encore l'énergie sur l'agenda politique de l'Union européenne. Dans *Contre vents et marées. Politiques des énergies renouvelables en Europe*, Aurélien Évrard (2013,

5. Il serait intéressant de tracer un réseau d'influences épistémiques et sociologiques entre les rapports Brundtland (1987) et Meadows (1972). Un mémoire de master pourrait ainsi analyser les permanences et les modifications d'un discours écologique international durant cette quinzaine d'années riche en rebondissements énergétiques, du premier choc (1973) au contre-choc pétrolier (1986). Il s'attacherait à la notion de « limites de [ou à] la croissance » dans un rapport critique aux débats actuels.

p. 245-247) montre de manière convaincante comment le « cadrage » des problèmes par l'Union sélectionne les « dimensions pertinentes de l'enjeu énergétique, via la libéralisation et l'environnement ». Deux raisons à cela : l'énergie est alors l'un des secteurs les moins intégrés et les plus stratégiques de l'économie européenne. Ce couplage politique entre économie et écologie induit plusieurs « changements discursifs » sur l'énergie, dont

> le verdissement du discours [dominant] sur la grande hydroélectricité, puis sur le nucléaire, non seulement dans le cas français, mais aussi en Allemagne. L'émergence des notions de « charbon propre » et d'« exploitation écologique des mines », ou le soutien apporté à de nouvelles techniques telles que la séquestration du dioxyde de carbone, constituent, quant à eux, des exemples de verdissement sur les énergies fossiles. (Évrard 2013, p. 244-245)

L'affichage écologique, ou « verdissement » de l'économie est un mot-écran efficace pour masquer des intérêts économiques sous couvert d'enjeux écologiques. Le mot-écran qui détourne la pensée se redouble d'un mot-valise – la « croissance verte » – qui « passe son contraire en contrebande » (Bihr 2007, p. 225). L'un des spectres les plus puissants du régime technicien – la croissance – se renforce ainsi en absorbant, de manière superficielle, les nouveaux enjeux écologiques. Certains économistes, tels Pierre-Noël Giraud, disent néanmoins de manière claire que « la croissance verte [...] est une réduction de la consommation matérielle » (Foucart 2014).

Mais, les cercles de la décision pensent encore fermement que le détour par les énergies renouvelables peut sauver la croissance matérielle. En particulier, « l'Allemagne et la France, toujours à la recherche d'un second souffle dans leur coopération » affichent les énergies renouvelables comme un objectif écologique de réduction de l'usage des hydrocarbures tout en poursuivant une politique « dure » de l'énergie caractérisée par une logique économique, une croissance de l'offre, une prédominance des énergies fossiles et nucléaires et une organisation centralisée sous forme de monopoles d'exploitation : EDF en France ; RWE, E.ON, et Vattenfall en Allemagne ; un encadrement étatique des coopératives et municipalités au Danemark, etc. (Évrard 2013, p. 19, 234). On retrouve pour l'énergie la notion de « camouflage » proposée par Gérard Dubey et Pierre de Jouvancourt (2018, p. 87) pour caractériser la numérisation du monde aujourd'hui. Les comportements de masse sont orientés et organisés grâce à des dispositifs de détournement et d'écrantage par les acteurs dominants de la société. À l'inverse, les critiques de la valorisation économique de l'écologie sont marginalisées par la « structuration asymétrique de la capacité d'agir » des acteurs (A. Stirling). Ce phénomène d'asymétrie est très marqué dans le domaine de l'énergie où les « acteurs historiques » disposent de « ressources économiques et politiques particulièrement importantes » leur permettant de contrôler leur pré carré par rapport aux concurrents émergents d'une part et aux citoyens européens et militants écologiques d'autre part (Aykut et al. 2017, p. 11-12). C'est ainsi que le secteur émergent des énergies renouvelables, initialement basé « sur des critères environnementaux (l'usage raisonné des ressources naturelles), sur une approche centrée sur la demande et sur la notion de diversification des sources d'énergie » est progressivement intégré au secteur électrique dominant, basé « sur des critères économiques (notamment le principe des économies d'échelle), sur une approche par l'offre d'énergie et la croyance dans une source d'approvisionnement dominante (charbon, nucléaire, gaz, etc.) » (Évrard 2013, p. 232).

6.2.3 Le stockage d'énergie aujourd'hui : une solution à quels problèmes ?

Les énergies renouvelables posent justement un problème d'exploitation aux acteurs historiques de l'électricité. Leur intégration en cours aux réseaux trans-européens de l'électricité constitue un défi trois fois

fondamental pour le régime technicien du temps présent. Elle menace, en effet, chacun des trois imaginaires opératoires au XX^e^ siècle pour le stockage de l'énergie (chapitre 5) : leur intermittence désorganise la régulation des réseaux de l'énergie ; leur incertitude déroute la prédiction industrielle ; leur nature extensive dérange la culture capitaliste de concentration et de centralisation.

Premièrement, les énergies renouvelables, comme le solaire, dorment la nuit ou, comme les marées, débrayent à mi-journée pour donner le temps aux estuaires de s'engorger. Leurs alternances quotidiennes produisent des flux périodiques. Les stocks sont inexistants dans le cas du solaire, discrets dans le cas des marées. Les forces naturelles, ces *intermittentes de l'énergie* défient la régulation journalière des réseaux de puissance (cf. 5.1). Deuxièmement, elles sont capricieuses : les courants d'air disparaissent quand ça leur chante ; les vagues s'aplatissent par temps calme ; les nuages voilent l'horizon technicien. Leurs rythmes aléatoires se jouent des prédictions futures et trahissent les espérances mathématiques. Ils déroutent les modélisations météorologiques, d'un jour ou d'une semaine à l'autre, et les modélisations climatiques d'une saison ou d'une décennie à l'autre. Aléatoires et incertaines, les forces naturelles déforment les cycles d'optimisation, débordent des cadres de dimensionnement et décalent les calendriers de planification (cf. 5.2). Troisièmement, les forces naturelles sont *environnantes* parce que la nature n'a pas pris soin de les mettre *en magasin* (chapitre 3). Aussi, leur ramassage dure aussi longtemps que la cueillette de brins d'énergie dispersés. Au mitan du monde, récalcitrantes et sauvages, les forces naturelles exigent, pour être enrégimentées, une incarnation locale, une conversion industrielle et une acculturation économique (cf. 5.3). Trois défis sont donc posés par l'intégration d'énergies renouvelables aux caractéristiques intermittentes, aléatoires et extensives : stabiliser les réseaux, optimiser l'offre et la demande, concentrer les productions.

Les acteurs du domaine sont conscients de ces défis. Que ce soit en Europe de l'Ouest ou en Amérique du Nord, le stockage de l'énergie est perçue comme la meilleure solution [6]. Un ancien directeur marketing d'EDF en poste chez Bolloré estimait en 2012 que le stockage d'énergie représentait « 90 % du potentiel [... de] l'équilibre entre offre et demande », soit un marché potentiel estimé à 500 milliards de dollars aux États-Unis (cité par Villareal 2014, p. 236-237).

La technostructure se montre optimiste, comme souvent. Par exemple, Jean-Louis Bal, président du Syndicat des énergies renouvelables, et Cédric Philibert (2013, p. 8-9) de l'Ademe, transmettent l'interprétation positive suivante de la situation. Se posant en experts du domaine, ils veulent rassurer sur des « problèmes réels souvent mal compris et surestimés ». Ils utilisent trois niveaux d'argumentation. Le premier niveau est technologique évidemment : aptitudes à prévoir les intermittences ; capacités de flexibilité des réseaux (interconnexion, gestion de la demande, adaptation de la production et stockage). Leur argumentaire investit aussi les temporalités en jeu : pratiques anciennes (et donc continuité historique) de la gestion des « variations de la demande » ; spéculation future sur « la progression attendue des ventes de véhicules électriques ou hybrides rechargeables » permettant de louer les batteries automobiles pour réguler le réseau (Bal et Philibert 2013, p. 13). Leur argumentation, enfin, est sémantique. Appeler le solaire et l'éolien « énergies intermittentes électriques » a pour effet rhétorique de sociabiliser les forces naturelles dans le milieu technicien. Leur interprétation est technocratique : une solution existe ; c'est une composition de dispositifs technologiques (prédictions, régulations) ; les experts montrent la voie, en donnant de la voix. Un dernier élément le confirme. Bal et Philibert (2013, p. 13) considèrent comme viables et souhaitables trois projets – Desertec, Transgreen, Plan solaire méditerranéen – présentant

6. Un rapport de l'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) dresse le bilan suivant : « Alors que les ressources d'énergie renouvelable comme le soleil et le vent fournissent une énergie propre au réseau, la puissance qu'elles produisent est souvent intermittentes. Une telle périodicité introduit des caractéristiques indésirables dans le circuit. En outre, la puissance issue de ces sources est souvent générée à des moments où elle est le moins nécessaire. Le stockage de l'énergie peut être utilisé pour résoudre ces deux problèmes. » (Institute of Electrical and Electronics Engineers 2015, p. 66)

une démesure environnementale : transporter sur des milliers de kilomètres la puissance électrique de zones ensoleillées de production (Afrique du Nord et Sahara) vers des milieux denses en consommation (Europe) à travers une mer et un désert.

Ainsi, la technostructure, à travers l'administration centrale (Ademe) ou des syndicats professionnels (des énergies renouvelables), appréhende le stockage d'énergie comme une solution aux trois défis de l'intégration massive des énergies renouvelables aux réseaux d'électricité. Elle rassemble ici le deuxième cercle de la décision (administrations centrales) et le troisième (syndicats professionnels) selon la typologie de Pierre Muller (cf. 1.3.4). Elle convainc également le premier cercle de la décision durant le mandat présidentiel de Nicolas Sarkozy (2007-2012). Celui-ci pousse la « décarbonation » sous les feux de la rampe. Il met sur l'agenda politique les voitures électriques à travers un « plan véhicule décarboné » destiné à soutenir le secteur automobile français (Renault, Peugeot-Citroën) en bénéficiant de l'expertise de Nissan et en soutenant par des financements publics les fabricants de batteries (Saft, Bolloré) et les infrastructures de recharge électrique (Villareal 2014, §3). Le quatrième cercle de la décision (parlements), dominé par l'Union pour la majorité présidentielle, valide le projet présidentiel.

Le néologisme « décarboné » est intéressant parce que c'est à la fois un mot-valise, qui dit le contraire du phénomène [7], et un mot-écran, qui masque un programme industriel derrière un paravent écologique. De manière similaire, une valorisation économique de l'écologie habite aussi les lois dites « Grenelle de l'environnement » de 2009. Les chambres parlementaires et les organes juridictionnels, quatrième cercle de la décision, font entrer le stockage de l'énergie en politique. Les deux dernières grandes lois de politique énergétique en font un enjeu public en France. La « Loi n°2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique » impute une responsabilité à la combustion des hydrocarbures dans les problèmes climatiques : « La lutte contre le changement climatique est une priorité de la politique énergétique qui vise à diminuer de 3 % par an en moyenne les émissions de gaz à effet de serre de la France. En conséquence, l'État élabore un "plan climat", actualisé tous les deux ans. » (Assemblée nationale 2005, art. 2) Après la maîtrise de la consommation, la diversification des approvisionnements et le développement de la recherche, le stockage (associé au transport) de l'énergie est le quatrième objectif législatif. Il correspond à deux modalités (figure 2.7) et deux fonctions (figure 2.8) distinctes. L'article 6 concerne la régulation géopolitique des stocks d'hydrocarbures sous forme chimique dans les cavités souterraines. Il précise un seuil minimum de pétrole stocké « équivalant à près de cent jours de consommation intérieure » en volume (Assemblée nationale 2005, p. 4). L'article 5 concerne la régulation électrique des réseaux de puissance dans le cadre d'une politique d'essor des forces naturelles et d'un héritage électronucléaire fort. Il souligne l'importance des recherches sur le stockage d'énergie pour « limiter les inconvénients liés à l'intermittence des énergies renouvelables et optimiser le fonctionnement de la filière nucléaire ».

En 2015, dix ans après la première loi liant en France énergie et climat, Ségolène Royal, alors ministre de l'Écologie, du développement durable et de l'énergie (2014-2017), fait adopter la loi « relative à la transition énergétique pour la croissance verte ». Cette loi « verdit » l'économie en la reliant à l'écologie. Elle s'appuie sur le Code de l'énergie élaboré à partir de 2005 et passé par ordonnance en 2011. Ce code relève du ministère de l'Économie, des finances et de l'industrie et de la ministre d'alors, Christine Lagarde (2007-2011). Il hybride les directives européennes sur le climat et la politique nationale de l'énergie. Il a été amendé à de nombreuses

7. Sacha Loeve et Bernadette Bensaude-Vincent (2018, p. 245) décortiquent l'emploi impropre et le contresens du mot « décarboné ». « Les hydrocarbures fossiles, du bois à l'anthracite et au pétrole, correspondent à des stocks de carbone réduit. Il s'agit donc bien de réduire le carbone. Mais soyons clair : "réduire" ne signifie pas diminuer la quantité de carbone. C'est réduire au sens de redox, c'est-à-dire abaisser le degré d'oxydation du carbone. L'urgence est donc moins de "décarboner" l'économie comme on l'entend dire que de ménager les proportions entre carbone organique et carbone oxydé. »

reprises jusqu'à aujourd'hui. La loi de 2015 réaffirme ainsi, à la suite de l'article L100-4 du code de l'énergie, l'objectif national de « réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030 et de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050 ». Cette Stratégie nationale bas-carbone, initiée en 2015 et réactualisée depuis, prévoit une baisse de 40 % de la consommation d'énergie finale en France sur la période 2020-2050, de quasiment 1 600 TWh à un peu moins de 1 000 TWh (RTE 2021, p. 11, 56). Dans le même temps, la production d'électricité devrait augmenter de 50 %, de 400 à 600 TWh.

Cette croissance de moitié de la production électrique requiert l'intégration des énergies renouvelables au parc électrique (et dans certains scénarios une part importante de nucléaire supplémentaire). Compte-tenu des caractéristiques intermittentes, aléatoires et extensives des forces de la nature, ceci nécessite une flexibilité accrue du réseau pour redistribuer la puissance dans l'espace et le temps. En 2020, la puissance électrique installée en France est de l'ordre de 130 GW. D'après la Stratégie nationale bas-carbone, elle devrait croître autour de 200 GW en 2050. Le Réseau de transport d'électricité a produit un rapport sur les *Futurs énergétiques 2050*, estimant que l'intégration des énergies renouvelables nécessiterait une flexibilité de puissance comprise entre 28 et 68 GW. Une telle fourchette représente entre 14 % et 34 % de la puissance totale installée en 2050, contre 5 % aujourd'hui (majoritairement STEP). La recomposition que cela implique repose sur cinq variables d'ajustement (appelées « leviers de flexibilité »). Parmi elles, quatre dépendent du stockage d'énergie : hydroélectrique, à travers une préconisation d'augmentation de 5 à 8 GW de la puissance STEP ; nouvelles centrales thermiques décarbonées, dont l'hydrogène (bas-carbone) serait un combustible possible ; batteries pour le stockage d'énergie photovoltaïque et le pilotage du réseau ; nouveaux usages de consommation dont les véhicules électriques et le fonctionnement d'électrolyseurs pour la production d'hydrogène (RTE 2021, p. 37). Seule la dernière variable, le degré d'interconnexion avec les pays voisins, ne fait pas intervenir des logiques de stockage d'énergie.

Le domaine de l'énergie est héritier des pratiques de planification industrielle du xx^{e} siècle en France (cf. 5.2.3). Plusieurs leviers institutionnels ont été mis en place par le premier cercle de la décision (présidents, gouvernements) et la quatrième (parlements, juridique) pour mettre en place cette planification. J'en retiendrai seulement deux en raison de leur importance pour le stockage d'énergie. Le premier est le code de l'énergie. Sur la période 2005-2015, il mentionne plusieurs enjeux de « stockage » : déchets radioactifs ; produits pétroliers, régulation à long terme pour le pétrole, régulation saisonnière pour le gaz ; chaleur ; « stockage géologique de dioxyde de carbone » (Ministère de l'Économie 2011). La loi de 2015 ajoute de nouvelles modalités de stockage vis-à-vis des gaz à effet de serre. L'article 14 précise que le « stockage de carbone dans les matériaux » et les « matériaux biosourcés » contribuent « significativement au stockage de carbone atmosphérique et à la préservation des ressources naturelles » (Assemblée nationale 2015, p. 6). Le code de l'énergie (2011, art. L.141) prévoit aussi une « programmation pluriannuelle des investissements de production » pour l'électricité, le gaz naturel et la chaleur. Elle est dépendante de rapports experts qui traduisent la Stratégie nationale bas-carbone sous la forme de scénarios dessinant les futurs énergétiques de la France à l'horizon 2050. Il y a là un nœud techno-politique important qui articule savoirs et pouvoirs dans la mesure où le choix des variables et la valeur des données influencent directement les résultats des scénarios et, par conséquent, les recommandations qui parviennent aux cercles de la décision. Or, les hypothèses, méthodes et résultats des scénarios varient en fonction des institutions qui les construisent : établissements publics (Ademe), sociétés industrielles (RTE), sociétés de conseil, etc.

Le second outil de la politique énergétique de la France est la Commission de régulation de l'énergie (CRE). Appelée Autorité des ententes jusqu'en 2000, la Commission de régulation de l'énergie collecte des données

nationales, arbitrent des différends entre acteurs du secteur et fait office de police des réseaux de transport et de stockage d'électricité, de gaz naturel et de dioxyde de carbone (géologique) (Ministère de l'Économie 2011, art. L.134). Elle incarne une forme d'optimisation de l'offre et de la demande d'énergie en régime technicien. Électricité de France a longtemps eu la mainmise sur les régulations offre-demande à l'échelle nationale que ce soit par la techno-politique de la production électrique (nucléaire) et du stockage d'énergie (STEP) ou par la politique tarifaire (cf. 5.2.4). La libéralisation de l'énergie issue des cadrages de l'Union européenne réduit l'importance quantitative des tarifs incitatifs au début du XXIe siècle. EDF supprime plusieurs tarifs « bleus » de son offre commerciale : EJP pour les particuliers depuis 1998 ; TEMPO pour les industriels depuis 2004 (Ademe, Consultants et al. 2017, p. 14). Du côté industriel, la baisse des capacités d'effacement s'explique aussi par la désindustrialisation du territoire national et la moindre attractivité des tarifs « bleus ». En effet, disposer de capacités d'effacement a un coût. Un centre industriel doit assurer la maintenance et l'opération de « groupes d'autoproduction » lors des pics de consommation d'électricité s'il souhaite produire en continu et l'horizon législatif d'« interdiction réglementaire d'utilisation des groupes électrogènes » réduit les perspectives d'autoproduction par énergie fossile (Ademe, Consultants et al. 2017, p. 14).

Le déploiement des énergies renouvelables remet l'effacement au goût du jour. Le code de l'énergie insistait sur la mise en place pour l'électricité de « prix différents suivant les périodes de l'année ou de la journée » et des incitations pour « limiter » les consommations aux « périodes où la consommation de l'ensemble des consommateurs est la plus élevée » (Ministère de l'Économie 2011, art. L.341-4). Quatre ans plus tard, la loi sur la transition énergétique est encore plus détaillée. Elle valorise les clients industriels ayant un « profil de consommation prévisible et stable ou anticyclique » en abaissant jusqu'à 50 % le prix du transport de leur électricité (Assemblée nationale 2015, art. 157). Elle vise un nouveau type de planification. L'article 160 charge la Commission de régulation de l'énergie d'informer le « Parlement des orientations qu'elle entend mettre en œuvre pour que les tarifs [de l'électricité ...] incitent à améliorer la sécurité d'approvisionnement et la qualité de fourniture, favorisent la limitation des pointes d'injection et de soutirage et contribuent au développement des flexibilités, parmi lesquelles les moyens de stockage d'électricité décentralisés » (Assemblée nationale 2015, art. 160). La « décarbonation » de l'énergie risque en effet de déstabiliser les infrastructures électriques conçues au tournant du XXe siècle comme des réseaux connectant de gros centres de production, les *centrales* thermiques. La multiplication de petits et moyens centres de production et leur dissémination sur l'ensemble du réseau provoquent, d'après certains acteurs dominants du secteur énergétique, une mutation profonde depuis les années 2010 (GridWise-Architecture-Council 2019, p. 12-15).

6.2.4 Réseaux « intelligents » et « décarbonation » de l'énergie

L'enjeu économique d'une telle reconfiguration est immense au niveau mondial. Il est tel que les pays les plus riches interviennent dans le secteur de l'électricité pour garder un rapport de force à leur avantage. Considérons la techno-politique des États-Unis, qui oriente la politique énergétique à l'échelle de la planète, avant de revenir au cas français.

Interopérabilité et stockage multimodal des réseaux électriques

Aux États-Unis, le département de l'Énergie établit dans les années 2000 un conseil d'experts et d'industriels spécialistes de l'architecture des réseaux, le GridWise Architecture Council (GWAC). Le but de ce *think tank* industriel est de « promouvoir et faciliter l'interopérabilité entre les nombreuses entités interagissant avec le système électrique de puissance » (GridWise-Architecture-Council 2019, p. i). Dans le contexte d'intégration

des énergies renouvelables intermittentes, l'interopérabilité des systèmes devient un impératif d'économie politique. L'Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), principale organisation professionnelle de l'électricité et de l'électricité aux États-Unis, publie d'ailleurs en 2015 un *Guide pour l'interopérabilité des systèmes de stockage d'énergie intégrés à l'infrastructure de puissance électrique*. La cinquantaine d'auteurs, membres de l'IEEE, traitent de l'interopérabilité dans l'acception large de « capacité de deux ou plus réseaux, systèmes, dispositifs, applications ou composants à échanger avec l'extérieur et à utiliser l'information de manière aisée et sûre » (Institute of Electrical and Electronics Engineers 2015, p. 4). Le guide s'adresse à toutes les parties prenantes (*stakeholders*) : gestionnaires et opérateurs de réseaux électriques certes, mais également professionnels et experts des techniques de l'information et la communication, énergéticiens, fabricants de batteries, etc. Alors que les États-Unis n'ont pas ratifié le protocole de Kyoto, la notion de « transition énergétique » prend un sens bien précis pour l'IEEE et le GridWise Architecture Council. Pour le secteur électrique, *cette* transition doit infléchir – ralentir la hausse voire diminuer – les émissions de gaz à effet de serre (monoxyde et dioxyde de carbone, méthane, etc.) en intégrant une part croissante d'énergies renouvelables – photovoltaïque, éolien, géothermie et biomasse – sans remettre en cause la poursuite de la croissance de l'offre électrique. Le GridWise Architecture Council structure le cadre intellectuel de cette transition énergétique-là, qu'il nomme « schème de l'énergie transactive » (*Transactive Energy Framework*). Un exemple de cadrage conceptuel forgé par ce conseil des « sages du réseau » (*grid-wise*) est reproduit sur la figure 6.3.

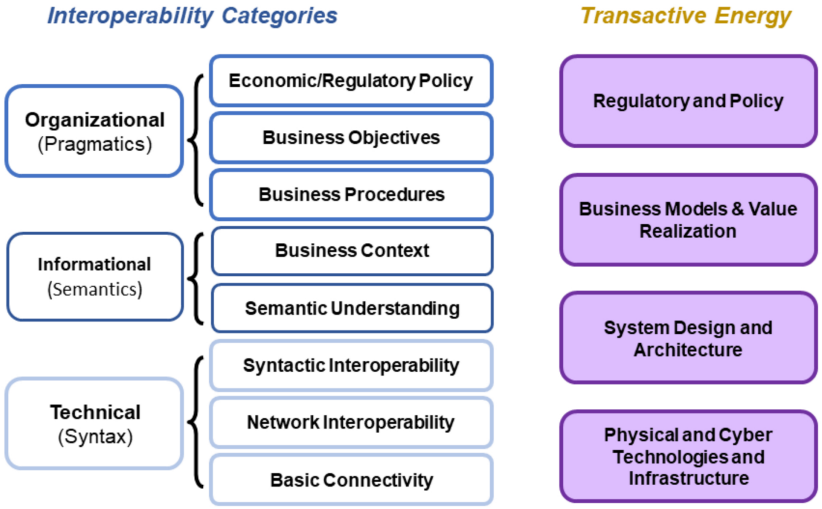

Figure 6.3 – Schème de l'énergie transactive (GridWise-Architecture-Council 2019, p. 25)

Le cadre de pensée relève des sciences de l'information et de la gestion. Il empile trois niveaux d'opération : technique, informationnel et organisationnel. Chaque niveau est subdivisé en deux ou trois sous-couches d'interopérabilité : entre artefacts et réseaux d'abord (syntaxe) ; entre signification et contexte commercial ensuite (sémantique) ; entre procédures économiques et régulations politiques enfin (pragmatique). Ceci se traduit, à droite de la figure 6.3, par quatre domaines de l'énergie transactive : infrastructures matérielles, architecture et conception, commerce, régulations. Alors que le cadre ne retient que des aspects économiques et organisationnels, le GridWise Architecture Council (2019, p. 1-2) dit fournir « une base neutre » pour la réflexion, la discussion et l'action politique. Je ne voudrais pas faire de procès d'intention car le conseil souligne aussi l'importance d'une confrontation de points de vue multiples. Sont cités économistes, régulateurs, politiques, vendeurs, intégrateurs, gestionnaires de centrales, opérateurs de réseaux, chercheurs et autres parties

prenantes. Le déni de démocratie tient plutôt au fait que la méthode prise comme base des discussions porte une vision située du monde. La définition de la notion d'« énergie transactive » le dit de manière explicite : « Un système de mécanismes économiques et de contrôle qui permet l'équilibre dynamique de l'offre et la demande à travers la totalité de l'infrastructure électrique en utilisant la valeur comme paramètre opérationnel clé. » (GridWise-Architecture-Council 2019, p. 12) Un tel schème de pensée est typique du régime technicien par sa focale régulatrice dans une perspective d'optimisation de la valeur économique. Une nouvelle fois, camouflée par l'outil routinier, la pensée technicienne trace la route, ferme des imaginaires, canalise la solution. Or, le choix des outils est rarement mis en discussion de manière publique et contradictoire. Il est un levier des milieux techniciens et gestionnaires pour influencer les décisions politiques par leurs savoir-faire professionnels à la manière des corps de l'État en France (Thoenig 1987, p. 37).

Il n'en reste pas moins que le problème que se donne le milieu technicien est ardu. Plus précisément, le projet de « décarbonation » de l'énergie pose trois problèmes de gestion des réseaux : stabiliser les infrastructures, optimiser l'offre et la demande, concentrer les productions renouvelables (6.2.3). Il fait réapparaître le spectre ancien de la maîtrise de l'énergie dans l'espace et dans le temps (cf. 3.3.1). À la fin du XIX^e^ siècle aux États-Unis, Thomas C. Mendenhall (1887, p. 213-214), professeur, expert et administrateur de l'électricité, décrit la maîtrise spatiale de la puissance comme « l'espoir et l'aspiration de tout ingénieur mécanicien intelligent ». Il conclut par un constat d'échec des batteries de stockage et des accumulateurs électriques pour y parvenir, malgré les efforts « d'innombrables sociétés par actions, représentant une quantité fabuleuse de capital ». Alors que les réseaux électriques sont en cours de construction dans les métroples de son temps, Mendenhall ne voit pas que leur déploiement fournira une réponse au problème du transport d'énergie sur de longues distances, bien au-delà des désirs et des espérances des ingénieurs-mécaniciens du XIX^e^ siècle.

En revanche, la maîtrise des temporalités de l'énergie inquiète les ingénieurs-électriciens tout au long du XX^e^ siècle jusqu'à aujourd'hui. En France, le Réseau de transport d'électricité (2021, p. 6) avertit que « les réseaux électriques doivent être rapidement redimensionnés pour rendre possible la transition énergétique ». Aux États-Unis, le GridWise Architecture Council (2019, p. 12-15) propose même un changement de « modèle » de gestion électrique via l'« énergie transactive » pour s'adapter à la décentralisation croissante des réseaux par la multiplication des petites et moyennes unités de production de puissance. Cette décentralisation énergétique ramène les batteries électriques sur la scène politique pour domestiquer la récalcitrance temporelle de l'énergie. De fait, les batteries ont assuré la régulation des réseaux locaux d'électricité depuis leurs constructions dans la décennie 1880. Ce qui s'est étoffé depuis l'époque de Mendenhall, c'est le nombre et la nature des modes de stockage (figure 2.7). Le stockage d'énergie est devenu multimodal. Sont ainsi évoquées aujourd'hui de multiples potentialités : batterie, supercapacité, transfert par pompage, air comprimé, volant d'inertie, chaleur, superconducteur et hydrogène (Institute of Electrical and Electronics Engineers 2015, p. 7-8). Mais, tous ces modes sont contraints, comme le regrette à propos des batteries le professeur de Développement durable au Collège de France, Jean-Marie Tarascon (2010, §28), par « la lenteur des progrès dans le domaine du stockage de l'énergie ». La lenteur fait problème pour le régime technicien quand l'accélération fait problème dans la société civile (Rosa 2005).

Si aucun mode de stockage n'apporte satisfaction au désir technicien et que l'option multimodale progresse, c'est parce que la gestion d'un parc électrique pénétré par les énergies renouvelables doit juguler un nombre croissant de temporalités. Une chercheuse en ingénierie système reconnue de Berkeley, Alexandra Von Meier (2012, p. 11), représente ces multiples temporalités sur la figure 6.4. L'utilisation d'une échelle logarithmique sur l'axe des temps fait apparaître trois plages de phénomènes en première lecture : de la microsonde à la seconde,

équilibrage quasi-instantané des signaux électriques (AGC, signifiant contrôle automatique de génération) ; des minutes aux heures et aux jours, régime des forces naturelles (solaire, éolien, hydraulique) ; des années aux décennies, planifications industrielles et cycles planétaires du carbone. Il n'est donc pas étonnant que le temps de réponse devient une caractéristique centrale d'un dispositif de stockage au même titre que la puissance instantanée, le stock d'énergie et l'efficacité de conversion (Institute of Electrical and Electronics Engineers 2015, p. 100).

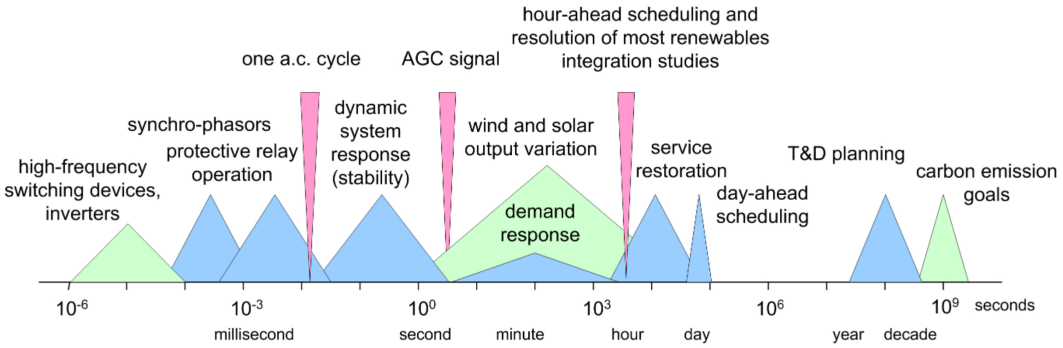

FIGURE 6.4 – Multiples temporalités de la gestion d'un parc électrique (Von Meier 2012, p. 11)

Les gestionnaires de réseaux espèrent lisser cette imbrication de temporalités par un savant cocktail de stockage-déstockage d'énergie en temps réel. Ils placent ainsi le stockage d'énergie au cœur de leur stratégie commerciale de croissance de l'offre électrique dans le cadre de la « décarbonation » de l'économie. Le *Guide* de l'IEEE prédit une ubiquité généralisée du stockage de l'énergie dans les réseaux de puissance du futur :

> Alors que les renouvelables prennent une part plus grande de la capacité de génération et dans les lieux où les systèmes électriques ne peuvent soutenir la demande croissante, les systèmes de stockage d'énergie pourraient fournir des services et des améliorations aux réseaux de puissance. Ainsi, « il se pourrait un jour que le stockage soit partout dans nos systèmes de puissance » [*Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications*, 2003]. On croit que le stockage d'énergie « sera un atout clé dans le réseau intelligent en évolution » [D. Rastler, 2012] (Institute of Electrical and Electronics Engineers 2015, p. 6).

Revenons au cas de la France. Là aussi, des institutions expertes et professionnelles, en accord avec les cercles législatifs et exécutifs, décident de la manière dont les énergies renouvelables sont intégrées aux réseaux de puissance [8]. Là aussi, la perturbation des temporalités médianes des parcs électriques – de la minute à l'année pour simplifier – par les forces naturelles reconfigure la régulation des réseaux électriques. Alors qu'aux États-Unis le département de l'Énergie collabore avec des institutions expertes en-dehors du cadre fédéral telles que

8. Une comparaison des techno-politiques de l'énergie et de l'hydrogène en France et aux États-Unis serait bienvenue même si elle dépasse le cadre de cet essai. Un sujet de thèse pourrait interroger l'articulation entre les niveaux sociologique et épistémique des politiques énergétiques en « démocratie technique ». Le premier niveau relevant des sciences politiques s'intéresserait à la manière dont les cercles de la décision interagissent avec les institutions parlementaires, administratives et industrielles ainsi que les agences de conseil et les *think tanks*. Le second niveau relevant de l'histoire des technosciences analyserait la construction des outils cognitifs (méthodes, représentations, imaginaires) et leurs usages à des fins politiques d'organisation du monde matériel et vivant. L'originalité du sujet tiendrait à l'intersection et à la confrontation entre les deux niveaux, où l'on verrait des formes appliquées de savoirs imposer des formes administratives de pouvoir en-dehors du contrôle citoyen, voire même en l'absence de conscience collective d'un tel déni démocratique. Une telle thèse matérialiserait certaines formes d'existence et certains rouages d'action du régime technicien du temps présent.

l'IEEE ou le GridWise Architecture Council, en France les gouvernements s'appuient sur les corps techniques de l'État, dont celui des Ponts et Chaussées pour le secteur de l'énergie (Thoenig 1987, p. 36-37). L'Ademe, en partenariat avec des cabinets de conseil, publie deux rapports détaillés sur le problème de l'intégration du renouvelable, respectivement intitulés *Étude sur le potentiel du stockage d'énergies* (Ademe, Artelys et al. 2013) et *L'effacement de consommation électrique en France* (Ademe, Consultants et al. 2017). Contrairement à la communication du GridWise Architecture Council, les rapports de l'Ademe ne mentionnent pas de mutation systémique mais insiste sur la continuité des réseaux de puissance malgré la pénétration grandissante des énergies renouvelables.

Considérons chacun des trois problèmes de régulation d'un réseau électrique : la maîtrise de l'équilibrage phénoménologique, la gestion des arrêts de production, le contrôle des profits d'exploitation (cf. 2.3.2). Premièrement, l'introduction de renouvelable perturbe l'équilibrage des réseaux. Celui-ci concerne les réponses du système aux fluctuations les plus rapides, de quelques secondes à une demi-heure et correspond à une réserve d'électricité dite « primaire », de l'ordre de 600 MW en France. Le rapport de 2013 indique que les technologies par volants d'inertie et par batteries seraient les solutions les moins chères pour répondre à l'augmentation de renouvelable. La « projection du coût d'investissement à horizon 2030, pour 1/2 heure de stockage, [... est] à 180 k€/MW/an pour des volants d'inertie (avec une hypothèse d'amortissement de 20 ans) et à 80 k€/MW/an pour une batterie Li-ion (avec une hypothèse d'amortissement de 10 ans) » (Ademe, Artelys et al. 2013, p. 15). L'installation de ces quantités supplémentaires de réserve d'énergie ne semble pas être un problème.

Deuxièmement, le renouvelable repose la question de la gestion des arrêts de production qu'ils soient prévus pour la maintenance ou inopinés à travers des pannes. Des divergences fortes du système électrique en termes de fréquence ou de puissance pourraient induire « une panne généralisée en cascade » (*a cascading blackout*) à une échelle continentale (Institute of Electrical and Electronics Engineers 2015, p. 53-54). Le caractère extensif des forces naturelles rend la panne d'un artefact moins problématique dans la mesure l'absence d'une éolienne (10 MW) ou d'un panneau photovoltaïque ne perturbe pas grandement l'équilibre des puissances contrairement à l'arrêt inopinée d'une centrale nucléaire (800 MW). Mais, leur caractère intermittent implique des absences de forces de manière périodique : la nuit ou par temps couvert pour le photovoltaïque, par temps calme pour l'éolien. On passe ainsi au troisième et plus important problème : l'optimisation économique de l'exploitation des réseaux.

Le rapport de 2017 identifie trois types d'incertitude gênant l'optimisation de l'équilibrage entre production et consommation (Ademe, Consultants et al. 2017, p. 10-11). La première incertitude n'est pas liée aux énergies renouvelables mais aux fluctuations de consommation. Tout en étant partiellement prévisible en fonction des habitudes socio-économiques liées aux rythmes journaliers, hebdomadaires et saisonniers, la demande varie aussi en fonction d'aléas climatiques. Le Réseau de transport de l'électricité (RTE) estime qu'« en cas de vague de froid, 1° C de moins représente une augmentation de la consommation de près de 2 400 MW », soit l'équivalent de trois tranches nucléaires de taille moyenne. Ces aléas climatiques jouent aussi du côté de la production renouvelable provoquant des « arrêts de fonctionnement non anticipés » et des perturbations de l'offre. Enfin, la troisième incertitude croît directement avec la part de renouvelable dans la production globale dans la mesure où la production des énergies renouvelables (solaire, éolien) n'est pas connue en temps réel mais seulement « anticipé[e] de manière relativement satisfaisante ». C'est cette incertitude-là qui oblige les gestionnaires de réseau « à moyen terme [à] augmenter les besoins de flexibilité nécessaires pour la gestion de l'équilibre du réseau ».

Face à ces incertitudes, le rapport propose quatre « outils de rééquilibrage » des réseaux. Les deux premiers

modulent la production, les deux derniers redistribuent la consommation. Le premier outil est le transfert d'énergie par pompage (STEP) historiquement majoritaire (cf. 5.2.4). C'est le plus répandu à l'échelle mondiale des modes de stockage de l'électricité des réseaux : en 2010, on dénombrait 200 stations de transfert d'énergie par pompage dans le monde, représentant 100 GW de puissance, soit 3 % de la production totale installée (Chen et al. 2009, p. 295 ; Camara 2011, p. 30). D'après les chiffres de l'Agence internationale de l'énergie(IEA) [9], la capacité de stockage par pompage a rapidement augmenté au cours des années 2010. Elle atteint 153 GW fin 2017, soit 2 % de la puissance électrique mondiale. Un supplément de 26 GW est prévu sur la période 2018-2023. Jusqu'à récemment, le mode de transfert par pompage hydraulique était le seul économiquement rentable (Ademe, Artelys et al. 2013, p. 200). D'autres modes de stockage sont désormais envisagés : batteries, hydrogène et air comprimé (Ademe, Consultants et al. 2017, p. 10). Le stockage par batteries croît rapidement à cause de la flexibilité qu'il assure aux réseaux électriques. Estimée à 17 GW environ en 2020, la capacité mondiale devrait plus que doubler en cinq ans (2018-2023) pour approcher 40 GW fin 2023. Une experte de l'IEA, Claudia Pavarini (2019) explique que, si la demande mondiale en électricité devrait augmenter de 20 % sur la décennie 2020-2030, la flexibilité des réseaux devrait augmenter de 80 % à cause de l'intégration des productions photovoltaïques et éoliennes aux systèmes électriques. Son analyse s'appuie sur les rapports *World Energy Outlook* de l'IEA. Le rapport de 2018 prévoit que le stockage par batteries devrait décupler pour atteindre 400 GW en 2040. Il explique cette croissance exponentielle par l'absence de contraintes de localisation (contrairement aux STEP), une plus grande modularité des batteries (par rapport aux barrages) et la baisse du prix des batteries. Les batteries lithium-ion devraient assurer le stockage de courte durée (80 % des capacités) tandis que les batteries sodium soufre et les batteries à flux fourniraient un stockage de plus longue durée. Le coût du stockage par batteries neuves pourrait être divisé par deux en dix ans pour atteindre 100 dollars par kWh en 2030 sans parler des possibilités de réutiliser des batteries d'occasion (Pavarini 2019). Le deuxième outil de rééquilibrage est le recours aux centrales électriques, qu'elles soient thermiques ou hydroélectriques, puisque leur production de puissance est modulable en fonction des besoins de consommation. Ces centrales sont dites « dispatchables ». Le troisième outil redistribue spatialement la demande en utilisant les interconnexions frontalières, encouragées par les politiques européennes de l'énergie (6.2.2). Le quatrième et dernier outil consiste à redistribuer dans le temps la consommation, ce qu'EDF appelle « effacement » depuis la création des contrats EJP en 1982. L'Ademe (2017, p. 12) mentionne deux types d'effacement à explorer : l'auto-production d'une part, la diminution effective de la consommation d'autre part.

Contrairement au GridWise Architecture Council qui annonçait un nouveau modèle de gestion des réseaux, le rapport de l'Ademe (2013, p. 14) se montre très confiant. Il souligne « une bonne résilience à une introduction conséquente d'énergies renouvelables ». Alors que la puissance installée est de l'ordre de 110 GW en France, les scénarios de l'Ademe prédisent une bonne stabilité du réseau jusqu'à 46 GW d'éolien (contre 16 GW en 2019) et 33 GW de solaire (contre 10 GW). Ceci s'explique par la composition particulière du « mix électrique » de la France. La forte proportion d'électronucléaire (environ 70 %) assure une base de production stable au cours du temps, couplée à une réactivité forte du fait de la grande capacité de stockage hydroélectrique, environ 16 % de la production totale, soit par transfert direct, 4,3 GW, soit par modulation avec de l'hydraulique avec réservoir, 13 GW. Ce bon équilibrage du réseau « dégrade la valeur des capacités de stockage d'électricité supplémentaires » (Ademe, Artelys et al. 2013, p. 12). L'ampleur du défi d'adaptation à la « décarbonation » est ainsi fortement dépendante de l'état des lieux antérieur du réseau à travers le « mix électrique ». Ceci explique en partie que la rhétorique de l'Ademe souligne une continuité structurelle des

9. Ces données proviennent du site internet officiel de l'IEA : https://www.iea.org/

réseaux vis-à-vis des sources d'énergie alors que le GridWise Architecture Council annonce un changement de modèle de la gestion des infrastructures de l'électricité. Ces transformations des mix énergétiques et la généralisation de l'interopérabilité entre réseaux ont été popularisées aux États-Unis par l'expression *smart grid*, traduite en français par « réseau intelligent ». De quelle « intelligence » parle-t-on ici ?

Une « intelligence » des réseaux pour piloter la demande

Au cours de la décennie 2010, on détecte une reconfiguration des perceptions de l'électricité. Alors que les praticiens avaient l'habitude de juger qu'un courant était « sale » (*dirty power*) parce qu'il nécessitait des services système (Chen et al. 2009, p. 293), les législateurs s'inquiètent à leur tour de la « qualité » de l'électricité issue des forces naturelles (Assemblée nationale 2015, art. 160). Ils interviennent en faveur d'une « flexibilité » de la production électrique. Cette sur-législation de l'électricité s'explique par les enjeux de gestion des réseaux à l'heure de la« décarbonation » de l'énergie. La multiplication des lieux de production reconfigure l'architecture spatiale du réseau en « décentralisant » la puissance produite et consommée. Les lieux de stockage d'énergie sont eux aussi délocalisés sur le réseau. La réserve d'énergie – issue de la production ou du stockage – qui peut être drainée lors d'une panne ou d'un pic de consommation est plus « distribuée » sur le réseau. La « distribution » désigne une entente commerciale entre les différents opérateurs-énergéticiens pour gérer les problèmes d'équilibrage des réseaux « décentralisés » (GridWise-Architecture-Council 2019, p. 15).

Le schème de pensée est directement importé du secteur numérique. On opère via « un nuage commun virtualisé » d'énergie (*a « virtualized » pool cloud*) (Institute of Electrical and Electronics Engineers 2015, p. 73) comme les « nuages numériques » (*cloud computing*) de stockage de données du « web 2.0 » [10]. Les entreprises dominantes de l'électricité contrôlent ainsi des « nuages virtuels » de stockage d'énergie comme les entreprises dominantes du numérique contrôlent des « nuages numériques » (*cloud computing*) de stockage de données. Dans les deux cas, ces dispositifs matériels et commerciaux rendent service aux usagers tout en faisant écran à leur connaissance de l'architecture. Il y a déconnexion par construction entre les lieux physiques – centres de données, centres de stockage – et les services achetés – espaces de stockage numérique accessibles, durée continue de puissance électrique délivrée. Dans les deux cas, la maîtrise des algorithmes – des dispositifs d'interrogation des ressources du web 2.0, des dispositifs d'optimisation de charge-décharge des réserves – assure le contrôle aux entreprises dominantes et coupe les usagers de réalités matérielles. Opacifier les modalités d'accès aux savoirs sur le technocosme renforce ainsi la « structuration asymétrique de la capacité d'agir » des acteurs (A. Stirling). Forts de cette asymétrie de construction, les acteurs historiques organisés en oligopoles d'exploitation n'ont plus besoin de défendre la centralisation des réseaux. Ils maintiennent les rapports de domination à leur profit par la maîtrise exclusive des moyens techniques et financiers pour gérer un réseau complexe et décentralisé. Comme dans les années 1930 à l'échelle régionale de l'UPEPO dans le sud-ouest de la France (cf. 5.1.1) ou en 1940 lors de l'interconnexion nationale à des fins militaires (cf. 5.2.3), les centres répartiteur d'électricité (*dispatchers*) demeurent les principaux nœuds de pouvoir parce qu'ils distribuent la puissance à la demande (dans le temps) et suivant différents sous-réseaux d'énergie (dans l'espace).

L'architecture des réseaux électriques subit une reconfiguration importante par multiplication des ramifications spatiales. Plusieurs jeux d'échelles ont déjà été analysés sur la période 1890-2010. L'échelle microscopique a montré la difficile gestion des flux et des stocks d'énergie à l'échelle de la centrale de Hartford à la fin du XIX siècle dans l'est des États-Unis (cf. 4.2.4) ainsi que la division du travail au sein d'une usine dans la

10. Le web 2.0 désigne la version raffinée de l'internet depuis les années 2000 faisant suite à la version première du « world wide web ». La simplicité d'utilisation et la diversité des fonctions d'usage ne doivent pas faire oublier la complexité systémique d'internet derrière l'écran d'un ordinateur ou des discours commerciaux.

France du début du xx^{e} siècle (cf. 4.3.1). L'échelle mésoscopique a souligné les enjeux d'économie politique et d'industrialisation de la houille blanche dans les montagnes françaises au début du xx^{e} siècle (cf. 4.3 ainsi que l'interconnexion des territoires du sud de la France dans les années 1930 entre houille noire et houille blanche (cf. 5.1.1). L'échelle macroscopique a insisté sur le déploiement des « réseaux trans-européens » de l'énergie depuis le traité de Maastricht de 1992 (cf. 6.2.2). Ces hétérogénéités d'échelle de l'électricité continuent d'exister aujourd'hui. Ce qui est nouveau, c'est la multiplication d'agrégats spatiaux qualifiés de « ressources d'énergie distribuée ». Le GridWise Architecture Council (2019, p. 5-6) décrit une si grande « prolifération de ressources d'énergie distribuée de différentes capacités » que même la direction d'écoulement des flux d'électricité est mal connue alors que les réseaux originels supposaient un flux orienté des centrales de production vers les centres de consommation. Cette redistribution spatiale des puissances produites, stockées et consommées fabrique de la complexité. « Ainsi, les chemins de l'information, les points de connexion et les points de contrôle augmentent en nombre et deviennent extrêmement complexes » (GridWise-Architecture-Council 2019, p. 8). Le GridWise Architecture Council (2019, Annexe A, p. 5) parle de « réseaux maillés » (*mesh networks*) pour rendre compte de la densification des lignes et des nœuds. L'Ademe (2017, p. 175) propose le terme de « centrale de production virtuelle » (*virtual power plant*) pour attirer l'attention sur la perte de rapport sensible aux réseaux électriques. Ces centrales de production virtuelle assemblent « des capacités de production ou d'effacement décentralisées (micro-cogénérations, centrales photovoltaïques, petite hydro, éoliennes, effacement, stockage...) ». Elles sont gérées par une nouvelle catégorie d'électriciens : les « agrégateurs ». Un agrégateur a un rôle de pilotage « intermédiaire entre des productions ou des consommations décentralisées d'une part et les marchés nationaux (énergie, capacité) d'autre part » (Ademe, Consultants et al. 2017, p. 174). Leur arrivée modifie les modèles économiques de gestion des réseaux électriques (Fumagalli 2016, p. 2). Ils sont rétribués pour les services qu'ils fournissent aux gestionnaires de réseaux, notamment en équilibrant les puissances entre offre et demande sur un périmètre donné.

Pour gérer de tels réseaux hétérogènes et intégrés, les technologies de l'information sont présentées comme aussi vitale que le « système nerveux » pour un organisme vivant (GridWise-Architecture-Council 2019, p. v). Les ressources d'énergie distribuée sont également cruciales pour assurer l'équilibrage dans le temps et dans l'espace de l'offre et de la demande. Elles assemblent des unités de production (photovoltaïque, éolien, etc.) et des unités de stockage afin de fournir la puissance au réseau au moment où la valeur du kilowatt est maximale (GridWise-Architecture-Council 2019, p. 25-26). Le service rendu à l'opérateur du réseau décentralisé est valorisé économiquement, et non plus l'action en soi de génération d'électricité. Car, le service au réseau contribue à assurer sa « résilience » et son fonctionnement en continu. Dans un cas limite, certaines ressources d'énergie distribuée peuvent se déconnecter, de manière temporaire ou permanente, du réseau principal pour former des agrégats « en îlots » si le calcul économique rend l'option plus rentable (Institute of Electrical and Electronics Engineers 2015, p. 77-78 ; GridWise-Architecture-Council 2019, p. 4). Ces îlots électriques sont aussi appelés « micro-grids ».

Voici donc le nouveau paysage électrique : un réseau décentralisé, distribué selon des agrégats de taille variable, pouvant être autonomisés partiellement ou totalement et pouvant être gérés à des constantes de temps de plus en plus faibles, quasiment en temps réel. C'est ce qu'on appelle un « réseau intelligent » en français. L'adjectif « intelligent » est ici un mot-valise car il dit le contraire de la réalité. Alors que l'intelligence peut être définie comme l'aptitude à sortir de la boîte, ici, le réseau « intelligent » ne fait qu'optimiser des mécanismes au sein de la boîte. Même si le calcul d'optimisation est compliqué, il ne s'agit que d'un simple processus de régulation : « "être intelligent" signifie ici "garder les flux énergétiques continus malgré toute

intermittence" » (Dubey et Jouvancourt 2018, p. 112-113). La traduction française n'est d'ailleurs pas appropriée puisque *smart* en anglais signifie vif, élégant, malin ou astucieux. Plus qu'une intelligence que des ingénieurs-démiurges auraient implantée dans les réseaux, c'est plutôt d'une astuce d'épicier dont il s'agit. Car, derrière l'écran d'une élégante science-fiction où les artefacts seraient devenus « intelligents », se joue une intrigue commerciale pour orienter la consommation d'électricité des usagers au profit des gestionnaires et des opérateurs de réseaux. La loi de 2015 parle clairement d'un pilotage de la consommation électrique. De même, le rapport de l'Ademe (2017, p. 175) sur les stratégies d'effacement définit un réseau « intelligent » comme le « pilotage du système électrique flexible afin de faire face à l'intégration des énergies renouvelables variables et le développement de nouveaux usages tels que le véhicule électrique en intégrant des nouvelles technologies de l'information et de la communication aux réseaux pour les rendre plus communicants. »

Au cœur du pilotage commercial, Enedis (ex-ERDF), filiale à 100 % d'EDF, a installé en France « 35 millions de compteurs intelligents baptisés Linky » sur la période 2016-2021 (Dubey et Jouvancourt 2018, p. 40-41). Ce programme national de 5 milliards d'euros cherche à suivre les consommations individuelles en « temps réel » afin de « les piloter à distance via l'installation de prises intelligentes, puis d'objets nouvellement conçus à cet effet ». Par les puissances de calcul des ordinateurs, le déploiement réticulaire de capteurs électroniques et l'organisation centralisée d'Enedis, le programme Linky matérialise dans le même temps l'imaginaire régulé des flux et des stocks de Pierre Massé (cf. 5.1) et la techno-politique de prévision et de planification du Commissariat général du Plan (cf. 5.2). La réalisation de ce double imaginaire technicien étend l'optimisation des ressources et le contrôle des temporalités jusqu'à la démesure du partout et du tout-le-temps. Gérard Dubey et Pierre de Jouvancourt (2018, p. 41) l'expriment d'une manière radicale dans leur ouvrage *Mauvais Temps. Anthropocène et numérisation du monde* :

> L'enjeu principal du pilotage des réseaux de distribution électrique est l'anticipation ou la prédiction : conjuguer les données météorologiques, les statistiques de consommation, les disponibilités de puissance afin de répondre à la demande, et dans le même temps, éviter toute coupure ou toute surcharge. En cela, le pilotage des réseaux électriques est depuis longtemps un exercice spéculatif, mais un exercice aveugle puisqu'il n'était pas possible d'obtenir un relevé de la consommation réelle sans l'extrapoler. Si aujourd'hui on ne peut avoir que des estimations de consommation toutes les heures, les technologies pressenties – en particulier les compteurs numériques – offriront des relevés de consommation, qui seront compilés et synthétisés tous les quarts d'heure, pour à terme se rapprocher du temps réel.

De très spéculatives, les estimations de consommations deviennent mesurables individuellement et calculables sur l'ensemble du réseau sur un pas de temps proche de l'instantanéité. Ces savoirs appliqués donnent les moyens d'un « pilotage » des comportements énergétiques. En effet, comme l'annonce Enedis sur son site internet, Linky « est un compteur électrique communicant nouvelle génération ». À ce titre, rien ne l'empêche de communiquer par les applications de *smart-phones* ou d'autres dispositifs connectés des alertes aux consommateurs pour infléchir ou accroître leurs consommations en fonction des disponibilités de puissance électrique du réseau. La situation du client est complètement différente par rapport aux stratégies d'incitation tarifaire initiées par EDF dans les années 1960 (cf. 5.2.4). Dans le cas d'un contrat EJP, le client prend la décision de ne pas consommer (ou de consommer moins) d'électricité durant certaines plages de temps où il serait surfacturé – une vingtaine de jours les plus froids (hors week-end) de l'année entre 6h et 22h – motivée par la possession de dispositifs alternatifs – de chauffage non-électrique notamment. À l'inverse, le boîtier communicant Linky influence instantanément, par des alertes répétées sous la forme de bip, bip insistants par

exemple, la psyché humaine. Il s'adresse directement aux démons de l'avarice, aux propensions à culpabiliser, aux séductions de l'optimisation, etc. Un gouffre sépare les deux dispositifs, celui qui distingue la pensée réfléchie du réflexe conditionné.

« Suite à l'ouverture des marchés depuis 1998, les tarifs EJP ne sont aujourd'hui plus proposés » aux particuliers (Ademe, Consultants et al. 2017, p. 13). De même, les contrats TEMPO qui leur font suite (à partir de 1996) sont supprimés en 2004 « pour les professionnels en basse tension ». À l'inverse, le régime technicien impose désormais une « régulation des conduites par des dispositifs hétéronomes » de type Linky avec le soutien de l'État (Dubey et Jouvancourt 2018, p. 112). Une telle administration masquée des populations trahit l'idéal démocratique de transparence des mécanismes d'organisation et de délibération commune des processus de décision. En outre, elle instaure « le cauchemar d'une veille infinie » où la nuit ne vient plus jamais couvrir de son silence et de son calme le technocosme énergétique (Dubey et Jouvancourt 2018, §4). Habiter les « réseaux intelligents » deviendrait une expérience collective aussi terrifiante qu'un cauchemar sans fin. Ainsi se dessinent les catacombes du régime technicien : un réseau « intelligent » est une version 2.0 de l'enfer biblique. Voyons si habiter les mondes hydrogène permet d'éloigner le spectre d'un tel enfer de contrôle permanent des comportements humains vis-à-vis de l'énergie.

6.3 Habiter les mondes hydrogène ou comment *économiser* les territoires

Dans *Power to the People : Energy in Europe over the Last Five Centuries*, Astrid Kander, Paolo Malanima et Paul Warde (2014, p. 13-16) proposent un modèle économique simple de l'histoire de l'énergie sur le temps long, à partir de séries quantitatives et du concept de « bloc de développement ». Ils interprètent ainsi trois moments de l'industrialisation de l'Europe depuis l'époque moderne par trois reconfigurations profondes des relations entre administrations, entreprises, consommateurs et infrastructures (matérielles et financières) autour d'une innovation majeure : un bloc vapeur-charbon-fer pour la première ; un bloc moteur à explosion-pétrole et un bloc électricité pour la deuxième ; un bloc technologie de l'information et de la communication pour la troisième (cf. 1.5.1). Un tel schéma insiste assurément trop sur la succession des « blocs de développement », là où le processus historique a superposé et accumulé les blocs les uns sur les autres. Mais, il suggère que le monde hydrogène le plus médiatisé aujourd'hui, l'économie de l'hydrogène, pourrait fonctionner comme un « bloc de développement » centré sur la pile à hydrogène (6.1.4). Il est d'ailleurs symptomatique que les professionnels du domaine préfèrent parler de « pile à hydrogène » aujourd'hui plutôt que de « pile à combustible » (Hissel 2022, p. 1). Ceci clarifie le champ d'action puisque, d'une part, la notion de combustible évoque le bloc moteur explosion-pétrole et que, d'autre part, l'hydrogène fait monde avec la pile. Malgré sa simplicité, le schéma des « blocs de développement » repose la question centrale dans cet essai du processus complexe qu'on peut appeler la réalisation historique (cf. 1.5). Au-delà des imaginaires et des héritages matériels, qu'est-ce qui fait exister un monde hydrogène ? (6.3.1)

6.3.1 Habiter le monde : s'ancrer au terrain et encrer le territoire

« Les hommes font leur histoire » écrit Alain Touraine (1978, p. 13) dans *La voix et le regard* pour défendre l'idée que « la société est un drame plus qu'une structure ». De manière compréhensive, je préfère prendre la société comme un drame *et* une structure. Du côté de la structure, les héritages transportent et transmettent des effets collectifs, anciens, durables et dépendants du sentier parcouru. Ils ancrent un territoire. Du côté du drame, des surgissements créatifs sont possibles, souvent imprévues et habituellement imprévisibles. C'est

de ce côté que penche Touraine (1978, p. 10) pour amplifier la voix des acteurs sur la scène de l'histoire et souligner la créativité des mouvements sociaux et étudiants. Habiter le monde revient alors à le réécrire en permanence. Mais, comme le montre la force structurante du régime technicien, l'héritage structuré ne doit pas être sous-estimé si on veut le déconstruire. Habiter le monde acte à la fois un ancrage au territoire et un encrage du territoire.

Entre la matérialité des structures sociales et les jeux d'écriture sur ce que peut être le réel, je conçois les mondes hydrogène à travers la confrontation entre des « trajectoires » héritées du passé ou importées d'ailleurs et des « itinéraires » pouvant surgir de manière nouvelle ou récurrente, ici et maintenant, du fait de la créativité humaine, individuelle et collective. Dans le premier pôle, on retrouve en grande partie les causalités matérielles de Paul Veyne (1971, p. 134), mais aussi des séries idéelles (mémoire collective) ; dans le second pôle, on retrouve en grande partie les intentions et le hasard, mais dont les modalités sont encadrées par le social institué. Le monde hydrogène prend donc place comme drame structuré et structure dramatisée. Ses habitants, structurés et structurants, inscrivent leurs drames collectifs et individuels dans l'espace et le temps.

6.3.2 R&D et politiques industrielles de l'hydrogène en France, 1990-2010

L'hydrogène revient sur le devant de la scène au tournant du XXIe siècle. Comme un demi-siècle plus tôt, son essor se fait par convergence et accrétion de champs hétérogènes. Trois niveaux politiques contribuent à structurer la recherche appliquée sur le domaine de l'hydrogène : européen, national, régional.

Certains laboratoires universitaires travaillaient sur l'hydrogène en France, sans interruption depuis plusieurs décennies : Bordeaux (Teissier 2008), Grenoble, Nantes (Teissier 2013a), Poitiers, Montpellier, Toulouse, etc. Ils étaient issus de trois domaines disciplinaires largement séparés les uns des autres : la chimie du solide et la science des matériaux (Teissier 2014), l'électrochimie et la science des interfaces (Teissier 2015), le génie électrique et les systèmes électroniques. Ces acteurs dispersés sont d'abord organisés par des politiques industrielles de l'hydrogène aux niveaux européen et français. Dans les années 1990, l'« Union européenne soutient le projet hydrogène [...] via les fonds de développement [...] des initiatives conjointes [Joint Undertaking] » où le public et le privé financent à parts égales la R&D (Hissel 2022, p. 4-5). En France, le ministre de la Recherche, Hubert Curien (1988-1993), pilote un programme interministériel pour le développement de véhicules « propres » (Simoncini 2018, p. 326-327). Ce programme agrège des intérêts liés à l'écologie (Ademe), l'automobile (Renault, Peugeot), l'énergie (CEA, EDF, Gaz de France) et l'électrochimie (CNRS, université). Cette première impulsion est réactivée, à partir de 1995, dans le cadre des débats liant climat et énergie (cf. 6.2.2). En 1997, l'année de la ratification du protocole de Kyoto, un autre ministre français de la Recherche, Claude Allègre établit des centres nationaux de recherche technologique (CNRT) afin de « favoris[er] le transfert de la recherche vers l'industrie » (Péra 2022, p. 2). L'un des CNRT porte sur les piles à combustible. Le thème est devenu porteur pour des raisons de politique générale.

Lionel Jospin vient de former un gouvernement (1997-2002), porté au pouvoir par une alliance électorale de « Gauche plurielle ». Cette coalition, sous l'influence des Verts, ne défend pas l'expansion du nucléaire. Ainsi, le projet de centrale nucléaire du Carnet dans l'estuaire de la Loire est officiellement arrêté en septembre 1997. Sous la pression de luttes écologistes en faveur des zones humides et de la protection des oiseaux, EDF souhaite se retirer de ce projet électronucléaire. Jospin utilise ce désir officieux pour annoncer la suspension officielle du projet d'aménagement énergétique alors dans une impasse administrative (Marrec 2022a). Il donne ainsi l'impression à l'opinion publique de tenir les promesses électorales de la Gauche plurielle. En dépit de ce succès de communication, son gouvernement continue d'accompagner la croissance ininterrompue de la

consommation électrique et gère la désindustrialisation de la France. Il s'intéresse aux filières énergétiques de haute technologie, dont la forte valeur ajoutée pourrait contribuer à réindustrialiser le pays. Il établit ainsi un programme national « Pile À COmbustible » (PACO) piloté par Roger Balais (EDF), Françoise Barbier (CEA) et Daniel Clément (Ademe) (Lucchese 2016, p. 5). Entre 2000 et 2005, ce programme dispose de 500 000 à un million d'euros par an pour financer des projets associant universitaires et industriels. Le troisième facteur structurant le domaine de l'hydrogène revient aux politiques des régions en faveur de l'industrialisation de leur territoire. Prenons le cas important dans le paysage français de la Franche-Comté.

6.3.3 Territoire de Belfort : une « symbiose industrielle » pour l'hydrogène

Depuis une vingtaine d'années, la Franche-Comté est un territoire habité par les mondes hydrogène en construction. L'hydrogène y a *germé* dans un milieu industriel ancien, *fertilisé* par un projet politique récent pour reprendre la métaphore botanique du « nénuphar ». C'est une interprétation d'ordre politique qui est surtout avancée par les acteurs de l'hydrogène eux-mêmes. Dans le cadre de la politique nationale de l'hydrogène du gouvernement Jospin, Jean-Pierre Chevènement, alors ministre de l'Intérieur (1997-2000) et élu local, intervient pour faire de l'hydrogène une promesse de réindustrialisation du Territoire de Belfort (Péra 2022, p. 1-2).

Innovations en tension : linéarité des modèles, holisme des territoires

Le projet politique n'est pas hors-sol. Il s'appuie sur les implantations locales de multinationales du transport et de l'énergie – Alsthom, General Electric, Peugeot – dont l'« activité [... est] en train de s'essouffler en termes de délocalisation, d'emplois » (Hissel 2022, p. 4). Il s'appuie aussi sur « la volonté du directeur [de l'Institut de génie électrique] de l'époque », Jean-Marie Kaufmann (Péra 2022, p. 2), et sur une culture locale de recherche appliquée, incarnée entre autres par l'UTBM [11]. C'est ainsi qu'émerge l'institut Franche-Comté électronique mécanique thermique et optique – sciences et technologies (Femto-ST, UMR 6174).

Au début du troisième millénaire, un nouveau monde hydrogène émerge donc au croisement de plusieurs facteurs socio-historiques : un contexte national favorable à une énergie de haute technologie (mais non nucléaire) ; un horizon futur de réindustrialisation par des secteurs à haute valeur ajoutée ; des intérêts politiques d'ordres électoraux et d'attachements au territoire ; un tissu industriel puissant dans les domaines de l'énergie, du transport et de l'automatisme, mais menacé par la compétition internationale ; une culture académique de savoirs et savoir-faire tournés vers les innovations technoscientifiques (dont le génie électrique) ; des politiques nationales en faveur de la recherche et du développement ; des politiques locales favorisant des collaborations entre institutions publiques et privées ; etc. Ces facteurs sont hétérogènes par leurs natures, leurs intensités et leurs échelles. Mais, à Belfort-Montbéliard, leur interaction relève d'une forme de « symbiose industrielle » définie par l'économie politique : interdépendance des territoires à une échelle « méso » ; complémentarité des secteurs industriels ; articulation public-privé. Seul le dernier critère de cette « symbiose » socio-technique – le financement, la gestion et le partage d'infrastructures – recensé par Arnaud Diemer (2016) ne fait pas partie des facteurs d'émergence. Il se situe plutôt parmi les objectifs du monde hydrogène.

Un premier objectif est de financer, gérer et partager une plateforme d'essai industriel à Belfort. Un tel objectif s'inscrit dans le déploiement, depuis le milieu du XX^e^ siècle, de la « triple hélice université-industrie-gouvernement » dont les centres d'essai sont un rouage essentiel (Etzkowitz et Leydesdorff 1997). Il correspond

11. L'université de technologie de Belfort-Montbéliard est créée au terme d'un processus, de 1985, création d'une antenne de l'université de technologie de Compiègne à Sevenans, à 1999, fusion de cette antenne avec l'École nationale d'ingénieurs de Belfort (créée en 1962) (Lamard et Lequin 2005, p. 183-282).

au cadre de pensée cher à la technostructure d'un « modèle linéaire d'innovation » (cf. 1.3.4). Le Département de la défense et la NASA ont développé dans les années 1970 et propagé depuis une « échelle de maturité technologique » (« Technology Readiness Level ») selon ce schéma linéaire (Tomaschek et al. 2016). Ils ont conçu cette échelle dite « T.R.L. », de l'échelon , 1, associé à l'idée d'un prototype à l'échelon 9, correspondant à la certification commerciale pour un marché industriel. L'échelle a été reprise depuis par les agences européennes pour mener la politique scientifique et industrielle de l'Union européenne. Elle est courante aujourd'hui dans les milieux académiques et industriels. On considère qu'un laboratoire CNRS s'occupe des premiers échelons (1-3) au plus près du fondamental, que le CEA peut aller jusqu'à l'échelon 6 de démonstration d'un prototype dans l'environnement d'utilisation et que les industriels prennent en charge les derniers échelons du développement (7-9) jusqu'à la commercialisation de plusieurs dizaines de milliers d'exemplaires (Hissel 2022, p. 3). À l'heure actuelle, le milieu technicien est convaincu de « la maturité technologique » des systèmes hydrogène « du point de vue performance d'un côté et du point de vue durée de vie de l'autre » (Hissel 2022, p. 4). Il reste à produire les artefacts et à les assembler dans l'environnement d'usage.

Réindustrialiser un territoire en projetant l'hydrogène en réseaux

Les choses ne sont pourtant pas si simples. Le soutien à l'hydrogène a été renforcé par la création de la nouvelle Agence nationale de la recherche (ANR) en 2005. De 2006 à 2012, deux programmes ANR de 3 ans – Panache puis HPAC – financent les recherches fondamentales et appliquées sur l'hydrogène et les piles à combustible à destination des milieux universitaires et industriels (Lucchese 2016, p. 7). La période coïncide avec le « plan véhicule décarboné » du président Nicolas Sarkozy (cf. 6.2.3). Mais, d'environ 10 millions d'euros en 2006, les financements décroissent chaque année pour redescendre au niveau de 2000-2005 (Lucchese 2016, p. 7). La diminution des budgets induit un désengagement des chercheurs, d'une centaine en 2006 en France à une trentaine en 2011-2012 (Hissel 2022, p. 2-3). À Belfort aussi, le futur paraît désenchanté. En 2016, l'un des principaux experts de l'hydrogène en France, Paul Lucchese (CEA) constate que « [c]ontrairement à l'Europe, la France ne reconnaît pas la filière hydrogène en tant que telle, ce qui permettrait d'avoir une synergie entre production et application ». C'est la fameuse « traversée du désert » (Lucchese 2016, p. 7-8) que tout promoteur d'un thème de recherche redoute à l'heure des financements par projets. L'hydrogène passe de mode autour de 2010. La voiture électrique sur batteries semble alors plus intéressante pour la mobilité urbaine et pour le stockage d'énergie (Villareal 2014, p. 335).

Une fois encore, les mondes hydrogène sont réanimés par l'enlacement de plusieurs facteurs de causalité. La loi d'août 2015 « relative à la transition énergétique pour la croissance verte » réaffirme les objectifs de réduction des émissions des gaz à effet de serre en France. L'une des nouveautés est de souligner les problèmes d'interconnexion entre les réseaux d'énergie. L'article 176 « identifie notamment les interactions entre les réseaux d'électricité, de gaz et de chaleur aux différentes échelles pour en optimiser le fonctionnement et les coûts » (Assemblée nationale 2015, art. 160, 176). Deux nouveaux critères d'appréciation sont introduits dans la loi : la « qualité » de l'électricité, la « flexibilité » du réseau. Ils constituent des leviers de couplage entre les réseaux d'énergies. L'un des volets de la « programmation pluriannuelle de l'énergie » concerne le « développement équilibré des réseaux, du stockage et de la transformation des énergies et du pilotage de la demande d'énergie ». Il cherche à favoriser « la production locale d'énergie, le développement des réseaux intelligents et l'autoproduction ». La mise en relation des réseaux d'énergie est d'ailleurs jugée suffisamment stratégique pour donner lieu à un dispositif législatif particulier : le « déploiement expérimental de réseaux électriques intelligents ou de dispositifs de gestion optimisée de stockage et de transformation des énergies »

peut être passé au Parlement par voie d'ordonnances (Assemblée nationale 2015, art. 200).

L'interdépendance des réseaux d'électricité, de gaz et de chaleur peut s'interpréter, dans un sens faible, comme leur complémentarité et, dans une sens fort, comme leur interconnexion. La complémentarité signifie qu'un réseau de chaleur est utilisé en substitution temporelle du chauffage électrique lors des pics de consommation d'hiver ou en substitution spatiale d'un réseau de gaz de ville en cours de démantèlement par exemple. L'interconnexion indique des couplages plus intenses entre les trois réseaux hétérogènes en rendant les rivages techniques interopérables (cf. 6.2.4). Elle suggère la construction d'un *système de systèmes*, où des réseaux d'énergie étendus sont progressivement reliés les uns aux autres par des nœuds de conversion de type gaz ou chaleur vers électricité et réciproquement. La projection d'un tel horizon sociotechnique dans la loi de 2015 est fondamental pour comprendre la réactivation des mondes hydrogène dans la deuxième moitié de la décennie 2010. En effet, la pile à combustible, en tant que convertisseur réversible gaz-électricité produisant de la chaleur en fonctionnement et pouvant être couplé à un moteur électrique, apparaît comme l'artefact rêvé pour optimiser les échanges entre réseaux d'énergie. Elle peut rendre interopérable en principe les quatre systèmes hétérogènes : électricité, gaz, chaleur et mobilité (6.3.4).

D'ailleurs, l'article 121 de la loi projette « un plan de développement du stockage des énergies renouvelables par hydrogène décarboné ». Son écriture résulte d'une activité de *lobbying* auprès des députés par de groupes de pression tels que l'AFHYPAC (Lucchese 2016, p. 13). L'article décline quatre volets complémentaires d'action, à différents niveaux de réalité sociale. Du côté matériel, ou infra-structurel, le plan favorise les artefacts et les réseaux. Il encourage ainsi les « innovations technologiques visant plus particulièrement les piles à combustibles, pour notamment développer le marché des véhicules électriques » et prévoit le déploiement d'« infrastructure de stations de distribution à hydrogène » (Assemblée nationale 2015, art. 121). Du côté idéel, ou super-structurel, le plan joue sur les cadres de pensée et d'action juridiques et économiques. Il prévoit ainsi de « faire évoluer la législation sur les réseaux de gaz » afin de faciliter l'usage de l'hydrogène et de produire « un modèle économique du stockage par hydrogène ». La « mobilité décarbonée » reste affichée comme une priorité malgré l'alternance politique entre les quinquennats de Nicolas Sarkozy (2007-2012) et François Hollande (2012-2017).

Les acteurs de terrain vivent les effets législatifs avec un bref temps de décalage. Ainsi, Daniel Hissel (2022, p. 3-4) identifie un « changement de paradigme sur l'hydrogène » à la charnière 2016, 2017. Il analyse avec justesse le renouveau de l'hydrogène à la stricte « concomitance » de trois facteurs : « la maturité technologique [...] du point de vue performance d'un côté et du point de vue durée de vie de l'autre » ; une « lame de fond sociétale » en termes « de changement climatique, de transition énergétique, de transition écologique, etc. » ; une mise en œuvre politique pour lutter contre la « désertification industrielle ». L'alignement temporel des facteurs technologiques, écologiques et économiques est renforcé par la convergence politique de quatre échelles territoriales : la communauté d'agglomérations de Belfort ; la région Bourgogne Franche-Comté ; l'État français ; l'Union européenne, enfin, pour son accompagnement de la R&D de l'hydrogène depuis les années 1990 (Hissel 2022, p. 4-5). Ce qui compte pour articuler ces différents niveaux de territorialité, ce sont les effets de seuil, d'entraînement, qu'ils soient symboliques ou matériels. Ainsi, alors que le président Emmanuel Macron annonce un « plan national » de 9 milliards d'euros sur l'hydrogène, le chiffre est « suffisamment significatif pour dire qu'on y va, et qu'on y va fort. Ça parle aux industriels du secteur, et pas seulement du secteur d'ailleurs : ce n'est pas 100 millions d'euros qu'on va saupoudrer cette fois-ci » (Hissel 2022, p. 4).

Vingt ans après les débuts de la politique franc-comtoise de l'hydrogène, la plateforme d'essai de Belfort est au cœur de la dynamique technoscientifique. Nommée FC Lab, pour « Fuel Cell Lab », elle est devenue une unité d'appui et de recherche (UAR) dans la terminologie du CNRS. Sa direction est assurée par des membres de

Femto-ST : Marie-Cécile Péra (directrice) et David Bouquin (directeur-adjoint). Elle fédère « les activités de plus de 140 chercheurs et ingénieurs, à travers [un] réseau de laboratoires partenaires » qu'ils soient locaux – Femto-ST, laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB) – ou situés dans des territoires voisins : Lorraine, Rhône-Alpes, Île de France [12]. FC Lab est un centre de ressources technoscientifiques dédié aux systèmes énergétiques de l'hydrogène, complémentaire du laboratoire voisin Femto-ST plus fondamental. Il propose, selon sa directrice, « des offres de service aux industriels, voire aux laboratoires qui en ont besoin : ouverture de la plateforme et de ses infrastructures de test et études d'ingénierie, études de faisabilité, soutien à la conception et à la réalisation de prototypes ». Le centre d'essai permet une mise à l'échelle industrielle (*up-scaling*) mais ne se substitue ni au laboratoire, ni à l'usine. Daniela Chrenko (2022, p. 11), spécialiste des batteries à Femto-ST, résume ainsi la « spécificité » de son laboratoire : « travailler sur l'énergie de manière systémique, avec cette ouverture dans différentes directions, une grosse expertise en hydrogène, une expertise dans les convertisseurs, dans les batteries, dans les machines électriques, dans les réseaux ». Plateforme technologique et laboratoire de recherche sont considérés comme complémentaires par les acteurs eux-mêmes en termes de méthodes, d'équipements et d'objectifs. Cette division du travail traduit une attitude modérée, peut-être instruite par la mémoire collective, contrastant avec la « démesure technologique » de l'ère gaullienne (cf. 5.2.5). Il peut accueillir des prototypes aussi grands que des bus hydrogène et les soumettre à des expérimentations durant plusieurs semaines (Hissel 2022, p. 5). C'est l'un des rares centres en France de ce type avec celui de Toulouse (LAPLACE), plus orienté vers les applications aéronautiques du milieu industriel local. À Toulouse comme à Belfort, le centre d'essai supplée les « bureaux d'études [… qui n'ont pas encore] ces compétences-là » dans le secteur des piles à combustible (Péra 2022, p. 4). Son fonctionnement implique une maintenance lourde en termes financiers et une standardisation « des procédures qui garantissent que les bancs d'essais sont toujours au même niveau de qualité ». Par cet investissement public, l'État et les collectivités territoriales ouvrent un lieu d'expérimentation reliant recherches appliquées et développements industriels et soutiennent la « symbiose industrielle » au niveau du tissu local.

D'ailleurs, si le nom FC Lab est qualifié de « fantastique » par les acteurs eux-mêmes c'est parce qu'il cadre non seulement avec la nouvelle filière industrielle (« Fuel Cell Lab ») mais aussi avec l'échelle « méso » des réseaux de l'hydrogène : FC Lab signifie alors « Franche-Comté Lab » (Péra 2022, p. 3). Habiter le monde hydrogène entre Belfort et Montbéliard aujourd'hui, c'est maîtriser le fonctionnement des piles à hydrogène certes, mais aussi fréquenter assidûment les deux promesses d'une économie locale de l'hydrogène : réindustrialiser le territoire et réticuler les énergies et les transports à l'échelle intermédiaire de la région. Dans le cadre d'une politique économique de l'hydrogène en Bourgogne – Franche-Comté, FC Lab n'est que la première infrastructure en partage.

Une « symbiose industrielle » achevée vise, en effet, un deuxième objectif plus ambitieux et à plus long terme dans le cadre régional : la construction et la gestion d'infrastructures composées de chaînes de production, stockage et transport de l'hydrogène et de réseaux de consommation de l'énergie dédiés à la mobilité et à d'autres usages comme le chauffage et la génération stationnaire d'électricité, ou les deux à la fois : cogénération de chaleur et d'électricité. L'hydrogène paraît bien être le nœud d'optimisation des « interactions entre les réseaux d'électricité, de gaz et de chaleur aux différentes échelles » posées par l'article 176 de la loi « relative à la transition énergétique pour la croissance verte » (Assemblée nationale 2015, art. 176). L'actualité semble concrétiser ces espoirs. Ainsi, le fabricant d'électrolyseurs, McPhy, l'un des leaders mondiaux dans le domaine, vient d'obtenir un financement de 114 millions d'euros de l'État français pour construire, en accord avec la

12. Ces informations sont extraites du site officiel de l'institution : https://www.fclab.fr/about-us/

Commission européenne, le plus grand électrolyseur européen près de Belfort [13]. Ce projet de Gigafactory est prévu pour une mise en service au premier semestre 2024. Il devrait progressivement monter en puissance pour produire, d'ici quelques années, des quantités industrielles d'hydrogène par électrolyse, équivalentes à un gigawatt de puissance, c'est-à-dire de l'ordre de grandeur d'une tranche nucléaire.

La mise sur agenda politique de l'hydrogène s'est donc faite en cascade, du cadrage européen aux politiques gouvernementales avant de s'inscrire dans des politiques régionales de développement économique des territoires ruraux et urbains. Elle réactive une nouvelle version de l'économie de l'hydrogène. Essayons d'en tracer le portrait avant de souligner quelques-uns des enjeux actuels qui traversent et structurent le monde hydrogène.

6.3.4 Économie de l'hydrogène, version 2.0

Durant les années 2000, l'Union européenne construit une politique industrielle de l'hydrogène et des piles à combustible dont l'objectif est la mise sur le marché de nouveaux produits commerciaux (Galich 2015, p. iii-iv). En 2019, la Commission européenne annonce un objectif de neutralité carbone de l'économie européenne pour 2050 (Pflugmann et De Blasio 2020, p. 14). L'économie de l'hydrogène devient ainsi un objectif de réalisation pour l'horizon 2050. Plusieurs acteurs sont particulièrement impliqués dans cette mise sur agenda politique de l'hydrogène : le commissaire à la Recherche, Philippe Busquin, un expert influent, Jeremy Rifkin, et un certain nombre de représentants de l'industrie automobile et de l'énergie (Galich 2015, p. 154). Avec son ouvrage à succès, *The Hydrogen Economy*, Rifkin (2002) avait contribué à populariser l'idée que l'hydrogène constituerait « la prochaine grande révolution économique ». Il présentait « un système énergétique complètement transformé, décarboné et décentralisé, avec l'hydrogène et les technologies pile à combustible en son cœur » (Galich 2015, p. 175). Il couplait ainsi la reconfiguration des réseaux électriques sous l'effet de l'intégration des énergies renouvelables (cf. 6.2.4) avec l'essor d'un nouveau monde hydrogène.

La politique européenne est traduite, en cascade, dans les différentes législations nationales. En France, la loi « relative à la transition énergétique pour la croissance verte » de 2015 met l'hydrogène sur l'agenda politique en faisant de l'intégration des réseaux d'électricité, de gaz et de chaleur un impératif stratégique (cf. 6.2.3). Cette politique européenne et française des macro-réseaux de l'énergie rencontre un ensemble de politiques locales de réindustrialisation des territoires et de décarbonation des mobilités urbaines (cf. 6.3.3). Cette intersection réactive une utopie ancienne, restée au niveau des imaginaires et des discours. Aujourd'hui, comme dans les années 1970, l'économie de l'hydrogène permettrait de coupler les infrastructures de l'énergie et du transport pour répondre à des enjeux d'autonomie énergétique et de « propreté » écologique (6.1.4). En 50 ans cependant, l'utopie a évolué en même temps que les contextes de l'énergie et des transports (cf. 6.2.2). Elle est notamment fortement pénétrée par les dispositifs électroniques et les réseaux numériques structurant de nouveaux « réseaux intelligents » (cf. 6.2.4). C'est la raison pour laquelle je parlerai d'une économie de l'hydrogène *version 2.0*. Voyons où nous mène l'exploration de ce monde hydrogène en cours de construction au début des années 2020.

Synchronies et synergies d'un monde hydrogène en chantier

La figure 6.5 schématise l'économie de l'hydrogène d'aujourd'hui héritière des années 1970 (cf. 6.1.4). Elle doit être lue à 50 ans de distance en gardant en mémoire la figure 6.2. J'ai néanmoins inversé la perspective. Alors que Gregory (1973, p. 15) figurait le monde hydrogène à partir de son infrastructure – production,

13. Ces informations sont issues du site internet de la région Franche Comté : https://www.invest-in-nord-franche-comte.fr/fr/newsletter-adn-fc/mcphy-bienvenue-nord-franche-comte/

distribution, stockage, consommation de l'hydrogène – j'ai disposé ce système de systèmes autour du stockage de l'hydrogène (cf. 6.1.3).

En effet, le stockage d'énergie est central dans l'économie de l'hydrogène 2.0. L'hydrogène peut, en effet, être stocké « massivement sur de très longues durées » (Hissel 2022, p. 7). Plusieurs technologies sont déjà au point sans altération chimique ni perte matérielle durant de nombreux mois, voire des années. Elles jouent sur des variables physiques : « sous pression si on veut – l'Air liquide connaît très très bien ça –; on peut le stocker sous forme liquide – ça coûte un peu cher en énergie –; et puis on peut le stocker sous forme solide – il y a des gens qui travaillent à développer des matériaux qui sont capables d'absorber de l'hydrogène à l'intérieur de leur structure et de conserver ça un temps, mais illimité. » (Coutanceau 2022, p. 9). Ces mécanismes sont réversibles : l'hydrogène peut être déstocké en modifiant les paramètres de température et de pression. Il peut alors être distribué aussi rapidement que du gaz naturel. La capacité de stockage peut ainsi organiser un cycle saisonnier découplant les moments de production (photovoltaïque en été, éolien par épisodes) et de consommation (chauffage en hiver, climatisation en été). En cela, le stockage de l'hydrogène est semblable aux stations de transfert d'énergie par pompage (STEP), qui fournissent la quasi-totalité des réserves des réseaux électriques jusqu'à une date récente. Il présente un avantage de tenue de charge par rapport aux batteries secondaires dont le temps d'auto-décharge est de l'ordre d'une semaine (Coutanceau 2022, p. 9). Le stockage saisonnier de l'hydrogène contribue à synchroniser des systèmes de production et de consommation d'énergie dont les constantes de temps sont distinctes et souvent décorrélées. L'économie de l'hydrogène facilite ainsi la circulation de flux d'énergie entre les systèmes de transport et d'énergie.

Le vecteur hydrogène rend possible des conversions entre différentes formes d'énergie (cf. figure 2.7). Ceci permet de coupler des systèmes d'énergie hétérogènes et de créer des effets de synergie entre différentes filières industrielles. La notion de « synergie », qui désigne l'action coordonnée de deux organes en physiologie, a donné lieu à des transferts métaphoriques vers les humanités depuis le XIX^e^ siècle comme en témoigne le cas de Lester Ward en sociologie (cf. 5.3.4). Elle est utilisée aujourd'hui par les techniciens et les technocrates pour décrire la construction des mondes hydrogène. Cette métaphore organiciste est aussi critiquée par les technologues pour la trop forte cohérence qu'elle suggère entre les filières énergétiques. C'est ce qu'explique Anaël Marrec en introduction d'un numéro thématique des *Cahiers François Viète* qu'elle a récemment consacré aux *Synergies et persistances dans l'histoire des techniques de l'énergie*. Le concept de système énergétique « tend en effet à présupposer des synergies entre techniques de l'énergie et à naturaliser la spécificité contemporaine d'une omniprésence sociale et matérielle des réseaux énergétiques » (Marrec 2022b, p. 7). Mais, il semble pertinent dans le cas des mondes hydrogène car il caractérise justement leur construction par la mise en correspondance de filières énergétiques distinctes.

La synergie entre flux hétérogènes d'énergie est perçue comme le moyen d'établir une synchronie entre la production et la consommation d'énergie. L'expression « économie de l'hydrogène » est donc à la fois un mot-écran et un mot-valise. Elle fait écran parce qu'elle suggère qu'une autonomie de l'hydrogène serait possible alors que l'hydrogène, vecteur énergétique, la pile à combustible et l'électrolyseur, nœuds de conversion, n'existent que dans leurs relations aux sources d'énergie. Elle fait contresens parce que le monde hydrogène est justifié par la conservation d'intérêts économiques qui lui préexistent et lui sont extérieurs : régulation du parc électrique intégrant des forces intermittentes (cf. 6.2.3), réindustrialisation locale (cf. 6.3.3), transports automobile, ferroviaire, maritime et aérien, etc. L'économie de l'hydrogène forme un « macro-système technique secondaire » parce qu'elle est construite sur cinq systèmes sociotechniques qui lui préexistent, et qui sont dits « primaires » (Gras 1997, p. 30). C'est un besoin d'accoupler ces réseaux primaires qui génère l'économie

de l'hydrogène. La multiplication des couplages entre systèmes est une spécificité des sociétés industrielles contemporaines. Chaque nouvelle synergie entre des systèmes préexistants crée de la complexité sociale et historique. Ce mécanisme de couplage est à la base de la complexité du monde hydrogène, qui est « divers, interconnecté, interdépendant et adaptatif » (Institute of Electrical and Electronics Engineers 2015, p. 43). Il s'apparente à « tout ce qui fait rouage finalement » (Auvity 2022, p. 8). Le couplage par l'hydrogène entre un réseau de gaz et d'électricité « ouvre des perspectives d'optimisation et de flexibilité, [...] mais c'est quand même compliqué ». La figure 6.5 schématise cette complexité du monde hydrogène par synergie de systèmes hétérogènes.

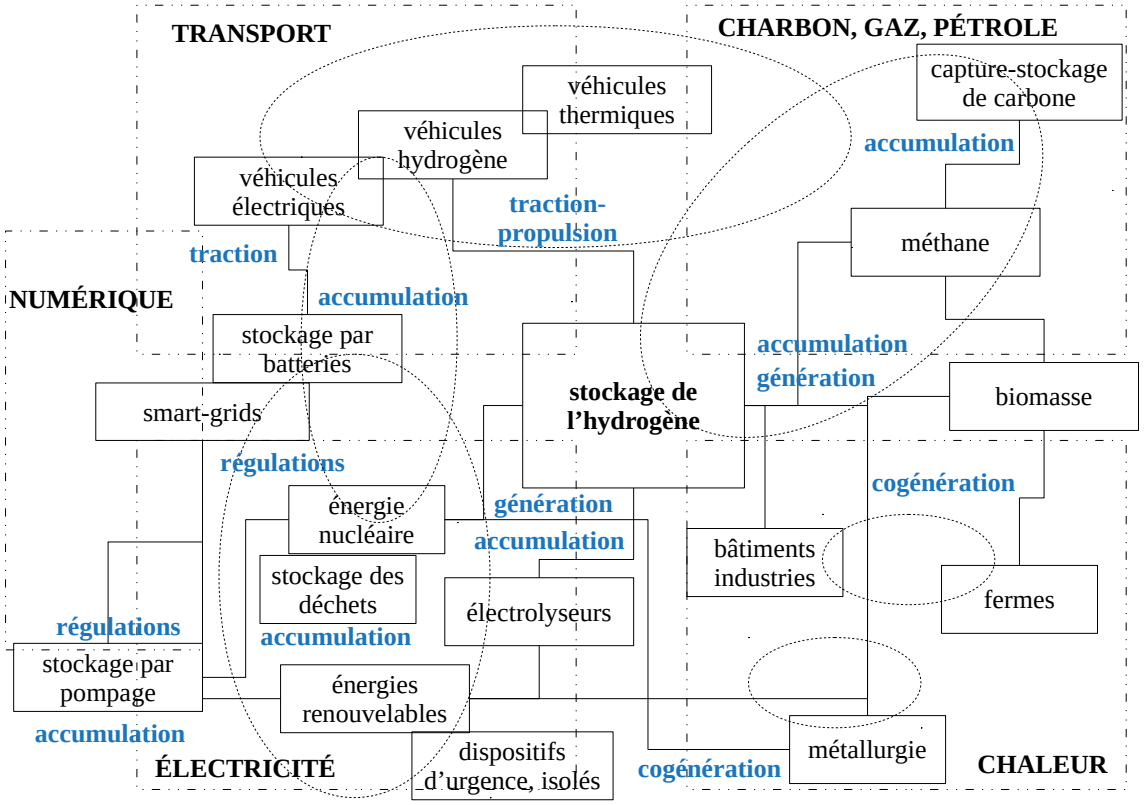

FIGURE 6.5 – Schématisation de l'économie de l'hydrogène des années 2020

Quatre systèmes sociotechniques sont représentés sur les quatre quarts de la figure 6.5, délimités par des traits discontinus : système de transport (haut gauche), système électrique (bas gauche), système de chaleur (bas droit) et système d'énergies fossiles, notamment charbon, gaz, pétrole (haut droit). Pour chaque système, les infrastructures sont symbolisées par des formes ovales en pointillé. Les réseaux de chaleur sont dessinées bien plus petits que les autres réseaux d'énergie en raison de leur implantation locale (cf. figure 2.9). L'infrastructure ferroviaire quant à elle enjambe les systèmes de transport et d'électricité. Distribués au sein des systèmes de transport et d'énergie, des rectangles en traits pleins figurent des opérations et/ou lieux de production, transformation et consommation d'énergie ou de matière ayant un rôle dans l'économie de l'hydrogène. Un nombre restreint de liens systémiques ont été représentés pour ne pas surcharger la figure mais en nombre suffisant pour transmettre une intelligibilité suffisante. Une attention particulière est portée au stockage de l'énergie. Sont donc indiquées les quatre fonctions classiques de la figure 2.8 : traction et propulsion,

accumulation, génération et régulation.

Le système des énergies fossiles joue un rôle d'épouvantail pour l'économie de l'hydrogène. Il domine l'économie de l'industrialisation depuis le XIXe siècle. Charbon d'abord, puis pétrole de plus en plus au XXe siècle, gaz plus récemment, ces ressources sont déterminantes en termes économiques et politiques par leurs prix et leurs disponibilités sur le marché international. Le contre-choc pétrolier de 1986 anémie pour un temps en France les financements de l'énergie solaire (Teissier 2013b). À l'inverse, quand « on a vu en 2008 un prix du pétrole qui a passé les 100 dollars le baril [...] la filière solaire photovoltaïque a connu un essor très important [... puis, à nouveau,] le prix du baril s'effondre et toutes ces solutions-là ne sont plus compétitives » (Auvity 2022, p. 4). Aussi, les modélisations économiques testant l'essor d'une économie locale de l'hydrogène – couplée à un champ d'éoliennes *off-shore* d'un gigawatt de puissance à l'horizon 2030 au large du complexe industrialo-portuaire de Saint-Nazaire en pays de la Loire – prennent le prix du baril de pétrole comme une variable majeure d'analyse du problème sociotechnique (Loisel et al. 2015, p. 6728). Le monde hydrogène est encadré par le monde fossile aujourd'hui et demain. Ceci est d'autant plus important que rien ne dit que l'extraction et la consommation d'énergies fossiles n'augmentera pas encore dans les décennies à venir comme ce fut le cas lors de la première économie de l'hydrogène des années 1970 (cf. 6.1.4).

L'économie de l'hydrogène se déploie en synergie forte avec le système électrique. Comme l'hydrogène, l'électricité est un vecteur énergétique porteur de multiples conversions. Le jargon professionnel utilise de nombreux néologismes (anglais) pour désigner les couplages entre le système électrique et les autres systèmes d'énergie et de transport : *power-to-gas*, *power-to-fuel*, *power-to-mobility*, *power-to-power*, *power-to-heat* (Ademe, Artelys et al. 2013). Des passerelles entre le système électrique et les autres systèmes énergétiques sont testées dans le cadre de l'économie de l'hydrogène. Ainsi, Engie (ex-GDF Suez) teste dans les années 2010 l'injection de quelques pourcents d'hydrogène produit par électrolyse à partir d'éoliennes dans le réseau gazier [14].

L'hydrogène donne aussi un rôle singulier et inédit au système de chaleur à travers trois types de synergie. Premièrement, de l'hydrogène produit par électrolyse approvisionnée par la puissance éolienne peut être utilisé comme source de chaleur dans l'industrie métallurgique ou d'autres industries nécessitant de haute température (verriers par exemple). Des expérimentations ont été développées au milieu des années 2010 dans le complexe industrialo-portuaire de Fos-sur-Mer [15]. Deuxièmement, les piles à combustible suscitent un intérêt pour la cogénération de chaleur et d'électricité. Sans être une fonction du stockage, la cogénération accroît, comme le stockage d'hydrogène, la quantité d'énergie utilisable (exergie). Elle est rendue possible par la pile à combustible. En accroissant l'exergie des dispositifs techniques, la pile à hydrogène améliore la qualité du système énergétique (C.-J. Winter 2006, p. 1628). La cogénération est d'ailleurs l'un des objectifs de développement de la loi « relative à la transition énergétique pour la croissance verte » (Assemblée nationale 2015, art. 176). Elle contribue à la stratégie d'activation des « synergies » entre réseaux d'électricité, de chaleur et de gaz dans une logique d'optimisation. Une deuxième synergie concerne la récupération des « énergies fatales ». Est dite « fatale » la chaleur emmagasinée dans les matériaux des machines en fonctionnement ou la chaleur perdue par dégagement à l'extérieur d'une enceinte donnée (fuites thermiques des bâtiments, des moteurs à explosion, etc.).

14. « GRID, piloté par Engie dans le nord de la France, consiste à produire de l'hydrogène à partir d'éoliens et à l'introduire dans le réseau de gaz naturel à hauteur de 5-10 %, dans un réseau réel, pas en démonstration, avec des maisons et de petites entreprises réelles qui utilisent le gaz naturel soit pour faire la cuisine, soit pour se chauffer. Ils ont une expérience là-dessus dans le Nord, dans un quartier à Dunkerque pour montrer que ça a un intérêt technique et économique. » (Lucchese 2016, p. 12)

15. « Le second projet, identique mais plus industriel, est à Fos-sur-Mer : produire de l'hydrogène à partir d'éoliennes présentes à Fos et l'utiliser pour des besoins industriels ou pour faire la synthèse de méthane à partir de CO_2 récupéré de raffineries et d'hydrogène. » (Lucchese 2016, p. 12)

La figure 6.5 expose, dans le cas de l'économie de l'hydrogène, les cinq caractéristiques d'un système sociotechnique selon Jacques Ellul (cf. 1.2.3) : un réseau d'interrelations de nature et d'intensité différentes (fonctions du stockage *versus* synergies entre artefacts) ; la préférence des éléments d'un système à se combiner en interne (liens primaires au sein de chaque quart de la figure 6.5) ; une aptitude pour le mouvement (écarts par rapport à la figure 6.2 des années 1970) ; des « structures de renvoi » ou *feed-back* au sein d'un système (tel l'effet rebond identifié par William Stanley Jevons en lien avec les hausses d'efficacité (cf. 3.1.2)) ; une mise en relation avec d'autres systèmes (liens secondaires entre les quarts de la figure 6.5).

Le demi-siècle qui nous sépare de Jacques Ellul a renforcé la matérialisation des systèmes techniques sur deux points. La première évolution concerne la potentialité d'une « synchronisation » des systèmes de transport et d'énergie jusqu'à un « temps réel », proche de l'instantanéité (Jordheim 2017). La deuxième évolution contribue à la synchronisation. Elle concerne l'intégration numérique des systèmes analogiques de l'énergie et des transports. L'économie de l'hydrogène des années 2020 sera donc qualifiée, par contraste celle des années 1970, de *version 2.0*. L'intégration numérique joue au niveau de chaque infrastructure-réseau et entre les réseaux. Au niveau d'un réseau, le système numérique agit sur divers dispositifs numériques : asservissements de machines, modèles de gestion d'usines ou de réseaux, collectes et traitements des données, etc. Les procédures de sécurité de la R&D hydrogène imposent par exemple d'installer « dans les salles d'essai [...] toute une batterie de capteurs [... et de] caméras [... pour] détecter cet hydrogène et [pour] l'évacuer si jamais il y a une détection » (Roche 2022, p. 11). Dans un autre registre, les techniciens de l'hydrogène, face au nombre de problèmes industriels à résoudre, en appellent à la création de plateformes numériques pour la mise en commun d'un grand nombre de données technoscientifiques sur la filière hydrogène (Dawood et al. 2020). Une technologie de pointe comme l'hydrogène est donc friande en dispositifs électroniques au même titre que d'autres filières de haute technologie. Ceci rappelle que le système numérique n'est « en rien un monde "dématérialisé" [...] : le domaine des technologies de l'information et de la communication consomme par exemple à peu près 10 % de l'énergie électrique mondiale et émet une quantité de gaz à effet de serre équivalent à celle du transport aérien. » (Dubey et Jouvancourt 2018, p. 50-52).

Le positionnement du système numérique, à gauche de la figure 6.5 entre l'électricité et le transport, a une signification particulière. L'économie de l'hydrogène 2.0 sous-tend en effet, avec l'appui du numérique, un projet encore largement utopique de synchronisation temporelle et de synergie spatiale entre le parc électrique et les réseaux de transport par une électrification graduelle de certains moyens de transport individuel (trottinettes, bicyclettes, automobiles, camions, etc.) et de transport collectifs (bus, trains, avions, etc.). Un tel projet s'appuie sur le déploiement intense et étendu des réseaux électroniques de communication. Alain Gras souligne la contrainte sociale du réseau internet pour le temps présent : « que veut dire se brancher sinon accepter la sociabilité moderne, rester citoyen de son temps ». Cette « pression sociale », qui se construit avec et pour l'industrialisation, « fait de l'homme moderne un homme qui ne peut vivre que connecté à des réseaux » (Gras 1997, p. 113). Dans le cas de l'hydrogène, le système numérique est convoqué pour gérer les flux et les stocks d'énergie aux différents niveaux systémiques – piles, véhicules, réseaux – à des pas de temps de plus en plus courts. L'hydrogène apparaît comme un vecteur de couplage entre les différents systèmes de transport et d'énergie.

Électro-mobilité et territoires de l'hydrogène

La voiture électrique constitue un précédent de couplage des réseaux électrique et routier. Dans sa thèse de science politique intitulée *L'industrie automobile à l'épreuve des voitures électriques. Entre changement et*

continuité, Axel Villareal a mis en évidence deux fonctions de la voiture électrique dans l'économie politique française au tournant des années 2010. Premièrement, en termes politiques, la voiture électrique constitue un objet-valise doté d'un « symbolisme contestataire ». Elle est présentée comme une « voiture propre » résistant à « la domination sans partage du pétrole dans la civilisation ». Ce verdissement de l'automobile sert à canaliser la contestation écologique tout en restant dans le cadre de l'automobilisme. Or, la voiture propre n'existe pas (Villareal 2014, p. 372). Comme tout produit industriel de masse, elle génère des pollutions (atmosphériques et extractivistes), des nuisances (bruits, encombrements, odeurs), des dangers (accidents fréquents, décès et blessures), des dépenses d'énergie, de matière et d'argent, etc. Même des filières affichées comme vertueuses génèrent des pollutions industrielles. Comme le souligne Antoine Missemer (2022, p. 86), « beaucoup des énergies dites renouvelables reposent sur des dispositifs aux soubassements matériels non renouvelables, ne serait-ce que les métaux nécessaires à la production d'éoliennes, de panneaux solaires et de batteries ». Une trentaine de matériaux nécessaires aux énergies renouvelables et aux batteries actuelles sont actuellement considérés comme des réserves limitées à l'échelle de la planète (Hache et al. 2019). Comment alors s'assurer que le passage de marchés de niche de l'hydrogène à un déploiement de masse garantisse une économie de l'hydrogène relevant d'une authentique écologie environnementale ?

De manière plus spécifique, et de manière contre-intuitive, Ivan Illich (1975, p. 50-51) suggère que, « [p]assé un seuil critique, l'industrie du transport fait perdre plus de temps qu'elle n'en fait gagner ». Ceci est vrai pour ceux qui utilisent les transports les plus rapides, mais aussi ceux qui les refusant sont marginalisés par les « distances aliénantes » qui deviennent la norme. Aussi, la réappropriation de l'espace et du temps pourrait s'effectuer par une réduction drastique et collective des mobilités par une réorganisation sociale et territoriale. Pour ce faire, des associations citoyennes comme Carfree défendent comme raisonnable la sortie d'un « automaboulisme » qui n'a cessé d'augmenter depuis la fin du XIX^e^ siècle (mot d'un ingénieur cité par Garçon 2003a, p. 7) :

> Ce qu'il faut soutenir, c'est le moindre déplacement et collectif. Rail, bateau, transport et taxis collectifs. Cela ne veut pas dire qu'il faille abandonner nombre de nos déplacements. Mais le faire raisonnablement. Et en finir surtout, avec l'idée qu'une personne se déplace avec 600 kilos de métal et matière plastique autour d'elle, en occupant 4 m^2 de surface en ville. (Communiqué « Fin de la bagnole, illusion du véhicule propre » de l'association Carfree du 2 novembre 2008 cité par Villareal 2014, p. 375).

Apparaît ici la deuxième fonction de la voiture électrique. Elle est présentée, au niveau économique, comme « un moyen de "sauver" l'industrie automobile de la crise » d'une supposée saturation des marchés (Villareal 2014, p. 164). Cet affichage, organisé en Europe par les constructeurs eux-mêmes, rejoue un argumentaire déjà appliqué dans les années 1930. Il est mis en œuvre, en France, par une « mission interministérielle Véhicules propres et économes » (2003-2007) sous la tutelle du Premier ministre Jean-Pierre Raffarin puis par un « Plan véhicule décarboné » (2008-2012) orchestré par le président de la République, Nicolas Sarkozy (6.2.3).

Ces politiques publiques en faveur du secteur automobile sont accentuées par la crise financière de 2008. Elles portent uniquement sur l'innovation technologique et le renouvellement de voitures neuves, bien que le marché d'occasion compte pour plus de deux tiers des ventes d'automobiles (Villareal 2014, p. 178). C'est à cette occasion que le concept de « réseaux intelligents » est popularisé (cf. 6.2.4). Les batteries des voitures électriques sont perçues comme des réserves d'électricité pouvant être remplies en heures creuses et utilisées à la demande tout au long de la journée. Un nombre important de véhicules électriques permettrait de lisser les

courbes de production et consommation d'électricité sur des durées de la journée à la semaine si le stockage d'électricité était contrôlée en temps réel.

La voiture hydrogène est alors aussi affichée comme une « voiture propre ». En France, elle reçoit moins de soutien politique que la voiture à batteries, le développement de la mobilité hydrogène étant repoussé d'une quinzaine d'années (Lucchese 2016, p. 8-9). En Allemagne, au contraire, le programme interministériel N.O.W. (2005-2015) associe quatre ministères (transport, environnement, économie et recherche) pour organiser le déploiement d'une mobilité hydrogène (cf. 6.2.2). Cet objectif passe par la construction de prototypes de démonstration et d'un maillage distribué de stations de recharge en hydrogène (Bonhoff 2010, p. 3-4). Malgré la faible politisation de la mobilité hydrogène en France, Renault-Nissan développe des prototypes hydrogène durant les années 2000 pour une commercialisation à l'horizon 2015 (Beuzit 2010, p. 8-9) [16]. De son côté, Peugeot s'allie avec le CEA pour développer une pile à combustible 80 kW pour la traction d'utilitaires (Lucchese 2016, p. 30).

C'est par l'Union européenne que la mobilité hydrogène entre plus franchement dans l'agenda politique. Les agences expertes jouent un rôle central dans cette mise sur agenda européen [17]. Le « rapport McKinsey » lance l'hydrogène sur la scène européenne. Il est très influencé – pour ne pas dire écrit sur le fond – par les grands groupes privés de l'énergie (électricité, gaz, pétrole) et les constructeurs automobiles (Galich 2015, p. 316). Il sert de base aux feuilles de route hydrogène de l'Union européenne (Galich 2015, p. 318), et, par rebond, à la feuille de route hydrogène en France (Lucchese 2016, p. 8). Au cours des années 2010, la politique hydrogène de la France « se base sur les flottes captives professionnelles, ce qui permet de démarrer l'activité sans passer par des infrastructures très coûteuses pour le public » (Lucchese 2016, p. 11). Entreprises (DHL, poste) et municipalités achètent et gèrent ainsi l'équivalent de quelques milliers de véhicules hydrogène en France. Un exemple promotionnel est la Société des taxis parisiens propres (STPP), disposant de quelques dizaines de voitures hydrogène fin 2016 à Paris (Lucchese 2016, p. 28). Le déploiement d'infrastructures de recharge doit venir par la suite afin de généraliser le marché aux automobilistes privés (Lucchese 2016, p. 23). Alors que l'État allemand a financé « la moitié des infrastructures » pour accélérer l'essor de la mobilité hydrogène, la stratégie n'est pas claire en France. Daniel Hissel (2022, p. 6) suggère de différencier l'électro-mobilité en fonction des usages : véhicules à batterie dans l'espace urbain, véhicules hydrogène sur des distances interurbaines, comparables aux véhicules à essence. Mais, à ce stade, il ne me semble pas qu'il y ait une réflexion d'ensemble sur l'électro-mobilité.

L'électro-mobilité pourrait emprunter des formes variées de véhicules : hybrides, batteries, hydrogène, etc. Le cas allemand du service central N.O.W. (2005-2015) rappelle l'importance des synergies entre artefacts et infrastructures pour organiser une mobilité en termes économique et écologique (Bonhoff 2010, p. 4). Comme dans toute utopie technologique en construction, l'artefact est central bien sûr parce qu'il permet des usages. Le directeur général de la société de partage Autolib' exprimait cette idée en 2012 à un moment d'essor des voitures électriques : « Si vous n'avez pas cette batterie là, vous ne pouvez pas créer l'éco-mobilité urbaine. La

16. La *road map* de Renault se donnait 2015 comme objectif de commercialisation de véhicules hydrogène. La prédiction ne fut réalisée ni dans le temps ni dans la quantité. Un utilitaire Kangoo ZE (développé avec Symbio) devait être commercialisé fin 2019, d'après le site H2-mobile, mais le changement de direction du groupe en 2019 (à cause des poursuites financières contre Carlos Ghosn) semble avoir arrêté le projet. Une nouvelle *joint venture* a été créée avec Plug Power pour la commercialisation, prévue en 2022, d'un Renault Master Hydrogène, camionnette utilitaire à usage urbain (Auvity 2022, p. 4). Par rapport à la feuille de route initiale, l'écart temporel est de sept ans, soit un tiers de la durée du programme industriel.

17. Il serait intéressant d'étudier la techno-politique européenne à travers les rapports de force entre Parlement, lobbyistes, experts et administrations techniques. Par exemple, Daniela Chrenko (2022, p. 5-6) mentionne les groupes de travail pluridisciplinaires (Batteries Europe) préparant des rapports technologiques pour la Commission européenne (Strategic Research Agenda) en s'efforçant de coupler des enjeux économique, environnemental et sociétal. De tels groupes produisent également des indicateurs-clés de performance (KPI pour *key performance indicators*) servant de référence à la politique européenne.

batterie créé une voiture, la voiture créé un usage. Donc là on est en train de créer un usage » (entretien cité par Villareal 2014, p. 335). L'artefact matérialise donc des potentialités d'usage. Mais, les choix de motorisation par exemple impliquent une réflexion plus large, articulant usages et infrastructures. Spécialiste d'électrochimie des piles à combustible, Christophe Coutanceau (2022, p. 18) insiste bien sur la dimension spécifique de chaque solution fournie par l'hydrogène et par des technologies complémentaires. « Si c'est pour un train électrique non relié au réseau, on ne va pas mettre des batteries parce qu'il faudrait un poids énorme de batteries. Par contre, l'hydrogène est adapté. Pour les petits véhicules de tourisme, je ne suis pas sûr que l'hydrogène soit vraiment adapté. La batterie [...] est beaucoup plus adaptée ».

Nous touchons ici aux limites du monde hydrogène habité. Nous les atteignons de deux manières différentes, par le territoire d'abord, par le peuplement ensuite. Premièrement, l'économie de l'hydrogène 2.0 n'existe pas isolément comme le mode d'existence de la pile à combustible le préfigurait déjà (cf. 6.1.2). Le monde hydrogène a des frontières poreuses, ouvertes à d'autres mondes qui le font exister. Ce fut le cas du monde extraterrestre de l'hydrogène dans les années 1960 (cf. 6.1.3). Ce fut le cas d'une première utopie d'économie de l'hydrogène dans les années 1970, portée par le secteur gazier (cf. 6.1.4). Le monde hydrogène est hybride par nature, métissé par culture. C'est un système de systèmes. L'économie de l'hydrogène est aujourd'hui couplée par construction à de multiples systèmes qui lui préexistent au XX^e^ siècle : chaleur, électricité, environnement, gaz, numérique, pétrole, transport, etc. Ce qui le fait tenir ensemble, c'est un peuple bigarré qui y croit : des politiques, des technocrates, des industriels, des investisseurs, des techniciens, des amateurs, des suiveurs, des audacieux, des citoyens, etc. C'est la deuxième limite du monde hydrogène : malgré leur diversité, un nombre limité d'habitants. Car, « [b]ien sûr, il y a des gens qui n'y croient pas. » (Coutanceau 2022, p. 18). En dépit des artefacts, des discours et des désirs de son peuple, le monde hydrogène reste une utopie pour une large part des mondes contemporains.

Le vocabulaire du sacré réapparaît dans les discours des savants. L'imaginaire technicien, on l'a vu dans l'introduction du chapitre 5, adopte au moins une fonction du sacré : faire accepter une angoisse collective par rapport au monde habité. Au stade où nous sommes parvenus – l'année 2022 – le monde hydrogène hésite encore, entre l'indifférence des uns et la différenciation des autres, entre l'abstraction des utopies et la matérialisation des choses, entre le déni et le désir. Je prends cette hésitation comme une invitation à suspendre l'activité pour asseoir une réflexion plus attentive aux hasards et aux détours, plus distanciée par rapport aux enjeux du domaine. Le monde hydrogène renouvelle l'espace de dialogue entre potentialités et hésitations. Plutôt que des objectifs à atteindre, les mondes hydrogène se font prétexte à interroger la société contemporaine en discutant ses imaginaires en chantier.

Cet ensemble de synchronies et de synergies de l'économie de l'hydrogène est encore très neuf. Bruno Auvity (2022, p. 8), enseignant-chercheur en énergétique et thermique de l'hydrogène, l'explique très bien en ces termes : « jusqu'à très récemment, et encore on en est qu'aux prémisses, on n'avait jamais lié un réseau de gaz et un réseau d'électricité. Ils étaient complètement découplés. Maintenant, à travers ce vecteur-là, ça ouvre des perspectives d'optimisation et de flexibilité, ça ouvre des champs ». L'aspect exploratoire de l'entreprise est profond. Il rend compte, là encore, d'une récalcitrance du monde sensible. Mettre en relation les objets et les réseaux de l'énergie, « c'est quand même compliqué ». La technicité du domaine est caractéristique des filières de haute technologie. Mais, l'objectif visé par les promoteurs de l'économie de l'hydrogène est très nouveau par la médiation supplémentaire que le vecteur hydrogène introduit. L'économie de l'hydrogène, malgré ses incertitudes de réalisation, ajoute une forme de complexité au monde de l'énergie et, donc, aux sociétés du temps présent et du temps futur. Redonnons la parole au technicien passionné et habile technologue :

> on a intégré l'idée qu'on allait vivre dans un monde de l'énergie beaucoup plus compliqué. Là, aujourd'hui, on est dans un monde quasiment mono-combustible pour faire tourner tout type de machines. Lorsque tu passes par cet intermédiaire (l'hydrogène), tu rajoutes de la complexité, il faut développer les systèmes, il faut les contrôler, si on pouvait utiliser directement l'énergie électrique d'origine renouvelable au moment où elle est produite, qu'est-ce qu'on se ferait moins suer ! (Auvity 2022, p. 8)

6.4 Hasarder les mondes hydrogène : les imaginaires en chantier

Nous entrons ici dans les imaginaires des mondes hydrogène. Cette ultime dimension du chantier est sans doute la plus fondamentale car elle structure la pensée collective et façonne la créativité des sociétés humaines. Déconstruire les imaginaires est un premier pas pour concevoir des ruptures de civilisation. Je ne parle pas ici d'innovation. L'innovation est une incrémentation de surface qui donne le change au conservatisme social. Je prends ici le monde hydrogène en chantier comme un moyen d'interroger certaines structures de l'ordre social et certaines tendances de l'époque contemporaine. Le regard des sciences de l'homme est d'autant plus nécessaire que les imaginaires contemporains regorgent d'impensés et de domaines sacrés. Ils sont notamment colonisés par le régime technicien. Dans le texte « "Nautilus" et "Bateau ivre" », Roland Barthes (1957, p. 86-89) défend que l'œuvre de Jules Verne fabrique, derrière le thème-écran du voyage, « le geste continu de l'enfermement » et le « geste profond de [...] l'appropriation ». Contre la « psychanalyse de la caverne » du *Nautilus* de Jules Verne, il propose « une poétique véritable de l'exploration » du *Bateau ivre* d'Arthur Rimbaud. C'est d'une poétique véritable de l'exploration dont les mondes hydrogène auraient besoin pour devenir des espaces en rupture avec l'ordre capitaliste. Comment l'imaginaire des navires hydrogéniers de demain trouve-t-il une place dans l'héritage idéel du temps présent, entre le *Nautilus* et le *Bateau ivre* ?

Construire un avenir qui ne serait pas la continuation du régime technicien, productiviste et extractiviste, nécessite un déroutage par les humanités, les littératures et les imaginaires. Car, comme David Thoreau (1854, p. 231) errant à tâtons entre les champs et les bois de Walden, « ce n'est que lorsque nous avons perdu le monde – que nous commençons à nous retrouver ». Sans un tel déroutage, le monde hydrogène formera une nouvelle excroissance énergétique dans la bulle croissante de la civilisation matérielle. Je voudrais donc écrire cette dernière section comme un essai d'exploration des mondes hydrogène à travers leurs failles et leurs franges. Plus spéculative que les précédentes sections, cette explore propose des espaces de dialogue en partant des incertitudes des professionnels de la technique. Au hasard de mes rencontres avec quelques acteurs du domaine, j'ai retenu quatre thèmes récurrents des chantiers de l'hydrogène : leurs cartographies, leurs couleurs, leurs échelles et leurs méthodes.

6.4.1 Viatique : prendre la route ou la clé des champs ?

L'exploration des imaginaires de l'hydrogène débute par une réflexion sur le temps et sur l'espace, ou plutôt sur le temps comme espace.

Le temps comme espace : routes, frontières et au-delà

La théorie contemporaine de la métaphore a montré que le langage traduit la plupart des perceptions humaines par des métaphores signifiantes. Or, en anglais comme en français, le temps est métaphorisé sous la forme d'espace : le temps est paysage ; les moments sont des bornes du paysage ; le passage du temps est

mouvement ; l'avenir est devant l'observateur et le passé derrière ; le temps est continu et linéaire comme une translation ; etc. (Lakoff 1979, p. 214). Ces métaphores ne sont pas isolées mais reliées entre elles par une structure, qualifiée de « métaphore de la structure événementielle » (*event structure metaphor*). Lakoff (1979, p. 245) et ses disciplines ont montré que le langage métaphorique impose, par ces effets structurels, des significations. La « cartographie [métaphorique] n'est pas arbitraire mais s'inscrit dans le corps et l'expérience et la connaissance quotidienne ». Inconsciemment, spontanément, les objectifs s'expriment comme des destinations, les moyens de leurs réalisations comme des itinéraires à parcourir, leurs degrés de difficulté comme des distances à parcourir ou des cols à franchir.

Depuis deux siècles, les États-Unis sont les champions de la spatialisation de l'histoire. Ils ont forgé plusieurs grands mythes modernes de conquête d'une frontière spatiale : au XIX^e^ siècle, la conquête de l'Ouest par les pionniers de la frontière a fait les États-Unis, selon l'imaginaire des fictions de Hollywood ; à la fin de la Seconde Guerre mondiale, la science devient la « frontière illimitée » incarnant la puissance technologique et militaire des États-Unis [18] ; dès le début de la guerre froide, la frontière de l'espace extraterrestre devient un nouveau lieu d'affrontement, repoussé jusqu'à la Lune en 1969 puis au-delà (cf. 6.1.1) ; etc. Les mythographes états-uniens ont donc forgé le récit mémoriel de cet État-nation-continent comme exaltation de la conquête des espaces par le peuple. À l'inverse, certains historiens utilisent des métaphores spatiales du temps dans une perspective critique. Ils empruntent l'image des « trajectoires » pour déconstruire les tendances lourdes et lentes par lesquelles les acteurs dominants de l'énergie verrouillent les systèmes énergétiques depuis l'industrialisation de l'Europe (Teissier et Marrec 2019, p. 314-315). Dans le cas des mythes mémoriels comme dans celui de l'histoire critique, les structures métaphoriques fabriquent une intelligibilité du processus historique en le spatialisant. Ce mécanisme est aussi efficace en politique aujourd'hui pour *donner toute sa place* à un projet politique.

Orientée vers l'avenir en construction, la spatialisation du temps est une force argumentative pour susciter l'adhésion collective. Alain Gras soulignait avec justesse l'emprise du modèle ferroviaire pour structurer l'imaginaire du temps et du progrès. « L'image des "rails de la civilisation" que l'on trouve alors chez la plupart des ethnologues et philosophes parle d'elle-même : elle associe une innovation technologique, de pointe pour l'époque, à une vision d'un temps orienté par l'amélioration morale. » (Gras 1997, p. 123) À l'inverse, Anthony Giddens (1990, p. 157) compare l'accélération du temps présent des sociétés industrielles à « un camion furieux » impossible à arrêter [19].

La spatialisation d'un temps à sens unique prend la forme à l'heure actuelle d'une multiplication des « feuilles de route » (ou *road maps* en anglais). Chaque échelon politique produit sa feuille de route hydrogène : Union européenne, États-nations, régions, métropoles, etc. Les professionnels et les experts de l'hydrogène interviennent pour la production de projections futures conformément aux pratiques de « démocratie technique ». Pour l'Union européenne, les contributions de Jeremy Rifkin et du rapport McKinsey (2010) ont par exemple été décisives pour façonner le cadre « décarboné » et l'horizon « 2050 » de l'économie de l'hydrogène

18. L'image de la science comme frontière sans fin a été popularisée en juillet 1945 par un célèbre rapport au président des États-Unis, Franklin D. Roosevelt, par son conseiller, l'ingénieur Vannevar Bush. Dans cet essai au titre limpide, *Science The Endless Frontier*, Bush (1945) compare la conquête de l'Ouest et la frontière de la science parce que toutes deux justifient l'intervention de l'État fédéral et font la grandeur des États-Unis : « Ce fut la politique de base aux États-Unis que le gouvernement ouvre de nouvelles frontières. Il a ouvert les mers aux bateaux à vapeur et fournit des terres aux pionniers. Bien que ces frontières aient plus ou moins disparu, la frontière de la science demeure. C'est rester dans la tradition américaine – celle qui a rendu grands les États-Unis – que de nouvelles frontières soient rendues accessibles au développement de tous les citoyens américains. »

19. L'image est due au traducteur car Giddens utilise le nom commun anglais *juggernaut*, transfert, durant la colonisation de l'Inde, du nom propre, Jagannath, « le seigneur du monde » l'un des titres de Krishna. Inexistant en français, le terme *juggernaut* désigne en anglais « une force irrésistible, meurtrière et aveugle » (Giddens 1990, p. 145).

en Europe (cf. 6.3.4). Mais, de nombreux experts et chercheurs moins médiatisés participent, de manière routinière, à la fabrication de feuilles de route pour les cercles politiques de la décision.

Pour revenir à l'échelon régional, le Groupement d'intérêt scientifique Pôle d'excellence de la recherche ligérienne en énergie (GIS Perle) a été impliqué dans des ateliers de discussion ayant abouti à la production d'une feuille de route 2020-2030 en pays de la Loire. Si les chercheurs et les industriels ont un intérêt économique à venir y défendre leurs thèmes, les politiques et les administrateurs, qui gardent la main sur la version finale, y trouvent une connaissance du terrain permettant d'organiser la feuille de route en partant du tissu académique et économique local (Auvity 2022, p. 11). Ce qui convainc ici les décideurs, ce sont des promesses de création d'emplois « à court et moyen termes » (Lucchese 2016, p. 26). Le choix de l'échelle de temps est d'ailleurs crucial pour la communication politique. Ainsi, se projeter en 2050 « reste de la fiction pour les gens » (Roche 2022, p. 10). Un horizon trop lointain détourne des efforts à enclencher dès à présent : « quand on dit 2050, c'est loin et on se dit qu'on va y arriver ». Aussi, c'est l'horizon 2030 qui a été fixé pour projeter tous les derniers plans hydrogène d'envergure. Les feuilles de route décennales « donnent une trajectoire, elles ouvrent un possible pour le décisionnaire qu'il soit politique et économique, industriel [...] des perspectives par rapport au marché » (Hissel 2022, p. 11). Elles suivent le principe métaphorique qui fait correspondre la facilité de réalisation avec la distance à parcourir. Après coup, l'expérience montre que « les projections dans le domaine de l'hydrogène furent optimistes ; on avait des *road maps* très optimistes en termes de déploiement » par rapport à ce qui a été réalisé (Hissel 2022, p. 11). Jusqu'à présent, aucune feuille de route n'a donc pris la pleine mesure des difficultés pour bâtir un monde hydrogène.

Plus fondamentalement, la multiplication des feuilles de route me semble poser deux problèmes cruciaux à la technologie prise comme science humaine (Haudricourt 1987). Premièrement, au niveau des imaginaires, l'objet « feuille de route » relaie un mythe central de la société bourgeoise au XX^e^ siècle : la circulation automobile. Prendre la carte routière comme un outil politique revient à donner l'automobile comme une évidence. Or, *ce-qui-va-de-soi*, ce qui se donne comme universel ou a-historique, relève du mythe selon Roland Barthes (1957, p. 9). Les images latentes de la route, tirées des *road movies* hollywoodiens, évoquent un substitut moderne de liberté et d'aventure. Avec la voiture, c'est une nouvelle image de la frontière qui surgit : la route comme moyen de toucher une limite existentielle. Même la contestation des poètes et des va-nu-pieds de la génération *beatnik* est récupérée « sur la route » par la culture automobile de la bourgeoisie états-unienne. L'année 1957 où Jack Kerouack publie *On the Road*, Citroën sort la « DS » cette élégante « exaltation de la vitre » sur tôle (Barthes 1957, p. 165-166). Avec la Déesse, « [o]n passe visiblement d'une alchimie de la vitesse à une gourmandise de la conduite ». Aux États-Unis comme en France, l'automobile est « *l'objet* superlatif [...] messager de la surnature ». Plus d'un demi-siècle plus tard, la feuille de route entretient, en somme avec toutes ces petites *Mythologies* du quotidien, une « mystification qui transforme la culture petite-bourgeoise en nature universelle » (Barthes 1957, p. 7).

Deuxièmement, au niveau des pratiques, le projet « feuille de route » fige, à partir du présent, un futur à sens unique comme un tunnel d'autoroute long d'une décennie. La destination gomme les potentialités d'arrêt, de bifurcation, de rebroussement ou de négation. Elle porte le regard vers un futur qui est un passé *relooké*. La technique de la feuille de route recycle les infrastructures héritées, reboucle sur les voies rapides du quotidien et referme les chemins de traverse plutôt que de laisser une place pleine et entière aux radicalités et aux marges ouvertes par les imaginaires. L'innovation apparaît alors pour ce qu'elle est : une novation de surface – technique – destinée à conserver l'essentiel des structures sociales. La proximité sémantique des mots destination et destinée nous ramène aux masques du sacré dans la modernité technicienne. La *destination* de la

feuille de route jouerait-elle dans les démocraties techniques un rôle analogue à la *destinée* dans les théologies discursives ? L'une comme l'autre formulerait un ordre sacré, mais selon des finalités différentes : progression pour l'une, rédemption pour l'autre. Ce parallèle rejoint encore le bestiaire mythologique de Barthes :

> Je crois que l'automobile est aujourd'hui l'équivalent exact des grandes cathédrales gothiques : je veux dire une grande création d'époque, conçue passionnément par des artistes inconnus, consommée dans son image, sinon dans son usage, par un peuple entier qui s'approprie en elle un objet parfaitement magique. (Barthes 1957, p. 164)

Le magique pointe vers le sacré. Or, le sacré d'une société relève de ce qui est considéré comme intouchable par le peuple. En 1970, les utopistes de l'hydrogène inscrivaient tous l'économie de l'hydrogène dans une croissance exponentielle de la production électrique sur la base d'une expérience historique depuis le début du XX^e^ siècle (cf. 2.4). Ils considéraient l'équation énergie-civilisation comme sacrée (cf. 1.3.4) et la croissance électrique comme intouchable. Cette double croyance était largement partagée à leur époque puisque les consommations de gaz et d'électricité ont augmenté de 40 % aux États-Unis durant l'espace temporel qui devait voir advenir l'économie de l'hydrogène (1970-2020). Il y aurait ainsi deux sacrés, l'un officiel et reconnu comme tel, la religion « en conserve », l'autre latent et impensé, la religion « vivante » (Bastide 1975, p. 8-9). C'est du côté latent que le régime technicien fabrique de l'impensé à une cadence fordiste. Compétition, croissance, efficacité, innovation, progrès, etc., ces mots structurent l'économie politique dominante des sociétés occidentales à la manière d'une liturgie technicienne. Un exemple récent, brillant entre mille, montre le refus du premier cercle de la décision de prendre au sérieux la critique sur des problèmes ardus de société – l'expansion (ou pas) de la téléphonie 5G – et son incapacité à vouloir considérer le désaccord comme un appel au dépassement politique plutôt qu'à la caricature infantile [20]. Or, face aux défis écologiques, sociaux et mentaux du XXI^e^ siècle, nous avons besoin de beaucoup mieux que des slogans, des publicités, des mots-écrans et des sarcasmes.

Voyons comment le détour par la métaphore routière donne accès à certains clés des champs pour bifurquer de la pensée routinière. La feuille de route fait deux fois écran à l'approfondissement de la réflexion. Comme objet, la feuille de route symbolise la voiture. Or, si le monde hydrogène se place en rupture par rapport aux héritages dominants, certains imaginaires devraient mettre en chantier des futurs possibles sans voiture individuelle. Comme projet, la feuille de route canalise la pensée. Elle la rend tubulaire. Or, le monde hydrogène a besoin, en tant que système de systèmes, d'une pensée complexe. Quatre cas précis nous déroutent des feuilles de route classiques de l'hydrogène et nous conduisent à transgresser certains imaginaires fossilisés.

Les deux premiers exemples évoqués présentent des pensées routinières, héritières du monde fossile de l'automobile (cf. 6.2.2). De hauts responsables de la construction automobile sont parfois considérés comme « visionnaires » parce qu'ils pensent la substitution du pétrole par l'hydrogène. C'est le cas de Pierre Beuzit, ancien directeur de la recherche chez Renault, devenu promoteur de la mobilité hydrogène [21]. Interrogé sur

20. Je fais ici référence au discours d'Emmanuel Macron du 14 septembre 2020 dans le cadre du projet gouvernemental France Relance, significativement associé au slogan américanisé de *French Tech*. Après une brève allusion au pays des Lumières, l'orateur réduisait le choix pour la France d'adopter (ou pas) la cinquième génération de standards de téléphonie mobile dite « 5G » à une alternative idiote : soit on était pour « l'innovation » de la 5G, soit on était pour le « modèle amish » de la bougie. Qu'un président de la République en exercice choisisse sciemment des propos aussi obtus à propos d'un choix de société qui n'a rien d'évident dépasse mon entendement malgré une bonne dose compréhensive. Une lueur (bougie ou ampoule) d'espoir dans la sombre indignité politicienne : l'attraction morbide des cercles de la décision pour la croissance technologique confirme la pertinence d'une archéologie des contraintes et des désirs de la technique.

21. P. Beuzit (2007) a notamment publié *Hydrogène : l'avenir de la voiture ?*, un essai faisant la promotion de la voiture hydrogène. Il y raconte la mise en place du plan R&D hydrogène de Renault (2000-2009), qu'il a piloté jusqu'à sa retraite en 2006.

la compétition induite par la voiture pile à combustible sur le marché traditionnel du thermique, il répond sans hésitation : « Pour nous, c'est la voiture qui remplace la voiture à pétrole ! » (Beuzit 2010, p. 10). Le deuxième exemple suit la même logique de substitution. En juin 2022, le Parlement européen (suivant en cela la Commission européenne) vote une loi interdisant la commercialisation de voitures thermiques neuves en Europe à partir de 2035 (Agence France Presse 2022). Cette initiative confond technologie de motorisation et nature des combustibles utilisés [22]. Une telle logique de substitution interpelle car elle présuppose semblables des systèmes énergétiques qui ne le sont pas. L'économie de l'hydrogène est construite par couplage entre de multiples sources d'énergie et de multiples fonctions d'usage (figure 6.5). Elle est l'inverse d'une économie basée sur un combustible dominant – le pétrole – et sur un moteur unique – thermique à combustion. Or, c'est ce modèle pétrolier avec « un seul marché à réguler » (Péra 2022, p. 12) qui domine la pensée économique jusqu'à aujourd'hui. Certes, il y a accumulation de sources d'énergie au cours du temps (figure 2.2), mais le système énergétique mondial est organisé par les énergies fossiles, qui sont elles-mêmes dominées par le pétrole. La production mondiale d'énergie primaire est structurée comme suit : 32,3% pétrole, 24,1% gaz, 28,2% charbon, 11,2% renouvelable (moitié hydroélectrique), 4,2% nucléaire (chiffres 2019) (British Petroleum 2021). Penser par substitution garde inchangée la structure économique générale, dominée par le transport individuel et l'électricité d'origine fossile. Or, « les économies fondées sur le charbon et le pétrole ont instauré un régime de temporalité chronophage. Le paradoxe est que plus on consomme du temps, plus on manque de temps. » (Loeve et Bensaude-Vincent 2018, p. 173). Plutôt qu'une pensée fossilisée par le modèle pétrolier, le monde hydrogène exige un revitalisation des modes d'existence et des modèles économiques. Les deux exemples suivants font ainsi glisser de l'économie politique à l'écologie politique.

En rendant difficile la production et le stockage d'énergie, le monde hydrogène démasque certaines incohérences du monde fossile. Plus particulièrement, il montre un déséquilibre entre la légèreté des discours politiques de verdissement et la pesanteur des pratiques commerciales. Le troisième cas est développé par un enseignant-chercheur en électrochimie, spécialiste des piles à hydrogène, de l'université de Poitiers. Christophe Coutanceau (2022, p. 13) compare l'influence publicitaire sur l'achat croissant de grosses voitures en Europe – « Quand je vois [...] les *pubs* [...] je suis un peu vert ! » – et ce qu'implique l'électrification d'un SUV décarboné – « une voiture à deux tonnes avec 400 kilos de batteries ». Ses préconisations interpellent le fonctionnement économique des sociétés démocratiques occidentales. « Donc, il faut commencer à expliquer aux gens aussi qu'un SUV électrique, c'est une ineptie. [...] il faut des petites voitures légères et là, oui, ça a du sens pour réduire l'énergie et [... les] matériaux » utilisés. Ce troisième cas confronte les choix de consommation et les conséquences écologiques. Le quatrième et dernier exemple ajoute une dimension politique susceptible d'imposer des contraintes collectives. Il concerne un vote législatif (de juin 2021) généralisant pour 2025 le déploiement de « zones faible émission » (déjà existantes dans plusieurs villes françaises) dans toute agglomération de plus de 150 000 habitants. Enseignant-chercheur en énergétique et spécialiste d'hydrogène à l'université de Nantes, Bruno Auvity (2022, p. 4) explique que cette « logistique du dernier kilomètre, pour acheminer les biens et les personnes » stimule la commercialisation des « camionnettes et petits fourgons hydrogène-batteries parce qu'il faut de l'autonomie, qu'il faut pouvoir transporter de la charge ». Ce choix politique contraignant les métropoles semble plutôt stimuler le monde hydrogène. Auvity (2022, p. 16) enrichit sa première lecture par une interrogation plus profonde : « est-ce que les véhicules hydrogène servent

22. « je trouve sincèrement une ineptie des gouvernements et de l'Europe de d'interdire qu'en 2035 il fallait arrêter la vente des véhicules thermiques. Ça n'a aucun sens, ça dépend ce qu'on met dans le véhicule thermique. Si je mets de l'hydrogène dans mon véhicule thermique, à part quelques NO_X que je vais former [...] ou des biocarburants [...] où est le problème puisque ça rentre dans le cycle du carbone ? Je pense qu'ici il y a une erreur qui a été faite ; je pense qu'un certain nombre de gens s'en sont rendus compte ; et il faut faire attention. » (Coutanceau 2022, p. 11)

seulement à acheminer les commandes d'Amazon en centre ville ? » La question du taux d'émission de CO_2, de la « décarbonation » de l'économie, devrait alors être considérée d'une manière plus large, plus systémique. L'enseignant-chercheur conclut en soulignant un angle mort de la réflexion collective, qu'elle soit académique ou citoyenne : « La question, c'est : "Il nous faut des véhicules qui émettent peu. Comment on fait ?" Mais, si c'est pour faire du commerce porte à porte de biens manufacturés en Chine via Amazon, ce n'est pas questionné [...] d'un point de vue institutionnalisé ».

Ainsi, ces quatre exemples concrets sortent la pensée technologique de sa torpeur. En projetant un monde imaginé, aux ressorts complexes et aux limites floues, ils interrogent les fausses évidences du monde habité. Par ses imaginaires hésitants, le monde hydrogène transgresse un modèle fossilisé, basé sur l'énergie facile du pétrole et la mobilité individualisée de la voiture. La récalcitrance de l'hydrogène à être produit, acheminé, stocké et utilisé doit servir d'étalon du normal de l'énergie pour repenser la distinction entre ce qui est désirable, ce qui est souhaitable et ce qui est faisable. La récalcitrance du sensible nous pousse à réévaluer, par contraste, la démesure d'un régime technicien où le désirable doit devenir faisable même s'il n'est pas souhaitable. Le système pétrolier qui nous habite a de bonnes aptitudes à la démesure. Il nous parle de la volonté de puissance, en actes et en symboles.

6.4.2 Les couleurs de l'hydrogène ou l'arc-en-ciel des puissances

La couleur que l'on attribue aux choses a une fonction symbolique. Elle véhicule des valeurs et des promesses. Ainsi, le *verdissement* de l'économie est un puissant ressort politique de l'Union européenne. De telles pratiques ne sont pas neuves en régime technicien. Au début du XX^e^ siècle, É. Cardot (1907) pensait l'histoire des vallées alpestres comme la succession colorée de régimes énergétiques : houille verte du bois, substituée par la houille noire du charbon, elle-même remplacée par la houille blanche des torrents et rivières (cf. 4.3). Un siècle plus tard, Jean-Pierre Williot (2020, p. 3) s'essaye à une interprétation colorée de l'histoire du gaz pour interroger la notion de transition énergétique. Le « gaz noir », artificiel, fabriqué à partir de charbon (1840-1960) est ainsi remplacé par le « gaz bleu » extrait des gisements fossiles, à partir des années 1950-1960, avant que ne se superpose plus que ne se substitue le « gaz vert » issu de la biomasse de l'agriculture au XXI^e^ siècle. La coloration symbolique de ces trois types de gaz (tous empiriquement transparents) compose une intéressante séquence de l'artificiel au naturel puis à un second artificiel. Le « gaz de ville » synthétisé chimiquement à partir de matière fossile est repeint en noir alors que le « gaz naturel » extrait du sous-sol se dote d'un séduisant reflet bleuté, dont la flamme sera ensuite recomposée avec la couleur verte attribuée au « biométhane » qui, lui aussi, provient d'une synthèse chimique, mais à partir de matière organique et non fossile. Ces recolorations des énergies au cours des temps font écho à des assemblages de couleurs à un temps donné. L'arc-en-ciel *multicolore* des houilles servit d'étendard politique en France dans les années 1920 et 1930 pour l'aménagement du territoire d'un État qui se voulait moderne et impérial (cf. 5.1.1). Il a durablement marqué les imaginaires et les pratiques technocratiques. Un demi-siècle plus tard en effet, la carte de *La France des énergies nouvelles* (1980) de la Délégation interministérielle à l'aménagement du territoire et à l'attractivité régionale (DATAR) reprend (sans la mentionner) la distribution spatiale de l'arc-en-ciel des houilles de l'entre-deux-guerres (Marrec 2018a, p. 608). À nouveau aujourd'hui, la métaphore de l'arc-en-ciel réapparaît dans le ciel du monde hydrogène.

Noir comme les gisements fossiles

La référence de puissance n'est plus le charbon mais le pétrole. Mais, sa couleur fossilisée est la même : « noire ». Le pétrole trouve sa puissance dans le rapport élevé, rarement égalé dans la nature, de l'énergie

chimique emmagasinée par unité de masse. La densité massique de l'essence est de l'ordre de 13 kW/kg (soit 9,5 kW/L). Celle des meilleures batteries lithium-ion vaut environ 0,25 kW/kg : 50 fois moins ! La « lenteur des progrès dans le domaine du stockage de l'énergie » déplorée par Jean-Marie Tarascon (Tarascon 2010, §28), et plus généralement par les chercheurs en électrochimie et science des matériaux, est jugée par rapport à cette force de la nature qu'est le pétrole. Son atout est donc d'abord phénoménologique. « Si le pétrole a pris un tel avantage, c'est que objectivement, il n'y a rien de mieux », résume simplement la directrice de la plateforme hydrogène de Belfort-Montbéliard, Marie-Cécile Péra (2022, p. 12). Trop puissant, le pétrole est aussi très docile. Ce qui distingue le pétrole du gaz naturel et du charbon, précise Péra, c'est qu'il est « le plus polyvalent » des trois : liquide à température ambiante quand le charbon est solide et le gaz naturel gazeux. Le pétrole est fluide, le charbon ne l'est pas assez, le gaz naturel l'est trop. Tous trois sont émetteurs de gaz à effet de serre : CO_2, CO, CH_4, etc. La combustion d'énormes quantités d'hydrocarbures par les sociétés industrielles depuis deux siècles convertit les gisements fossiles en d'actifs gaz carbonés, qui, excités par les rayons du soleil, modifient les climats de la Terre à une vitesse anthropique inquiétante par rapport aux temps biologiques et géologiques. Toute l'affaire relève d'un terrible malentendu ontologique :

> On a voulu considérer ces composés carbonés comme de simples réservoirs d'énergie à libérer. On a ainsi « craqué », défait les liaisons chimiques entre carbone et hydrogène pour consommer le carbone comme on consommerait un aliment, avant de le délaisser pour tourner à nouveau les espoirs vers l'hydrogène. Ce faisant, on a délibérément fait oublier que ces architectures moléculaires sont des ouvrages du temps, qu'elles se sont formées au cours des longues durées de l'histoire de la Terre, pendant des centaines de millions d'années. [...] toute énergie fossile est du temps concentré : la consommer, c'est consommer du temps. (Loeve et Bensaude-Vincent 2018, p. 171-172)

Le temps concentré du noir pétrole se consume, se disperse sous forme d'invisibles esprits excités et assombrit notre horizon réchauffé. En principe, l'affaire est simple. En jargon technicien, on parle de « décarboner » le « mix énergétique ». En politique européenne, les énergies fossiles sont, paraît-il, sur la *liste noire* de l'Union ce qui a considérablement *noirci* leur image publique. Aux sommets mondiaux, chaque nouvelle Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques (COP) reverdit solennellement son serment d'arrêter. Puissant et docile, mais perturbateur et coupable, le pétrole est invité à sortir... Ou plutôt, à rentrer en lui-même : le pétrole doit apprendre la patience et rester gisant dans les immenses puits souterrains de carbone. En pratique, la consommation d'énergie des sociétés humaines n'a jamais été aussi forte qu'aujourd'hui. Elle ne cesse d'augmenter sur Terre. De la COP 1 à la COP 25 (1995-2019), la consommation mondiale d'énergie primaire est passée de 380 à 580 exajoules (British Petroleum 2021, p. 12). Cette hausse de 53 % en 25 ans est assurée en large majorité par la combustion de matières fossiles : pétrole, charbon et gaz comptent pour 85 % de la consommation mondiale d'énergie. C'est beaucoup 85 % à « décarboner », c'est-à-dire à *réduire*, non en termes métaboliques de flux d'énergie, mais au sens redox de forme chimique (Loeve et Bensaude-Vincent 2018, p. 245). Les sociétés industrialisées du XXI^e^ siècle ont donc un « mix énergétique » bien sombre. Mais, comme « on est obligé d'en sortir. On est obligé d'imaginer... » (Péra 2022, p. 12).

Pour éclaircir le mix énergétique mondial, il faut en effet beaucoup d'imagination. En Europe, la proportion d'énergies fossiles descend de dix points : 73,5 % des 83,4 exajoules qu'elle consomme annuellement (chiffres 2019) (British Petroleum 2021, p. 11). Certains pays européens ont eu une politique de l'énergie en faveur du nucléaire depuis les années 1970, ce qui monte l'électronucléaire, non renouvelable, à 9,9 %, et l'Union européenne a basé sa politique économique sur le solaire et le photovoltaïque depuis les années 2010, également

à 9,9 %, le mix étant complété par de l'hydroélectrique à 6,7 %, lui aussi renouvelable. L'hydrogène est présenté comme une solution parmi beaucoup d'autres pour décarboner l'économie. Christophe Coutanceau (2022, p. 9, 18) est à nouveau très direct : « Alors, l'hydrogène, ça ne suffira pas [...] Quand c'est présenté – comme c'est souvent présenté – comme la solution miracle du futur, je n'y crois pas [...] C'est une solution » parmi d'autres. Les leviers d'action suggérés par les acteurs de l'hydrogène sont d'ailleurs très nombreux : biomasse, capture et stockage de CO_2, cogénération de chaleur et d'électricité, efficacité et performance des machines, énergies renouvelables, isolation des bâtiments, modifications alimentaires (proportion de viande), récupération de chaleur fatale, réduction des besoins en énergie (climatisation, consommation, température des intérieurs, transport, etc.), réduction des matériaux de construction, etc.

L'hydrogène permet de tirer certains de ces leviers d'action. Marie-Cécile Péra (2022, p. 20) insiste pour l'hydrogène, comme Christophe Coutanceau pour la décarbonation, sur l'importance de jouer toutes les cartes ensemble, sans négliger une seule piste. « L'hydrogène ne sera pas justifié par des smart-grids uniquement, pas plus que par le transport ou que le tertiaire. Il doit être utilisé dans toutes ces applications-là sinon on va rester sur des marchés de niche. » Que signifie cette multiplication des pistes d'action pour résoudre le problème énergétique des sociétés fossiles du XXI^e^ siècle ? Sur le temps long du régime technicien, on peut y voir la mise en doute de la double croyance technocratique qu'il existe une solution aux problèmes de société et qu'il est possible de trouver la meilleure (cf. 1.3.4). Serait-ce alors un indice de l'essoufflement de l'optimisme technocratique et de la démesure technologique du régime technicien ? Soulignons cette option pluraliste revendiquée par certains chercheurs en sciences de l'ingénieur. Ils ne sont pas les seuls. Ainsi, H2-Mobile (2022a) est une agence de *lobbying* financée par six acteurs économiques de l'hydrogène [23]. Elle évoque elle aussi le pluralisme énergétique du futur d'une manière qui rappelle une stratégie commerciale de promotion de la filière hydrogène :

> Parce que la mobilité de demain sera plurielle sur le plan énergétique, H2-Mobile vise à informer grand public, professionnels et collectivités sur les initiatives et les perspectives de la filière. Sans vouloir entrer en concurrence avec d'autres énergies ni évangéliser la filière, il s'agit d'expliquer le rôle de l'hydrogène dans la mobilité d'aujourd'hui et de demain et de justifier sa complémentarité avec d'autres sources d'énergies. (H2-Mobile 2022a)

Le site joue la carte de la neutralité de l'information. On retrouve ainsi sans cesse des formules du type « tout ce qu'il faut savoir » comme le choix de l'information et de la forme qu'on lui donne ne relevait pas d'un registre d'interprétation. L'invocation du pluralisme énergétique résulte alors, me semble-t-il, d'une adaptation communicationnelle aux contextes politiques des années 2020 d'un héritage de la culture publicitaire du capitalisme industriel du XX^e^ siècle. Mais, revenons à nos moutons, c'est-à-dire aux couleurs l'hydrogène.

Gris anthracite comme l'hydrogène jaune

Aujourd'hui, l'hydrogène est « gris ». Tout le monde le dit. Environ 95 % de l'hydrogène produit dans le monde provient de gisements fossiles. L'hydrogène a donc aujourd'hui une belle couleur gris « anthracite », du nom de cette variété de charbon contenant autour de 95 % de charbon en masse. Le procédé hégémonique est aussi le moins cher : le vaporeformage de gaz naturel produit un kilogramme d'hydrogène pour environ 1,5 €(H2-Mobile 2022b). Mais, il dégage 10 kilogrammes de CO_2 par kilogramme d'hydrogène et beaucoup

23. Cette société d'information, fondée par Michaël Torregrossa en 2019, affiche clairement son financement par des entreprises de taille et de fonction variables dans la filière hydrogène : Artis (équipement), CRMT (bureau d'études, R&D), Edge Energy Europe (équipement, stations hydrogène), Engie Solutions (stations hydrogène), Groupe Iming (bureau d'études), MPH Energie (stations hydrogène)

de chaleur car la réaction chimique a lieu entre 700 et 1 000°C en présence de catalyseurs. Un second procédé, lui aussi utilisé, produit de l'hydrogène par gazéification du charbon. On parle alors d'hydrogène « noir » parce qu'il dégage 20 kilogrammes de CO_2 par kilogramme d'hydrogène. La production annuelle de 70 millions de tonnes d'hydrogène émet ainsi environ un milliard de tonnes de dioxyde de carbone dans l'atmosphère de la Terre (International Energy Association 2019 ; H2-Mobile 2022b). Ceci compte pour 3 % environ des émissions mondiales, 34 milliards de tonnes de dioxydes de carbone étant comptabilisées en 2019 par British Petroleum (2021).

Fort de son expérience et de ses connaissances en tant que responsable pile à combustible chez Opel en Allemagne, Jochen Jakowski (2010, p. 10) parvenait à la conclusion suivante sur l'électro-mobilité : « le taux d'émission [de gaz à effet de serre] des voitures électriques est pire avec le mix énergétique existant qu'avec un bon moteur à combustion interne ». Cette comparaison entre les mobilités thermiques et électriques reste intéressante car le mix électrique de chaque pays n'a pas structurellement beaucoup varié depuis douze ans. Elle attire aussi notre attention sur l'hydrogène « jaune », dont la production est assurée par un électrolyseur branché au réseau électrique et dont l'émission équivaut donc au mix électrique.

L'empreinte fossile de l'hydrogène, qu'il soit gris ou jaune, n'est pas son seul inconvénient énergétique. « Le problème majeur de l'hydrogène est sa faible densité énergétique par unité de volume » : autour de 2 kWh/L, résume Christian Ngô (2016, p. 14), dans l'article éponyme des *Techniques de l'ingénieur*. Il y a 50 ans, Derek Gregory (1973, p. 21), fervent promoteur de l'hydrogène, soulignait que la capacité calorifique volumique de l'hydrogène était le tiers de celle du gaz naturel. Par conséquent, à énergie égale, le volume d'hydrogène à transporter était triple que celui de gaz naturel. La comparaison donnée par les *Techniques de l'ingénieur* est encore plus défavorable : à énergie égale, le volume d'hydrogène à déplacer est 15 fois supérieur à celui de pétrole. L'hydrogène est un fluide qui prend beaucoup de place. Cette expansion volumique a des conséquences sur la taille démultipliée des infrastructures nécessaires pour la distribution d'hydrogène. Comment croire aux promesses écologiques des mondes hydrogène avec ces deux sérieux handicaps de départ ?

Promesses multicolores de l'arc-en-ciel de l'hydrogène

Une stratégie efficace consiste à recourir au symbolisme de l'*arc-en-ciel de l'hydrogène*. L'expression « arc-en-ciel » est prononcée par Robin Roche (2022, p. 10). Ce spécialiste des systèmes de l'hydrogène à l'université de technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM) ouvre l'arc-en-ciel par l'hydrogène « blanc » ou « natif ». Cet hydrogène repose à l'état naturel dans des gisements souterrains méconnus, dont le plus célèbre est celui de Bourakébougou au Mali (H2-Mobile 2022b). Roche (2022, p. 10) précise : « *A priori*, ce n'est quand même pas une source gigantesque ». Sa collègue, Marie-Cécile Péra (2022, p. 13), est plus tranchée. Elle critique l'« engouement pour trouver des sources naturelles de l'hydrogène » car, si d'importantes réserves étaient mises en évidence par des sondages géologiques, les mêmes mécanismes géopolitiques que ceux du pétrole se reproduiraient. À nouveau, « des gisements, qu'on va épuiser, qui ne sont pas homogènes à la surface du globe [... induiraient des] prises de contrôle par les grands groupes sur ces marchés, d'exclusion d'une partie de la planète de ces marchés » (Péra 2022, p. 13), sans parler de la pollution des océans et des sous-sols durant l'extraction industrielle. L'économie de l'hydrogène perdrait son intérêt vis-à-vis de la relocalisation et de la dépollution des systèmes énergétiques. À l'inverse, le site internet H2-Mobile (2022b) proche des industriels de la filière hydrogène ne mentionne ni les problèmes de pollution, ni les inégalités économiques. Il dresse un tableau d'abondance de l'hydrogène natif. « Selon de nombreux experts, les sources naturelles d'hydrogène blanc seraient assez importantes pour satisfaire les besoins en hydrogène de toute la planète. » L'exploitation

industrielle de ces ressources souterraines et océaniques « intéresse donc de plus en plus les firmes industrielles et les gouvernements qui tentent de mettre au point des techniques viables pour l'exploiter sur le long terme. » (H2-Mobile 2022b).

Dès la première couleur, on voit donc que les acteurs de l'hydrogène n'attribuent pas la même valeur à chaque mode de production. La métaphore de l'arc-en-ciel de l'hydrogène produit une échelle de valeur. En cela, la situation est comparable à l'arc-en-ciel des houilles des années 1920 (cf. 5.1). Cette similitude de comportements à un siècle de distance est d'autant plus intéressante pour repérer des effets structurants à long terme du régime technicien que l'arc-en-ciel des houilles n'a pas laissé de trace dans la mémoire collective de l'énergie. Dans les années 1920, les valeurs dominantes étaient la puissance, la synchronisation et l'optimisation des réseaux électriques. Elles restent toutes les trois pertinentes pour l'économie de l'hydrogène des années 2020, dans le cadre prévisionnel de l'intégration des énergies renouvelables aux macro-réseaux électriques à l'horizon 2050 (cf. 6.2.3).

La revendication de la « propreté » de l'hydrogène est une valeur nouvelle par rapport aux années 1920. H2-Mobile fait miroiter une abondance de ressources d'hydrogène natif, donc « propre ». Un rapport de l'Agence internationale de l'énergie (International Energy Association 2019) intitulé *Le futur de l'hydrogène* à destination du G20 contenait plus d'une centaine d'occurrences de l'expression « énergie propre » (*clean energy*), soit une fois toutes les deux pages. La quinzaine d'occurrences du mot « pollution » concernaient toutes la pollution atmosphérique, que l'économie de l'hydrogène est censée résoudre. Dans un autre registre, Pierre Beuzit (2010, p. 10) pare le véhicule hydrogène de toutes les vertus écologiques et ergonomiques : « Ce sont les mêmes performances, les mêmes prestations [que le thermique ...], sauf que c'est zéro émission, zéro CO_2, zéro bruit, c'est la voiture un peu idéale entre guillemets ». La notion de « propreté » mise en avant dans l'économie de l'hydrogène se rapproche des utopies de l'hydrogène des années 1970. Derek Gregory (1973, p. 14) opposait le modèle du « sans consigne, pas de retour » des gaz polluants les centres urbains par les moteurs thermiques au modèle « retour vide » de la production nucléaire et solaire d'hydrogène. Il se focalisait uniquement sur l'émission des gaz polluants. C'est aussi le cas aujourd'hui en se focalisant sur les seuls gaz à effet de serre. Ce prisme dominant de la décarbonation est le résultat du « verdissement » politique de l'économie depuis 2007 surtout, à partir du premier paquet énergie-climat de l'Union européenne (cf. 6.2.2) et de sa déclinaison française à travers le « plan véhicule décarboné » du mandat présidentiel de Nicolas Sarkozy (2007-2012) (cf. 6.2.3). Cette orientation politique dominante a conduit à légiférer pour établir des normes de labellisation « bas-carbone ». Comme pour d'autres produits de consommation, « ce type de mécanisme [... permet de] s'assurer de la traçabilité » du produit et de la chaîne de fabrication (Roche 2022, p. 10). La norme « décarbonée » vaut trois kilogrammes de CO_2 dégagés par kilogramme d'hydrogène produit.

Le prisme de la décarbonation est une aubaine pour avancer « le rôle de l'énergie nucléaire dans un système d'énergie propre » (International Energy Association 2019, p. 3). L'hydrogène « rose » est ainsi valorisé par l'Agence internationale de l'énergie pour *Le futur de l'hydrogène*. Le rapport énumère les sources décarbonées d'hydrogène en rassemblant renouvelables, biomasse et nucléaire. Il choisit aussi des cas mettant en valeur le nucléaire. Le rapport explique les bénéfices de la production thermique d'hydrogène à partir de la chaleur dégagée par les centrales nucléaires en fonctionnement (International Energy Association 2019, p. 46). Il y a là deux biais idéologiques. Le premier biais renvoie au futur une cogénération qu'il est possible de mettre en œuvre au présent. Le second biais est de valoriser la filière nucléaire, qui représente, en 2019, 10 % de l'électricité produite dans le monde, alors que les 63 % produits par centrales thermiques fossiles pourraient donner lieu à un gain quantitatif plus important (British Petroleum 2021, p. 65). Le site H2-Mobile est également

dithyrambique sur le nucléaire. Il détaille un projet d'EDF de coupler la centrale nucléaire de Sizewell en Angleterre à un électrolyseur pour la production d'un « hydrogène propre » à l'horizon 2030 (H2-Mobile 2022b).

Le nucléaire est convoqué à la fois dans l'économie de l'hydrogène des années 1970 et celle des années 2020. Comme le souligne avec humour Christophe Coutanceau (2022, p. 10), « la nuance entre "vert" et "décarboné", c'est le nucléaire ». Présenter comme similaire les énergies renouvelables, la biomasse et le nucléaire sous prétexte qu'ils ont des taux d'émission de gaz carbonique proche réduit considérablement le spectre du sensible. C'est méconnaître la diversité des modes d'existence des choses en les réduisant à une seule donnée chiffrée. L'hydrogène issu de la biomasse parfois qualifié de « brun » doit être considéré avec attention. Il « faut réfléchir pour que cette exploitation-là n'impose pas une monoculture ou une pression sur les territoires, les terrains, etc., parce que, sinon, on tombe sur des aspects de biodiversité » et des problèmes d'autonomie alimentaire (Coutanceau 2022, p. 10). La biomasse pointe vers les déchets déjà existants, de l'agriculture ou de l'industrie du bois.

Le site internet H2-Mobile (2022b) met en évidence une autre force argumentative de l'image de l'arc-en-ciel. En nuançant « la palette de couleurs de l'hydrogène [...] [d]u bleu, du vert, du rose, du blanc ou même du noir », la métaphore suggère une grande porosité entre les modes de production de l'hydrogène et une souplesse de passage de l'une à l'autre couleur. H2-Mobile suggère ainsi un passage facile de l'hydrogène gris, hégémonique, à l'hydrogène bleu par capture et stockage du dioxyde de carbone. Ce mécanisme, est-il écrit, « devrait d'ailleurs permettre de stocker d'ici à 2030 près de 15 % du CO_2 émis à travers toute la planète », bien au-delà de la filière hydrogène. H2-Mobile promet donc beaucoup dans la mesure où la capture et le stockage de dioxyde de carbone ne sont pas encore effectifs à l'échelle industrielle (cf. 5.3.3). Il fait écran aux réalités de terrain en promettant une voie encore incertaine pour bleuir l'hydrogène.

Une controverse académique est d'ailleurs en cours dans la revue internationale « Energy Science & Engineering » (Wiley) sur le taux de carbonation de l'hydrogène bleu. Robert Howarth, du département d'écologie de Cornell, et Mark Jacobson, du département d'ingénierie environnementale de Stanford, défendent, modélisation à l'appui, que le bilan carbone complet de l'hydrogène bleu ne fait gagner que 10 % d'émission de CO_2 par rapport à l'hydrogène gris (Howarth et Jacobson 2021, p. 1676). Une telle affirmation induit la réponse, cinq mois plus tard, d'un collectif de 24 chercheurs européens et états-uniens, tous issus des sciences de l'ingénieur. Leur analyse, basée sur des améliorations attendues dans un « proche futur » et des synergies à déployer de manière systématique, annonce plutôt la capture de 90 % des émissions de CO_2 (Romano et al. 2022, p. 4, 9). Répondant à leur commentaire, Howarth et Jacobson (2022, p. 5) concluent qu'« il n'y a rien de vert dans l'hydrogène bleu ». Ils interprètent l'hydrogène bleu comme un affichage de l'industrie pétrolière et gazière pour « soutenir leur modèle économique ». H2-Mobile, on le voit, ne prend pas du tout en compte la complexité des réalités de la production d'hydrogène bleu. Le site joue aussi du contresens écologique car il ne mentionne pas les déséquilibres biologiques potentiels que pourrait induire un stockage souterrain de carbone à l'échelle industrielle. Par des énoncés-écran et valise, le site « d'information » H2-Mobile (2022b) masque des problèmes centraux des mondes hydrogène en chantier.

Ce tour d'horizon de l'arc-en-ciel de l'hydrogène a ouvert certaines échappées vers des problèmes de pollution de l'atmosphère, des océans et des sous-sols. Ces problèmes sont contrebalancés par des promesses technologiques au mieux à l'horizon 2030. Même du point de vue limité de la décarbonation, nous sommes restés au point de départ : l'économie de l'hydrogène est fortement émettrice de gaz à effet de serre, 3 % des émissions mondiales. La rhétorique de l'« hydrogène propre » portée par la métaphore de l'arc-en-ciel a une

fonction de détournement cognitif vers des horizons purifiés mais (encore ou à jamais) inaccessibles pour masquer des pratiques polluantes et des réalités sales déjà répandues au présent. L'« optimisme sous-critique » dénoncé par Jean Brun tourne à plein régime à travers des agences internationales (International Energy Association 2019), des politiques nationales (Foucart 2021) et des entreprises de *lobbying* industriel. Beaucoup de chercheurs du domaine soulignent nombre de problèmes des mondes hydrogène en construction, mais peu d'entre eux refusent vraiment d'y croire. Le régime technicien nous conditionne à croire aux promesses technologiques.

Le second handicap énergétique de l'hydrogène concernait sa faible densité volumique d'énergie, qui induit un sur-dimensionnement des infrastructure de transport par rapport au pétrole et au gaz. Ce problème de sur-dimensionnement est contrebalancé, selon les promoteurs de l'économie de l'hydrogène, par la perspective d'une réduction drastique de la taille des réseaux grâce à une production locale d'hydrogène. Plutôt que l'échelle planétaire des méthaniers et des supertankers, plutôt que l'échelle continentale des gazoducs et des oléoducs, le réseau de l'hydrogène devrait se déployer à une échelle régionale autour des métropoles urbaines. Analysons plus en détail cette question de l'hydrogène comme un espace énergétique en construction.

6.4.3 Lieux, réseaux, échelles de l'hydrogène de demain

La notion d'espace énergétique est intéressante parce qu'elle figure le monde hydrogène comme un espace de composition de systèmes énergétiques et de relations sociales et comme un territoire en devenir. Elle permet de considérer l'articulation entre les héritages et les surgissements dans un espace social et matériel, divers et contradictoire (cf. 1.5). Le monde hydrogène apparaît alors comme un « entrelacs de systèmes hétérogènes, composés d'éléments organisationnels, infrastructurels et environnementaux » et soumis à des contestations en acte et en imagination (Teissier 2022a, p. 2). Gavin Bridge et Ludger Gailing (2020, p. 1041) appréhendent les espaces énergétiques à travers trois catégories d'espace : lieux, réseaux et échelles. Considérons chacune des trois catégories à partir des représentations et des discours des professionnels de la filière hydrogène.

Urbanité bleue de la ville hydrogène

Dans les imaginaires techniciens, si le premier objet de démonstration de l'hydrogène est la voiture individuelle, son premier lieu de déploiement est la ville. Au début des années 2010, un leader mondial des piles à combustible, UTC Power[24], diffuse une publicité représentant une ville hydrogène, donnée sur la figure 6.6.

C'est une projection imagée de l'économie de l'hydrogène 2.0 (cf. 6.3.4). Son imaginaire s'inscrit dans l'esthétique du jeu vidéo *SimCity*. Ce jeu, dont la première version sort en 1989 chez Maxis, a justement pour objectif de créer, modifier et étendre de nouvelles villes en prenant le rôle d'un maire devant gérer un budget communal. On retrouve, dans le jeu vidéo comme sur l'affiche publicitaire, les lieux habituels de la ville états-unienne, qu'ils soient politiques (mairie, prison, sous-marin), économiques (hôtels, industries, supermarchés) ou sociaux (écoles, hôpitaux, musées, résidences). Entre eux, les moyens de transport sont l'automobile, qui

24. UTC Power est considérée comme l'un des leaders mondiaux de fabrication des piles à combustible avec Ballard Power Systems (Vasudeva et al. 2013, p. 652). Jusqu'en 2013, elle appartient à la multinationale United Technologies Corporation (UTC), basée aux États-Unis et spécialisée dans l'aéronautique, l'automatique et la mécanique. Elle est rachetée ensuite par la multinationale Doosan, l'un des principaux équipementiers au niveau mondial basé en Corée du Sud, et intégrée à sa filiale Doosan Fuel Cell America. La publicité de la figure 6.6, que j'ai collectée sur internet en 2013 sans noter l'adresse du site (Teissier 2017a), a disparu depuis. Le rachat de cette entreprise états-unienne par un groupe sud-coréen rend compte d'une tendance plus générale qu'il faudrait documenter et inscrire dans une évolution structurelle de l'industrie mondiale, dont le centre de gravité glisse de l'Amérique du Nord vers l'Asie orientale.

Figure 6.6 – Affiche publicitaire d'une ville hydrogène, UTC Power, 2012-2013

donne « le pouvoir de dire non aux émissions et oui à un air plus propre et à une indépendance énergétique », et les bus, désormais « silencieux, doux et sans émission, mis à part de l'eau dans le pot d'échappement ». Les lieux et les objets mobiles, pourvus des piles à combustible produites par UTC Power, contribuent à une « énergie prouvée et propre, partout » dans la ville. C'est le message principal en haut à gauche de la publicité, suivi par un sous-titre didactique : « Piles à combustible : le choix énergétique propre, fiable et économique faisant fonctionner une planète plus efficace et écologiquement responsable ». L'image complète le texte. La couleur bleue récurrente (ciel, mer, lac, étiquettes des lieux et objets, logo d'UTC Power) symbolise l'idée de propreté tandis que les lignes naïves des dessins enfantins à la *SimCity* renforcent le sentiment d'un monde moelleux.

Les symboles véhiculés par cette publicité heurtent certaines réalités de terrain. Les couleurs sombres des énergies fossiles sont absentes de cette affiche publicitaire, ce qui contraste avec les réalités du mix énergétique états-unien (cf. 6.4.2). D'ailleurs, de manière significative, rien n'est dit de la production d'hydrogène dans cette projection idéalisée de l'économie de l'hydrogène 2.0. Aussi, le gain écologique annoncé n'est pas prouvé. Tout est conservé, en revanche, du consumérisme états-unien : l'automobile permet de rejoindre le *mall* et ses différents commerces depuis les zones d'habitation distantes. Mêmes objets, mêmes dispositions, mêmes usages : l'organisation sociale est conservée. Ce qui est défendu par cette publicité est une substitution générale du bloc moteur à explosion-pétrole par le bloc pile à combustible-hydrogène (cf. 1.5.1). UTC Power insiste sur les intérêts économiques, écologiques et techniques : coût moindre, propreté accrue, efficacité et fiabilité augmentées. Mis à part, l'écologie – qui est un aspect nouveau dans les discours technocratiques à partir des années 1970 – les autres critères sont des permanences du régime technicien depuis la deuxième moitié du XIX^e^ siècle (cf. chapitre 3). L'*American way of life* est préservé dans cette vision de l'économie de l'hydrogène 2.0. La publicité d'UTC Power apparaît idéologique par plusieurs aspects : préservation de l'ordre social, valorisation des critères de la modernité industrielle (sans qu'ils soient démontrés en pratique), figuration idéelle masquant les réalités de terrain (dangers, maîtrise des risques, infrastructures de l'hydrogène, etc.). Une

seule synergie entre réseaux d'énergie est indiquée sur la publicité d'UTC Power, au niveau des étiquettes « micro-grids » et « hôtels » : la cogénération d'électricité et de chaleur. Ceci nous conduit à relier les lieux de l'hydrogène aux réseaux de l'énergie.

Réseaux et communautés de l'hydrogène

L'affiche publicitaire d'UTC Power, en montrant une ville tout-hydrogène « indépendante » et « lisse », contraste avec les leçons de l'histoire de l'hydrogène qui montrent une économie relationnelle et récalcitrante (Teissier 2017a). L'image d'une ville hydrogène fiable et moelleuse tait soigneusement les problèmes de sécurité. Or, les acteurs de la R&D ont souligné l'importance des dispositifs de détection du gaz hydrogène lors des expérimentations en laboratoire et des démonstrations en centre d'essai (cf. 6.3.4). Cette panoplie de capteurs et caméras viendra-t-elle tapisser le monde hydrogène en cas de déploiement massif des automobiles hydrogène ? L'économie de l'hydrogène intégrerait alors une réseau supplémentaire de vidéosurveillance du gaz volatil et inflammable qu'est l'hydrogène. Des communiqués d'alerte hydrogène rejoindrait les alertes météorologiques, routières et sanitaires sur le fond médiatique de l'information en continu. Leurs effets sur l'anxiété collective des sociétés de demain n'ont pas été étudiés à ma connaissance. Or, des accidents sont à prévoir dans le monde hydrogène en voie de construction.

Les acteurs de la R&D disent les risques d'incendies. « C'est un signal à bas bruit, dont on ne parle plus trop, [mais] inévitablement, je ne vois pas comment on pourrait faire pour qu'il n'y ait jamais d'incidents avec l'hydrogène. » (Auvity 2022, p. 13) Jusqu'à présent, le faible nombre de véhicules hydrogène en circulation n'a pas donné lieu à des incendies médiatisés, mais « statistiquement, c'est sûr il y en aura un jour » (Roche 2022, p. 11). D'ailleurs, ces problèmes de risque industriel ont induit la formation d'une « une vraie communauté de la sécurité de l'hydrogène dans le monde » (Roche 2022, p. 11). Les pompiers notamment se préparent affronter ces risques nouveaux sur le réseau routier. En France, les compagnies de la Manche « ont mis au point des procédures d'intervention, qu'ils sont en train de diffuser à l'ensemble de leurs collègues en France, quand un véhicule hydrogène brûle » (Lucchese 2016, p. 25). Le chantier des mondes hydrogène stimule donc le couplage entre réseaux de l'énergie et réseaux de surveillance. Mais, ce n'est pas le seul.

La multiplication des synergies entre réseaux sociotechniques est l'une des conditions d'existence de l'économie de l'hydrogène 2.0 (figure 6.5). La construction effective de ces synergies entre réseaux d'énergie et réseaux d'information est l'une des principales ambitions de la R&D actuelle. C'est le cas, par exemple, du projet ESTUAIRE financé par l'Ademe et la région Pays de la Loire (2019-2022) dans le port de Saint-Nazaire. L'acronyme, qui signifie Études pour un SmarT grid multi-énergies et multi-Usages sur un territoire portuAIRE, dit bien l'enjeu de construction d'un « réseau intelligent » par couplage de l'information, des énergies et des usages (cf. 6.2.4). L'un des contributeurs du projet ESTUAIRE, Bruno Auvity (2022, p. 13-14) explique les enjeux et méthodes de ces recherches relevant des sciences de l'ingénieur. L'objectif était de réfléchir à « la possibilité de faire émerger un réseau énergétique local [... et] "intelligent" » au niveau d'une zone portuaire. Comment produire, stocker, distribuer et consommer de l'hydrogène à un coût optimisé dans l'éventualité où le port de Saint-Nazaire approvisionnera en hydrogène les navires à quai dans le futur ? Une première option de production d'hydrogène est la récupération de la chaleur fatale dégagée dans le bâtiment de Man Energy Solutions lors des essais moteurs diesel. Une deuxième option est d'utiliser l'électricité stockée par certains acteurs industriels du port (dont Akajoule) l'ayant achetée à bas coût ou générée avec des panneaux photovoltaïques lors de leurs heures creuses d'activité. Le couplage de ces enjeux de cogénération (option 1) et d'optimisation de stockage (option 2) est rendu possible par une nouvelle législation « qui dit que, dans un

rayon de deux kilomètres, tu peux faire des communautés de réseaux de personnes qui partagent l'énergie ». La manière de poser et de résoudre le problème relève d'une logique d'optimisation technico-économique de flux et de stocks devenus courante en régime technicien au cours du xx^{e} siècle (cf. 5.1). Elle se heurte à un « phénomène complexe » dans la mesure où les usages sont couplés. La complexité résulte de la mise en connexion de trois réseaux distincts au départ – chaleur, électricité, gaz – par des piles à combustible. Auvity détaille les questionnements successifs des chercheurs en sciences de l'ingénieur :

> J'ai des acteurs qui sont les uns à côté des autres, qui ont leurs besoins en électricité, leurs consommations en chauffage pour les bâtiments… Tu commences à dire « je vais produire de l'hydrogène » : est-ce que je le stocke sur place pour le reconvertir en électricité ou, au contraire, quitte à avoir de l'hydrogène, est-ce que je peux l'utiliser pour des besoins de mobilité ? Produire combien d'hydrogène et pour quoi ? Quels sont les besoins de mobilité des entreprises ? Est-ce qu'elles ont des flottes de véhicules ou est-ce qu'il y a des transports en commun à côté ? Tu as besoin de savoir par où passe le réseau, mais pour alimenter quel bus de quelle ligne pour quelle autonomie ? À partir de quelque chose qui était bien identifié au départ, un réseau soit électricité – pouvant être éventuellement convertie en chaleur – soit de gaz pour le bâtiment et l'industrie, là, on mélange et ça devient des systèmes très complexes. (Auvity 2022, p. 14)

Les potentialités de l'hydrogène pour coupler réseaux de chaleur, de gaz et d'électricité reconfigurent les usages de l'énergie. Elles font émerger « une notion d'auto-consommation individuelle, mais aussi collective » dans un voisinage de quelques bâtiments. Elles interrogent aussi les besoins et les comportements des différents acteurs industriels au sein du port en termes de chauffage, force motrice et transport. La complexité qui émerge par couplage technologique est d'ordre social et territorial. Or, ni les concepteurs du projet, ni les agences de financement n'ont associé à la réflexion des sociologues, des urbanistes ou des géographes. Auvity (2022, p. 14-15) regrette également de ne « même pas [avoir] travaillé avec le réseau de transport de Saint-Nazaire parce que c'était un projet court ». Ceci revient à prendre « des données de la littérature » là où des variables de terrain auraient permis de compléter la modélisation par un faisceau d'analyses qualitatives et quantitatives de la communauté de réseaux sur place. Il est accepté, en régime technicien, que les techniques d'optimisation technico-économique fournissent une solution suffisante aux problèmes complexes d'ordre social et spatial. Or, la suite de questions de la longue citation ci-dessus, montre l'hésitation voire le désarroi des chercheurs en sciences de l'ingénieur pour appréhender la complexité sociotechnique de la zone portuaire induite par les multiples couplages entre usages énergétiques. Il y aurait eu, au contraire, un espace de dialogue pertinent à ouvrir avec les sciences de la société pour approfondir les notions de risque industriel, pour déconstruire les évidences de la paire données-variables et pour interroger les représentations associées d'une zone portuaire comme espace complexe d'action et d'existence (cf. 1.6.3).

Cet exemple d'une zone portuaire en auto-consommation est loin d'être anecdotique. Il entre dans la catégorie des agrégats énergétiques de type « ressources d'énergie distribuée » ou « micro-grids » (cf. 6.2.4). Ces agrégats localisés disposent de capacités de stockage d'énergie les rendant aptes à des déconnexions vis-à-vis du macro-réseau électrique pendant des durées variables. La multiplication et la distribution transversale de ces « îlots » énergétiques induisent une mutation en profondeur des espaces énergétiques du temps présent en Amérique du Nord et Europe de l'Ouest. Or, dans le cas du projet ESTUAIRE à Saint-Nazaire ou dans celui du GridWise Architecture Council aux États-Unis, la gestion des « micro-grids » s'appuie sur une expertise limitée : optimisation technico-économique des sciences de l'ingénieur dans le premier cas ; schème informationnel et organisationnel des sciences de l'information et de la gestion dans le second cas. Dans les deux cas, la majorité

des sciences de l'homme et de la société sont exclues de la réflexion et de l'organisation de ces systèmes complexes alors qu'ils relèvent de problèmes d'usages et d'organisations collectifs sur un territoire en devenir. Dans les deux cas, l'hydrogène est au centre du dispositif comme nœud des synergies entre réseaux. Il constitue donc l'un des piliers des politiques régionales de l'énergie depuis les années 2000 comme dans le cas du Territoire de Belfort (cf. 6.3.3). Forts de cette politique régionale depuis deux décennies, l'université de Bourgogne Franche-Comté et le laboratoire Femto-ST ont développé une réflexion originale sur l'articulation entre les fonctions et les échelles des réseaux d'énergie.

Échelles d'énergie et rapports de force dans les mondes hydrogène

Daniel Hissel, responsable de l'équipe « Systèmes électriques Hybrides, ActionneuRs électriques, systèmes PAC » (SHARPAC) de Femto-ST, trace une distinction claire entre *smart-grids* et *micro-grids*. Les « réseaux intelligents » désignent « l'inter-opérabilité des réseaux à l'échelle des nations et des grands opérateurs énergétiques » et relèvent des « marchés et [...] des questions qui sont essentiellement financières et informatiques » (Hissel 2022, p. 12). Si « l'hydrogène introduit de l'intelligence en termes de distribution et de pilotage » au niveau des « macro-réseaux », son principal rôle se joue au niveau des réseaux locaux, « à l'échelle d'un habitat, d'une île, d'un micro-quartier ». Son collègue, Robin Roche, qui a soutenu une thèse sur les *smart-grids* avant de rejoindre Femto-ST, souligne plus encore le faible enjeu de l'hydrogène pour gérer les macro-réseaux électriques. « J'ai l'impression qu'au niveau industriel [...] les opérateurs de réseaux électriques [...] ont déjà plein de choses à gérer, notamment l'intégration du renouvelable, l'intégration des batteries, qui leur permet de faire face à la variabilité à court terme. Du coup, l'hydrogène arrive en priorité 50. » (Roche 2022, p. 12). Leur collègue, Marie-Cécile Péra (2022, p. 20), complète leur analyse par une réflexion technologique sur la faible capacité énergétique de l'hydrogène : « si on doit stabiliser un très grand réseau, il faut un stockage très massif d'hydrogène ». Or, ce stockage massif poserait de nombreux problèmes de dimensionnement, construction et gestion d'infrastructures de taille importante (cf. 6.4.2). Péra poursuit par une mise en relation pertinente de l'échelle des réseaux et de leurs fonctions énergétiques :

> J'en reviens à la même idée, que l'équilibrage de fond soit fait par les grands réseaux – on aurait de grands réseaux stables – et des réseaux locaux qu'on viendrait interconnecter ou pas, chacun devant assurer une part de sa stabilité. C'est tout l'enjeu des smart-grids à partir d'énergies renouvelables avec des solutions locales de stockage. [...] si les pointes sont gérées plus localement, on n'a plus besoin de réguler le grand réseau avec des stockages massifs d'hydrogène. (Péra 2022, p. 20)

Les chercheurs de Femto-ST sont donc unanimes pour distinguer plusieurs échelles de réseau d'énergie. Pour rester dans un schéma ternaire classique, ils identifient l'échelle micro d'une zone portuaire ou d'un quartier, l'échelle méso d'une métropole ou d'une région, l'échelle macro d'un pays ou d'un continent. Ils s'accordent également à penser que les différentes échelles sont complémentaires plutôt que concurrentes. Chaque échelle infra pourrait permettre de résoudre des problèmes à l'échelle supra. Ainsi, Marie-Cécile Péra souligne les potentialités du stockage de l'énergie sous forme d'hydrogène dans les méso-réseaux pour stabiliser les macro-réseaux électriques soumis à une part croissante de forces intermittentes. « [Q]uoiqu'on en dise et quoiqu'en dise aussi l'Ademe, ou les scénarios RTE , je ne crois pas au déploiement des énergies renouvelables pour atteindre les objectifs affichés dans la production électrique, si on ne stocke pas par l'hydrogène » (Péra 2022, p. 20). Ce qui m'intéresse ici, c'est la manière dont une technicienne met en doute l'analyse de la technostructure sur un sujet techno-politique qu'elle connaît bien. Elle critique l'excès de confiance de l'Ademe

dans la résilience du réseau électrique français vis-à-vis de l'intégration des énergies renouvelables. Cette confiance technocratique est lisible dans le rapport sur *L'effacement de consommation électrique en France* (Ademe, Consultants et al. 2017), déjà analysé à propos des « réseaux intelligents » (cf. 6.2.4).

Ce faisant, l'universitaire pose, en technologue, un problème politique plus large. Comment des désaccords issus de sphères professionnelles ayant des expertises différentes sont pris en compte en « démocratie technique » ? Seront-ils intégrés, traduits ou marginalisés par les rapports de force entre les cercles de la décision pour construire les mondes hydrogène de demain ? La prise en compte de telles controverses serait féconde pour le processus démocratique car elle ferait émerger des impensés du régime technicien. La confiance technocratique s'appuie ici sur l'idée que l'option électronucléaire serait « propre » sous prétexte qu'elle serait « décarbonée ». Ceci réduit la variété des problèmes écologiques posés par l'industrialisation de la planète depuis le XIX^e^ siècle à un unique indicateur : l'équivalent de dioxyde de carbone libéré par kilowatt produit. Sans stockage d'hydrogène, conclut Péra (2022, p. 20), « on reste dans une logique où pour stabiliser le réseau, il faudra tellement augmenter le nombre de centrales nucléaires que ce sera déraisonnable ». Avec humour, l'enseignante-chercheuse de Belfort résume la déraison du régime technicien et la démesure d'une croissance industrielle sans limite.

Pourtant, il y a fort à parier que les approches sceptiques, sobres, frugales ou décroissantes seront inaudibles dans la construction des mondes hydrogène de demain. De fait, les cercles de la décision défendent la croissance électronucléaire. C'est le cas des puissances géopolitiques mondiales comme la Chine, les États-Unis, la Russie ou la France. Elles envisagent, selon la presse française de l'automne 2021, de mener des programmes de production et de commercialisation de petites « centrales nucléaires modulaires » (*small modular reactors* ou SMR) pour l'horizon 2030. D'une puissance de 150 à 500 MW, ces centrales seront placées sur des barges maritimes ou fluviales et déplacées à la demande, y compris à l'international. Le président de la République, Emmanuel Macron, défend la dissémination de telles centrales nucléaires flottantes pour assurer la « transition écologique » (Foucart 2021). Il a l'appui du quatrième cercle de la décision à travers l'Assemblée nationale, dont la majorité des partis représentés est productiviste. En région, l'exemple des Pays de la Loire suggère un alignement du parti Les Républicains sur La République en marche. La présidente de Région, Christelle Morançais, emboîte le pas au président de la République en octobre 2021 pour défendre l'installation d'une centrale nucléaire modulaire dans l'estuaire de la Loire en substitution de l'arrêt de la centrale au charbon de Cordemais (Gauchard 2021). À l'inverse, le député écologiste du Maine-et-Loire, Matthieu Orphelin critique ce projet nucléaire « d'un autre temps » et préfère « travailler sur les nouvelles compétences, miser sur la sobriété et l'efficacité énergétique, investir pour développer les énergies renouvelables » (cité par Gauchard 2021). Structurellement, l'État français finance deux fois plus la R&D nucléaire (9,5 € par habitant et par an en 2018) que les énergies renouvelables (5 €) (Ministère de la Transition écologique et solidaire 2020). La discussion sur l'opportunité du nucléaire en pays de la Loire souligne l'« enjeu de souveraineté énergétique pour le territoire » régional, selon Morançais (citée par Gauchard 2021).

Au-delà des mots de la femme politique, quelles sont les marges de manœuvre de l'échelle régionale pour construire une autonomie énergétique vis-à-vis des macro-réseaux de l'énergie ? Cette question ouvre tout un champ de réflexion sur la techno-politique de l'hydrogène. La complexité des mondes hydrogène aurait requis de suspendre la réalisation du chantier pour prendre le temps de la réflexion selon des postures désintéressées vis-à-vis des intérêts économiques ou politiques de la filière industrielle et des approches plurielles et contradictoires. Alors que la réflexion contradictoire n'est qu'embryonnaire ou fragmentée, la construction des mondes hydrogène est en cours de matérialisation. Ce décalage temporel est constitutif du régime technicien. Le monde des technosciences est déjà concrétisé alors que son bien-fondé n'a pas encore été pleinement discuté.

La réalisation matérielle par quelques-uns précède la prise de conscience par la collectivité. Cette antériorité de la matérialisation d'intérêts privés écrase la discussion publique. C'est ainsi que l'essentiel de la fabrication du contemporain échappe aux choix collectifs en « démocratie technique ».

6.4.4 Organisation du contemporain : des savoirs sans pouvoir

Avant d'en venir à l'organisation des savoirs par le pouvoir en régime technicien, je voudrais m'arrêter sur le cas des pays de la Loire pour inscrire le monde hydrogène dans un territoire concret, que je fréquente par ailleurs. Malgré un affichage politique de l'hydrogène, cette région n'a ni la longévité du projet franc-comtois (cf. 6.3.3, ni les financements « massifs » de l'Occitanie (Auvity 2022). Elle offre donc un terrain adéquat pour étudier une certaine normalité en « démocratie technique ». Hasardons quelques réflexions sur les possibilités de construire un monde hydrogène ayant une certaine autonomie dans les limites d'une région. « Une économie de l'hydrogène est-elle réalisable en pays de la Loire ? » Telle est la question que je posais à la journée d'études « Hydrogène, de la production aux usages », organisée le 20 septembre 2021 par la métropole mancelle et Le Mans Université (Teissier 2021) [25]. Je répondais alors par la négative, sans illusion. Si mon analyse n'a pas changé depuis l'année dernière, elle s'est enrichie d'indices matériels plus solides et de témoignages d'acteurs du domaine.

La porte étroite de l'hydrogène ligérien dans une économie mondialisée

La région est l'échelon politique qui investit le moins dans les programmes hydrogène décennaux en cours (2020-2030) : 13 à 35 € par an et par habitant pour l'Union européenne (European Commission 2020), 10 € pour la France, 4 € pour les pays de la Loire. Comme d'autres régions, les pays de la Loire cherchent à afficher une thématique phare. Ils ont choisi, compte-tenu de l'importance des chantiers navals de Saint-Nazaire et de la façade atlantique, un monde hydrogène maritime : construction navale, propulsion des navires, champ d'éoliennes *off-shore*, etc. (Auvity 2022, p. 12). La feuille de route de la Région favorise, en outre à partir de juillet 2020, un développement de l'hydrogène le long du val de Loire à travers l'appellation *H2 Loire Valley* (Pays de la Loire 2021, p. 49).

Ironiquement, le « val de Loire hydrogène » est encadré par deux puissants symboles de la civilisation fossile : à l'est le circuit automobile du Mans et sa course unique au monde des 24 heures du Mans ; à l'ouest le complexe industrialo-portuaire de Saint-Nazaire, son terminal pétrolier de Donges et son terminal méthanier de Montoir-de-Bretagne. Le port autonome de Nantes Saint-Nazaire importe chaque année 472 pentajoules d'énergie (5 % de la consommation national d'énergie primaire), essentiellement sous forme de combustibles fossiles et nucléaires (Bahers et al. 2020). Ce flux matériel équivaut à 130 % de la consommation d'énergie des pays de la Loire et à environ 260 € par habitant de la Région (Ministère de la Transition écologique et solidaire 2020). Deux ordres de grandeur économique séparent donc le système énergétique en place (fossiles, nucléaire) [26] et le monde hydrogène en chantier. Ce rapport de un à cent est typique pour l'ensemble du pays [27].

25. La journée d'études était ouverte par une allocution du maire du Mans, Stéphane Le Foll. L'élu socialiste, promoteur de l'économie de l'hydrogène et de la croissance économique, ne prenait pas le temps d'assister aux débats scientifiques quittant la salle immédiatement après son allocution. Une telle attitude est symptomatique du désintérêt des cercles de la décision pour les savoirs académiques.

26. Les énergies renouvelables peuvent être négligée en première approximation car elles représentent moins de 5 % de la consommation d'énergie en pays de la Loire (Ministère de la Transition écologique et solidaire 2020).

27. Un autre ordre de grandeur intéressant est la dépense énergétique annuelle par habitant en France, 1 340 € en 2018, 610 € de taxes énergétiques (Ministère de la Transition écologique et solidaire 2020). Ces dépenses et ces taxes, là encore, sont pour la quasi-totalité liées au système énergétique déjà en place, dont 90 % de sources d'énergie fossiles et nucléaires (British Petroleum 2021).

Il suggère que le monde hydrogène ne pèse pas lourd devant la puissance économique des filières énergétiques en place. Sans intervention politique forte, c'est-à-dire massive et contraignante, le monde hydrogène sera construit en complément plutôt qu'en substitution des marchés de l'énergie fossile et nucléaire. Il introduira de nouveaux usages sans que les anciens disparaissent : un foyer avec une seule voiture se dotera d'une voiture hydrogène supplémentaire ; l'extension du marché en ligne de type Amazon nécessitera des véhicules décarbonés pour atteindre les centres villes riches et friands de produits consommés en Chine ; la généralisation des « dark stores » impliquera une multiplication des deux roues hydrogènes ; etc. Ceci annonce une nouvelle strate de consommation d'énergie « hydrogène » dans le profil énergétique de la France, conformément à la croissance exponentielle du XX^e^ siècle (cf. figures 2.1 et 2.2).

Un autre ensemble de problèmes non résolus (et rarement abordés) dans le déploiement des mondes hydrogène concerne la construction et la gestion des infrastructures. Il pose de multiples questions : qu'est-ce qui est nécessaire ? qui finance quoi ? qui construit quoi et où ? qui opère quoi et pour combien ? qui approvisionne et comment ? qui consomme et pour quoi ? Ces questions sont d'autant plus ouvertes que deux tendances actuelles fragmentent les réseaux électriques et leur exploitation : la multiplication matérielle des agrégats énergétiques d'un côté, la privatisation économique des opérateurs d'énergie de l'autre. Dans le cadre de son *Étude sur le potentiel du stockage d'énergies*, l'Ademe utilise plusieurs modes de raisonnement technico-économique pour appréhender la gestion des réseaux électriques. Le rapport propose une « approche collectivité » pour distinguer les bénéfices collectifs « tous acteurs confondus » des analyses propres à chaque acteur (Ademe, Artelys et al. 2013, p. 40). Il souligne aussi l'importance de l'intervention de l'État et des régulations législatives pour soutenir des zones marginales vis-à-vis du macro-réseau électrique et inciter les entreprises privées des énergies renouvelables à investir dans les « zones non interconnectées » ou « zones insulaires » (Ademe, Artelys et al. 2013, p. 25-26).

La construction d'un monde hydrogène pose au moins cinq problèmes de « démocratie technique ». C'est d'abord un problème d'économie politique où, pour reprendre l'expression de l'Ademe, la « puissance publique » façonne des espaces énergétiques sous sa juridiction. Quels sont les moyens d'action d'un région administrative telle que les pays de la Loire pour construire une économie locale de l'hydrogène ? C'est ensuite un problème de « symbiose industrielle » (Diemer 2016). Comment, à l'échelle d'une région, coupler les acteurs industriels et académiques, articuler les intérêts publics et privés, arbitrer les équilibres de financement, de gestion et de partage des infrastructures de l'hydrogène ? Puis, il y a des enjeux écologiques. Pourrait-on élargir l'approche collectivité de l'Ademe pour intégrer des critères écologiques plus larges que la seule référence à la « carbonation » ? On peut penser, avec l'écologie politique, à des variables pénalisant les pollutions souterraines et atmosphériques, l'artificialisation des sols, la croissance énergétique, l'augmentation des flux de matière et de circulation humaine, etc. Le quatrième problème est celui du désaccord inhérent aux processus démocratiques. Comment remplacer l'approche dite d'« acceptabilité sociale », où l'expression même révèle une imposition technocratique, par des processus de décision plus collectifs d'une part et plus contraignants d'autre part en cas de refus des mondes hydrogène ? Le cinquième problème renvoie à la tension suscitée au sein d'espaces habités de manière limitée – une région – par des forces qui les traversent et les contraignent – des institutions supra-étatiques et transnationales notamment. Sur aucun de ces problèmes, les pays de la Loire ne me semblent avoir pris la mesure des enjeux de la construction d'une économie régionale de l'hydrogène.

Aucun de ces problèmes de « démocratie technique » n'est propre aux pays de la Loire. Tous relèvent de situations générales du temps présent. Le cinquième problème attire l'attention sur la géopolitique mondiale de l'énergie dans laquelle des rapports de force inégaux rendent les régions et les populations dépendantes de forces

économiques qui leur sont extérieures. En effet, les sociétés transnationales couplent les zones de production et de consommation de l'énergie sur des distances planétaires en maîtrisant des chaînes longues de flux de matière (gazoducs, oléoducs, réseaux nucléaires) et d'énergie (réseaux électriques) par un contrôle des rivages techniques qu'ils soient maritimes au niveau des complexes industrialo-portuaires ou terrestres au niveau des infrastructures frontalières (cf. 5.2.2). L'État joue un rôle ambigu car, tantôt, il soutient le développement des transnationales ayant un lien historique avec la France [28]), tantôt, il cherche à accroître la souveraineté énergétique de son territoire en s'opposant aux transnationales de l'énergie. Les rapports de force actuels me semblent très défavorables à la relocalisation effective de la production énergétique comme le suggèrent des scénarios sur la formation d'un important marché international de l'hydrogène dans les décennies à venir.

Deux spécialistes de relations internationales de l'université de Harvard, Fridolin Pflugmann et Nicola De Blasio (2020, p. 5), rapprochent les « futurs marchés de l'hydrogène » aux « marchés actuels de gaz naturel ». À partir de critères technico-économiques (consommation, finance, infrastructure, technologie) et d'une politique de décarbonation de l'énergie, ils proposent une modélisation de la géopolitique de l'hydrogène à l'horizon 2050. Outre la localisation des gisements éoliens et solaires et la qualité des infrastructures énergétiques, ce modèle prend en compte les ressources en eau nécessaires à un pays producteur. Une forte incertitude pèse sur la fourchette de consommation d'hydrogène en 2050, d'une hypothèse de stabilité autour de 10 exajoules (chiffres 2018) à une rapide croissance de 40 à 80 exajoules selon les estimations de divers instituts (Pflugmann et De Blasio 2020, p. 19). Leurs résultats prévoient néanmoins une division internationale du travail à l'échelle de la planète, où des « champions de l'exportation » (Australie, États-Unis, Maroc, Norvège) approvisionneraient des champions de l'importation (Corée, Japon et une partie de l'Union européenne). Dans cette division du travail, une ligne de fracture distingue la France et l'Allemagne au sein de l'Union européenne. La France (et l'Espagne) dispose de gisements solaires et éoliens, de ressources hydrauliques et de bonnes infrastructures. En outre, la synthèse d'hydrogène pourrait être possible en heures creuses par électrolyse à partir d'électricité nucléaire. En dépit des incertitudes, il y aurait donc, selon Paul Lucchese (2016, p. 26) de la place pour un « modèle [...] décentralisé [...] ou semi-décentralisé à l'échelle d'une région, voire dans la station service [hydrogène] elle-même ». Christophe Coutanceau (Coutanceau 2022, p. 14) croit aussi en la possibilité d'une « approche française » de production locale et autonome d'hydrogène. Comme Pflugmann et De Blasio (2020, p. 5), il fait le lien avec le marché international du gaz naturel. « Cette stratégie française n'est pas idiote, surtout si l'on pense à ce qui se passe depuis le conflit en Ukraine et les difficultés d'approvisionnement en gaz naturel pour les Allemands. » (Coutanceau 2022, p. 14) L'Allemagne, comme le Royaume-Uni et contrairement à la France, manque de ressources hydrauliques (Pflugmann et De Blasio 2020, p. 39). Sa stratégie économique favorise la production locale de technologies de l'hydrogène par ses propres industries mais adhère à la production distante d'hydrogène : « faire produire l'hydrogène ailleurs, par exemple au Chili, puis [faire] transporter, en construisant par exemple des pipelines, des gazoducs, soit par hydrogéniers, par bateaux sous forme liquide » (Coutanceau 2022, p. 14). Paul Lucchese prévoit le développement complémentaire des logiques locales de production-consommation et des flux massifs à l'échelle mondiale :

> Les Japonais ont d'autres idées car ils n'ont pas beaucoup de renouvelable : ils pensent faire faire ailleurs de l'hydrogène – ils ont des contacts avec l'Australie là-dessus – puis le faire transporter chez eux. C'est un autre volet. On imagine dans chaque pays des productions locales mais je pense qu'il y aura aussi, si vraiment ça se développe, un commerce international de l'hydrogène. C'est

28. Il est abusif d'assimiler les entreprises du CAC 40 à des entreprises « françaises » puisque environ 40 % des actions sont détenues par des investisseurs étrangers. On trouve au sein du CAC 40 les entreprises suivantes impliquées dans les mondes hydrogènes : Air Liquide, Airbus, Alstom, Engie, TotalEnergies.

> comme l'énergie renouvelable : il y a des régions extraordinaires au niveau des renouvelables, qui ont des potentiels énormes, que ce soit en soleil ou en vent, et qui sont très loin des habitations, donc c'est un peu dommage de ne pas exploiter ce potentiel. Pour le solaire, on pense bien à tous les déserts. En éolien, il y a des zones incroyables, en Argentine par exemple, mais très loin de Buenos Aires. On imagine qu'il pourra y avoir un commerce mondial d'hydrogène pour les pays qui n'en ont pas beaucoup. (Lucchese 2016, p. 26)

Ce témoignage informe le fonctionnement du monde contemporain sur deux points au moins. D'une part, il révèle une permanence et un impensé du régime technicien : la représentation de la nature comme potentialité à estimer et comme puissance à exploiter (cf. 1.2.2 et 3.3.3). Il serait ainsi « un peu dommage de ne pas exploiter ce potentiel » mondial, ces « régions extraordinaires au niveau des renouvelables, qui ont des potentiels énormes » même s'ils sont à 15 000 kilomètres du lieu de consommation. D'autre part, ce témoignage suggère que les acteurs du domaine sont conscients du double mouvement à l'œuvre dans la construction des mondes hydrogène – relocalisation partielle de la production, mondialisation accrue des échanges – mais que les stratégies de promotion de l'hydrogène insistent uniquement sur la promesse d'une relocalisation et d'une réappropriation. Or, l'intensification des échanges énergétiques renforce les inégalités économiques, écologiques et sociales au niveau international. Le marché mondial du lithium par exemple affiche un verdissement écologique par décarbonation de l'économie alors qu'il augmente les disparités économiques entre les pays producteurs de minerais (Bolivie) et les pays fabricants de batteries (Chine) et induit des inégalités sociales, des problèmes médicaux et des pollutions écologiques dans les zones d'extraction minière (Amérique du Sud) (Teissier 2022c, p. 228-230).

Un monde hydrogène serait construit à l'échelle planétaire sur le modèle du capitalisme mondialisé. Il articulerait une continuité des chaînes d'approvisionnement de matière et d'énergie et une segmentation des droits des travailleurs (conditions locales de travail et de salaire). Comment la filière hydrogène gérera-t-elle les problèmes d'encombrement, d'artificialisation et pollution les plus divers inhérents à toute activité industrielle de taille massive ? En outre, l'existence d'un marché contraint posera les mêmes problèmes géopolitiques que les hydrocarbures fossiles (dont l'exploitation a justifié plusieurs guerres au Proche et Moyen Orient depuis le milieu du XX^e^ siècle. Enfin, le transport d'énergie coûte de l'énergie. La « délocalisation de la puissance » coûte cher en termes économiques, énergétiques et écologiques (Gras 2003). Ces « flux cachés », c'est-à-dire non comptabilisés dans le bilan économique, énergétique et écologique de la France, pourraient-ils être pris en compte et drastiquement réduits dans les décennies à venir ? La puissance économique, politique et symbolique des oligopoles pétroliers laisse augurer d'une réponse plausible à cette question. Qu'en sera-t-il des flux cachés d'énergie induits par la formation d'un marché mondial et local de l'hydrogène ?

Il est intéressant de voir les apories écologiques du système énergétique de croissance. La poursuite par la France d'une politique nucléaire unique au monde par son importance dans le mix électrique et sa géographie associant soleil, vent et pluie lui permettent d'envisager une localisation de la production d'hydrogène. Par contraste, le Japon et l'Allemagne ont pris en compte l'accident nucléaire majeur de Fukushima de 2011 en mettant en œuvre un arrêt progressif de l'électronucléaire national. Cette politique de responsabilité couplée à de faibles ressources hydrauliques les conduisent à défendre la pertinence d'un marché international de l'hydrogène et à organiser son déploiement à l'échelle planétaire. La première option – française – promet une économie *locale* de l'hydrogène. En contrepartie, elle participe au marché international des énergies nucléaires, soutient l'extractivisme de matières radioactives qui s'accompagne de pollutions locales et d'échanges commerciaux inégaux (entre la France et le Niger par exemple), augmente les risques d'accidents atomiques de

type Tchernobyl ou Fukushima et produit des milliers de tonnes de déchets radioactifs pour des millénaires. La seconde option – allemande et japonaise – promeut une économie *mondiale* de l'hydrogène. Ce faisant, elle organise une division internationale du travail qui s'accompagne de pollutions locales et d'échanges commerciaux inégaux (entre l'Allemagne et le Maroc par exemple), augmente les risques géopolitiques d'accès aux ressources d'hydrogène et produit un surcroît de consommation énergétique par un transport massif par hydrogéniers sur des distances planétaires. Dans un cas comme dans l'autre, si aucune régulation politique d'envergure n'est mise en place, la construction des mondes hydrogènes – locaux et mondiaux – se superposera aux systèmes énergétiques préexistants sans les remplacer. Elle contribuera à accroître les consommations d'énergie, les pollutions industrielles, l'extraction de matériaux critiques et les usages marchandisés sans réflexion d'ensemble ni décision collective.

Ces quelques réflexions sur le cadre étroit que se donne une région riche comme les pays de la Loire pour construire un monde hydrogène localisé, égalitaire et écologique invitent à repenser les mondes hydrogène, non pas en termes étriqués d'économie de l'hydrogène, mais par une approche compréhensive d'écologie politique.

6.5 Conclusion : condition humaine et planète en partage

La construction des mondes hydrogène est orientée vers un horizon de régulation systématique dans la gestion administrative de l'espace, du temps et du social. Deux siècles d'industrialisation ont montré que de tels projets d'optimisation énergétique dans l'espace et le temps s'accompagnait invariablement d'une croissance brute de consommation d'énergie. Pourra-t-il en être différemment cette fois-ci ? (6.5.1) Quelles sont les alternatives à la croissance dans les futurs en construction ? (6.5.2).

6.5.1 Le sacré contemporain : croissance économique et organisationnelle

L'économie de l'hydrogène 2.0 projette à l'horizon 2050 en Europe un système de systèmes industriels destiné à relocaliser la production d'énergie de manière renouvelable. Quelle forme prendra-t-elle dans les décennies à venir ?

Un regard vers les utopies des années 1970 contient des enseignements sur les permanences et les reconfigurations du régime technicien du temps présent (6.1.4). Derek Gregory (1973, p. 15) imaginait que, pour multiplier par quatre la quantité d'électricité produite aux États-Unis entre 1972 et 2022, il serait nécessaire de construire d'énormes centrales nucléaires de 10 GW de puissance, soit dix fois la puissance des tranches nucléaires les plus puissantes de l'époque et d'aujourd'hui. Il contrebalançait cette démesure par leur éloignement sur le continent américain par rapport aux zones habitées ou leur éloignement océanique *off-shore*. Il envisageait des centrales photovoltaïques complémentaires mais pas d'autres dispositifs comme les éoliennes pourtant déjà disponibles à l'époque (Heymann 1998). Le nucléaire est convoqué à nouveau dans l'économie de l'hydrogène des années 2020 comme une énergie « propre » car « décarbonée ». Peu de leçons sont tirées en France par les premiers cercles de la décision (gouvernements, parlements) des contestations populaires depuis un demi-siècle, des problèmes de stockage de déchets radioactifs en quantité croissante, des accidents graves les plus graves (Three Mile Island, Tchernobyl, Fukushima), de politiques de gouvernement moins extractivistes comme celle de la Gauche plurielle (1997-2002) (6.3.2).

La position de la France contraste avec le Japon et l'Allemagne, où l'accident de Fukushima de 2011 a eu des conséquences radicales : arrêt rapide de 80 % des centrales nucléaires au Japon ; arrêt de 100 % des centrales en Allemagne échelonné sur la période 2011-2022. Selon la presse française de l'automne 2021,

plusieurs pays nucléarisés (Chine, États-Unis, France, Russie, etc.) mènent des programmes de production et de commercialisation de petites centrales nucléaires modulaires (*small modular reactors* ou SMR) pour l'horizon 2030 (Foucart 2021). La démesure n'est pas, comme dans les années 1970, dans la taille des centrales de 10 GW annoncées par Gregory et l'Institute of Gas Technology de Chicago, mais dans la dissémination de nombreuses centrales nucléaires flottantes de 150 à 500 MW à travers les frontières politiques. Elle est présente à travers le gigantisme du complexe industriel de l'hydrogène en cours de construction en Europe. L'installation d'électrolyse GigaFactory dans le Territoire de Belfort est dimensionnée pour avoir une puissance comparable aux tranches nucléaires en activité, de l'ordre de 1 GW de puissance pour la production d'hydrogène (6.3.3). La technostructure continue de construire des projets basés sur les promesses de la haute technologie (*high-tech*), des chaînes de production internationales et la démesure technoscientifique. Les spectres techniciens continuer de hanter les imaginaires du temps présent.

Qu'a-appris la technostructure des utopies introuvables de l'économie de l'hydrogène à la fin des « Trente Glorieuses » ? Cette question pose un problème fondamental à la manière dont la technostructure construit du savoir et du pouvoir en « démocratie technique ». Au-delà des litanies des « professionnels de la *promesse* » dénoncées par Jean Brun, un réel dialogue interdisciplinaire émancipé (ou même déjà conscient) des rapports culturels de domination en régime technicien dessinerait quelques perspectives des « continents futurs » en construction aujourd'hui. Il s'inscrit dans une réappropriation politique plus large par les populations contemporaines des rapports environnementaux, sociaux et mentaux au cosmos.

Deuxième question fondamentale pour l'économie de l'hydrogène, mais non résolue par les mondes hydrogène en construction. La construction de l'économie de l'hydrogène 2.0, si elle se concrétise, peut-elle le faire sans extension des infrastructures énergétiques et sans croissance de la consommation d'énergie ? Là encore, l'expérience historique appelle à la prudence. Le mouvement générale depuis l'industrialisation de l'Angleterre au XVIII^e^ siècle suggère le contraire (7.3.4). « Alors que chaque énergie a connu sa période de prédilection, participant à recomposer les équilibres énergétiques, pratiquement aucune énergie n'a connu de déclin » (Bouvier 2012b, p. 34). La croissance exponentielle de consommation énergétique de la France dit le contraire depuis un siècle (figure 2.2). L'expérience du temps présent dit le contraire à l'échelle de la planète. « La consommation mondiale d'énergie a été multipliée par six entre 1950 et 2010. » (Bouvier 2012b, p. 34-35) Néanmoins, la technostructure, ignorante peut-être de l'expertise historienne, fait preuve de son habituel « optimisme sous-critique » (Jean Brun). La Stratégie nationale bas-carbone de l'État français annonce la baisse de 40 % de la consommation d'énergie finale du pays sur la période 2020-2050, de 1 600 TWh à 1 000 TWh (RTE 2021, p. 11, 56). Pour le premier cercle de la décision, c'est un problème purement technologique. « Pour Emmanuel Macron, la transition écologique est avant tout une transition technologique », résume Stéphane Foucart dans *Le Monde* de novembre 2021. Il détaille les dispositifs qui assurerait, selon E. Macron, la « transition énergétique » : « Déploiement du premier avion bas carbone d'ici la fin de la décennie, de petits réacteurs nucléaires modulaires, de l'hydrogène "vert", mise en production de deux millions de véhicules électriques et hybrides ». Il y a comme un air de déjà vu, rappelant le « plan véhicule décarboné » de N. Sarkozy volant au secours de l'industrie automobile en panne dans les années 2000. Mais, la croissance économique et le productivisme industriel reste du domaine du sacré, fût-il laïque, au sein du milieu politique.

Au terme de mon exploration du régime technicien, je vois (au moins) trois structures technico-économiques faisant obstacle, à l'échelle de la planète, à l'expression et à la mise en œuvre d'une décroissance matérielle et énergétique (sans mentionner les facteurs démographiques et culturels). Le premier obstacle est une structuration économique asymétrique entre capital et travail. Pour rétribuer toujours plus le capital (au détriment du travail),

le capitalisme mondialisé a besoin d'une croissance matérielle et économique. Dans leur *Histoire de l'énergie*, Jean-Claude Debeir, Jean-Paul Deléage et Daniel Hémery (1986, p. 28) ont montré l'importance de la maîtrise des surplus énergétiques depuis l'Antiquité. « La rente énergétique, dans les différents modes de production, s'est ainsi combinée au surplus servile, au surplus féodal ou à la plus-value capitaliste (surplus value). » L'un des moyens d'accroître la rente énergétique est justement de déployer une stratégie « différentielle » à travers l'espace. Cette tendance est reconfigurée à l'heure actuelle par les réseaux électriques dits « intelligents » pour lesquels les « services système » deviennent, à certains moments de tension du réseau de distribution, plus stratégiques que les moyens de production (6.2.4). Dans la chaîne de valeur, la gestion des stocks d'énergie peut ainsi devenir plus rentable que la production d'énergie.

Le deuxième obstacle est un enjeu bureaucratique de méthode : pour résoudre un problème de société, la régulation politique et administrative a appris à créer de nouvelles institutions (ou de nouveaux outils) plutôt à faire disparaître des usages anciens. Elle s'exprime par une routine d'addition, non par un effort de soustraction. Prenons un cas au sein du monde hydrogène. Les politiques régionales de production et de distribution locale d'hydrogène par des énergies renouvelables me semblent des leviers intéressants à l'heure actuelle pour relocaliser l'économie mondialisée et réinscrire l'expérience humaine dans un milieu à sa mesure. Mais, rien n'assure que, dans le même temps, ne vont pas se construire les chaînes longues, caractéristiques du capitalisme depuis le XIV^e^ siècle génois et vénitien, produisant l'hydrogène au Maroc, au prix d'une exploitation sociale et d'une pollution environnementale, construisant toute une chaîne de transport et de distribution jusqu'aux ports allemands. Une telle entreprise capitaliste internationale entretiendrait les rapports de domination Nord-Sud (7.4.3), nourrirait la croissance énergétique du fait du transport et des conversions énergétiques multiples et n'aurait pas forcément comme conséquence la réduction de la consommation d'énergies fossiles. Je ne vois pas par quels mécanismes techno-politiques les chaînes longues de l'hydrogène ne seront pas déployées sur la période 2020-2050. Ceci est d'autant plus probable que l'histoire économique et politique s'est structuré au XX^e^ siècle à travers la multiplication et l'expansion des sociétés transnationales.

C'est le troisième obstacle structurel à une décroissance effective de la production matérielle et économique : l'alliance capitaliste et productiviste entre les sociétés transnationales et les États-nations souverains. En introduction d'un numéro thématique des *Cahiers François Viète* intitulé *Rivages et horizons techniques des mondes atlantiques au vingtième siècle*, nous présentions ce problème avec Ronei Clecio Mocellin :

> C'est cette capacité à coupler les zones de production et de consommation, et à contrôler leurs interconnexions par-delà les hétérogénéités juridiques et les distances planétaires qui élèvera les sociétés privées au rang de multinationales puis de transnationales. Mais, comme le montre chacun des trois cas de ce volume, la structuration des sociétés transnationales dans la première moitié du XX^e^ siècle s'ancre à des territoires sous la juridiction d'États souverains. Leur croissance démesurée dans la deuxième moitié du siècle en fera parfois des égales, par la puissance, à certains États souverains. [... Elle s'est également appuyée] sur leur État d'origine tout au long du XX^e^ siècle et au-delà. (Clecio Mocellin et Teissier 2020b, p. 12)

6.5.2 Écologies mentales : relation, soustraction, suspension

Comment organiser le chantier des mondes hydrogène en termes matériels, énergétiques et sociaux ? Je n'ai pas de réponse claire à cette question. L'approche des sciences humaines peut indiquer des *garde-fous* au sens littéral et symbolique du terme et élargir les thèmes de société discutés sur la place publique. Elle peut rendre visibles des enjeux de société qui ont été masqués ou ignorés par l'incurie politicienne, la lâcheté médiatique et

l'intérêt économique. Dans *Les Trois Écologies*, Félix Guattari (1987) pose la nécessité de considérer, de manière large, les aspects mentaux, sociaux et environnementaux des sociétés humaines. Ces questions fondamentales sont marginalisées dans l'arène politique et instrumentalisées par les premiers cercles de la décision sans égards pour les résultats des sciences humaines et sociales. Quand elles ne sont pas caricaturées à des fins électorales, elles sont réduites à des considérations technico-économiques dans le cadre de la « démocratie technique » du régime technicien structuré par les experts et les bureaucraties.

Le régime technicien croit pouvoir résoudre les problèmes de société par plus de technique. C'est la signification du chantier des mondes hydrogène. Engendrer de nouveaux systèmes techniciens pour continuer à jouir, comme dans *L'île mystérieuse*, des valeurs de la civilisation industrielle : confort, consommation, croissance, modernité, mobilité, progrès. La réalité rejoint ici la fiction. Dans l'utopie littéraire de Jules Verne, le discours des personnages et l'imaginaire de l'auteur engendrent de nouveaux mondes habitables par la technique. Dans la société industrielle et bureaucratique qui est la nôtre, l'action politique et économique engendre de nouvelles institutions qu'elle superpose aux institutions existantes. Rares sont les exemples de substitution d'institutions et de soustraction d'usages. Ce qui est déjà en place résiste parce qu'il s'appuie sur des pouvoirs institués. La technologie, en couplant les réseaux hétérogènes préexistants, constitue un puissant levier d'accumulation institutionnelle. Il serait temps, sans doute, au XXIe siècle de penser l'action politique comme substitution et comme soustraction.

Penser les mondes hydrogène, c'est réfléchir à la manière dont ils pourraient se substituer à des usages non essentiels, des structurations déraisonnables, des objectifs démesurés. Peser les mondes hydrogène, c'est se demander s'ils valent la peine de leur construction compte-tenu de leur complexité. Imaginer les mondes hydrogène, c'est élargir la perspective pour mettre à distance l'héritage productiviste et industriel, c'est rendre possibles des échappées en-dehors d'une vision tubulaire de l'avenir, c'est bifurquer de la croissance énergétique et économique sans fin. Cette idée de bifurcation du processus historique a été popularisée par René Thom, un mathématicien devenu technologue. L'image a été récemment reprise par certains jeunes diplômés des grandes écoles en rupture vis-à-vis du modèle capitaliste et industriel. C'est le cas dans les écoles nationales supérieures d'agronomie : à Paris, à travers le collectif « Des agros qui bifurquent » ; à Toulouse, des diplômés disent vouloir désormais « marcher là où il n'y a pas de chemin » (Pieiller 2023). Ces « militants » de la cause écologique et ces « déserteurs » de la technostructure ont aussi été formés à l'École polytechnique ou à l'École des hautes études commerciales (HEC). Pour ces jeunes générations, « bifurquer ne veut pas dire fuir », mais, au contraire, traiter sérieusement les problèmes écologiques et sociaux du temps présent.

La nécessité d'un pas de côté est aussi ressentie par des professionnels de la technique. Bruno Auvity (2022, p. 8) oppose l'image publique de l'hydrogène – simple comme un moteur à eau – à son image professionnelle – compliquée « comme tout ce qui fait rouage » et complexe comme une synergie entre systèmes. La multitude de conversions énergétiques à elle seule est d'une incroyable complexité pour coupler quatre ou cinq réseaux hétérogènes d'énergie, de transport et d'information. Promouvoir le monde hydrogène, c'est faire écran à ces difficultés pour emporter l'adhésion économique, politique et citoyenne. Auvity dévoile une deuxième stratégie d'écrantage : la confusion entre efficacité et sobriété. Le milieu académique est prié de s'intéresser seulement à l'efficacité énergétique ; en termes de sobriété, « il y a zéro questionnement d'un point de vue institutionnalisé » (Auvity 2022, p. 16). Par son pas de côté vis-à-vis du milieu technicien, il rejoint d'autres scientifiques impliqués dans ces collaborations sur l'hydrogène incluant les sciences humaines et sociales pour souligner les limites de l'approche technologique seule.

Christophe Coutanceau (2022, p. 13) le dit plusieurs fois : « Toute la partie *techno* [...] ne suffira pas

de toute façon. Je pense que ce n'est pas la technologie qui nous sauvera ». Marie-Cécile Péra (2022, p. 9) surenchérit : « l'énergie n'est jamais un problème technique, presque jamais un problème technique [rires]. Plus je travaille dedans, plus je me rends compte que notre part – évidemment il y a une partie technologique, je dis ça par provocation – c'est tellement vital pour nos sociétés que c'est indispensable de travailler » avec les sciences humaines et sociales. Les fondements de la civilisation matérielle peuvent ainsi être réinterrogés. La croissance sort du domaine du sacré. Coutanceau (2022, p. 13) distingue clairement la « "sobriété", on fait attention » de la « "frugalité", on se serre un peu la ceinture, ce n'est plus la même chose ». Sans angélisme et avec lucidité, il propose trois voies d'action simultanées et collectives : efficacité technologique, récupération énergétique, sobriété-frugalité sociétale. Il conclut : « Il faut mettre les trois ensemble, sinon, à mon avis, on va dans le mur ». Contre de telles propositions, les tenants de la croissance déploient leur rhétorique habituelle, des plus subtiles : « on s'est fait traiter de pleins de choses – et d'Amish aussi [rires] – mais, plus ça va, plus les gens ont compris que soit c'est ça, soit on va dans le mur » (Coutanceau 2022, p. 13).

L'espoir empreint de scepticisme de Coutanceau nous ramène une nouvelle fois à écouter les paroles du passé comme autant d'avertissements contre l'inertie tubulaire des sociétés contemporaines. Il y a juste cinquante ans le rapport Meadows défendait la possibilité d'un monde à l'équilibre démographique et économique.

> Il n'y a, bien sûr, aucune garantie que la nouvelle société soit bien meilleure ou même bien différente de celle qui existe aujourd'hui. Il semble possible, cependant, qu'une société libérée de la nécessité de se débattre dans les nombreux problèmes causés par la croissance ait plus d'énergie et d'ingéniosité pour résoudre d'autres problèmes. En effet, nous pensons que l'évolution d'une société qui favorise l'innovation et le développement technologique, une société basée sur l'égalité et la justice, a beaucoup plus de chances d'évoluer dans un état d'équilibre global que dans l'état de croissance dont nous faisons l'expérience aujourd'hui. (Meadows et al. 1972, p. 8)

Cette société équilibrée, ni croissante, ni décroissante, dessine un horizon d'attente du temps présent. Elle offre un moment de suspension pour réfléchir à la condition humaine dans ses multiples relations aux existants. Le désordre capitaliste et l'ordre techniciste des sociétés industrielles contemporaines ne sont que des épiphénomènes vis-à-vis du temps cosmique, de l'espace terrestre et de l'humaine condition. Philippe Descola suggère une piste séduisante « par-delà nature et culture » pour se décentrer du régime technicien qui nous colle à l'âme. « Le référent commun aux entités qui habitent le monde », écrit-il à propos des cosmologies humaines à travers l'espace et le temps des sociétés humaines, « n'est donc pas l'homme en tant qu'espèce », vision réduite du naturalisme occidental, « mais l'humanité en tant que condition. » (Descola 2005, p. 36-37)

Imaginer les mondes hydrogène nécessiterait d'intégrer les interactions sociales et psychologiques au sein d'un territoire habité, les rapports de puissance entre États souverains et entreprises transnationales et les conséquences des modes d'exploitation industrielle et des modes de consommation intensive sur les écosystèmes naturels à l'échelle de la planète. Un détour par des cosmologies alternatives au naturalisme serait édifiant dans une perspective d'introspection idéelle et de soustraction matérielle. Peut-être ensuite seulement, serait-il temps de se demander si le monde hydrogène vaut la peine d'être construit… ou pas. Car, ne pas collaborer est aussi une façon de résister. Günther Anders souligne en ces termes l'un des ressorts les plus puissants de l'enrôlement des êtres humains à l'appareil contemporain :

> Celui qui, comme observateur de notre monde actuel, a eu l'occasion d'étudier le mécanisme de mise au pas a couramment dû constater que (contrairement aux préjugés communs et à la

plupart des philosophies) ce n'est pas la peur de la mort qui est la plus grande ou la plus vive chez les humains, mais la peur de ne pas participer. (Anders 1960, p. 126)

Chapitre 7

Conclusion générale

La conclusion revient d'abord sur le problème épistémologique qui fonde cette habilitation à diriger des recherches. L'hypothèse est la suivante. Dans les sociétés industrielles contemporaines, les savoirs scientifiques et techniques disposent d'un capital symbolique supérieur et sont enrôlés par les pouvoirs économiques et politiques à travers la recherche et le développement depuis la fin du XIX^e^ siècle. Ceci m'a incité à vouloir renouer une forme de dialogue entre les sciences de l'homme et de la société et les sciences de la nature et de l'ingénieur de manière constructive et contradictoire. Ce dialogue m'a fait prendre conscience d'une structure inobservable structurant l'époque moderne que j'ai appelé régime technicien. L'enjeu est épistémologique certes mais également dans la mesure les technosciences et la technostructure organisent en profondeur les rapports sociaux en régime technicien. L'oxymore répandue de « démocratie technique » en témoigne.

La section 7.1 est suivie par trois sections qui résument les principales conclusions de l'exploration du régime technicien à travers le problème du stockage de l'énergie dans les sociétés européennes et états-uniennes durant la période 1850-2050. Chacune des sections reprend l'un des schèmes énergétiques étudiés en détail dans le chapitre 5 qui relèvent simultanément d'une intelligibilité, d'une opérativité et d'une affectivité du monde. La section 7.2 montre comment l'époque contemporaine est structurée par une cosmologie des flux et des stocks, d'abord marquée par l'empreinte de la matière à la fin du XVIII^e^ siècle puis façonnée par l'énergétisme au cours du XIX^e^ siècle. Ensuite, la section 7.3 analyse de manière synthétique la manière dont les différentes fonctions du stockage de l'énergie quadrillent le temps et l'espace des sociétés industrielles sur la période 1850-2050. Enfin, la section 7.4 substitue, à l'idée d'un grand partage entre nature et culture dans l'occident contemporain, une image plus poreuse dans laquelle techniciens, technocrates et technologues ne cessent de troquer des morceaux de nature et des valeurs de culture.

7.1 Enjeux du dialogue : humanités, complexité et (inter)disciplinarité

Les discours politiques utilisent souvent la notion de retard pour justifier la mise en œuvre d'une politique donnée au prétexte que le pays ou la région serait « en retard » par rapport à un autre territoire. Ce faisant, ils ne font qu'argumenter du « point de vue moral et normatif » car, comme l'a bien montré Reinhardt Koselleck (2000, p. 159), il n'y a ni but *a priori*, ni passage obligé en histoire. S'il y a un retard en politique, c'est plutôt celui du milieu politique à incorporer des savoirs académiques solides. Ainsi, défendre, comme Emmanuel Macron ou d'autres hommes politiques actuels, que la « transition écologique » doit être technologique et non pas sociale (Foucart 2021), c'est ignorer 50 ans de recherche et de résultats de sciences humaines et sociales. Depuis Bertrand Gille (1978), plus personne n'ignore dans le champ académique que les techniques sont pétries de

social. C'est semble-t-il loin d'être le cas dans le milieu politique.

L'absence de prise en compte des humanités et sciences sociales pour penser la société est un problème majeur de démocratie technique. C'est un héritage bien ancré en régime technicien. Le « divorce entre science et philosophie » remonte au XVIII^e siècle (Wallerstein 2005, p. 363), l'hégémonie de la première sur la seconde se construit avec l'industrialisation du XIX^e siècle. La marginalisation des humanités et des sciences sociales dans la pensée politique et économique est d'autant plus problématique que le politique et l'économique ont organisé le champ des savoirs à leur profit sur le temps long depuis la Renaissance (Pestre 2003). La recherche et le développement (R&D) forment le fer de lance de cette économie politique en régime technicien.

7.1.1 Retour sur les formes du dialogue interdisciplinaire

La section 7.1 débute par un retour réflexif sur les différentes formes de dialogue interdisciplinaire que j'ai éprouvées, notamment durant la période de concrétisation de mon habilitation à diriger des recherches de l'automne 2018 au printemps 2023. J'ai identifié quatre types principaux d'espace de dialogue interdisciplinaire. Si les échanges restent cadrés par les enjeux disciplinaires, je parlerai de pluridisciplinarité ; si, au contraire, ils transgressent les cadres disciplinaires, je parlerai de transdisciplinarité.

Le premier type d'espace de dialogue concerne les rencontres ponctuelles et pluridisciplinaires dont regorge la vie universitaire : séminaires périodiques, colloques thématiques, soutenances de thèse, etc. J'ai mentionné à plusieurs reprises les apports variés des ateliers de travail des doctorants et des discussions avec plusieurs collègues de l'université de Nantes. De manière cruciale, depuis mon recrutement en septembre 2010, le Centre François Viète m'a fourni un écosystème stimulant en termes d'échanges pluri, inter et trans-disciplinaires : séminaire hebdomadaire accueillant sciences de l'homme et de la nature ; tutelle de deux facultés, l'une de lettres et langages, l'autre de sciences et techniques ; enseignements devant des publics multiples (sciences, ingénierie, histoire, humanités environnementales) ; etc. J'aimerais indiquer une initiative ancienne remontant au début des années 2010. Stéphane Tirard et Cristiana Oghina-Pavie ont créé et animé un cycle de séminaires transdisciplinaires intitulé « Intersciences » entre les universités d'Angers et de Nantes. Le principe était d'inviter une paire de chercheurs sur un même thème, dont l'une était issue des sciences de l'homme et l'autre des sciences de la nature. Une collection « Intersciences » en a résulté chez l'éditeur parisien Hermann [1].

Un deuxième type de rencontre interdisciplinaire se joue autour des entretiens avec des acteurs (techniciens, technocrates) du domaine comme dans le cas de l'hydrogène. Au-delà des entretiens, le partage de corpus d'entretiens d'autres chercheurs occasionne des échanges dans la constitution de grille d'analyse par exemple, mais des ateliers de travail plus suivis permettent aussi des échanges de problématique, de méthodologie, de références pluridisciplinaires [2]. Il peut finalement mener à un outil formel de diffusion d'entretiens et d'analyse des rapports entre entretiens et recherche. C'est le cas d'un site internet que j'ai co-édité en 2011-2012 avec Sacha Loeve et Bernadette Bensaude-Vincent intitulé « Sciences : Histoire Orale ». Le projet n'a pas pu être poursuivi faute de temps et de financement. Le site internet qui fonctionne encore garde la trace de notre réflexion collective sur le statut épistémologique des archives orales [3]. Nous avons également montré, avec

1. C'est dans cette collection que j'ai pu finalement publier ma thèse de doctorat grâce à l'aide et aux encouragements de S. Tirard (Teissier 2007, 2014)

2. Dans le cadre de cet essai, j'ai déjà indiqué le partage réciproque avec plusieurs chercheurs des sciences humaines et sociales : Thierno Diop, Denis Guthleben, Anaël Marrec, Nicolas Simoncini, Axel Villareal. Depuis quelques mois, Mathilde Lancelot anime un atelier de travail au Centre François Viète sur la constitution et l'usage d'entretiens avec des chercheurs issues de quatre disciplines : anthropologie, histoire, philosophie, sociologie.

3. Voir http://www.sho.espci.fr « Les archives orales constituent des sources précieuses pour une histoire des sciences soucieuse du contexte de la production du savoir : son ancrage biographique, ses aspects matériels, pratiques, instrumentaux, institutionnels, ou encore ses cultures professionnelles. Elles contribuent par ailleurs à mettre en lumière le rôle joué par des acteurs souvent invisibles

Bernadette Bensaude-Vincent, comment la biographie des matériaux pouvait être écrite entre la mémoire et l'histoire de la chimie contemporaine (Bensaude-Vincent et Teissier 2015).

Un autre projet de collecte, diffusion et analyse d'un corpus d'entretiens est prévu dans le cadre du projet ANR d'étude interdisciplinaire de l'estuaire de la Loire comme espace énergétique depuis les années 1970 (ESTUER) (partie III). Il inclura une exposition au Centre d'histoire du travail de Nantes, en collaboration avec Christophe Patillon et Manuella Noyer, dont le titre prévisionnel est « L'estuaire ligérien entre imaginaires techniciens et mémoires des luttes » (tâche 7 de la figure 7.6).

Ceci nous mène à la troisième forme de dialogue interdisciplinaire : les projets financés et les programmes à durée limitée. Le projet ANR que je viens de mentionner en est un exemple. Il se nourrit, depuis 2020, d'un collectif pluridisciplinaire d'universitaires nantais autour de l'étude de l'estuaire de la Loire : Jean-Baptiste Bahers (ingénieur et géographe), Jean-Baptiste Comby (sociologue), Étienne Delaire (ingénieur et historien), Annabelle Duval (géographe), Aurélien Évrard (politiste), Gaëtan Levillain (historien), Anaël Marrec (historienne), Eve Meuret-Campfort (sociologue), Séverine Misset (sociologue) et moi-même. Le projet quatre laboratoires de Nantes Université représentant quatre disciplines des sciences humaines et sociales : Centre François Viète (UR 1161), Centre nantais de sociologie (UMR 6025), Droit et changement social (UMR 6297) et Espaces et sociétés (UMR 6590). J'ai découvert la notion d'« espace énergétique » (Bridge et Gailing 2020), qui structure plusieurs sections du chapitre 4 et du chapitre 6 de cet essai, grâce au dialogue transdisciplinaire du collectif ESTUER. Les membres du projet ESTUER pourront également engager un dialogue avec ceux du projet ESTUAIRE mentionné dans la section 6.4.3. Le projet ESTUAIRE, porté par les sciences de l'ingénieur, était une étude prospective de mise en place d'une micro-économie de l'hydrogène dans le port de Saint-Nazaire. Il relève d'un schème énergétique classique de type coût-bénéfice. Une telle rencontre sera-t-elle possible compte-tenu des divergences disciplinaires et méthodologiques, voire idéologiques, des deux projets ? Une telle question reste en suspens tant que le dialogue n'est pas entrepris.

Le collectif du projet ESTUER contraste aussi, par la fluidité des échanges interdisciplinaires, avec une plateforme plus large dominée par les sciences de la nature et de l'ingénieur : le Groupement d'intérêt scientifique Pôle d'excellence de la recherche ligérienne en énergie (GIS Perle). Je détaillerai par la suite les raisons structurelles qui reproduisent les hiérarchies du régime technicien à travers la section 7.1.5. Ceci produit des incompréhensions et, parfois, un « dialogue de sourds » malheureux (Clecio Mocellin 2019) entre sciences de l'homme et sciences de l'ingénieur, malgré la bonne volonté de la plupart des participants. Des résultats positifs peuvent être notés. C'est à l'invitation de Jérôme Bellettre, coordinateur du GIS Perle, que je dois d'avoir testé une première fois l'idée d'« espaces de dialogue » lors du 3e séminaire annuel du GIS Perle en mars 2019 (1.6.4).

C'est également grâce au GIS Perle que j'ai rejoint un groupe de réflexion interdisciplinaire sur les *low-tech* (basse technologie) structurée par Bruno Auvity autour de chercheuses et de chercheurs issus des sciences de l'ingénieur, de la communication et de la société (droit, économie, sociologie). Ce groupe organise un colloque interdisciplinaire sur la basse technologie dans le cadre des Journées scientifiques de Nantes Université le 5 juin 2023. « Par *low-tech* ou "basse technologie", nous entendons des dispositifs techniques économes en matériaux et en énergie, réparables et ouverts, accessibles en termes économiques et pratiques, et susceptibles de fédérer des communautés d'usagers et de faciliter la réappropriation des techniques par des collectifs localisés. » (Auvity et Teissier 2023). Une telle technologie est intéressante, non parce qu'elle s'opposerait à la haute technologie, mais parce qu'elle force à penser autrement le processus de standardisation et de croissance du

dans la recherche scientifique : techniciens, stagiaires, etc. Enfin, elles rendent sensible la complexité des interactions qui peuvent exister entre chercheurs, disciplines, champs de recherches et organisations, ou encore entre valeurs sociales et valeurs épistémiques. »

régime technicien depuis deux siècles. Le colloque est d'ailleurs intitulé « Déconstruire la notion d'"innovation" par les *low-tech* : transformations économiques, sociales et culturelles du temps présent ». Il invite à repenser les tendances productivistes de l'industrie, les questions d'opacité des dispositifs technoscientifiques et les problèmes politiques de réappropriation de la production et de la consommation d'énergie d'une manière transversale et holiste en intégrant les sciences humaines, sociales et naturelles.

Le quatrième type d'espace de dialogue interdisciplinaire concerne des institutions plus pérennes que la recherche sur projet. Au cours de mon habilitation à diriger des recherches, j'ai appris l'existence d'une unité de recherche qui semblait avoir été créée pour répondre à mes vœux de dialogue transversal entre sciences de la nature, de l'ingénieur, de l'homme et de la société : le Laboratoire Interdisciplinaire des Énergies de Demain (LIED). L'unité de recherche « a pour objectif fondateur de développer "l'écologie des énergies", en menant à la fois recherches scientifiques et techniques guidées par les problèmes à résoudre dans le cadre de la transition énergétique et de l'accroissement des besoins mondiaux en énergie » [4]. Elle présente une pluralité académique et accueille quatre consultants de l'industrie. Les technosciences, qui représentent deux tiers des effectifs, sont les suivantes : biologie, chimie, informatique, mathématiques, physique, sciences de l'ingénieur, sciences de la terre. Les sciences humaines et sociales représentées sont aussi variées : anthropologie, écologie, économie, géographie, histoire, philosophie, sciences politiques, sociologie. Je n'ai pas eu l'occasion, jusqu'à aujourd'hui, d'échanger avec des membres du laboratoire mais je suis curieux d'apprendre par quelles dispositions concrètes la recherche passe d'une agrégation disciplinaire à une production inter ou transdisciplinaire. Avoir élu Mathieu Arnoux, professeur d'histoire médiévale, à la direction du laboratoire est déjà en soi un geste significatif par la prise en compte des structurations socio-historiques sur le temps long pour penser les « énergies de demain ». Je reviendrai, en revanche, dans la section 7.1.4 sur ma rencontre avec un autre laboratoire interdisciplinaire, singulier dans le paysage académique français : l'institut Franche-Comté électronique mécanique thermique et optique – sciences et technologies (Femto-ST, UMR 6174).

7.1.2 Dépendance et fragmentation de la recherche académique

L'habilitation à diriger des recherches offre une occasion d'analyse réflexive de la manière dont nous, chercheurs académiques, sommes (mal) outillés et (mal) organisés pour produire des savoirs et des représentations sur le temps présent en-dehors et au-delà des pouvoirs économiques et politiques.

La recherche et le développement (R&D) ont été profondément reconfigurées depuis deux décennies au niveau international. Le processus est institutionnalisé en France durant le second mandat présidentiel de Jacques Chirac (2002-2007) à travers différentes institutions dont le rôle s'avère déterminant aujourd'hui : en 2005, Agence nationale de la recherche (ANR) ; en 2006, loi de programme pour la recherche (2006-2013), dans le cadre du gouvernement de Dominique de Villepin ; en 2006, Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (2006, AERES), transformé en 2013 en Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (HCERES) ; en 2007, loi d'autonomie des universités, dans le cadre du gouvernement de François Fillon ; etc. Les conséquences de la mise en place de ces diverses institutions ont été graduelles mais profondes sur l'enseignement supérieur et la recherche : réduction des recherches fondamentales et augmentation des recherches appliquées, baisse des crédits récurrents des établissements, renforcement de l'influence du milieu économique et des politiques de la recherche, accroissement du contrôle administratif à travers des institutions expertes (AERES, HCERES), etc. Une partie de la R&D traditionnellement effectuée par les entreprises transnationales est transférée aux jeunes pousses technologiques (*start-up*) et au milieu

4. Citation extraite du site internet officielle : https://fr.u-paris.fr/laboratoires/laboratoire-interdisciplinaire-des-energies-de-demain

académique (Teissier 2017b). Ce transfert s'est accompagné d'une généralisation du financement par projet dans le milieu académique. Certains budgets publics pérennes (salaires permanents, crédits récurrents des laboratoires) ont ainsi été affectés à des financements par projet de deux à cinq ans.

La recherche et le développement (R&D) de l'hydrogène et des piles à combustible sont emblématiques de ces évolutions générales. Les agences d'évaluation privées – dont le rapport McKinsey de 2010 pour l'hydrogène – et le rôle d'« experts » omnipotents – comme Jeremy Rifkin – sont décisifs dans l'organisation des cercles de la décision (6.3.4). Le financement par projet a structuré trois principaux groupes d'acteurs : les industriels autour de l'Agence française pour l'hydrogène et les piles à combustibles (AFHYPAC), devenu France Hydrogène en 2021 ; le Commissariat à l'énergie atomique [5] ; le milieu universitaire. Mais, les situations concrètes sont évidemment plus imbriquées.

Le programme Simstock (2007-2010) est un projet labellisé pris au hasard parmi des milliers de cas comparables pour l'intrication d'intérêts public et privés, de recherche et développement. Il concerne la « modélisation du comportement des systèmes de stockage d'énergie embarqués pour véhicules routiers » pour des batteries NiMH et Li-ion et des supercapacités. Inscrit dans le cadre de la mission interministérielle Véhicules propres et économes (2003-2007), son budget de quatre millions d'euros est pour moitié public, pour moitié privé. La figure 7.1 montre bien l'agrégation hétérogène d'acteurs et d'intérêts : industriels privés (Batscap, Imagine, LMS Engineering Innovation, Reginov, PSA, Renault, Valeo, Saft), industriels publics (CEA, EDF, Institut français du pétrole, Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité (réorganisé en IFSTTAR en 2011), associations (Pôle MTA, L3E), agences publiques (Ademe, ANR, CNRS), laboratoires universitaires (réactivité et chimie des solides, électromécanique (Compiègne), intégration du matériau au système (Bordeaux), école d'ingénieurs (La Rochelle)).

Figure 7.1 – Conglomérat Simstock d'optimisation d'un véhicule électrique (Friedrich 2010)

De tels conglomérats montrent à quels points la réflexion et la recherche des universitaires sont dépendantes d'institutions extérieures : bureaucratiques, commerciales, industrielles et, dans une moindre mesure, associatives. Cette interdépendance est souvent affichée comme une nécessité pour traiter la complexité par couplage de systèmes sociotechniques. Mais, « pour ceux qui financent [la recherche hydrogène, ...] ces grands groupes, des consortiums industriels qui y vont puis qui n'y vont plus quand ils se rendent compte de la complexité », ce n'est pas la rupture mais la préservation du statu quo qui prime (Auvity 2022, p. 8). Aussi, les

5. Le centre de recherche nucléaire allemand, appelé Forschungszentrum Jülich GmbH ou *Jülich*, a lui aussi structuré le paysage national des piles à combustible. Klaus Bonhoff (2010, p. 4), qui a piloté le programme interministériel N.O.W. (2005-2015), souligne l'importance de Jülich pour les applications stationnaires de l'hydrogène en Allemagne. « Jülich has a strong hydrogen and fuel cell program, more on the research side and more on the non-automotive side. So, Jülich is quite strong in high temperature fuel cells for stationary applications. At that time when I was there [ca. 2000], when I did my PhD, they also had a demonstration unit combining photovoltaic arrays with hydrogen storage through an electrolyser, the storage fuel cell supplying all year around autonomously the library of the research centre with renewable energy. » (Bonhoff 2010, p. 2)

gros acteurs industriels contrôlent l'innovation pour conserver les rapports de force existants.

Un second exemple relevant lui aussi du stockage de l'énergie montre comment l'imbrication des savoirs technologiques, des intérêts économiques et des logiques administratives a des effets très concrets sur les processus de (non) décision en « démocratie technique ». Les administrations techniques produisent ou financent de nombreux rapports offrant un état des lieux sur un problème spécifique. L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe) fait partie des administrations influentes en France sur les questions d'environnement et d'énergie. Créée en 1991, cet établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) est placé sous la tutelle du ministère de l'Environnement. Membre du deuxième cercle de la décision au sens de P. Muller, l'Ademe sous-traite la rédaction de rapports d'expertise à des membres du troisième cercle : associations d'experts, cabinets de conseil, laboratoires de recherche, etc.

C'est ce qui se passe en 2013 pour la publication d'une *Étude sur le potentiel du stockage d'énergies*. L'Ademe forme un *consortium* avec la Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services (DGCIS), relevant du ministère de l'Économie, et l'Association technique, énergie, environnement (ATEE), porte-parole d'une dizaine de poids lourds de l'énergie en France : Alstom, Areva, Dalkia, EDF, E-On France, GDF Suez, GrDF, Orange, Saft et Total. Le consortium a pour but de financer le rapport qui pose « le cadre de réflexions sur le développement de la filière stockage d'énergies » (Ademe, Artelys et al. 2013, p. 2). Prennent également part au consortium le Réseau de transport de l'électricité (RTE), gestionnaire des réseaux de transport électrique en France, et l'Électricité réseau distribution France (ERDF devenu Enedis en 2016), principal gestionnaire de distribution. Le rapport est rédigé de manière conjointe par deux sociétés de conseil (Artelys, ENEA Consulting) et un laboratoire de recherche grenoblois (G2Elab). Le consortium rend compte d'une forme d'« économie concertée ». Cette expression utilisée dans l'après-Deuxième Guerre mondiale désignait la collaboration entre industriels, administrateurs et sociétés privées autour d'un enjeu politique et économique (Kuisel 1981, p. 409). Dans le schéma de politique publique de Pierre Muller, le consortium se situe à cheval sur les deuxième et troisième cercles de la décision. Il identifie un problème technique dont il formule les enjeux politiques et économiques dans un rapport officiel, solide et argumenté. Ce faisant, il oriente les futures politiques publiques en amont des décisions gouvernementales du premier cercle et des votes parlementaires du quatrième cercle.

L'action du consortium contribue ainsi à porter sur l'agenda politique le développement d'une nouvelle filière industrielle du stockage de l'énergie au début des années 2010. Elle résulte de l'agencement d'intérêts d'industriels privés et publics, d'administrateurs et d'experts. La publication du rapport révèle néanmoins des intérêts divergeant au sein du consortium. L'avant-propos précise que les résultats du rapport « n'engagent aucunement les acteurs industriels du consortium » (Ademe, Artelys et al. 2013, p. 2). Ces derniers, ainsi que d'autres « acteurs privés », n'adhèrent pas aux « scénarios de mix énergétique 2030 » issus de travaux prospectifs de l'Ademe et de RTE. C'est une situation typique où les représentations économiques et écologiques du monde se déchirent au présent lorsqu'il s'agit d'énoncer les objectifs de l'avenir.

Ce cas d'« économie concertée » montre un processus de co-construction par les cercles administratifs, industriels et experts de réflexions technico-économiques engageant de futures politiques publiques. Il se déroule en-dehors des cercles politiques et juridiques alors qu'il pourra influencer fortement le cadre de ces politiques ou, au contraire, leur marginalisation si les imaginaires associés sont dépréciés dans le régime technicien. Ils se déroulent également en-dehors des cercles professionnels non-dirigeants (absence des syndicats), ni d'associations citoyennes (écologistes par exemple). Cette expérience suggère certaines limites des pratiques de démocratie technique où le peuple – *dêmos* – est exclu de discussions préalables posant les bases, souvent en termes technico-économiques, de ce qui est pensable et devient consensuel. Ce peuple introuvable composerait-

il un cinquième cercle très éloigné des premiers cercles de décision ?

De nombreux techniciens (et certains technocrates) sont conscients des contraintes économiques et politiques qui pèsent sur la recherche et le développement. « Nous, on répond à un cahier des charges qui a été rédigé par quelqu'un d'autre » (Auvity 2022, p. 16). Le constat de Bruno Auvity s'appuie sur l'expérience collective d'une modélisation d'un micro-réseau hydrogène au sein d'une zone portuaire. Ce type de projet est considéré comme bien balisé par un ensemble de variables technico-économiques, même si, on l'a vu (6.4.3), la culture technicienne de la recherche par projet ignore certains savoirs pertinents (géographie, sociologie, urbanisme). Ceci conduit à des simplifications du problème comme prendre pour données des variables sociales : consommation, coopération, mobilité, etc. De même, s'interroger sur le bien-fondé des essais moteurs de Man Energy Solutions (ou de leurs concurrents) ne fait pas partie du cahier des charges des financeurs de ce projet de R&D. Les sciences de l'ingénieur sont particulièrement efficaces pour fabriquer une solution optimisée à un problème limité et quantifiable dans l'espace, le temps et le nombre d'acteurs impliqués.

En revanche, les sciences de l'ingénieur sont mal outillées pour traiter de situations complexes couvrant de larges espaces géographiques et sociaux durant des temps moyens ou longs. Sensibilisé à l'interdisciplinarité, Christophe Coutanceau (2022, p. 14) évoque un problème hydraulique d'envergure en Europe en cas de production massive d'hydrogène [6]. Les mondes hydrogène pourraient ainsi connaître un déséquilibre hydraulique entre les lieux de production d'hydrogène – consommateurs d'eau – et les lieux de consommation d'hydrogène – générateurs d'eau. Or, compte-tenu de l'organisation académique actuelle, aucune discipline n'est préparée pour étudié des enjeux écologiques, sociaux et technologiques.

7.1.3 Linéarité des organisations, complexité des situations

Le stockage de l'énergie est un défi aux schématisations linéaires des réseaux électriques. Ainsi, une revue critique de littérature technique sur les systèmes de stockage d'électricité décompose le réseau de puissance en cinq fonctions classiques : combustible, génération, transport, transmission, services. Elle produit la figure 7.2 selon une échelle linéaire de valeur. Les risques indiqués en haut – volatilité, faible utilisation, congestion, sécurité, électricité « sale » (*« dirty » power*) – sont valorisés par le stockage d'énergie pour conduire aux avantages du bas – couverture du risque, arbitrage de charge, utilisation accrue, stabilité, électricité de qualité. Ce schéma linéaire ne rend pas compte de la fonction systémique du stockage de l'énergie qui occupe toute la longueur de la figure 7.2. Aussi, les experts du domaine essaient d'affiner la représentation. L'*Étude sur le potentiel du stockage d'énergies* qui vient d'être mentionnée raffine par exemple la diversité des situations selon neuf segments définis « en termes de mix local de production/consommation et de niveau de tension de la connexion réseau » (Ademe, Artelys et al. 2013, p. 44-45). L'image des « segments » dit toutefois la difficulté de penser sans un modèle linéaire.

Ces représentations segmentées se reflètent dans les organisations académiques. C'est le cas notamment de la Fédération de recherche hydrogène du CNRS (FRH2), qui regroupe environ 300 chercheurs titulaires et 30 laboratoires en France [7]. FRH2 structure la R&D nationale à travers les thèmes fonctionnels de l'hydrogène :

6. « [I]l faut de l'eau, beaucoup d'eau. En Europe, en 2030, la production d'hydrogène par électrolyse, c'est 40 GW, ce qui représente si je me souviens bien – c'est un calcul que j'avais fait – ça représente plus de 10 millions de tonnes d'hydrogène, d'accord ? On part de l'eau, si on considère des rendements de 100 %, l'eau, c'est 18 grammes, l'hydrogène, c'est 2 grammes, il faut neuf fois plus d'eau, ça fait 90 millions de tonnes d'eau, donc 90 milliards de litres d'eau. Il faut les trouver. Évidemment, l'hydrogène, quand on l'utilise, reforme de l'eau. Il n'y a pas de perte d'eau. Par contre, il va y avoir un déplacement spatial et temporel d'eau entre le moment et l'endroit où on va produire l'hydrogène et le moment et l'endroit où on va le consommer et reformer l'eau. Ça, on y réfléchit pas beaucoup mais il va falloir y penser car cela pourrait créer des déséquilibres entre territoires. » (Coutanceau 2022, p. 14)

7. La FRH2 a été créée en 2020. Voir le site officiel de la fédération de recherche : https://frh2.cnrs.fr/presentation/

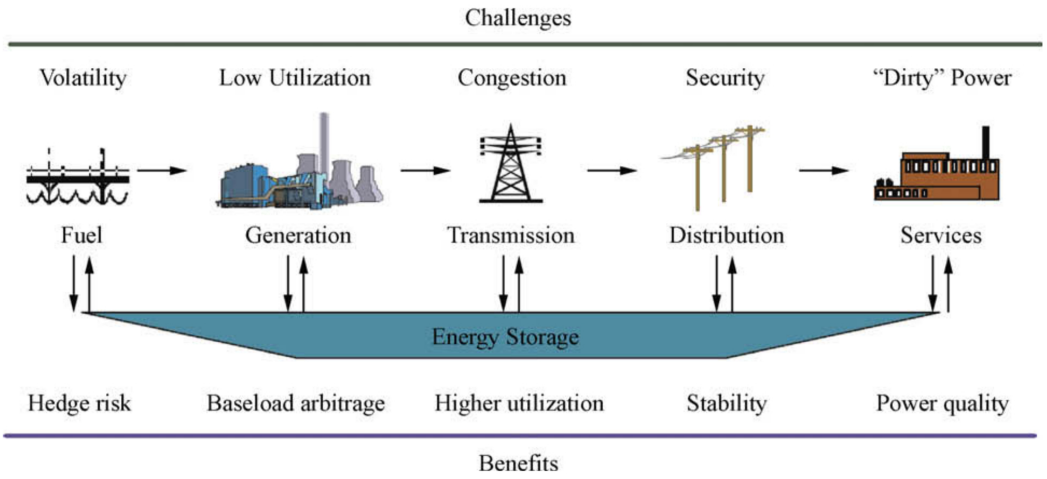

FIGURE 7.2 – Représentation linéaire du stockage d'énergie selon la chaîne de valeur (Chen et al. 2009, p. 293)

production, stockage, mobilité, stationnaire, formation et essais. Elle conserve une mémoire de la dualité matériaux-systèmes à travers son équipe dirigeante : son directeur, Olivier Joubert, est membre de l'Institut des matériaux Jean Rouxel de Nantes (IMN, UMR 6502), son directeur-adjoint, Daniel Hissel, de l'institut Franche-Comté électronique mécanique thermique et optique – sciences et technologies (Femto-ST, UMR 6174). En revanche, elle peine à développer une approche couplant les aspects technologiques, sociaux et écologiques. Ce problème n'est évidemment pas propre à FRH2 ou au champ de l'hydrogène mais traverse le milieu académique. Les raisons sont d'ordre idéel et matériel.

En termes d'imaginaire, je suis surpris par l'empreinte forte et durable du modèle linéaire d'innovation dans les institutions politiques et académiques. L'« échelle de maturité technologique » (« Technology Readiness Level ») conçu par le Département de la défense et la NASA dans les années 1970 sert aujourd'hui de référence aux politiques de la recherche européenne (6.3.3). Elle est très présente dans le milieu académique, y compris le champ de l'hydrogène. Par construction, cette échelle « TRL » donne une représentation linéaire de la technologie, de l'échelon 1 du prototype à l'échelon 9 de la certification commerciale. Elle place les centres d'essai au cœur d'une progression qui irait de la recherche fondamentale à la recherche appliquée puis du développement à la diffusion commerciale (Godin 2005, p. 4). Comme la feuille de route, le modèle linéaire d'innovation offre une perspective tubulaire. Or, la linéarité de l'innovation a été démentie par des études scientométriques (Leydesdorff et Meyer 2007, p. 211). Là encore, les cercles de la décision qu'ils soient européens ou français ignorent les résultats de la recherche académique qui leur feraient prendre conscience de leurs impensés en découvrant des *réflexes* là où ils voient des *réflexions*. Finalement, la simplicité, même fausse, est plus attrayante que la complexité, difficile à manier [8]. Une représentation linéaire de l'innovation est trop pratique pour être abandonné par les communautés académiques et la technostructure sans solution de rechange. Benoît Godin, qui a sérieusement étudié la construction historique du modèle linéaire d'innovation, donne les raisons de sa permanence d'usage.

Les efforts récents pour modifier ou remplacer le modèle ont été limités quant à leur impact.

8. On retrouve la même séduction de la simplicité dans le registre des humanités. Par exemple, le succès de la notion de trajectoire en histoire des techniques s'explique par la simplicité de la métaphore en dépit de la fausseté du transfert sémantique qu'il réalise. À l'inverse, une métaphore comme celle du sac de nœuds est plus précise en termes historiographiques mais sans doute trop complexe à manier (Teissier et Marrec 2019, p. 319-320).

> Premièrement, les modèles alternatifs, avec leurs multiples boucles de rétroaction, ressemblent davantage à une œuvre d'art contemporain ou un « plat de spaghettis et de boulettes de viande » qu'à un cadre analytique utile. Deuxièmement, les efforts pour mesurer les nouveaux modèles interactifs n'ont pas encore porté leurs fruits, du moins dans la littérature officielle : les statistiques et les indicateurs sur les flux de connaissance entre secteurs économiques, acteurs et utilisateurs de la recherche et les types d'activités sont encore en cours d'élaboration. De la même manière, très peu de chiffres précis sur les coûts de l'innovation sont sortis des enquêtes officielles sur l'innovation, du moins pas assez de chiffres suffisamment robustes pour compléter les chiffres de la R&D. Dans l'ensemble, le succès du modèle linéaire suggère comment les statistiques sont souvent nécessaires pour donner une (longue) vie aux concepts, mais aussi comment leur absence est une limitation à l'évolution des modèles et des cadres analytiques. (Godin 2005, p. 35-36)

Les deux dernières phrases de Godin montrent toute l'importance des chiffres dans la construction du « réel ». Le chantier des mondes hydrogène, par ses incertitudes, pourrait servir de terrain pour déconstruire le modèle linéaire à travers une réflexion interdisciplinaire. La puissance argumentative et symbolique de la simplicité dans la représentation du monde social rejoint deux autres facteurs d'explication plus matériels de la difficulté des collaborations entre disciplines, c'est-à-dire pluridisciplinaires. Le premier facteur concerne la segmentation institutionnelle des évaluations professionnelles. De la « reconnaissance par [les] pairs » dépend l'avancement individuel des chercheurs et l'évaluation collective des laboratoires (Auvity 2022, p. 9). Or, les comités nationaux du CNRS et des universités sont organisés de manière disciplinaire. La pression institutionnelle est d'autant plus forte que les chercheurs débutent dans la carrière. Cette forte structuration disciplinaire du champ académique explique pourquoi la science des matériaux ne s'est pas constituée en discipline en France contrairement à d'autres pays comme les États-Unis ou les Pays-Bas (Bertrand et Bensaude-Vincent 2011). Un deuxième obstacle est le temps indispensable pour mener une interdisciplinarité réelle. « [T]out le problème de l'interdisciplinarité, c'est qu'il faut trouver le temps de faire les deux, de cultiver son propre champ disciplinaire et trouver du temps pour s'aventurer sur des chemins de traverse. Et le temps, c'est sans doute ce que les universitaires de maintenant ont le plus perdu… » (Péra 2022, p. 9). Par contraste avec ces réalités de terrain contraignantes en termes disciplinaires et temporels, les hiérarchies institutionnelles et les agences d'évaluation (ANR, Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur) prescrivent l'interdisciplinarité comme horizon d'attente permanente.

Dans le cas de l'hydrogène en particulier et de l'énergie en général, l'objet même d'étude – la dimension multiphysique des piles à combustible et le tissu de conversions entre sources d'énergie – pousse aux échanges entre disciplines (Hissel 2022, p. 8), c'est-à-dire aux collaborations pluridisciplinaires.

7.1.4 Échappées épistémologiques : entre et au-delà des disciplines

La plupart du temps, les collaborations pluridisciplinaires s'effectuent au sein des sciences de la nature et de l'ingénieur. Ainsi, alors qu'il est spécialiste de thermique et d'énergétique, Bruno Auvity (2022, p. 9) a travaillé avec « des électrochimistes, des gens des sciences des matériaux, et de l'autre côté, des gens du génie électrique, de l'automatique ». Si cet échange par-delà les frontières disciplinaires, c'est-à-dire transdisciplinaire, ouvre des horizons et suscite la curiosité, il est difficile d'avoir une production entre deux disciplines, c'est-à-dire une créativité interdisciplinaire. Et en effet, poursuit le chercheur nantais, « l'essentiel de notre production scientifique est dans nos journaux respectifs […] on est quand même – j'aime bien cette expression – tous un peu dans notre couloir ! » (Auvity 2022, p. 9). Sa collègue franc-comtoise, Marie-Cécile Pera (2022, p. 10), le

rejoint sur la quantité « d'énergie et de détermination » nécessaires pour co-publier avec des chercheurs de champs éloignés, peut-être « un pour vingt [articles] dans la proportion des publications ». Comment alors définir cette fameuse interdisciplinarité ? Beaucoup la considèrent comme « une évidence quand on parle de piles à hydrogène » (Hissel 2022, p. 8), mais, concrètement, il est malaisé de dire ce qui est vraiment créé entre deux disciplines (Auvity 2022, p. 9).

Le cas de Femto-ST offre, à ce titre, une perspective originale et encourageante à l'université de Bourgogne Franche-Comté et à l'université de technologie de Belfort-Montbéliard (6.3.3). C'est un des rares laboratoires en France où une dizaine de chercheurs en sciences humaines et sociales forment une équipe autonome – Récits – au sein d'une unité mixte de recherche de sciences et technologie. Cette unité de recherche « constitue certainement une singularité dans le paysage des écoles d'ingénieurs » comme le soulignent deux ses membres historiens, Pierre Lamard et Yves-Claude Lequin (2005, p. 288). « Sa démarche, poursuivent-ils, consiste à penser la technologie comme un fait social et culturel, à penser ce fait dans la complexité et sa contextualité, à situer le phénomène à l'intersection de l'économie, du politique et du scientifique. » Elle rejoint des présupposés fondamentaux de mon habilitation à diriger des recherches. Pierre Lamard m'a d'ailleurs donné l'occasion d'y exposer ma réflexion en février 2022. J'ai ainsi pu bénéficier des échanges pertinents et contradictoires avec un public d'enseignants-chercheurs et de chercheurs intéressés, pluridisciplinaires et compréhensifs (Teissier 2022b). J'ai aussi été associé à un ouvrage collectif en cours d'écriture, issu d'une journée d'étude sur « Hydrogène et sciences sociales », organisée par Nathalie Kroichvili, économiste et responsable de l'équipe Récits, et Daniel Simoncini qui en est membre aussi depuis sa thèse de doctorat [9] et spécialiste de la socio-histoire des piles à combustible (Kroichvili et Simoncini 2022). P. Lamard m'a également présenté quatre membres de Femto-ST, que j'ai pu interviewer durant l'année 2022 (D. Chrenko, D. Hissel, M.-C. Pera, R. Roche), ce qui a enrichi d'autant mon corpus d'entretiens sur les mondes hydrogène.

Or, Femto-ST est l'un des principaux laboratoires universitaires français sur l'économie de l'hydrogène. Il couvre des champs aussi variés que « les matériaux, la chimie, l'électrochimie, le génie électrique, les systèmes de commande, l'intelligence artificielle, l'informatique, les sciences humaines et sociales, l'économie, le contexte sociologique » (Hissel 2022, p. 8). Les scientifiques que j'ai interviewés se réjouissent des échanges avec des collègues économistes, historiens et sociologues. Daniel Hissel (2022, p. 8) soulignent la pertinence de la culture technologique des enseignants-chercheurs de Récits, qui « enseignent aussi dans une école d'ingénieurs [... et] ont l'habitude de parler à des ingénieurs ». Des discussions régulières ont pu conduire à « identifier des sujets d'intérêts communs ». Marie-Cécile Pera (2022, p. 9) est également enthousiaste sur la manière dont les discussions transdisciplinaires permettent de confronter des « intuitions » plus larges et de sortir du « conditionn[ement de] certains schémas » de pensée. Elle regrette malicieusement que les chercheurs en sciences humaines et sociales ne soient « pas assez nombreux ! ». Daniela Chrenko (2022, p. 3) évoquent l'importance d'avoir « pris le temps nécessaire, presque un an, pour apprendre à parler la même langue » lors d'un co-encadrement de thèse Cifre sur un sujet d'électro-mobilité mêlant économie et technologie. Pera (2022, p. 10) souligne la nécessité d'« une plus grande ouverture d'esprit des deux côtés pour accepter de prendre le temps d'épouser le point de vue de l'autre discipline, même au niveau des méthodes ».

Terrain de collaboration interdisciplinaire, le projet HyLES en cours « vise à déployer des solutions technologiques hydrogène dans les îles françaises » : Corse, Réunion et Nouvelle-Calédonie (Hissel 2022, p. 8). Les îles géographiques sont justement un type d'espace énergétique délicat dans le cadre du déploiement des énergies renouvelables car elles ne disposent pas de la régulation stabilisatrice d'un macro-réseau environnant.

9. Ma participation au jury de soutenance de thèse de N. Simonicini en décembre 2018 m'a permis d'entrenir une conversation, parfois contradictoire, avec le candidat, les autres membres du jury et certains acteurs de l'économie de l'hydrogène de l'UTBM.

Les chercheurs de Femto-ST sont à l'initiative de l'étude de ces meso-réseaux électriques et non pas les pouvoirs publics. L'absence d'intérêt direct leur permet d'être agnostique sur le monde hydrogène à construire. Participant actif à HyLES, Robin Roche (2022, p. 3) contraste l'hypothèse d'« un vrai potentiel » hydrogène des territoires isolés avec la démonstration qu'elle implique : seul le « projet permettra de répondre pour savoir si l'hypothèse est correcte, et jusqu'à un quel point ». Il explique l'intérêt de collaborer avec les sociologues et économistes de Récits pour identifier les spécificités de chaque île en termes de milieu naturel, géographique et climatique (archipel, petites îles, grandes îles) et d'organisation économique, sociale et culturelle. Hissel (2022, p. 8) complète les propos de son collègue en soulignant que la collaboration permet d'« adapter les solutions au plus près des particularités insulaires [...] sans arriver avec des solutions clé-en-main ». Les méthodes ethnographiques (par entretiens et questionnaires notamment) révèlent « en dehors des problèmes purement techniques, différents verrous socio-économiques » (Roche 2022, p. 3).

Roche souligne l'ambition à la fois épistémologique et opérationnelle du projet HyLES. Sur le plan épistémologique, il s'agit de « trouver une méthode la plus commune possible aux trois cas et réplicable à d'autres » ; sur le plan opérationnel, il s'agit de produire « des recommandations aux acteurs publiques et privés » sous la forme d'un livre blanc. La forme stabilisée de la méthode n'est pas encore explicitée. La créativité interdisciplinaire prend, en revanche déjà, la forme d'un métissage des méthodes et des résultats – « intégrer des aspects plus qualitatifs qui ressortiront des travaux des SHS [sciences humaines et sociales] » – et d'un élargissement des questionnements – poser « des questions énergétiques dans un contexte plus large » (Roche 2022, p. 4). Sur le plan opérationnel, il est important de mettre à distance le bien-fondé *a priori* d'un monde hydrogène : « si on fait quelque chose qui est super techniquement, mais que personne n'en veut », le résultat du projet HyLES devra souligner cet aspect-là.

Un programme labellisé et un laboratoire ne sont pas les seules institutions stimulant des échanges interdisciplinaires de manière continue. À l'échelle nationale, Christophe Coutanceau (2022, p. 11) participe à la cellule Énergie du CNRS dont « le comité de pilotage contient au moins un représentant des 10 instituts de recherche du CNRS » et dont l'objectif est de « réfléchir de manière holistique [... ou] systémique » à la transition énergétique à l'horizon 2050. La Cellule a institué trois ateliers de prospective sur l'énergie (Arpèges) portant sur la mobilité, le stockage d'énergie et l'urbanisme. Mais, comme c'est classiquement le cas, « ces trois Arpèges étaient plus pilotées par les aspects sciences technologiques, sciences "dures" on va dire » (Coutanceau 2022, p. 12). Ceci a conduit à créer un groupe de travail sciences humaines et sociales centré sur les aspects de synergies entre systèmes sociotechniques :

> Comment on met en place des systèmes qu'on relie les uns aux autres aux niveaux des territoires et à différentes échelles ? Comment est-ce qu'on implique les différents acteurs ici ? [... Quelles sont] les implications pour les changements de modes de vie ; ce qu'on appelle l'« acceptabilité », même si je n'aime pas trop car c'est un terme qui est un peu désuet maintenant ; la désirabilité, l'implication des acteurs, d'une façon vraiment pro-active, si on veut vraiment le faire ; l'explication : ce qui se passe au niveau des éoliennes est vraiment symptomatique, on impose sans expliquer, mais je suis sûr que si on explique... il vaut mieux avoir un champ d'éoliennes à côté qu'une centrale nucléaire. (Coutanceau 2022, p. 12)

Comme dans le cas de Récits et de Femto-ST, l'ouverture d'esprit et l'approche interdisciplinaire semblent de mise pour hasarder des futurs possibles. Le groupe de travail envisage les possibilités de changer les modes de consommation, de déplacement et d'habitation et de rejeter certaines solutions technologiques qui ne

seraient pas désirables ou acceptables. Au-delà des perspectives et de son implication évidente, Christophe Coutanceau (2022, p. 11) reste néanmoins sceptique vis-à-vis des seuls discours : « l'objectif [est] la fameuse neutralité carbone en 2050. J'ai quelques doutes, mais bon, on va essayer ». Ce scepticisme est justifié par l'inertie des modes de vie et des modes de pensée.

7.1.5 Expériences d'une interdisciplinarité (in)conséquente

J'aimerais clore la section 7.1 sur les enjeux du dialogue interdisciplinaire par quelques considérations sur la vie intellectuelle d'un groupement d'intérêt scientifique auquel je participe depuis trois ans. Ce cas montre la difficulté pratique d'apprentissage réciproque entre techniciens, technocrates et technologues malgré la bonne volonté des unes et des autres.

Depuis 2019, je participe au Groupement d'intérêt scientifique Pôle d'excellence de la recherche ligérienne en énergie (GIS Perle) [10] à titre individuel comme chercheur et comme directeur du Centre François Viète. Le GIS Perle est un collectif de recherche relevant simultanément de l'expertise en « démocratie technique » (1.3.4) et de l'interdisciplinarité dans le monde académique. Du côté politique, il contribue à façonner l'ordre social en s'efforçant d'apparaître pour les agents politiques, dont la région Pays de la Loire, et les agents économiques, dont la Chambre de commerce et d'industrie (CCI), comme un « un lieu de passage obligé » (Thoenig 1987, p. 36-37) pour les politiques régionales de l'énergie. Il n'a aucun pouvoir décisionnaire, ni budget propre. Mais, il joue un rôle politique comme force de coordination et de traduction entre trois des quatre « cercles de la décision » (Muller 2018, p. 30-49) au niveau régional : administrations techniques locales, décentralisées de l'État ou régionales (2e cercle), entreprises et organisations professionnelles (3e), conseils généraux et régionaux (4e). Du côté académique, le GIS Perle offre des possibilités de discussions lors des journées annuelles (Teissier 2019 ; Marrec 2021) et lors de rencontres thématiques, éventuellement organisées par d'autres institutions partenaires (Teissier 2021). Il sert de lieu de rencontre pour nouer des collaborations entre chercheurs des sciences de la nature, de l'ingénieur, de la société et de l'homme, notamment dans la perspective de réponse à des appels à projets régionaux ou nationaux. Trois de ses huit groupes de travail croisent directement la problématique de mon habilitation à diriger des recherches : « stockage de l'énergie », « piles à combustible » et « aspects sociétaux ». Enfin, dans une perspective réflexive, c'est le lieu-institution qui m'a servi de référence pour penser et définir la notion d'« espace de dialogue » qui sous-tend cet essai (1.6.3). C'est dire si, en dépit des limites interdisciplinaires que je vais souligner, le GIS Perle me paraît stimulant et original.

Malgré son ouverture aux sciences humaines et sociales et la bonne volonté d'une majorité des participants, le Gis Perle est profondément ancré dans la culture technicienne. Lors du comité directeur ayant validé l'intégration du Centre François Viète au Gis Perle en décembre 2020, j'ai détaillé deux programmes du laboratoire croisant directement les thèmes de recherche du Gis Perle. J'ai ainsi mentionné la « réflexion [de Dominique Pécaud] sur la modernité comme phénomène de rationalisation généralisé du social [... s'inspirant] de la remarque faite par Cornelius Castoriadis à propos du fait que : "La société n'est ni chose, ni sujet, ni idée" mais que cela ne doit pas empêcher pas d'en parler ! notamment en termes d'inventaire des relations de co-existence entre ces trois dimensions (chose, sujet, idée) et de mouvements d'institutionnalisation inhérents à la formation de l'action collective ». Le second programme détaillé, « Énergies, techniques et sociétés » sous la responsabilité d'Anaël Marrec [11], explore la question des énergies en société à travers l'histoire environnementale et les Science & Technology Studies. Je soulignais l'intérêt de coupler l'histoire à rebours et l'histoire du temps

10. Voir le site correspondant : https://www.triapdl.fr/perle-pole-dexcellence-de-recherche-ligerienne-energie/
11. Voir sur la page internet correspondante : https://cfv.univ-nantes.fr/activites-de-recherche/axe-3-artefacts-et-systemes-1

long pour saisir les enjeux, les pratiques et les imaginaires des mondes présents et futurs et de recourir à l'analyse épistémologique comme une modalité d'échanges entre les différentes disciplines. Au terme des 15 minutes d'exposé, au moins encore un membre du comité directeur s'interrogeait sur l'intérêt de l'histoire, de la sociologie et de l'épistémologie au sein du Gis Perle. Cette incompréhension n'est pas individuelle mais structurelle.

Ainsi, plusieurs bilans du Gis Perle et d'autres groupes de travail comme le thème « Industrie du futur » de l'université de Nantes sont formulés en termes de « verrous techniques » (à renseigner dans des colonnes de tableur) et font souvent référence à l'« acceptabilité sociale des techniques » par des populations. Or, plusieurs chercheurs du groupe « Aspects sociétaux » du Gis Perle ont souligné, à diverses reprises, la dimension idéologique de la formulation « acceptabilité sociale des techniques » par rapport à la « construction sociale des techniques » (Bijker, Hughes et al. 1987) qui ne suggère pas une nécessité ou un impératif d'acceptation d'un projet industriel mais une construction collective. De même, ils ont souligné l'inadéquation de penser la technique en termes linéaires de « verrous techniques » le long d'une chaîne de valeur économique car la technique est systémique par construction même. Thomas Hughes (1998, p. 840-847) critique par exemple depuis les années 1970 une vision trop mécanique du « système technique » en substituant aux notions de « goulot d'étranglement » ou de « verrou technique » la métaphore militaire de « saillants rentrants » sur un champ de bataille. Ainsi, le renforcement d'un rentrant peut impliquer des effets « en cascade » sur le reste du système à la manière de la conquête d'une poche sur le front militaire. À l'inverse, lorsqu'il nous est demandé de proposer des éléments d'amélioration ou d'approfondissement, nous, chercheurs issus des sciences humaines et sociales, sommes souvent démunis face à la matrice générale du bilan marquée par une culture de l'efficacité, par un cahier des charges précis et par des cadres de réponse normés.

Ces quelques retours d'expérience ne visent pas des attitudes individuelles. Je le répète : le GIS Perle est un lieu très ouvert à la discussion grâce, entre autre, à la personnalité de Jérôme Bellettre qui en est responsable mais aussi de Bruno Auvity co-responsable du groupe Hydrogène. Je voulais souligner que l'interdisciplinarité, au-delà de la rhétorique, pose des difficultés réelles et concrètes de prise en compte de la diversité des méthodes, des concepts et des imaginaires des différentes disciplines de l'ingénierie aux humanités. L'organisation disciplinaire de la formation universitaire et de la recherche ne nous prépare pas du tout à envisager des espaces de recherche pluridisciplinaire. D'autre part, elle est dominée par la culture technicienne dans les sociétés contemporaines industrielles. À mon sens, le meilleur test interdisciplinaire est une production commune : communication orale, édition scientifique, exposition matérielle ou numérique, publication écrite [12]

Pour caricaturer la situation contemporaine, nous, technologues, embrassons la technique dans sa profondeur et sa complexité sans pouvoir indiquer un chemin précis vers une solution locale alors que nos *alter egos* techniciens collent à la technique grâce à des modèles localisés sans pouvoir les restituer dans un monde hétérogène. Les cercles de la décision préféreront la règle technicienne à la critique technologique. La technocratie sera plutôt recrutée dans les rangs ordonnés de la pensée calculante que dans les gaz ionisés de la pensée méditante.

12. Je ne donnerai qu'un seul exemple d'interdisciplinarité réussie issue de mon expérience à l'université de Nantes. J'ai collaboré durant deux ans avec deux chercheurs en humanités numériques, Matthieu Quantin et Benjamin Hervy, ayant soutenu une thèse en humanités numériques au Centre François Viète. Leur idée était de tester la méthode algorithmique qu'ils avaient mise au point pour évaluer la proximité sémantique entre des textes (Haruspex) sur un de mes corpus de thèse : une trentaine d'entretiens avec des chimistes du solide et des chercheurs sur les matériaux. Nulle interprétation ne fut possible sans une confrontation précise et rigoureuse des méthodes de calcul d'Haruspex et la connaissance qualitative des entretiens. Nous expliquons le partage, l'incompréhension et la construction du savoir interdisciplinaire issu de cette expérience collective dans un article (Teissier, Quantin et al. 2018).

7.1.6 Modes d'existence de la technique contemporaine : le régime technicien

L'une des spécificités de la technique contemporaine est sa propension à réguler le social par son emprise sur les infrastructures et les imaginaires des sociétés industrielles. Son agentivité passe alternativement par une contrainte administrative et organisationnelle et par un désir inconscient et indéfini. C'est ce que j'ai appelé le régime technicien. Celui-ci contribue à sociabiliser la matière – l'énergie comme conversion –, à imposer des rythmes historiques – l'existence comme accélération –, à déployer des morphologies sociales – la société comme réseau – et à forger des valeurs culturelles – la nature comme fond. Le régime technicien structure ainsi quatre dimensions fondamentales de l'expérience humaine : la sociabilité, la temporalité, la spatialité et la culturalité.

L'organisation générale de l'essai offre une première image du régime technicien dans le cas du stockage de l'énergie sur la période 1850-2050 entre Europe de l'Ouest et Amérique du Nord. Trois niveaux d'analyse peuvent être isolés du plus matériel au plus idéel, du plus empirique au plus évanescent. Le premier relève des infrastructures et de l'économie que l'histoire des techniques a étudié en priorité depuis l'article programmatique de Lucien Febvre (1935, p. 535) appelant à une « coopérative de travail » interdisciplinaire sous la houlette d'un « historien dressé spécialement à cette tâche » de coordination, comparaison et interprétation. Cette infrastructure matérielle et économique, on l'a vu d'abord dans le chapitre 2, ossature du régime technicien et cartographie du stockage de l'énergie, mais aussi dans le chapitre 4, où s'étendent les ramifications des « voisinages électriques » autour des réseaux de puissance.

Puis, il y a glissement vers les schèmes énergétiques du chapitre 5. Ceux-ci sont façonnés et portés par les professionnels, techniciens et technocrates, dans les sphères économiques et politiques. Là, surprise ! La « structuration des imaginaires énergétiques » construit des manières de penser mais aussi des manières de faire et des manières de sentir, au fond des manières d'être ensemble. Le fonctionnement de l'électricité a recomposé la culture générale des populations occidentales, désormais enchâssées aux voisinages industriels par un double effet sociotechnique : une administration des espaces énergétiques et un désir d'enchantement électrique.

Cet épisode électrique témoigne d'un phénomène plus général d'hégémonie technicienne qui reconfigure la culture contemporaine en profondeur. C'est que montrait l'exploration des strates profondes de la civilisation occidentale dans le chapitre 3. Les dictionnaires et les encyclopédies relaient, par la signification des mots et la formulation d'images, la constitution d'un nouveau schème utilitariste et économique qui met « l'énergie en magasin » durant la deuxième moitié du XIX^e^ siècle. La cosmologie énergétiste s'étoffe au siècle suivant à travers la formulation et la circulation de trois schèmes énergétiques relatifs au stockage : la représentation quantitative du cosmos comme flux et stocks d'énergie ; l'ambition technicienne de saisir les temporalités des sociétés humaines, y compris les horizons incertains des futurs ; le partage du sensible et du psychique par-delà nature et culture. Le mécanisme de diffusion est invisible la plupart du temps car il procède par capillarité sociale. Des schèmes techniciens imprègnent ainsi le corps social à son corps défendant.

L'emprise du régime technicien pose une question anthropologique majeure car ces schèmes agrègent simultanément l'intelligibilité, l'opérativité et l'affectivité des populations soumises au régime technicien. La capacité de la science-fiction d'une part, mais, plus généralement, de tous les dispositifs mythogènes du capitalisme industriel et de la société programmée exaltent l'image de toute puissance de la machine. Les discours enthousiastes ou anxiogènes sur l'« intelligence » artificielle de la société de la communication ou les réseaux « intelligents » de la société de l'énergie sont repris et répétés, « en boucle » et sans discernement, par la sphère médiatique où se répondent publicités marchandes et promesses électorales.

Le dernier chapitre se focalise sur un problème du temps présent – l'économie de l'hydrogène – afin

d'assembler les constituants du régime technicien pour le faire exister en tant que monde habité. Le chapitre 6 interroge la possibilité d'habiter des « mondes hydrogène » dans les décennies à venir. Ces mondes n'existent pas encore, mais ils sont en cours de construction. Au-delà de l'écume de l'actualité et des effets de nouveauté, les soubassements des mondes hydrogène sont anciens. Ils s'ancrent à la profondeur temporelle et inconsciente des structures socio-culturelles du régime technicien. Pour ne pas être surpris par ce qui risque de se produire dans les décennies à venir, il est temps de se retourner sur les deux siècles qui viennent de s'écouler pour y chercher certains invariants sociologiques et quelques évolutions historiques de l'industrie de l'énergie et de son stockage.

Une permanence du régime technicien sur la période 1850-2050 concerne le haut statut économique et social de l'énergie. Elle est à l'œuvre dans la conversion de l'Angleterre victorienne au charbon, dans l'Amérique techniciste et productiviste du XX^e^ siècle ou aujourd'hui dans la construction des mondes hydrogène à l'échelle planétaire. L'énergétisme, cette cosmologie qui ordonne le monde selon les principes de conservation de l'énergie et les principes d'évolution de l'entropie, relève du sacré à l'époque contemporaine. L'équation énergie-civilisation en est la forme la plus aboutie. Mais, l'énergétisme est à la fois inconscient et intouchable. Il incarne le bien en régime technicien. La croissance énergétique est un pilier du capitalisme industriel en Europe de l'Ouest et en Amérique du Nord depuis deux siècles. Elle n'est mise en question ni par les technostructures, ni par les gouvernements, ni par les parlements. Le projet politique d'une « décarbonation » de l'économie ne vise nullement à décroître la production et la consommation d'énergie. Il consiste à choisir la quantité de gaz carbonique par kilowatt produit comme étalon universel de « propreté » écologique. Ce jeu d'écriture protège la bonne conscience occidentale sans ralentir les tendances à la croissance économique et à la superposition des sources d'énergie. De telles considérations accèdent peu à l'arène politique. Elles sont rarement portées de manière contradictoire, alors que cela devrait être la norme en régime démocratique, et seulement par les mouvances radicales à gauche de l'échiquier politique. Le productivisme énergétique est un dogme invariable dans les sociétés industrielles et programmées depuis le XIX^e^ siècle. Les techno-politiques du futur, mises en place au milieu du XX^e^ siècle, ont encadré la réalisation de la prophétie de la croissance énergétique.

7.2 Cosmologie des flux et des stocks : de la matière à l'énergie

7.2.1 L'énergie en magasin, l'écologie en magazine

La première tendance est l'accomplissement de la prière de l'ingénieur français, Antoine Andraud. « Il faut qu'on arrive à ce point, que chacun puisse avoir des *forces* en magasin comme on a aujourd'hui des chevaux à l'écurie pour le travail du lendemain. » (Andraud 1839, p. 18). S'il n'y a plus beaucoup de chevaux pour la traction mécanique, Andraud avait raison en ce qui concerne la généralisation du stockage d'énergie sous de multiples formes (figure 2.6), de multiples modes (figure 2.7) et de multiples fonctions (figure 2.8). Il avait tort en revanche sur la gratuité des convertisseurs énergétiques fussent-ils actionnés par les forces de la nature. La « marche des eaux », la « course des vents » et l'effluve solaire ont pu être convertis en travail mécanique mais toujours à un certain coût financier. À deux siècles de distance, alors qu'est affiché un certain « verdissement » de la production d'énergie, se dressent aussi les coûts matériels en termes de flux de matériaux et d'énergie, les coûts technologiques en termes de déploiement d'infrastructures et de machines dans l'espace, les coûts écologiques en termes de pollution sonore, visuelle, souterraine, mentale, etc., et de perturbations, voire de disparitions, des écosystèmes. Alors que du Fermier général Lavoisier au Lord Kelvin, l'économie de la nature se réduisait à une comptabilité de plus en plus mathématisée et de moins en moins sensible, de Bernard Bruhnes

à Félix Guattari, l'écologie se recomposait en direction de la psyché, de la sociabilité et de l'environnement. Pourtant, les cercles de la décision et la technostructure continuent de résonner aux vibrations binaires de certains schèmes énergétiques : coûts-bénéfices, flux-stocks, nature-culture, fossile-décarboné, etc. Pour leur pensée utilitariste, les forces de la nature se réduisent à une quantité de puissance mise « en magasin ».

Pour mieux saisir la permanence utilitariste et productiviste du régime technicien, comparons un projet (non réalisé) de William Thomson à la fin du XIXe siècle pour convertir la « puissance de la pluie » et le déploiement d'immenses champs d'éoliennes au début du XXIe siècle. Dans son article intitulé « Sur les sources d'énergie de la nature disponibles pour l'homme dans la production d'effet mécanique », Thomson (1881, p. 381) pose la question suivante :

> Sommes-nous nécessairement limités à de telles sources naturelles d'énergie hydraulique que celles fournies par la pluie tombant sur les collines rurales, ou pouvons-nous envisager la collecte de l'eau de pluie dans des réservoirs placés artificiellement à des hauteurs suffisantes au-dessus des plaines pour fournir une énergie motrice de façon économique en actionnant des roues hydrauliques ?

À cette question rhétorique, Thomson répond évidemment oui. Il imagine une multitude de réservoirs d'eau placés sur des piliers surplombant la plaine d'une centaine de mètres. Sa principale hésitation est d'ordre économique. Il affine ensuite sa réflexion en hiérarchisant les besoins des populations en plaçant l'eau potable au-dessus de l'énergie. Thomson (1881, p. 381) approuve la « dépense des aqueducs, ou de conduites d'eau souterraines, pour transporter de l'eau sur de grandes distances » alors qu'il critique la construction de canalisations pour la production d'énergie au-delà de quelques centaines de mètres. Pour l'énergie hydraulique, il faut soit privilégier le « drainage naturel », soit coupler la conversion hydraulique « en connexion avec l'approvisionnement en eau des villes ». Le projet de Thomson présente des similitudes avec le temps présent. Son désir technicien de quadriller l'espace rural avec des châteaux d'eau monumentaux évoque nos immenses champs industriels d'éoliennes qui recouvrent désormais certains paysages de plaines et de collines, mais également des zones côtières, dites *off-shore*. Il y a une similitude claire en termes de forme, de taille et de fonction des deux systèmes techniques. Dans les deux cas, les intempéries climatiques (pluies ou vents) sont asservies et stockées pour être utilisées au moment approprié par rapport au régime de consommation.

Deux choses ont drastiquement changé en un siècle et demi. Premièrement, la conversion énergétique la plus fréquente implique désormais l'électricité comme intermédiaire. Ceci résulte de la construction locale de réseaux de puissance à partir de la décennie 1880, juste après la conférence de Thomson (4.1, 4.2), puis leur expansion indéfinie jusqu'au XXIe siècle (5.2, 1.2). La deuxième rupture d'ampleur réside dans le changement d'échelle des infrastructures du réseau énergétique. Leur taille a grossi de plusieurs ordres de grandeur par rapport aux quelques centaines de mètres préconisées par Thomson. Pour l'électricité, les réseaux de puissance mesurent plusieurs milliers de kilomètres à travers l'Europe continentale (6.2.2) ou les deux plus grands réseaux électriques aux États-Unis (Eastern Interconnexion et Western Interconnexion). Les réseaux d'approvisionnement en hydrocarbures, quant à eux, ont tout simplement pris les dimensions planétaires. Le marché transcontinental du pétrole et du gaz est structurée à partir des années 1920, sous hégémonie occidentale, par la formation d'un cartel industriel de sept sociétés dominante appelées les « Sept Sœurs » (Seven Sisters) jusqu'à aujourd'hui (Gras 2015, p. 96-107). La rupture n'est pas que morphologique. Elle introduit une donnée fondamentale dans l'histoire du monde contemporain.

Dans le cas de l'électricité, comme dans celui du pétrole et du gaz, les macro-systèmes techniques sont contrôlés par des oligopoles financiers extrêmement puissants. La « structuration asymétrique de la capacité

d'agir » (A. Stirling) qui en résulte est particulièrement marquée dans le domaine de l'énergie où les « acteurs historiques » disposent de « ressources économiques et politiques particulièrement importantes » leur permettant de contrôler leur pré carré par rapport aux concurrents émergents d'une part et aux citoyens européens et militants écologiques d'autre part (Aykut et al. 2017, p. 11-12). Or, les oligopoles de l'énergie sont beaucoup plus intéressés par les bénéfices économiques que par les trois écologies de Félix Guattari (1987). Cette rupture historique et la structuration économique et politique qui en résulte sont essentielles pour comprendre la difficulté d'une coordination internationale sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre comme en témoignent les déceptions répétées des Conférence des parties (COP) successives depuis la première COP à Berlin en 1995. Alors que l'énergie est mise en magasin de manière industrielle à l'échelle de la planète, l'écologie est remisée sur papier glacé dans les magazines des pays occidentaux.

7.2.2 Mesurer et modéliser le monde par des flux et des stocks

La métaphore hydraulique pour penser le monde est ancienne. Au XVIII^e^ siècle, elle est utilisée en économie, domestique et politique, en physiologie et en médecine. La méthode des bilans (massiques) de Lavoisier à la fin du siècle rend plus systématique cette approche. L'économie de la nature devient un tableau comptable d'entrées et de sorties de quantités mesurables. L'adoption de la masse comme étalon universel rend « commensurables » des domaines hétérogènes tels que la chimie, la physiologie, l'agriculture, le commerce et la politique (Bensaude-Vincent 2020, p. 47). Cette cosmologie présente le monde comme un ensemble équilibré de flux de matière, de chaleur et d'argent, qui circulent dans l'espace et se conservent dans le temps. Sadi Carnot, qui partage avec Lavoisier une conception substantialiste de la chaleur, élabore ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu* (1824) à partir de l'analyse des flux thermiques.

La cosmologie des flux de matière est renouvelée durant la deuxième moitié du XIX^e^ siècle. Plusieurs phénomènes hétéroclites rendent visible aux sociétés industrielles la question des stocks d'énergie : l'asservissement accru des forces de la nature dans la démarche utilitariste (7.2.1) ; les inquiétudes économiques et géologiques sur les possibilités de pénurie de charbon en Europe (3.1.2) ; la formalisation du premier principe de la thermodynamique, qui stipule une conservation universelle de l'énergie sous la forme de travail et de chaleur. À ce titre, le travail de William Thomson et sa réception large rendent compte d'un mouvement plus général. Thomson conçoit la notion d'énergie et manipule les convertisseurs énergétiques en mettant au centre de ses pratiques la notion de « réserves » de travail mécanique utile pour la production industrielle (W. Thomson 1852b, 1881). D'autre part, les savants issus des humanités recourent volontiers au naturalisme et aux analogies organicistes et physiciennes pour comprendre les sociétés humaines (3.3.3). Des savants aussi influents que Herbert Spencer ou Wilhelm Ostwald introduisent des mécanismes de transformation des sociétés basés sur les théories biologiques de l'évolution et les principes thermodynamiques (3.1.3). De même, l'électricité reconfigure les imaginaires de l'époque. Elle vivifie la pensée vitaliste en littérature. Aux deux extrémités du XIX^e^ siècle britannique, Mary Shelley (1818, p. 60-61) et Thomas Hardy (1888, p. 37) mettent en correspondance les flux électriques du cosmos et les influx nerveux du corps humain.

La cosmologie des flux de matière est ainsi enrichie par l'énergétisme de deux manières. Premièrement, l'équilibre statique du monde est mis en mouvement. Deuxièmement, les flux sont associés à des stocks. La cosmologie énergétique s'incarne à partir des années 1880 dans les réseaux de puissance. Le fonctionnement des réseaux électriques implique un équilibre constant entre les flux de puissance et les stocks d'énergie (3.2). Ils induisent un changement d'échelle de trois ordres de grandeur dans la transmission de puissance, de quelques centaines de mètres comme le souhaitait William Thomson pour la conversion de « puissance de la pluie »

(7.2.1), à plusieurs centaines de kilomètres comme le préconise Charles William Siemens lorsqu'il décrit la ligne à haute tension reliant les chutes du Niagara à la ville de Chicago à la fin des années 1870. Tout en dilatant indéfiniment l'espace, les réseaux électriques rétractent le temps jusqu'à l'instantanéité.

L'imaginaire régulé des flux et des stocks est déployé durant la première moitié du XX^e^ siècle pour construire et gérer les infrastructures électriques en Europe et aux États-Unis (5.1). Cet épisode rend compte du succès opératoire de la modélisation technoscientifique (5.4.1). Le régime technicien valorise le bricolage de la modélisation pour quatre raisons : un désir de la chose mesurée que partagent le scientisme et le capitalisme ; l'atténuation des incertitudes sociales et historiques par des figurations précises, qui, à défaut d'être sûres, orientent l'action ; une aptitude à la médiation des jointures du social entre matériel et idéel, entre compréhension et action, entre savoir et pouvoir ; une traduction des quantités en qualité par la fabrication de récits collectifs sur le sur la société. Par la puissance opératoire des espérances mathématiques, le modèle expert se substitue en partie aux expériences humaines à partir des années 1930. Suite à la Deuxième Guerre mondiale, le principe d'optimisation coût-bénéfice apparaît comme la meilleure solution pour prévoir et planifier le futur de la deuxième moitié du siècle.

Dans le cas de l'électricité industrielle, le schème flux-stock permet de réduire une situation complexe à l'expression d'un problème formel exprimé par un système d'équations dont la résolution offre une comparaison chiffrée de type coût-bénéfice. En cela, la filière électrique rejoint la propriété essentielle de la culture moderne, selon Max Weber : son « extrême calculabilité ». La comptabilité de l'énergie s'étend à des territoires de plus en plus vastes au cours du XX^e^ siècle. Elle concerne l'électrification des sous-continents européens et états-uniens à partir des années 1880 et l'organisation du marché mondial des hydrocarbures à partir des années 1920 (7.2.1). Après les crises pétrolières des années 1970, les États et les institutions transnationales, dont l'Agence internationale de l'énergie, renforcent l'administration des différentes filières énergétiques à l'échelle de la planète. Cette agrégation des diverses filières énergétiques (pétrole, gaz, charbon, matières fissiles, biomasse et matériaux) est nommée « système social de l'énergie » (Klausner 1979). Les échanges économiques y sont fortement structurés par les rapports de domination d'ordre diplomatique et militaire. L'intégration des filières énergétiques est couramment visualisée par des diagrammes de Sankey. C'est le cas du bilan énergétique de la France de 2018 présenté sur la figure 7.3 extraite d'un rapport récent du ministère de la Transition écologique et solidaire.

Un diagramme de Sankey rend visibles les flux énergétiques d'un territoire. Il affiche d'abord, comme un tableau, des estimations chiffrées [13] de consommation primaire d'énergie et pour chaque filière, grâce à un équivalent commun, ici le milliard de tonnes équivalent pétrole (Mtep). Il permet ensuite de comparer les parts relatives de chaque filière industrielle par la taille relative des flèches horizontales, des flux entrants (à gauche) et sortants (à droite). La figure 7.3 montre par exemple la faible part des énergies renouvelables dans le mix énergétique de la France, autour de 11 % à la fin des années 2010. Enfin, le diagramme de Sankey indique les pertes énergétiques entre la production primaire et la consommation finale grâce aux flèches partant vers le haut (imagées comme des pertes atmosphériques). Ainsi, il est possible de visualiser les gigantesques pertes lors des conversions de chaleur en électricité : environ deux tiers de la chaleur produite sont ainsi perdus aujourd'hui, en raison d'une politique de cogénération de faible ampleur à l'échelle du territoire national. Une telle proportion ramène à la question des mondes hydrogène en construction. En tant que système de système (figure 6.5), l'économie de l'hydrogène est particulièrement friande de conversations

13. Les estimations peuvent varier en fonction des enquêtes et des modélisations de chaque institution. Pour la quantité d'énergie primaire en France en 2018, le rapport de British Petroleum (2021, p. 10) donne 235 Mtep contre 262 Mtep pour le rapport du ministère de la Transition écologique et solidaire (2020, p. 111).

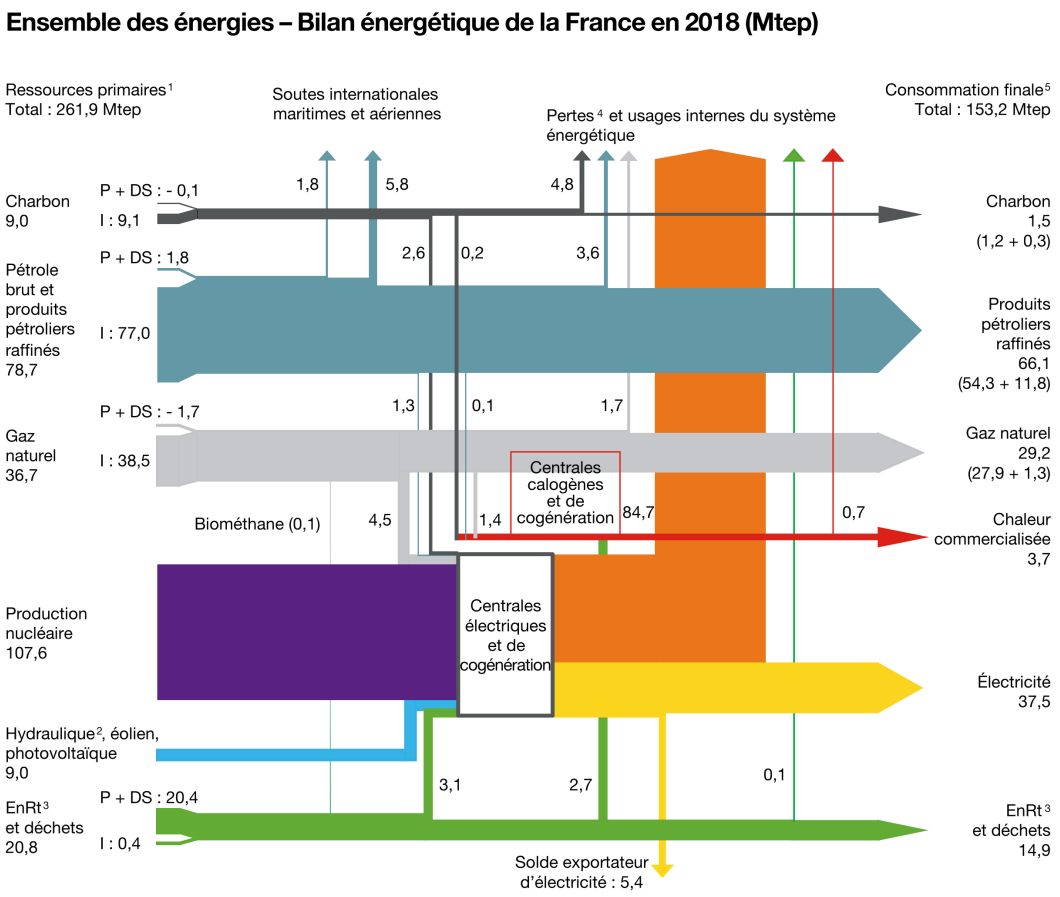

FIGURE 7.3 – Diagramme de Sankey des flux d'énergie entrants et sortants en France en 2018 (Ministère de la Transition écologique et solidaire 2020, p. 111)

énergétiques et sera donc très marquée par des pertes énergétiques lors des conversions. Ces pertes, dont les communautés technoscientifiques discutent aujourd'hui, auront pour conséquence de poursuivre, à travers les mondes hydrogène, la croissance énergétique des sociétés contemporaines (6.4.2).

7.2.3 Énergétisme : diagrammes et métaphores dans les humanités

La fonctionnalité des diagrammes de Sankey explique leur intense circulation. Leur transfert du milieu technicien vers les humanités est un processus classique en régime technicien du fait de l'hégémonie culturelle dont jouissent les technosciences dans les sociétés industrielles.

L'image du monde comme flux matériels et énergétiques

L'ingénieur Charles Minard a utilisé le principe en 1869 pour montrer l'évolution quantitative des troupes napoléoniennes durant leur progression puis leur régression dans la campagne de Russie en 1812-1813. Trente ans plus tard, un autre ingénieur, Matthew Sankey, popularise ce type de schéma en l'appliquant au fonctionnement d'une machine à vapeur. Ces diagrammes improprement dits « de Sankey » se répandent ensuite dans l'administration et l'industrie au XX^e^ siècle (Chevalier 1981, p. 16-17). Mais, ces cartes de cartes de flux (de matière, d'énergie, d'argent) sont aussi utilisées par les sciences de la nature, en écologie notamment, et par les sciences de la société, en économie ou encore en géographie. Il y a là un nouvel indice de l'emprise

de la pensée technicienne sur les humanités d'une part et l'administration de la société d'autre part [14].

La cosmologie des flux est aussi déterminante en histoire. Jean-Baptiste Fressoz (2021) par exemple enfonce le clou matérialiste pour dire l'importance de coupler l'histoire de l'énergie à l'étude quantitative des matériaux et des flux de matière. Il applique l'idée de la « symbiose industrielle » développée en histoire économique (Diemer 2016) à l'histoire sociale et environnementale. En réclamant « une histoire des symbioses énergétiques et matérielles », il s'efforce de renverser les idées reçues : le XXe siècle cesserait d'être le siècle du pétrole pour devenir un moment d'un processus industriel plus large durant lequel « le pétrole "épaule le charbon" » (Fressoz 2021, p. 10). Son appel programmatique cherche à lutter contre la notion omniprésente en histoire et en politique de « transition énergétique » et à repolitiser le débat à travers les luttes sociales et environnementales [15]. Dans un autre registre, moins programmatique et plus empirique, Gaëtan Levillain (2023) souligne aussi l'importance de l'approche par les flux matériels en histoire sociale et environnementale. Il couple « l'enrésinement des forêts et l'industrialisation du bois en France » au besoin économique de bois transformés, en particulier des résineux, pour soutenir l'industrialisation durant l'époque contemporaine. L'« histoire technologique, culturelle et environnementale » de sa thèse en fin de rédaction renverse complètement l'image classique du bois comme « matériau traditionnel » pour montrer son rôle déterminant dans l'industrialisation du monde occidental.

Sans être exhaustif, je voudrais également évoquer la manière dont les géographes se sont réappropriés les schèmes techniciens des écologues. Issue de la géographie sociale, l'écologie territoriale développe au XXIe siècle une analyse « métabolique » des sociétés humaines. Il s'agit de calculer « l'ensemble des flux d'énergie et de matières mis en jeu par le fonctionnement d'un territoire donné [...] produit de l'entrelacement de processus naturels (ou physiques), incluant en particulier les cycles naturels tels ceux de l'eau, du carbone, de l'azote, etc., et de techniques (entendues au sens anthropologique) issues des sociétés humaines » (Barles 2017, p. 821). Les géographes et les écologues adoptent ainsi l'approche comptable des économistes du XIXe siècle. Dans le cas de l'écologie territoriale, ils inversent, en outre, la hiérarchie des valeurs en plaçant l'écologie au-dessus de l'économie.

L'approche matérielle a ici l'avantage de mettre en évidence des coûts masqués qui ne sont pas pris en compte par la comptabilité économique classique. Il s'agit des coûts matériels, énergétiques et environnementaux de l'extraction de puissance et du transport d'énergie. Il est intéressant de souligner une certaine permanence du rapport entre énergie consommée et coûts de production et de transport à un siècle de distance. En 1907, le prix du charbon variait du simple au triple en France à cause des variations du coût de transport : 15 francs dans les départements miniers, 31 francs dans la Seine, 45 francs en Haute-Vienne (Morsel 1991a, p. 515). Étonnamment, l'ordre de grandeur est le même aujourd'hui pour les énergies fossiles. Pour extraire et acheminer 472 petajoules d'hydrocarbures et d'uranium dans le port de Saint-Nazaire en Loire atlantique depuis cinq continents, 547 petajoules d'hydrocarbures sont consommés et brûlés avant l'arrivée au port (Bahers et al. 2020, tableau 2). Cette quantité faramineuse d'hydrocarbures, 116 % (plus importante que la consommation primaire elle-même) n'apparaît pourtant pas sur le diagramme de Sankey du bilan énergétique 2018 de la France publié par le ministère de la Transition écologique et solidaire. Dans la perspective d'une réflexion à l'échelle planétaire, il est important de prendre conscience des coûts environnementaux et sociaux

14. Une étude socio-historique serait ici à mener pour analyser les contextes de circulation et de réappropriation de ces schèmes d'intelligibilité et d'opérationnalité. Elle pourrait mieux expliciter le fonctionnement épistémologique de ces schèmes techniciens et les raisons socio-historiques de leur adoption au-delà des milieux techniciens.

15. De manière significative, Fressoz (2021) ne semble pas s'intéresser à la manière dont l'imaginaire historien est colonisé par la cosmologie naturaliste. Il substitue, à la métaphore thermodynamique de la « transition », la métaphore biologique de la « symbiose » sans expliquer comment fonctionne la métaphore ni s'arrêter à ses connotations morales. À un siècle et demi de distance, sa démarche ressemble à celle de Lester Ward qui transférait la notion de « synergie » de la physiologie vers la sociologie pour des raisons politiques (5.3.4).

de cette « délocalisation de la puissance » (Gras 2003) et de les prendre en compte politiquement. Une réflexion sur l'économie mondiale du lithium est proposée dans la section 7.4.3.

L'histoire comme « psychologie des nénuphars »

L'usage courant des métaphores par les humanités s'explique par la difficulté à décrire le social et à écrire l'historique. J'ai souvent eu recours à des métaphores naturalistes : géologique d'abord – la « stratification » des enjeux énergétiques dans les imaginaires, discours et pratiques des habitants de la deuxième moitié du XIX^e^ siècle (3.1) ; puis astrophysique – l'accrétion de « nébuleuses » innovantes (Garçon 2003a) dans le cas de la voiture électrique vers 1890 (4.1.3) ; chimique ensuite – la « cristallisation » d'un monde hydrogène extraterrestre dans les années 1960 ; mécanique enfin – le « verrouillage » de situations historiques (McGuire et al. 1993). En dépit de leur force figurative et donc argumentative, ces métaphores contribuent à naturaliser le social. Des métaphores issues d'autres sphères d'activité humaine sont donc bienvenues : Norbert Elias et Eric Dunning (1994) interprètent une configuration sociale comme un jeu sportif dont les règles sont prédéfinies mais dont les situations sont renouvelées à chaque partie. Alain Touraine (1978, p. 10-13) utilise avec bonheur la métaphore du drame littéraire. Il développe une métaphore couplant la « voix » des acteurs dans la construction du social et le « regard » sociologique dans l'appréhension du social. Pour rendre compte de la double dimension de l'histoire – théâtre de l'action et peinture *a posteriori* du drame – nous avons proposé avec Anaël Marrec de parler d'une « psychologie des nénuphars » (Teissier et Marrec 2019, p. 332-334).

Cette métaphore a émergé à travers une étude critique de l'usage des métaphores naturalistes et technicistes dans les sciences humaines. Nous étions partis de quatre métaphores courantes en histoire des techniques et histoire de l'énergie, importées depuis les sciences de la nature et de l'ingénieur : trajectoire, transition, lignée, système. Ces quatre métaphores incorporent quatre types de détermination – mécanique, thermodynamique, biologique, cybernétique – pour appréhender le processus historique associés à quatre type de temporalité : opératoire, statistique, mémorisée, socioculturelle (Teissier et Marrec 2019, p. 328). À notre tour, nous avons forgé une métaphore par mélange des genres en croisant la peinture de Claude Monet et la littérature de Virginia Woolf. Par l'image d'une « psychologie des nénuphars », nous voulions rendre compte de la double dimension de l'histoire comme théâtre de l'action et comme peinture du drame [16].

La métaphore s'appuie sur un épisode connu de l'histoire européenne de la peinture : *Les Nymphéas*. De la fin des années 1880 au milieu des années 1920, Monet peint environ 250 tableaux représentant des nénuphars dans un bassin, qui sont, pour l'essentiel dans son jardin à Giverny. Une telle entreprise, qui dure trois décennies, associe une double série temporelle et discontinue : le changement, par étapes, au fil des heures, des jours et des saisons d'un paysage végétal (bassins, nénuphars et lumières) ; le changement existentiel et esthétique de la psychologie et de la sensualité du peintre. Les deux séries sont liées entre elles mais aucune n'est réductible à l'autre car chacune peut donner lieu à un surgissement imprévu de créativité : due à la coopération et à la compétition des nénuphars dans leur environnement pour la première ; due à l'existence et à la psychologie du peintre pour la seconde. L'interrelation de ces deux séries hétérogènes de surgissement-créativité constitue une analogie pertinente pour expliquer ce que nous entendions par histoire. La première série constitue le processus historique si l'on reconnaît aux nénuphars une capacité de communication collective que les sciences biologiques leur octroient depuis quelques années et une psychologie individuelle que les cosmologies animistes leur octroient depuis quelques millénaires. La seconde série constitue le récit historique, tissé par

16. Le paragraphe qui suit est une adaptation de la partie de l'article où nous expliquions la métaphore (Teissier et Marrec 2019, p. 332-333). Cette réflexion commune sur les temporalités a pour point de départ un travail entrepris à trois, avec Paul Naegel sur « un usage citoyen du métier d'historien » au moment de la COP 21 de Paris (Naegel, Marrec et al. 2015).

les changements de savoir-faire, de sensibilité et d'état d'âme du peintre, les modes culturelles de son époque et les héritages de sa société. Nous appelions « psychologie des nénuphars » cette métaphore qui présente la double nature de l'histoire comme processus et comme récit. Par le recours à une psychologie double, celle du peintre et celle des nénuphars, nous insistions sur l'importance des espaces intimes pour penser l'histoire en relation avec les espaces sociaux. Nous introduisions ainsi une cinquième type de détermination d'ordre psychologique associé à un cinquième type de temporalité d'ordre intime. Le va-et-vient du social à l'intime permet d'interroger les aspects de créativité et d'inventivité d'une manière relationnelle, qui soit à la fois contraignante et disposant de degrés de liberté.

Dans le même article, nous proposions une seconde métaphore, à la croisée de la mécanique et du jeu. La métaphore du « sac de nœuds » attirait l'attention sur la dimension politique des convertisseurs énergétiques et l'inertie des systèmes énergétiques tout en soulignant l'importance de la contingence dans la façon dont les ensembles sociotechniques se rencontrent (1.6.4).

7.2.4 Convertisseurs : épistémologie, technologie et idéologie de l'énergie

Le mouvement de matérialisation, d'opération et de multiplication des convertisseurs énergétiques à partir du XVIII^e^ siècle en Europe est un facteur central d'organisation des sociétés contemporaines jusqu'au XXI^e^ siècle. Il structure l'articulation entre les infrastructures matérielles, les réseaux de transport et de distribution et la formulation de schèmes énergétiques. Il explique l'hégémonie culturelle de la cosmologie des flux et des stocks et l'organisation en réseau des mondes contemporains. L'expansion territoriale des convertisseurs énergétiques affecte simultanément l'intelligibilité du cosmos – les convertisseurs établissant un principe d'équivalence et une porosité entre nature et société – l'opérativité du régime technicien – ces machines domestiquant les forces hétérogènes de la nature afin de produire une puissance utilisable pour la production économique – et la sensibilité des populations contemporaines – ces artefacts stimulant de manière quotidienne des préférences affectives et morales sur l'environnement de vie et d'expérience. En somme, avec les convertisseurs énergétiques, se déploient une épistémologie, une technologie et une idéologie de l'énergie. C'est la force de la technoscience contemporaine de produire de manière couplée une intelligibilité, une opérationnalité et une sensibilité du monde en général et du local existentiel en particulier.

Cette triple aptitude forme le leitmotiv le plus obsédant de cette habilitation à diriger des recherches. Elle structure en profondeur le régime technicien sur la période 1850-2050. Elle est portée par ces machines que sont les convertisseurs mais aussi par les schèmes énergétiques qui peuplent les catacombes de l'imaginaire contemporain et façonnent l'infrastructure matérielle et organisationnelle des sociétés industrielles et technoscientifiques de l'occident contemporain. Entre les convertisseurs et les schèmes surgit la question fondamentale (et irrésolue) des sciences humaines et sociales : l'agencement entre création et structuration, entre production et reproduction, entre hasard et nécessité. Dans l'introduction de *L'idéel et la matériel. Pensée, économies, sociétés*, Maurice Godelier (1984, p. 9-39) repose le problème en articulant les dimensions idéelles et matérielles des rapports sociaux. S'il identifie un premier niveau de déterminisme – correspondant aux rapports sociaux qui s'imposent aux individus – il ajoute un second niveau de déterminisme qui hiérarchise la force des rapports sociaux entre eux, les rapports sociaux de production étant pour lui dominants dans les sociétés humaines. Le recours aux schèmes techniciens est une manière de ne pas considérer l'hégémonie *a priori* des rapports sociaux de production par rapport aux autres rapports sociaux (artistiques, culturels, politiques, religieux, etc.). Influencé par l'approche holiste de Paul Veyne, je préfère laisser en suspens l'encombrante question de la force relative des facteurs sociaux les uns par rapport aux autres.

Ceci n'empêche pas de s'intéresser aux enjeux politiques de la technique. Les convertisseurs forment justement un nœud fondamental de la techno-politique des sociétés contemporaines. La métaphore du « sac de nœuds », que nous avons forgée avec Anaël Marrec (2019), qualifie l'histoire des énergies sur la période 1850-2050 (1.6.4). Elle fonctionne à trois niveaux. Premièrement, elle signale l'imbrication de facteurs techno-politiques, dont les degrés d'interaction dépendent de l'espace : interaction forte pour un projet local (nœud-convertisseur) ; interaction faible entre projets distants (contact des nœuds dans le sac). Deuxièmement, l'image du nœud suggère que la difficulté à faire ou à défaire des projets énergétiques (faire ou défaire un nœud) est d'autant plus forte qu'il s'inscrive dans des espaces énergétiques (nombre croissant de nœuds à mesure que le sac se remplit) incorporant de nombreux facteurs culturels, économiques, politiques et sociaux au-delà des techniques de l'énergie (Marrec et Teissier 2020, p. 248). Troisièmement, l'image du « sac » souligne les limites des concepts en sciences de l'homme, l'histoire des énergies se prêtant difficilement à des généralisations. Elle évoque l'idée, pour les sciences sociales, que le social ne peut être saisi que de manière discontinue et locale comme les fragments d'une société, qui révéleraient que des éclats déformés du réel. Mais, les limites des concepts existent aussi en sciences de la nature. Pour ne prendre qu'un exemple emblématique, le principe de conservation de l'énergie, tout en ayant une force heuristique pour les sciences mathématico-expérimentales depuis 1850, contient de multiples ambiguïtés comme l'a bien montré Isabelle Stengers (3.1.3). L'énergie devient un étalon universel de la physique sans pour autant donner la « raison » de l'équivalence entre travail et chaleur. La « généralité se paie par la mutité quant à ce qui est mesuré » (Stengers 1997, p. 187). Les ambiguïtés des sciences de la nature et de l'ingénieur, qui sont masquées par l'opérativité de leurs méthodes d'action sur le réel, sont autant de raisons de refuser leur hégémonie culturelle dans les sociétés contemporaines (7.2.3).

7.2.5 Batteries : banalité de la récalcitrance, démesure de la promesse

La batterie électro-chimique est un convertisseur emblématique de cette triple permanence du régime technicien : désir de puissance, asymétrie sociale, productivisme énergétique. L'électricité industrielle, par la fascination qu'elle a exercée à la fin du XIX^e^ siècle, a d'abord été perçue comme la solution universelle au stockage de l'énergie dans les réseaux industriels (3.3.1). Thomas Mendenhall (1887, p. 213-214) parle d'une « croyance » collective en l'électricité pour « stocker ou accumuler l'énergie de manière économique afin qu'elle soit facilement transportable ». William Thomson (1881), comparant les batteries électro-chimiques à des « boîtes d'énergie », envisageait la distribution d'électricité sur le modèle des bouteilles de lait ou de gaz (4.2.2). La batterie incarne la modernité électrique à la Belle Époque.

La recherche et le développement (R&D) des batteries électro-chimiques est un cas intéressant pour confronter la récalcitrance des artefacts aux promesses des technosciences contemporaines. Aux yeux des experts en électrochimie et chimie du solide, la croissance de la quantité d'énergie stockée dans les batteries paraît lente : la densité énergétique des batteries a « seulement » été multipliée par cinq en deux siècles ! (2.2.1). Lors de sa leçon inaugurale à la chaire de Développement durable du Collège de France, Jean-Marie Tarascon (2010, §28) souligne « la lenteur des progrès dans le domaine du stockage de l'énergie ». La densité énergétique des batteries commerciales lithium-ion est aujourd'hui d'environ 0,25 kW/kg, 50 fois moins que celle de l'essence, autour de 13 kW/kg. Si la linéarité de l'augmentation du stockage d'énergie irrite le milieu technicien, c'est parce que d'autres phénomènes sociaux connaissent des croissances exponentielles : la consommation d'énergie et d'électricité en France (figure 2.2) et dans le monde depuis l'industrialisation occidentale ; le stockage d'informations des semi-conducteurs du domaine électronique, dont la capacité double tous les deux ans depuis les années 1970.

Que le doublement biannuel du stockage d'information soit qualifié de « loi » (de Moore) (Brock 2006) ou que la croissance exponentielle de la production d'énergie depuis deux siècles soit considérée comme une « norme » sociale montre bien l'emprise du régime technicien sur les sociétés contemporaines. La démesure des technosciences est la mesure de la civilisation contemporaine. C'est le sens de l'équation énergie-civilisation qui hante les imaginaires occidentaux depuis un siècle et demi (1.3.4). Ce schème énergétique a lui aussi donné corps à une « loi » d'anthropologie qui mesurerait la culture d'une société humaine par la quantité moyenne d'énergie disponible par individu : la « loi de White » (5.3.1). Sans doute, avons-nous oublié la banalité avec laquelle les choses résistent au quotidien. Ne sommes-nous pas trop habitués en régime technicien, trop jeunes comme le craignait Georges Bernanos (1947), à penser comme les machines. Si la chaîne d'opérations peut produire plus, pourquoi ne pas réaliser cette croissance ? Cette question est reformulée en régime technicien comme une double injonction capitaliste : hors de la croissance économique, point de salut pour les cercles de la décision ; hors de la consommation d'artefacts, point de désir pour le corps social.

Or, au cœur même de la modernité électrique des années 1880-1910, l'électricité ne tient pas toutes ses promesses. Les fabricants de batteries surestiment les performances de stockage et donnent des chiffres correspondants à des conditions optimales, inaccessibles en pratique. Les professionnels soulignent de nombreux problèmes en opération : arrêts imprévus, fragilité des cellules, fuites d'électrolytes, manque d'endurance, vieillissement précoce, etc. (figure 4.1). La recherche et le développement, malgré des financements importants des industries électriques, ne fournissent pas des produits d'une qualité jugée suffisante par les ingénieurs-électriciens. La batterie électrique est alors considérée comme « un outil très imparfait » (Hospitalier et Bainville 1901, p. 53), qui manque de fiabilité (Salomons 1894, p. 166). Les porteurs de la seconde industrialisation – électriciens, chimistes, mécaniciens – peinent à sociabiliser des artefacts récalcitrants au technocosme. Les valeurs techniciennes sont mises à mal par des réalités terre-à-terre. On préconise l'économie alors que les batteries gaspillent l'énergie, la standardisation alors qu'elles vieillissent de manière imprévisible, la portabilité alors qu'elles sont lourdes, l'ergonomie alors qu'elles sont rigides et dangereuses.

La défection des artefacts par rapport aux promesses triomphantes bat en brèche le désenchantement de la modernité selon Max Weber. La maîtrise incomplète des technosciences est complétée par un réenchantement du monde par les mythes techniciens. Les défauts de la technologie matérielle sont lissés par la technologie discursive. Professeur et administrateur, Thomas C. Mendenhall réalise l'alliance réussie entre artefacts et symboles : il relie les artefacts d'un ensemble électrique comme il relate leur déploiement sous la forme d'une épopée du progrès (3.2.1). Les pratiques électriques, incomplètes ou en échec, sont ainsi réanimées par une mémoire collective glorifiant l'électricité dans le temps et l'espace des sociétés occidentales. C'est ainsi que les électriciens deviennent des « magiciens » et l'électricité un conte de fées moderne. Leurs impuissances passagères sont oubliées sous les promesses d'à-venir. Le régime technicien réussit ainsi l'alliance « mystico-magique » des choses et des mots à travers le « caractère performatif du langage » (Cérézuelle 2011, p. 152-153). La force métaphorique de la batterie est mise en scène dans la sociologie de Lester Ward (5.3.4). Lui-même « produit de la frontière », Ward transforme la batterie de stockage, objet banal et quotidien, en un puissant sémiophore incarnant la liberté humaine dans sa cosmologie matérialiste.

7.3 Temps et espaces du stockage de l'énergie, 1850-2050

Les fonctions du stockage de l'énergie agencent les temps et les espaces des sociétés industrielles sur la période 1850-2050. La section 7.3 s'appuie sur la filière électrique en raison de sa centralité dans la modernité technicienne depuis les années 1880 mais élargit la réflexion, en différents points, au champ de l'énergie à

l'époque contemporaine.

7.3.1 Énigme contemporaine : distribuer l'énergie dans le temps et l'espace ?

> L'objectif principal du stockage de l'énergie est « d'adapter » à chaque instant la production à la demande, malgré le caractère le plus souvent irrégulier et aléatoire de l'une et de l'autre, en mettant en réserve les kWh. [...] Ce « transfert dans le temps » de grandes masses d'énergie implique – comme le transport dans l'espace par les lignes électriques – un certain « péage » constitué ici, d'une part, par les pertes d'énergie et, d'autre part, par les charges financières et les dépenses d'exploitation.

La citation précédente résume la *Vue d'ensemble sur les divers procédés de stockage de l'énergie* publiée par la Direction des études et recherches d'Électricité de France (EDF), sous la direction de Gaston Remenieras (1956, p. 1). Elle formule plusieurs traits caractéristiques du problème du stockage de l'énergie à l'époque contemporaine. Sa date de publication, 1956, fait office de pivot au milieu des deux siècles d'étude, 1850-2050. Cela ne doit pas nous surprendre dans la mesure où les réseaux électriques reconfigurent en profondeur les fonctions du stockage de l'énergie à l'époque contemporaine et que Remenieras porte la parole de l'une des technostructures qui a organisé et planifié la gestion centralisée des réseaux de puissance dans le monde occidental. La citation précédente inscrit le stockage d'énergie dans le cadre spatio-temporel du réseau électrique et dans le schéma économique de la compétition entre sources d'énergie. Remenerias souligne la fonction régulatrice du stockage d'énergie dans l'équilibre des flux électriques : « "adapter" à chaque instant la production à la demande, malgré le caractère le plus souvent irrégulier et aléatoire de l'une et de l'autre ». Mettre « en réserve les kWh » permet de régulariser les aléas naturels et d'asservir les forces de la nature pour faire fonctionner la machine sociale. Cet équilibrage a des conséquences sur la gestion du réseau. En effet, le « "transfert dans le temps" de grandes masses d'énergie implique – comme le transport dans l'espace par les lignes électriques – un certain "péage" ». Il constitue la fonction essentielle du stockage d'énergie : synchroniser les temps de production et de consommation de puissance à moindre coût et, si besoin, redistribuer la puissance au sein de l'espace énergétique. Soixante-dix ans après ce rapport d'EDF, les fonctionnaires et experts de l'Ademe ne pensent pas autrement le problème du stockage de l'énergie. Seule évolution conceptuelle : ils distinguent désormais le « stockage stationnaire », « permettant de décaler l'usage dans le temps sans le décaler dans l'espace », et le « stockage embarqué ou portable », permettant de décaler l'usage dans le temps et dans l'espace [17].

L'objectif gestionnaire de régulation des flux de puissance par les stocks d'énergie dans l'espace et dans le temps est une permanence du régime technicien sur la période 1850-2050. L'impératif de régulation est particulièrement fort pour les dispositifs locaux d'électricité et les réseaux électriques de puissance. Certes, la gestion régulatrice des flux et des stocks de matière préexistent à l'électricité de puissance. Avant même le déploiement d'infrastructures à grande échelle, une machine incorpore par son fonctionnement la double opération de régulation et de réservoir. Dans une machine à vapeur, le volant d'inertie sert à réguler la vitesse de rotation de la machine par alternance de mise en réserve et de restitution du travail mécanique (Hospitalier 1880, p. 354). La régulation mécanique est étendue, du local au régional, par la construction des réseaux ferroviaires. La première industrialisation déploie aussi des réseaux bancaires et télégraphiques (3.2.4). La mise en réseau des territoires par le capitalisme est conceptualisée par la tradition saint-simonienne durant la

17. Extrait du site internet de l'Ademe, consulté en 2014, cf. https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-laction/stockage-lenergie

première moitié du XIXe siècle. On retrouve ici la cosmologie des flux et des stocks de matière (charbon) et de symbole (argent) de la section 7.2.

Dans quelles mesures l'introduction des dispositifs et des réseaux électriques modifie-t-elle la gestion des flux et des stocks en termes opératoires et économiques ? Cela revient à expliciter l'aspect « systémique » des réseaux électriques. L'électricité, sans doute, nécessite une régulation « plus systématique » des flux et des stocks que les autres réseaux industriels. Que signifient alors les termes « systémique » et « systématique » ? La batterie électrique joue un rôle central dans la régulation systémique de l'électricité. Elle répond, écrit Édouard Hospitalier (1901, p. 53), « à un besoin si impérieux qu'en dépit de ses imperfections son emploi s'est généralisé ». Par analogie avec l'épargne en économie politique, les électriciens caractérisent alors l'accumulateur électrique par une double fonction de mise en réserve d'énergie (7.2.1) et de régulation de puissance. De manière plus spécifique, la batterie fait équipe avec un autre convertisseur énergétique dans la construction des réseaux électriques : la dynamo magnéto-électrique convertit le travail mécanique en électricité (3.1.3). Le couplage de ces deux nœuds énergétiques, d'abord installé de manière locale et isolée, se multiplie par réticulation à mesure que s'étende le quadrillage électrique de la modernité électrique (1880-1910). Un article de la revue *Science* (1889, p. 54-55) résume bien le problème du couplage entre les nœuds du réseau à la fin du XIXe siècle. La « batterie de stockage est, en fait, une égalisatrice et une régulatrice de la dynamo, en plus d'agir comme un réservoir en cas d'accident ».

Un tel énoncé technicien, situé dans le temps, peut être reformulé comme une question englobant l'ensemble de la période 1850-2050. Comment gérer et déplacer les stocks d'énergie durant le temps d'opération et à travers l'espace de gestion des réseaux électriques ? La question paraît anodine. Pourtant, sa réponse est une énigme contemporaine. Sa résolution occupe et inquiète les techniciens et les technocrates de l'électricité depuis un siècle et demi. La batterie électrique réalise les quatre principales fonctions du stockage de l'énergie à l'époque contemporaine : accumulation, génération, propulsion et traction, régulation (figure 2.8). Son intérêt économique et sa commercialisation se développent dans le dernier tiers du XIXe siècle (4.1.2).

Le milieu technicien envisage la substitution des piles génératrices de courant dans les réseaux télégraphiques (depuis les années 1820) et téléphoniques (depuis les années 1870) par des batteries rechargeables. Celles-ci, après les améliorations de Camille Faure et de Charles Brush, sont plus puissantes, moins encombrantes et plus durables par unité de puissance que les batteries primaires à usage unique. Un opérateur télégraphique dominant aux États-Unis comme la Western Union Telegraph Co procède à un remplacement massif des piles par les batteries au cours de la décennie 1890. La substitution concerne aussi la signalisation électrique : alarmes et signaux sonores de sécurité, dispositifs de police, alarme incendie, etc. Mais, la reconfiguration du marché électrique par les batteries est bien plus profonde qu'une substitution d'artefacts. Elle induit de nouvelles fonctions économiques qui jouent sur trois temporalités de la gestion d'un réseau (2.3.2) : instantanée ou temps réel (7.3.2), imprévisible ou temps de la crise (7.3.3), périodique ou temps de la croissance (7.3.4). Ces trois temps du stockage électrique sont autant de fonctions de régulation du régime technicien sur la période 1880-2050.

7.3.2 Temps du phénomène : équilibrage instantané et qualité de l'énergie

La régulation électrique répond d'abord à une sensibilité de l'instant imposée par la phénoménologie de l'électricité. Pour que le réseau soit stable, les puissances produites et consommées doivent être équilibrées en temps réel par des dispositifs de stockage d'énerig. Les « batteries-tampon » sont alors introduites pour assurer « l'effacement des fluctuations et variations [de charge] qui s'exercent sur les dynamos et les machines »

(Childs 1895, p. 586). En « absorbant le choc des variations sans le répercuter sur les moteurs » et en égalisant les fluctuations, une batterie d'accumulateurs lisse en permanence les instabilités de charge, à partir des nœuds du réseau où elle se trouve (stations centrales ou annexes) (Childs 1895, p. 586). Cet équilibrage instantané est nécessaire pour le bon fonctionnement du réseau. Il se comprend mieux par un détour par la phénoménologie de l'électricité. L'électricité est un flux divisible et non stockable. Stocker l'électricité est contraire à sa phénoménologie mais nécessaire au fonctionnement des réseaux électriques. Cette analyse d'ordre technologique est une manière d'expliquer la récurrence du problème technicien et la contrariété du désir technocratique dans le domaine du stockage d'électricité sur la période 1880-2050.

L'équilibrage des réseaux concerne le réglage de puissance, de tension et de fréquence de l'électricité. Une batterie d'accumulateurs rend plusieurs services : arbitrage de distribution, lissage de puissance, raffermissement du courant, de la charge et de la tension, etc. (Institute of Electrical and Electronics Engineers 2015, p. 52). Dans un périmètre de transmission et de distribution d'électricité, le stockage par batteries contribue aussi « à maintenir tous les composants système d'une ligne de transmission en opération synchrone les uns avec les autres afin d'empêcher l'effondrement du système » (Chen et al. 2009, p. 293). La régulation synchrone d'un réseau entre dans la catégorie actuelle de « services système » (Ademe, Artelys et al. 2013, p. 39). Un gestionnaire de réseau peut ainsi écrêter la demande (*peak shave*) pour renforcer la stabilité d'un périmètre sensible ou améliorer la qualité du courant délivré en atténuant les oscillations, les pics, les bosses, etc., de l'électricité générée (Chen et al. 2009, p. 293).

L'approche par l'agentivité des phénomènes permet de repérer des similitudes technologiques, au sein du régime technicien, entre des situations séparées dans le temps et dans l'espace. Elle interroge l'énergie comme qualité. La qualité phénoménologique de l'électricité est déjà apparue à travers la normalisation, ou standardisation professionnelle, de l'électricité (3.2.3). Beaucoup a été dit déjà par l'historiographie sur la normalisation électrique, notamment la « guerre des courants » à la fin du XIX^e^ siècle. Thomas Hughes (1983, p. 218-221) a montré comment la lutte économique et financière entre systèmes alternatifs et continus n'avait pas d'issue évidente *a priori* mais qu'il est possible de dire *a posteriori* que deux facteurs sociotechniques furent déterminants pour l'emporter : le facteur de charge et le mix économique. La répartition entre courants alternatifs (dominants) et courants continus (aux marges des usages) est un cas de dépendance au sentier qui structure fortement le développement et la gestion des réseaux électriques jusqu'à aujourd'hui. Incidemment, le mix économique revient sur le devant de la scène au début du XXI^e^ siècle, à travers l'introduction d'énergies renouvelables dans les réseaux électriques pour des raisons économiques et politiques (6.2.4). La recomposition du mix énergétique repose la question de la sensibilité du système aux fluctuations temporelles les plus courtes, de quelques secondes à une demi-heure. Ceci nécessite un ajustement de la réserve d'électricité dite « primaire ». Dans le cas de la France, la reconfiguration de la réserve primaire (de l'ordre de 600 MW) est analysée par l'*Étude sur le potentiel du stockage d'énergies* (Ademe, Artelys et al. 2013) due à un consortium réunissant industriels de l'énergie et administrations publiques (2.3.3). Le rapport estime que les technologies par volants d'inertie et par batteries lithium-ion sont les solutions les moins chères pour assurer la maîtrise de l'équilibrage face à l'augmentation relative des énergies renouvelables. Il ne considère pas cet ajustement des infrastructures de réseau comme un problème techni-économique majeur.

7.3.3 Temps de l'imprévu : défaillances, pannes, accidents, risques, crises

La question de l'imprévu a de nombreuses ramifications en régime technicien. Les défaillances de matériel et les pannes des dispositifs forment l'une de ses ramifications, essentielle mais peu étudiée (Lambert et Raveux

2019). L'optimisme technicien se nourrit d'ailleurs de la relative efficacité avec laquelle les techniciens savent régler les dysfonctionnements industriels locaux.

À la fin du XIX^e^ siècle, les gestionnaires de centrales électriques utilisent les batteries-tampon non seulement pour l'équilibrage instantané du réseau mais encore comme dispositifs d'urgence pour la fourniture d'électricité en cas d'arrêt imprévu des génératrices. Malgré l'enchantement électrique, les batteries ne font pas des miracles. Elles provoquent des pannes par leurs défaillances matérielles vis-à-vis des promesses commerciales, les artefacts pouvant fortement fluctuer entre eux (4.1.2). Les batteries d'accumulateurs n'ont pas des réserves d'énergie suffisantes pour prendre la charge en cas de coupure accidentelle des flux électriques. Le cas de la Hartford Electric Light Company (HELCO) le montre bien (4.2.4). Lorsqu'un incendie détruit l'usine hydroélectrique de Rainbow en septembre 1897, ce ne sont pas les batteries d'accumulateurs qui prennent le relais mais les machines à vapeur d'une autre centrale de la compagnie, une vingtaine de minutes après le début de l'incendie (Weaver 1969, p. 74-75). Les batteries de stockage ne sont donc pas les régulateurs infaillibles du réseau de puissance de la modernité électrique (1880-1910).

Sur la période 1920-1940, l'expansion des réseaux électriques et la densification des interconnexions régionales ont redéployé la gestion de la panne selon plusieurs échelles (5.1). Progressivement au cours du siècle, le problème des pannes et des accidents se pose moins au niveau local de l'artefact défectueux ou de l'incendie d'une centrale qu'au niveau du couplage des échelles d'espace municipales, régionales, nationales et continentales. La technostructure appréhende les pannes de manière différenciée par le déclenchement de réserves primaires, secondaires ou tertiaires, caractérisées par le temps de réponse des dispositifs d'urgence et par le stock d'énergie disponible en réserve (Ademe, Consultants et al. 2017, p. 19). Elle s'efforce aussi de maîtriser, à côté de l'aléatoire des pannes, accidents et tempêtes, le calendrier de maintenance des centrales électriques et autres dispositifs. Le problème de la maintenance se pose d'ailleurs de manière cruciale à mesure que les centrales à combustible (fossiles et nucléaires) et les barrages hydroélectriques vieillissent. Il y a un autre domaine où la gestion des pannes et accidents est déterminante : l'essor ou l'arrêt de filières technologiques. Philippe Bruyerre montre un lien intéressant entre accidents techniques et « panne sociale » dans le cas des « démonstrateurs » d'aérogénérateurs d'Électricité de France dans les années 1950. La Direction des études et recherches d'EDF transforme l'accumulation d'incidents techniques sur les prototypes en une « *mise en panne* des aérogénérateurs » à partir de 1963 (Bruyerre 2019, p. 157). Elle condamne ainsi durablement la filière éolienne en France. L'argumentation technique basée sur la concentration de pannes cache en réalité un choix politique d'EDF.

Comme pour le temps du phénomène, le temps de la panne est remodelé par l'introduction des énergies renouvelables dans le mix énergétique. Le caractère extensif des forces naturelles rend la panne d'un nœud du réseau moins problématique si l'on compare en termes de puissance l'arrêt inopiné d'une grande éolienne (10 MW) par rapport à une centrale nucléaire (800 MW). Mais, leur caractère intermittent implique des durées d'absence de manière périodique : la nuit ou par temps couvert pour le photovoltaïque, par temps calme pour l'éolien. Une reconfiguration profonde du mix énergétique fait craindre que des divergences fortes du système électrique en termes de fréquence ou de puissance pourraient induire « une panne généralisée en cascade » (*a cascading blackout*) à une échelle continentale (Institute of Electrical and Electronics Engineers 2015, p. 53-54). L'effondrement du réseau (*black-out*) nécessiterait d'importants stocks d'énergie pour son redémarrage (*black-start*) (Chen et al. 2009, p. 293).

La « société du risque » (Beck 1998) déploie deux dispositifs organisationnels pour juguler l'anxiété collective vis-à-vis des crises sociotechniques : l'hypertrophie économique d'une part (7.3.4), un arsenal d'outils de

prévision et de gestion d'autre part (7.3.5). Mais, elle est aussi coextensive de la société de l'information et de la communication. Les médias, qui ont un rôle décisif dans le troisième cercle de la décision, contribuent à raviver les peurs en cultivant les faits divers. De manière plus générale, la technologie discursive contribue à réguler les angoisses sociales de la modernité. Les sociétés contemporaines « demande[nt] à la machine, qui envahit de plus en plus [leur] vie, de fabriquer de nouveaux mythes ». La technologie matérielle est relayée par la technologie discursive. L'épisode de la « question du charbon » ravivée par Williams Jevons en 1865 est significatif de ce point de vue (3.1.2). Il met en scène trois types de discours rassurant l'opinion publique. Premièrement, les technocrates de l'empire britannique contribuent à réduire les craintes populaires en grossissant les stocks de charbon disponibles par addition des ressources « probables » de houille aux réserves connues.

Deuxièmement, les techniciens et inventeurs européens promettent l'extraction de travail et d'électricité par conversion et accumulation des forces de la nature à partir des années 1860. Ils peignent un « arc-en-ciel des houilles » aux reflets séduisants, qui fascine le public amateur et les administrateurs publics, sur la période 1860-1940. Chaleurs, courants, marées, radiations, vents deviennent autant de promesses de croissance économique et de modernité électrique (3.2, 5.1.1). Un siècle plus tard, ces promesses cornucopiennes n'ont pas été réalisées par les énergies renouvelables mais par les combustibles fossiles et nucléaires qui représentent plus de 85 % du système énergétique mondial. Néanmoins, la technostructure rejoue la même hiérarchie de valeur avec l'arc-en-ciel de l'hydrogène : puissance, synchronisation, optimisation (6.4.2). Elle pare même l'hydrogène d'une quatrième couleur cardinale : le vert associé à un hypothétique « système hydrogène bas-carbone » (RTE 2021, p. 40-41). En effet, 95 % du marché mondial de l'hydrogène est « gris anthracite », issu de l'extraction de combustibles fossiles (6.4.2).

Le troisième type de remède discursif contre l'anxiété énergétique des sociétés industrielles est la science-fiction. Il est peut être lénifiant dans le cas d'utopie. « L'eau est le charbon de l'avenir » écrit Jules Verne (1875) dans *L'île mystérieuse*. Mais, à l'inverse, la science-fiction pratique aussi la dystopie inquiétante. Dans *Black-Out. Demain, il sera trop tard*, Marc Elsberg (2012) met en scène une panne électrique généralisée (*black-out*) à l'échelle de la sous-région européenne. Il imagine une attaque terroriste ciblée sur les capteurs électroniques de régulation de puissance. En augmentant de manière artificielle la demande de puissance électrique, la manœuvre électronique conduit à l'effondrement du réseau trans-européen de l'électricité, ce qui induit un chaos politique et un drame humain. La circulation d'un tel roman, traduit en une quinzaine de langues et reproduit à plus d'un million d'exemplaires, a contribué à diffuser la peur d'un *black-out* généralisé qui hante désormais l'imaginaire du temps présent.

Ainsi, le discours technoscientifique contribue à réguler l'anxiété collective vis-à-vis d'une rupture d'approvisionnement électrique ou d'une pénurie de combustibles fossiles à l'époque contemporaine. Ses ressorts sont ambigus. D'une part, le discours « progressiste » enchante la matérialité par la puissance des technosciences à réguler des flux et des stocks de matière, d'énergie et d'argent. D'autre part, lors de crises matérielles ou idéelles d'approvisionnement, ses raisons perdent leur nature sacrée. Ses formules ne sont pas sensibles à l'angoisse collective qui s'exprime alors. Les sociétés contemporaines font l'expérience des limites du naturalisme sur les marges de la métaphysique.

7.3.4 Temps de la croissance : étendre le réseau, optimiser la consommation

Le troisième usage de la régulation électrique est d'ordre économique. Le stockage d'énergie permet d'augmenter le « facteur de charge » d'une centrale électrique, c'est-à-dire le rapport entre sa puissance moyenne de fonctionnement sur une période donnée et sa puissance nominale. Plus la puissance effective est proche de la

puissance nominale, plus la centrale est rentable. Cet idéal de régulation joue à toutes les échelles d'intégration socio-économique des systèmes électriques : locale, municipale, régionale, nationale, continentale. Voyons comment il s'incarne et change de formes selon les situations, les lieux et les moments.

La figure 7.4 met en correspondance les typologies énergétiques du début et de la fin de la période d'étude. J'en donnerai trois commentaires. Premièrement, la figure montre une permanence sur le temps long depuis l'industrialisation de l'Europe des combustibles « naturels » (charbon, gaz) et « synthétiques » (pétrole, uranium) dans l'économie industrielle (W. Thomson 1852b). Ces classes d'énergie représentent 90 % des consommations énergétiques dans le monde aujourd'hui (6.4.1), 87 % pour la France (figure 7.3). Les proportions sont similaires aux consommations de charbon dans l'Angleterre victorienne du XIX^e^ siècle (Mathis 2021, p. 16). Deuxièmement, la figure suggère un contraste entre discours et pratiques. Les énergies alternatives représentent aujourd'hui environ 10 % du total de la consommation énergétique : 5 % de matériaux biologiques (biomasse, déchets), 5 % d'énergies renouvelables (hydroélectrique, éolien, solaire, géothermie). De telles proportions rappellent la nécessité de distinguer les discours politiques de « verdissement » de la « transition énergétique » dans les prochaines décennies et l'enracinement de la civilisation « carbonifère » dans un long héritage d'industrie chimique et de matériaux fossiles. Troisièmement, l'approche quantitative ne suffit pas. En effet, le stockage d'énergie est quasiment invisible sur la figure 7.4. Il transparaît dans la « batteries électriques » (associée à 0 % en 2018 pour la France). Il s'apparente à un « nain énergétique » absent de la plupart des bilans économiques et politiques mais crucial par sa fonction régulatrice (1.6.4).

<table>
<tr><th>THOMSON, 1852
EFFET MÉCANIQUE</th><th>HOSPITALIER, 1880
ACCUMULATEURS</th><th>BELL, 1897
INDUSTRIE US</th><th>FIGURE 2.7
SYNTHÈSE</th><th>FIGURE 7.1
FRANCE 2018</th></tr>
<tr><td>nourriture</td><td colspan="2"></td><td>biologique</td><td>8 %
(biomasse, déchets)</td></tr>
<tr><td rowspan="3">mouvements de fluides</td><td rowspan="2">air comprimé</td><td>hydraulique</td><td rowspan="3">mécanique</td><td rowspan="3">4 %
(hydroélectrique, éolien, marémoteur)</td></tr>
<tr><td>marée</td></tr>
<tr><td>ressorts</td><td>vents</td></tr>
<tr><td rowspan="2">solide en hauteur</td><td>poids</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">mécanique</td><td rowspan="2">0 %</td></tr>
<tr><td>accumulateurs hydrauliques</td></tr>
<tr><td>combustibles artificiels</td><td colspan="2"></td><td>chimique</td><td>67 %
(pétrole, nucléaire)</td></tr>
<tr><td>combustibles naturels</td><td rowspan="2"></td><td>combustibles</td><td>chimique</td><td>20 %
(charbon, gaz)</td></tr>
<tr><td>chaleur</td><td>solaire
géothermie</td><td>thermique</td><td>1 %
(solaire, géothermie)</td></tr>
<tr><td></td><td>batteries électriques</td><td></td><td>chimique</td><td>0 %
(essor des batteries en cours)</td></tr>
</table>

FIGURE 7.4 – Correspondances entre classifications de l'énergie sur la période 1850-2050

Suite aux travaux de Gaston Planté et Camille Faure, l'entrepreneur anglais Joseph Swan (1882, p. 5052) caractérise la batterie par son flux (courant électrique) et sa capacité de stockage (rétention). C'est la seconde caractéristique – le stockage d'énergie ou rétention – qui est radicalement nouvelle alors que le flux électrique est connu depuis le XVIII^e^ siècle à travers les bouteilles de Leyde (3.2.2). Pour le milieu technicien, l'objectif économique est de maximiser le pouvoir de rétention des batteries en utilisant des métaux courants et bon marché. Une douzaine d'années après Swan, un professeur de Columbia, Francis B. Crocker (1895, p. 602),

résume l'usage commercial des batteries d'accumulateurs devant l'American Institute of Electrical Engineering en ces termes. « La fonction des accumulateurs est de recevoir de l'énergie électrique à un moment ou à un endroit et de le distribuer à un autre moment ou un autre endroit. » Le premier débouché concerne l'extraction et la concentration des forces du vent et du soleil et leur conversion en électricité. Des installations locales sont ainsi testées à partir des années 1880 (4.2.1). Les batteries s'avèrent finalement trop chères et trop incertaines pour l'exploitation d'énergies renouvelables durant la période 1880-1910. La logistique locale et discrète de l'électricité perd, en effet, la compétition économique et financière avec une technologie étendue et continue : les réseaux électriques. C'est le second débouché commercial des batteries.

Vers 1900, les batteries jouent sur les ressorts économiques de la gestion d'un réseau électrique de quatre manières différentes (4.2.3). Premièrement, en lissant les variations de charge, les batteries-tampon augmentent le rendement de conversion des dynamos et le temps de vie de la machinerie. Deuxièmement, elles pourvoient, dans le cas des stations de puissance, aux pics de puissance nécessaires au démarrage des tramways (Childs 1895). Ceci permet d'économiser l'achat et l'opération d'une dynamo supplémentaire. Troisièmement, les batteries constituent des réserves d'énergie assurant le déplacement d'énergie dans le temps en fonction de l'alternance des jours et des nuits. Ce ne sont plus, comme dans les deux cas, des flux instantanés ou rapides mais des cycles de charge-décharge de cellules électrochimiques durant plusieurs heures. Les batteries d'accumulateurs se déchargent durant les heures de pointe le matin et en soirée, où la courbe de charge atteint des maximums de puissance. Elles se rechargent ensuite durant les heures creuses de la nuit. Les cycles énergétiques des batteries adaptent ainsi le système de production d'électricité aux rythmes sociaux de consommation. L'optimisation du déplacement d'énergie dans le temps permet de sous-dimensionner les installations de production par rapport aux pics de demande, ce qui réduit d'autant les équipements, les locaux et les salaires. Quatrièmement, les batteries permettent de redistribuer la puissance produite par une station centrale à travers des stations annexes aux extrémités du réseau. Cette redistribution spatiale d'énergie permet de réduire les sections et les longueurs de fils de cuivre. Comme pour l'optimisation temporelle, cette optimisation spatiale impose la gestion de cycles longs de charge-décharge de grandes quantités de cellules électrochimiques durant les heures creuses.

Les voisinages électriques adaptent les comportements sociaux aux rythmes naturels du jour et de la nuit. En retour, ils quadrillent la société en mettant un « fil à la patte » des contemporains (Gide 1904a, p. 317). La fonction régulatrice du stockage d'énergie gagne en importance dans les sociétés industrielles au cours du xx^{e} siècle. Durant la période 1920-1940, en France, les infrastructures régionales sont densifiées et les jonctions interrégionales se multiplient (5.1). Ce mouvement, à la croisée d'interventions étatiques et de compétitions économiques, forme un « super-réseau » à l'échelle du territoire (figure 5.1). Une conséquence importante en termes d'optimisation est le couplage de régions hydrauliques (montagnes du Sud) avec des régions carbonifères (plaines du Nord). Les centrales thermiques au charbon offrent ainsi une base moyenne de production électrique alors que les barrages hydroélectriques permettent une modulation de la puissance par une gestion des stocks hydrauliques (5.1.1). L'interconnexion des réseaux régionaux rencontre le désir technocratique d'une gestion optimisée et centralisée. L'intégration du réseau national ravive l'idée de complémentarité énergétique entre le Nord charbonnier et le Sud hydraulique (Lacoste 1986, p. 112-115). Mais les rythmes naturels, les comportements sociaux et les aléas climatiques imposent de forts décalages entre la production et la consommation d'électricité au sein du parc électrique. La région parisienne connaît des variations de l'ordre de un à dix entre les maximas et les minimas de consommation à la fin des années 1930 pour un même dimensionnement des infrastructures de production (figure 5.2). Les réseaux électriques seront nationalisés après la Deuxième Guerre mondiale sous la direction centralisée d'Électricité de France (EDF).

Si les flux hydrauliques (instantané, périodique, régularisé) des barrages hydroélectriques sont intégrés aux schèmes calculatoires (variables, paramètres) et opératoires du réseau national, la technostructure d'EDF ne considère pas comme cruciale la constitution de réserves hydrauliques supplémentaires. Elle envisage le pompage hydraulique durant les heures creuses comme outil d'écrêtage des pointes de consommation (Gérard 1972, p. 488) mais ne le met pas en œuvre à grande échelle jusqu'aux années 1970. Le programme nucléaire Messmer (1794-1976) change la donne en conduisant EDF au déploiement massif de stations de transfert d'énergie par pompage (5.2.4). Environ quatre gigawatts (4 GW) de puissance de pompage sont installés en France sur la période 1974-1986 de manière isomorphe aux installations nucléaires (figure 5.5). La techno-politique du stockage d'énergie hydraulique s'inscrit dans une évolution plus large.

La crise pétrolière de 1973 induit une tentative de réappropriation par les États riches, très dépendants des énergies fossiles du Moyen Orient, d'une certaine souveraineté énergétique. L'économie de l'hydrogène est ainsi présentée par Derek Gregory (1973) comme une solution aux problèmes de dépendance géopolitique des États-Unis d'une part et de pollution atmosphérique des énergies fossiles d'autre part (6.1.4). Cette politique industrielle de l'énergie qui englobe les différentes filières énergétiques conduit Samuel Klausner (1979, p. 6) à forger la notion de « système social de l'énergie ». Le système social de l'énergie résulte d'une homogénéisation des infrastructures et des superstructures de l'énergie aux échelles nationales et internationales. Il est caractérisé par la mise en commun de deux symboles : un étalon de comparaison des sources d'énergie en termes de puissance (kW), d'énergie (Mtep) et de coût ($) ; une représentation du marché de l'énergie par des flux physiques (Klausner 1979, p. 20). Le déploiement des stations de transfert d'énergie par pompage en France et le projet d'économie de l'hydrogène aux États-Unis permettent d'enrichir la représentation de l'énergie de Klausner en couplant l'approche par les flux par une opération sur les stocks telle que le pompage hydraulique et la conversion en hydrogène. Ceci matérialise la cosmologie des flux et des stocks d'énergie qui structure le régime technicien sur la période 1850-2050 (7.2).

7.3.5 Temps de la prévision entre production et consommation d'énergie

La technostructure d'EDF met en place deux leviers complémentaires pour réguler production et consommation. Le premier levier consiste à décaler dans le temps certaines consommations à l'aide d'une politique tarifaire à partir des années 1960. Le second levier joue sur le décalage dans le temps de la production d'électricité grâce à l'installation de stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) à partir des années 1970. Chacun de ces deux leviers techno-politiques a des effets comparables en quantité, de l'ordre de 5 % de la consommation électrique nationale.

Premièrement, EDF cherche à limiter la durée et l'intensité des pointes de consommation en introduisant une offre tarifaire différenciée à partir des années 1960. Cette « gestion de la charge par le signal tarifaire », pour reprendre le jargon technocratique actuel, s'adresse aux consommateurs individuels et industriels (Ademe, Consultants et al. 2017, p. 14). En 1965, un tarif « bleu » incite les clients individuels à décaler, aux heures creuses de la nuit, le chauffage électrique de l'eau afin d'écrêter la courbe de charge nationale. Le dispositif est élargi à partir de 1982 à travers la tarification « effacements jour de pointe » (EJP) sur l'ensemble de l'année. « Ces options tarifaires, compensant un prix élevé du kWh lors des pointes hivernales par un prix réduit le reste de l'année, [ont] pour objectif l'incitation à l'effacement de consommation lors des pointes hivernales. » (Ademe, Consultants et al. 2017, p. 14) Le mot-écran d'« effacement » est intéressant dans le contexte productiviste des Trente Glorieuses parce qu'il suggère une suppression de consommation là où il n'y a qu'un déplacement dans le temps, c'est-à-dire une gestion des stocks d'énergie. La politique tarifaire d'EDF

a aussi des conséquences sur les rythmes sociaux des consommateurs qui changent leurs comportements de consommation de manière quotidienne et hebdomadaire. Elle représente jusqu'à 6 GW d'effacement dans le cas EJP, à son maximum de contractualisation en 1997. Ceci représente alors 6 % de la puissance installée au niveau national.

À partir de la crise pétrolière et du programme nucléaire, EDF développe un second levier d'action techno-politique en installant un nombre important de stations de transfert d'énergie par pompage au cours des années 1970 (7.3.4). En 1982, alors que 1,8 GW de transfert d'énergie par pompage a été installé en France, que l'hydroélectricité compte pour 20 GW et l'électronucléaire pour 14 GW, la technostructure d'EDF fait un premier bilan d'opération (5.2.4). Elle analyse les trois fonctions des STEP dans le parc électrique (Courier 1982, p. 408). La première fonction est d'offrir une souplesse et une rapidité d'équilibrage du réseau. Alors que les centrales nucléaires sont « difficiles à moduler et longues à démarrer », les « groupes mixtes pompe-turbine » ont un fonctionnement cyclique permettant une réversibilité et une rapidité d'opération, en quelques minutes à peine en cas de déséquilibre du réseau (Cassaz 1992, p. 287). Ils sont perçus comme un meilleur moyen pour « maintenir la qualité du réseau électrique » au niveau national qu'un autre mode cyclique de stockage, le volant d'inertie (Courier 1982, p. 418). Celui-ci est considéré comme trop localisé dans l'espace et trop vite amorti dans le temps pour l'équilibrage du réseau national, mais il peut convenir pour « atténuer les appels de puissance » au niveau d'un site industriel. La deuxième fonction utilise les STEP pour écrêter les pics de consommation, ce qui est classique depuis l'équipement du Lac noir et de l'usine de Kembs sur le Rhin en 1938. Elle concerne l'« économie de défaillance » parce que le pompage permet de réduire les « risques de défaillance » dans une zone électrique tout en économisant l'équipement des centrales thermiques qui auraient été nécessaires sans lui. Le schème technicien envisage le risque de défaillance du réseau au cours du temps en termes d'espérances mathématiques dans le modèle optimisé des flux et stocks d'énergie dont Pierre Massé et Maurice Allais sont les champions après la Seconde Guerre mondiale (5.1.2). La troisième fonction est aussi la plus importante pour EDF : gérer le transfert d'énergie par pompage hydraulique pour économiser les combustibles nucléaires et fossiles. La logique s'est inversée par rapport aux années 1950 lorsque Électricité de France misait sur le thermique plus que sur l'hydroélectrique dans le contexte de croissance exponentielle des Trente Glorieuses (5.2.3). Le surcoût des importations d'hydrocarbures depuis les crises pétrolières des années 1970 et le choix électronucléaire de la France expliquent ce glissement stratégique d'EDF des années 1950 aux années 1980.

Économiser les combustibles est d'autant plus important au début des années 1980 que la consommation mensuelle d'électricité en France varie de 70 % environ entre les maxima d'hiver et le minimum du mois d'août, estival et vacancier (Courier 1982, p. 404). Pourtant, lors du contre-choc pétrolier de 1986, le prix du baril étant revenu à son niveau des années 1960, EDF freine sa politique d'installation de transfert d'énergie par pompage. La puissance installée, de l'ordre de 4 GW en 1986 (17 % de l'hydroélectricité et 5 % du total électrique), augmente faiblement pour atteindre 4,3 GW en 2013 (17 %) (Ademe, Artelys et al. 2013, p. 12).

EDF développe ainsi une stratégie complémentaire à travers les deux leviers techno-politiques. La politique tarifaire transforme les rythmes quotidiens (appareils fonctionnant la nuit) et incite aux réductions de consommation lors des jours de pointe en hiver. Le transfert d'énergie par pompage est dirigé vers la gestion annuelle des flux et des stocks électriques. Elle place l'accent sur la prévision saisonnière, qui est plus simple et plus fiable qu'à un pas de temps plus court, journalier ou hebdomadaire, très sensible aux aléas climatiques. EDF construit sa stratégie sur la mise en réserve saisonnière de puissance pour contourner « le risque de défaillance en hiver » (Courier 1982, p. 411). Elle utilise, dans une moindre mesure, les transferts hebdomadaires comme source

d'appoint en hiver et demi-saison pour compenser des aléas climatiques durant quelques jours. La variabilité journalière, qui était considérée comme cruciale en termes d'optimisation économique sur l'ensemble du territoire national à la fin des années 1930 (figure 5.2), est considérée comme résolue presque partout au début des années 1980 (Courier 1982, p. 406). La seule utilisation des transferts journaliers d'énergie par pompage s'applique aux « régions excentrées sur le réseau de grand transport et dépourvues de moyens propres de modulation ».

7.3.6 Confins de l'énergie et marges du temps : le cas des îles électriques

La référence aux régions *excentrées* est intéressante pour une réflexion technologique sur les espaces énergétiques du temps présent. À la fin du XX^e^ siècle, l'éloignement géographique vis-à-vis d'une *centrale* est perçu par les technocrates du réseau comme une exception électrique. La réticulation dense et étendue des centres de production électrique forme un continent énergétique au sein duquel les îles électriques représentent des aberrations vis-à-vis de la logistique de distribution et de consommation. La situation était diamétralement opposée à la fin du XIX^e^ siècle : la centrale était l'exception, les voisinages électriques tout juste en construction, faisant de l'isolement la règle de l'espace énergétique. L'inversion des rapports entre centres et îles énergétiques en un siècle peut être mesurée en revenant à l'imaginaire énergétique du grand aménageur technico-économique de l'empire britannique que fut William Thomson pour le XIX^e^ siècle. Si Thomson (1881) adhère à la ligne électrique à haute tension reliant les chutes du Niagara à Chicago après avoir entendu l'inventeur-entrepreneur de l'électricité, Charles William Siemens, il imagine que ce flux gigantesque de puissance sera ensuite distribué, de manière discontinue, dans des boîtes concentrées d'énergie déposées, comme des seaux de charbon, devant les maisons de la société victorienne (3.2.2, 4.2.2). Cette logistique industrielle discontinue, basée sur des morceaux de houille, rend le charbon comparable à la plupart des produits commercialisés par le capitalisme occidental au XIX^e^ siècle.

Avec l'essor et la normalisation des réseaux de puissance, l'imaginaire de l'énergie est recomposé au XX^e^ siècle. La technocratie s'efforce d'incorporer les espaces isolés au quadrillage électrique. Mais, ces confins électriques sont récalcitrants au continuum électrique. Ils prennent la forme d'îles, phares et balises dans les zones maritimes, de refuges, observatoires et antennes dans les zones montagneuses. L'espace confiné et isolé des espaces insulaires pose des problèmes de bord vis-à-vis des continents énergétiques et leurs logistiques réticulées. En France, le Service des phares et balises mène une politique d'installation d'aérogénérateurs de 1 à 2 MW pour alimenter des phares sur des îles des années 1940 aux années 1960 (Marrec 2018a, p. 449-452) alors que EDF met la filière éolienne en panne au niveau du réseau national (Bruyerre 2019).

Le déploiement de l'hydrogène repose, dans les années 2020, la question de la spécificité énergétique des marges isolées. Ainsi, le projet HyLES, qui « vise à déployer des solutions technologiques hydrogène dans les îles françaises », nécessite des études préliminaires et des dimensionnements adaptés aux contextes sociotechniques de la Corse, la Réunion et la Nouvelle-Calédonie (Hissel 2022, p. 8). Si Günther Anders (1960, p. 56) insiste sur l'inaptitude d'un appareil à fonctionner sous la forme d'« un simple instrument Robinson », il y a bien pourtant un *effet Robinson de l'énergie*. Celui-ci dit simplement que les espaces isolés et éloignés nécessitent une certaine morphologie énergétique et un dimensionnement d'infrastructures adapté. Le plus emblématique des « effets Robinson » de l'énergie est le premier monde hydrogène, construit par la NASA pour survivre à l'espace interplanétaire durant la mission Apollo vers la Lune (6.1.3). La pile à hydrogène a rendu l'habitacle de la fusée Apollo opérationnel et habitable dans un environnement hostile. Cette machine « hypertélique » dans la terminologie de Gilbert Simondon (1958, §2) incarne une adaptation extrême à l'environnement

extraterrestre.

Mais, le mode d'existence singulier de l'énergie vis-à-vis des espaces isolés, confinés ou éloignés des infrastructures techniques habituelles est assez commun en régime technicien. Anaël Marrec a analysé cet imaginaire opérationnel d'espaces confinés de production d'énergie à travers la récurrence de projets d'« îles industrielles dans l'histoire des énergies renouvelables ». Elle rapproche ainsi le projet d'« usine flottante Claude-Boucherot » (1926-1934), censée convertir l'énergie thermique des mers en puissance électrique et en glace près des rivages intertropicaux, de projets actuels d'installation de plateformes éoliennes *off-shore* pour la production d'hydrogène au large des pays de la Loire (Marrec 2018b, p. 177). Elle montre comment, dans les deux cas, l'île industrielle renvoie à un imaginaire de l'autonomie tout en structurant des échelles concentriques d'usages aux niveaux locaux, régionaux et nationaux. Que ce soit dans le cadre de l'entreprise coloniale française d'entre-deux-guerres ou dans le contexte de « transition énergétique » de la période 2020-2050, un même extractivisme capitaliste légitime la construction de barges industrielles pour la production d'énergie et leur consommation de voisinage (Marrec 2018b, p. 194-196).

L'économie de l'hydrogène montre un autre aspect des îles électriques à travers la valorisation du nucléaire. Alors que les politiques nucléaires ont installé des centrales sur des rivières techniques, le long des fleuves ou sur les côtes maritimes, les promoteurs de l'économie de l'hydrogène des années 1970 imaginent des centrales électriques éloignées des sites de consommation soit sur le continent, soit sur des « plateformes flottant dans l'océan » au-delà de l'horizon maritime depuis les côtes habités (Gregory 1973, p. 15). Ces projets d'îles industrielles rappellent les parcs éoliens *off-shore* en cours d'installation dans le cadre des politiques de « verdissement » de l'énergie. Un différence de morphologie et de taille distingue l'économie de l'hydrogène des années 2020 des utopies des années 1970 (6.1.4, 6.3.4). En ce qui concerne la forme énergétique, Derek Gregory (1973) mentionne des plateformes flottantes de type solaire (photovoltaïque) rendues invisibles par l'éloignement des centres urbains alors que les îles industrielles prennent aujourd'hui la forme de champs d'éoliennes, dont certaines, comme à Saint-Nazaire, sont visibles depuis la côte. En ce qui concerne la taille, Gregory préconisait des centrales nucléaires « géantes » de 10 GW de puissance, soit dix fois le dimensionnement des centrales en opération depuis les années 1970, alors que le nouveau projet industriel envisagé à l'horizon 2030 concerne de « petites » centrales nucléaires modulaires (SMR), d'une puissance de 150 à 500 MW (6.4.2). On nage ici en plein imaginaire de l'autonomie associée aux îles, associé au genre utopique créé par Thomas More il y a cinq siècles. Le déplacement des îles industrielles renvoie quant à lui à la mondialisation énergétique du XX^e^ siècle. Ces centrales nucléaires seraient placées sur des barges flottantes, déplacées à la demande, le long des rivages maritimes ou fluviaux.

Comment interpréter le passage entre 1970 et 2020 de projets nucléaires dix fois plus grands que l'existant à des projets deux à cinq fois plus petits ? Une hypothèse est qu'après la série d'accidents graves – Three Mile Island, Tchernobyl, Fukushima – le slogan *small is beautiful* (Ernst F. Schumacher) est une expression-écran pour faire accepter un redéploiement nucléaire en « démocratie technique ». Une autre possibilité est que la croissance énergétique des pays riches durant les Trente Glorieuses n'a pas maintenu son rythme débridé de croissance. Gregory estimait qu'il faudrait environ 50 ans pour remplacer tout le gaz naturel consommé aux États-Unis par de l'hydrogène synthétisé par électrolyse. Ceci nécessiterait de quadrupler la production d'électricité, d'environ 360 GW en 1972 à plus de 1 300 GW en 2022 (Gregory 1973, p. 18). Cette « tâche impressionnante » impliquerait la construction d'un millier de centrales nucléaires de 1 GW de puissance moyenne. Ceci donne un « avant-goût de la révolution énergétique qui devra prendre place durant le prochain demi-siècle » aux États-Unis. En 50 ans, les consommations d'électricité ont « seulement » augmenté de 40 %

environ aux États-Unis, de 360 à 500 GW. Aussi, les centrales nucléaires géantes n'ont pas été construites. Mais, dans le même temps, les consommations de gaz ont aussi augmenté de 40 %, de 22,5 à $31{,}1.10^{15}$ Btu. Malgré les promesses de l'économie de l'hydrogène, il n'y a pas eu de transition énergétique par la construction d'une économie de l'hydrogène. Au contraire, les transnationales des énergies fossiles ont renforcé leur position dominante dans le système énergétique mondial. L'actuel président de la République française promet la dissémination de telles centrales nucléaires flottantes dans les prochaines décennies pour assurer ce qu'il considère comme une « transition écologique » (Foucart 2021). La prophétie d'Emmanuel Macron connaîtra-t-elle le même destin que celle de Derek Gregory, porte-parole de l'industrie gazière états-unienne des années 1970 ?

7.3.7 Les mondes hydrogène : synchroniser les temps, connecter les espaces

Dans les îles électriques ou les navettes spatiales, une même contrainte d'espace-temps impose une optimisation différente de la gestion des stocks d'énergie afin d'assurer une fourniture convenable des flux de puissance. Cette expérience des marges est aux antipodes de la situation, devenue classique en régime technicien, de régulation des réseaux de production et de distribution d'énergie. L'« économie de l'hydrogène » incarne ce rêve démiurgique de synchronisation des temps et d'interconnexion des espaces (6.3.4).

L'hydrogène est un vecteur d'énergie qui présente un sérieux avantage phénoménologique par rapport à son rival dominant, l'électricité : sa conservation sans déperdition d'énergie et de matière durant le stockage en réservoirs mécaniques et le transport en gazoduc ou en hydrogénier. Le système hydrogène pourrait ainsi permettre un cycle saisonnier découplant les moments de production (photovoltaïque en été, éolien par épisodes) et de consommation (chauffage en hiver, climatisation en été). Son stockage présente simultanément les avantages des stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) et la souplesse des batteries secondaires sans l'inconvénient d'auto-décharge hebdomadaire. Il constitue un levier pour synchroniser les rythmes de production et de consommation et pour convertir des flux hétérogènes d'énergie. Le nom même d'« économie de l'hydrogène » fait donc à la fois écran et contresens. C'est un mot-écran qui suggère l'autonomie des mondes hydrogène alors que l'hydrogène, vecteur énergétique, n'existe que dans sa relations aux sources d'énergie. C'est un mot-valise qui justifie la conservation d'intérêts économiques qui lui préexistent et lui sont extérieurs : régulation du parc électrique intégrant des forces intermittentes (6.2.3) ; réindustrialisation locale (6.3.3) ; transports automobile, ferroviaire, maritime et aérien ; filières d'énergie fossile (95 % de l'hydrogène produit est gris) ; etc.

L'économie de l'hydrogène est le contraire d'un monde autonome. Ce « macro-système technique secondaire » articule cinq systèmes sociotechniques « primaires », qui lui préexistent de manière largement indépendante. Ces multiples couplages sont schématisés sur la figure 6.5 : transport, électrique, chaleur, fossile (charbon, gaz, pétrole) et numérique. Ils sont aux prises avec les hétérogénéités des « rivages techniques » qui résistent à la fluidité sociotechnique. Les rivages techniques, qui forment simultanément des zones d'échanges de flux et des zones d'entreposage de stocks (Clecio Mocellin et Teissier 2020a, p. 6), se traduisent aussi, dans le domaine de l'énergie, par des déperditions supplémentaires d'énergie dues à la conversion des énergies entre elles et à l'échange de signaux électroniques entre réseaux numériques d'information.

Néanmoins, en accentuant la tendance au couplage entre systèmes industriels, caractéristique des sociétés contemporaines, l'économie de l'hydrogène 2.0 peut être qualifié de « système de systèmes ». La mise en synergie de systèmes préexistants crée de la complexité sociale et historique. Elle explique la complexité du monde hydrogène, qui est « divers, interconnecté, interdépendant et adaptatif » (Institute of Electrical and Electronics

Engineers 2015, p. 43). Comme « tout ce qui fait rouage », le couplage par l'hydrogène de systèmes hétérogènes « ouvre des perspectives d'optimisation et de flexibilité » (Auvity 2022, p. 8). Un tel système de systèmes est pensé pour réguler l'énigme contemporaine de la distribution de l'énergie dans le temps et l'espace (7.3.1). Il incarne un projet démesuré par son caractère systématique : connecter des territoires différenciés, de l'échelle d'une île énergétique (7.3.6) aux réseaux trans-européens de l'énergie en passant par l'économie régionale, et synchroniser les temps opérationnels de l'énergie : temps du phénomène jusqu'à un pas quasi-instantané d'équilibrage (7.3.2), temps de l'imprévu incorporant les défaillances d'artefacts et les pannes de réseaux ainsi que les risques climatiques ou terroristes (7.3.3), temps de la prévision entre production et consommation d'énergie et politiques de réduction de l'écart (7.3.5). Par cet enchevêtrement de temps, le régime technicien exprime d'une manière radicale son objectif d'optimisation spatio-temporelle de la distribution de l'énergie : l'absence de repos du système énergétique. Ceci rappelle deux projets des années 1930 : la production et le stockage d'hydrogène durant les heures creuses de la consommation électrique, par Rudolf A. Erren en Angleterre (6.1.4) ; la combustion de lignite de mauvaise qualité durant la nuit afin de réaliser un transfert d'énergie par pompage hydraulique en Rhénanie (5.1.1). Mais, le cas de l'économie de l'hydrogène semble viser une systématisation de l'optimisation énergétique et une disparition complète du repos économique.

La connexion systématique des différents réseaux industriels impose de multiples conversions d'énergie dont la pile à combustible et l'électrolyseur seront les principaux opérateurs (7.2.4). Elle implique aussi une interopérabilité à trois niveaux : technique, entre artefacts et infrastructures ; sémantique, entre signaux d'information et marchés commerciaux ; juridique, entre procédures économiques et régulations politiques. La multiplicité des interopérabilités, des connections et des conversions entre systèmes renvoie à la notion de « réseau intelligent » ou *smart-grid* (6.2.4). Les échanges de matière, d'énergie et d'information sont censés être facilités par le déploiement du numérique à travers la collecte de données et leur traitement calculatoire par la modélisation. Collecte et calcul des données électriques sont désormais permises après l'installation récente par Enedis de 35 millions de boîtiers de contrôle Linky. L'objectif affiché est un pilotage en « temps réel » de l'offre et de la demande. La mise en place d'un « réseau intelligent » ne doit pas être comprise comme « une règle de conduite décidée par une personne ou une collectivité autonome et réflexive, mais bien plutôt comme la régulation des conduites par des dispositifs hétéronomes » (Dubey et Jouvancourt 2018, p. 112).

Les comportements collectifs et individuels des individus sont ainsi administrés par des dispositifs socio-techniques dont les objectifs et les usages n'ont pas été clairement discutés ni décidés par les populations sur lesquelles ils s'appliquent désormais de manière quotidienne. Il me semble qu'il s'agit là d'une tendance du régime technicien qui contredit en partie l'analyse du désenchantement du monde de Max Weber. Alors que le sociologue allemand reliait la modernité à la transparence de la science moderne, permettant de « prouver qu'il n'existe en principe aucune puissance mystérieuse et imprévisible qui interfère dans le cours de la vie » (Weber 1919, p. 13), la densification technoscientifique tend, au contraire, à opacifier les sociétés du temps présent. La multiplication des « boîtes noires » et leurs mises en relations à travers des dispositifs « intelligents » construisent, me semble-t-il, une opacité du technocosme par rapport à l'intelligibilité humaine. Cela pose un problème éthique d'administration hétéronome des populations sans leur consentement. C'est un enjeu politique majeur des mondes hydrogène en construction.

7.3.8 Des scénarios du futur aux brèches du temps présent

La politique française de construction d'un super-réseau national de l'électricité à partir des années 1920 dans le cadre du capitalisme organisé du premier XX^e^ siècle (2.2.3) peut être rapprochée de la politique

européenne de gestion des « réseaux trans-européens » de l'énergie depuis les années 1990 dans le cadre de la mondialisation néo-libérale (6.2.2). Le mouvement actuel d'intégration des énergies renouvelables aux réseaux trans-européens de l'électricité s'explique par deux attitudes contradictoires : une prise de conscience par les opinions publiques internationales de l'origine anthropique du changement climatique ; un refus des cercles de la décision nationaux et internationaux de mettre en œuvre une rupture radicale avec le productivisme du capitalisme industriel à l'origine du problème. Aussi, la politique énergétique et industrielle de l'Europe se construit depuis une quinzaine d'années autour d'un mot-écran, popularisé en France, sous le mandat présidentiel de Nicolas Sarkozy (2007-2012), de « décarbonation » de l'économie. C'est un mouvement politique et économique plus général. Depuis le « plan climat » de 2005, les gouvernements successifs annoncent, avec plus ou moins de conviction ou d'opportunisme, l'objectif de « diminuer de 3 % par an en moyenne les émissions de gaz à effet de serre de la France » (Assemblée nationale 2005, art. 2). Plus généralement, la valorisation économique de l'écologie est devenue un levier politique central depuis les années 2000. En 2015, Ségolène Royal, alors ministre de l'Écologie, du développement durable et de l'énergie (2014-2017), fait voter la loi « relative à la transition énergétique pour la croissance verte ». Celle-ci réaffirme l'objectif de « réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40 % entre 1990 et 2030 et de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050 ». Elle initie une Stratégie nationale bas-carbone prévoyant la baisse de 40 % de la consommation d'énergie finale en France sur la période 2020-2050, de 1 600 TWh à 1 000 TWh (RTE 2021, p. 11, 56). Dans le même temps, la production d'électricité devrait augmenter de 50 %, de 400 à 600 TWh.

Un tel engagement sera-t-il tenu ? Je ne risquerais pas une prophétie mais une remarque basée sur deux siècles de capitalisme industriel. Depuis les débuts de l'industrialisation, aucun pays n'a opéré de réduction de sa consommation énergétique en-dehors des moments de crises économiques ou d'affrontements militaires. D'ailleurs, à l'échelle mondiale, la seule année à avoir un bilan énergétique mondial proche des objectifs de « décarbonation » du protocole de Kyoto est l'année 2020 durant laquelle la pandémie de Covid-19 avait même arrêté le trafic aérien à l'échelle planétaire. En effet, la croissance matérielle et économique est sacrée en régime technicien en relation avec son imaginaire de l'équation énergie-civilisation. Jamais encore, autant d'énergie fossile ne sera brûlée en une année dans le monde qu'en 2023. Au niveau national, l'écran est plus subtil. L'illusion d'une décroissance nationale de certaines consommations d'énergie est entretenu par des arrangements comptables aux frontières politiques. Ainsi, les dépenses d'énergie effectuées à l'étranger pour rendre l'énergie disponible en France sont effacées : plus d'un baril de pétrole brûlé pour chaque baril importé dans une raffinerie française (7.2.3). Ainsi, le « verdissement » national repose sur une chaîne d'approvisionnement internationale initiant des problèmes sociaux et environnementaux ailleurs : c'est le cas du lithium aujourd'hui (7.4.3). C'est le projet de l'hydrogène « vert » demain : l'approvisionnement du Japon viendrait d'Australie, celui de l'Europe d'Afrique. Cela n'empêchera pas les réappropriations locales comme le montre le cas du Territoire de Belfort (6.3.3). Au contraire, les exemples de relocalisation de la puissance, dont certains cherchent la sobriété, font écran aux pratiques généralisées en régime technicien : la croissance économique et matérielle à toutes les échelles d'espace.

L'une des raisons historiques fondamentales est que les forces de la nature heurtent trois schèmes énergétiques constitutifs du régime technicien au XX^e^ siècle (chapitre 5). Elles posent trois problèmes d'exploitation à l'échelle industrielle que les techniciens et les technocrates essaient de résoudre depuis 150 ans. Premièrement, les énergies renouvelables suivent les rythmes naturels d'alternance jour-nuit dans le cas du soleil et de la demi-période de rotation de la Terre dans le cas des marées océaniques. L'intermittence de ces flux thermiques et mécaniques défie la régulation journalière des réseaux électriques (5.1). Deuxièmement, les

énergies renouvelables sont aussi capricieuses que les aléas météorologiques du vent pour les masses d'air et d'eau (vagues) et des nuages pour les rayons du soleil. L'incertitude de ces flux mécaniques et thermiques joue avec les prédictions des modélisations du futur météorologique et climatique et trahit, par ses singularités quotidiennes, l'espérance mathématique des prévisions saisonnières. Elle déforme les cycles d'optimisation, déborde les cadres de dimensionnement et décale les calendriers de planification (5.2). Troisièmement, les énergies renouvelables sont fidèles à leur phénoménologie environnante et extensive. Au mitan du monde, leurs écoulements désordonnés sont récalcitrants à l'emmagasinement de puissance et à la concentration industrielle (5.3). Intermittentes, aléatoires, extensives, ces trois qualités des forces de la nature renouvellent l'énigme contemporaine de la distribution de l'énergie dans l'espace et dans le temps (7.3.1. Elles instituent les énergies renouvelables en défis pour le régime technicien : stabiliser les réseaux étendus (7.3.2, 7.3.3), optimiser l'offre et la demande (7.3.4, 7.3.5), convertir les forces (7.2.4), concentrer les puissances (7.2.5).

En Europe de l'Ouest et en Amérique du Nord, la technostructure perçoit le stockage d'énergie comme un outil stratégique d'intégration des énergies renouvelables aux réseaux de puissance trans-continentaux. Censé fournir « 90 % du potentiel [... de] l'équilibre entre offre et demande », le marché du stockage de l'énergie est estimé à 500 milliards de dollars pour les seuls États-Unis dans les décennies à venir (Villareal 2014, p. 236-237). La technostructure européenne envisage sérieusement le déploiement d'infrastructures de transport d'énergie entre l'Afrique et l'Europe pour répondre à la croissance prévue d'électricité et équilibrer le réseau trans-européen de puissance. Les projets Desertec, Transgreen, Plan solaire méditerranéen annoncent le transfert électrique sur des milliers de kilomètres de la puissance solaire convertie en Afrique du Nord et dans le Sahara vers les zones de consommation intensive en Europe à travers une mer et un désert (Bal et Philibert 2013, p. 13). À l'inverse, les technologues Gérard Dubey et Pierre de Jouvancourt expriment la nécessité politique de mettre à distance l'approche régulée du temps et de s'engouffrer dans les brèches du temps présent pour repenser la société contemporaine et reconstruire du social en-dehors de la logique de production capitaliste.

> L'intermittence de l'énergie [renouvelable] se présente en effet comme un obstacle de taille au temps contrôlé et linéaire de l'activité productive : accepter l'intermittence, c'est accepter les temps morts, les respirations, les pauses et les aléas pour ce qu'ils sont : une arythmie qui tolère et rend possible des échappées, des fugues, des lignes de fuite. C'est une brèche ou une déchirure dans le cours rendu normal des choses, une brèche offerte par une altérité qu'il s'agit de gommer (Dubey et Jouvancourt 2018, p. 112-113).

Le régime technicien veut, au contraire, imposer une temporalité lisse, sans prise ni surprise. Même l'avenir est canalisé par la fabrication de scénarios qui modèlent les sociétés futures d'une manière bureaucratique. La production de scénarios par les modélisations s'intensifie à partir des années 1980. Le couple modèle-scénario devient un passage obligé des politiques de la science et de la technique au XXIe siècle. Le cas des mondes hydrogène le montre par son ambition technocratique de synchronisation des temporalités sociales par l'action conjuguée de la prévision technoscientifique, de l'opération économique et de la régulation sociale (7.3.7). Le stockage de l'énergie au XXe siècle montre la mise en forme, la mise en discours et la mise en politique des dispositifs de modélisation. La scénarisation du futur est l'expression par excellence du regard technocratique. À l'heure actuelle, la construction de « feuilles de route hydrogène » donne forme aux sociétés futures par voie technocratique sans donner voix démocratique à l'agora. Or, l'expérience politique d'un régime démocratique devrait impliquer la mise en partage des contradictions et des dissensions avant la mise en œuvre de choix collectifs. D'autre part, le modèle de la réalité n'est pas la réalité elle-même.

Un scénario est une représentation fictionnelle et un outil opératoire. Il bricole une *fourchette* d'incertitude d'autant plus large que l'horizon prévisionnel s'éloigne dans le futur. Lorsqu'un scénario est pris pour la réalité, il devient un mythe. La fabrication de mythes par la technique contemporaine compense en partie l'angoisse générée par l'expansion matérielle et organisationnelle de la technique dans les sociétés industrielles. La fonction rassurante et aliénante de la technologie constitue un paradoxe de la modernité occidentale selon Jean Brun (1981, p. 15). « Histoire et Science sont devenues les deux puissants facteurs mythogènes de notre époque alors qu'elles prétendent ouvertement nous affranchir de toute forme de pensée mythique ». L'imaginaire technicien fait office de sacré dans les sociétés industrielles. Il régule, au régime technicien, l'angoisse existentielle de l'être humain. La fonction mythogène de la technologie est du ressort psychanalytique selon Roger Bastide (1975, p. 87) : nous, contemporains du régime technicien, « demand[ons] à la machine, qui envahit de plus en plus notre vie, de fabriquer de nouveaux mythes ». La technologie discursive lénifie les corps contemporains irrités par la technologie matérielle. La mythologie technique rend ainsi acceptables la sursaturation technique des sociétés contemporaines et le surrégime des rythmes sociaux du temps présent.

Le projet technocratique enserre le futur dans des modèles d'optimisation économique et des scénarios rassurants de trajectoires calculées. Il encercle les sociétés contemporaines dans des schèmes techniciens dont on peut se demander s'ils n'assèchent pas, en retour, des imaginaires alternatifs et des voies de rupture vis-à-vis du capitalisme industriel. En effet, le projet technocratique programme, rend désirables et concrétise les tendances profondes des sociétés contemporaines depuis deux siècles. En particulier, l'extractivisme énergétique et le productivisme capitaliste opèrent une « transition énergétique » du tout-renouvelable au tout-fossile en deux siècles d'industrialisation. À partir de la fin du XVIII^e^ siècle, un régime énergétique équilibré entre des flux de puissance (vents, rivières) et des stocks d'énergie (bois, animaux) bascule vers une prédominance des stocks d'énergies « fossiles », au sens étymologique de corps « extraits de la terre ». La « civilisation thermo-industrielle » (Alain Gras) adopte ainsi un régime technicien, où l'extraction, la distribution et la consommation des ressources fossiles sont régulées par un quadrillage social et une réticulation de l'espace et du temps. Un mécanisme d'extension-verrouillage (McGuire et al. 1993) concrétise le régime technicien comme une structure régulée de l'énergie. Il explique, en partie, les difficultés sociotechniques des sociétés industrielles pour exploiter les forces de la nature depuis les années 1860. Les tentatives récurrentes des entreprises capitalistes et des projets étatiques se heurtent aux problèmes de stockage d'énergie indispensables désormais pour s'intégrer au système énergétique fossile. Ce problème de stockage d'énergie ne se pose pour les programmes nucléaires, eux aussi marqués par des logistiques de stocks.

Lorsqu'à la fin du XX^e^ siècle, une politique internationale remet les flux de puissance au goût du jour pour des raisons diplomatiques, économiques et écologiques, les logiques idéelles et matérielles de régulation spatio-temporelle de l'énergie transforment le stockage d'énergie en problème économique central de la techno-politique du temps présent. Ceci ne présume pas pour autant de son utilité sociale et morale. Alors que la « démocratie technique » est en crise de légitimité sociale et de transformation écologique, il est peut-être temps d'ouvrir une brèche au dissensus, de prêter l'oreille aux voix contradictoires et de prendre au sérieux les alternatives collectives qui fracturent le projet technicien, industriel et capitaliste.

7.4 Fractures de la nature et de la culture

L'« homme a une histoire parce qu'il transforme la nature ». Telle est l'hypothèse de départ de Maurice Godelier (1984, p. 10) pour analyser les rapports entre idéel et matériel dans la structuration des sociétés humaines. Elle s'appuie sur un présupposé naturaliste d'un grand partage entre nature et culture. Il est vrai que

le régime technicien isole la nature et s'efforce de la transformer en appareil régulé et asservi pour l'extraction et la mise en réserve de forces (7.4.1). Mais, il organise aussi un troc intense entre nature et culture qui recompose, en chaque instant et chaque lieu, une économie morale de la nature (7.4.2).

7.4.1 Écologie politique : harmonies naturelles, angoisses existentielles

Sur la période 1880-1910, la modernité électrique reconfigure les rythmes sociaux en transgressant certains rythmes naturels comme l'alternance du jour et de la nuit et certaines données physiologiques comme la relation du vivant au voisinage proche. Le technocosme qui en résulte transforme les cadres spatio-temporels de l'organisation sociale et du travail contemporain ainsi que les rapports sensibles au monde. Ces transformations matérielles et idéelles peuvent être perçues au début du XX^e^ siècle dans les échanges contradictoires entre Charles Gide, A. Audebrand, Bernard Brunhes et Émile Cardot sur les usages de la houille blanche et de la houille noire (4.3). Plus qu'une économie industrielle comme pour la gestion du réseau électrique de Hartford (4.2.4), la controverse révèle une économie de la nature dans un sens proche de l'écologie politique de la deuxième moitié du XX^e^ siècle.

Cette écologie politique discute les hiérarchies de valeur. La valeur est d'abord pour le capitalisme un prix qu'un libéral comme Audebrand ne cesse de convoquer. Mais, la valeur prend d'autres formes selon les participants de la controverse : organisation coopérative de la société pour Gide ; organicisme entre nature et société à travers la « dette sociale » pour J. Reynard et l'« utilité générale » pour Brunhes. L'organicisme utilisé pour appréhender les sociétés humaines est un mélange de cosmologie naturaliste et de morale. Il s'apparente à l'épistémologie d'Herbert Spencer, de Lester Ward, des anthropologues évolutionnistes et fonctionnalistes pour fonder les sciences humaines et sociales à partir de la deuxième moitié du XIX^e^ siècle (3.1.3). Mais l'organicisme est également un argument politique. Il fournit une représentation qui rend solidaires les générations humaines, présentes et futures, et les milieux naturels. La coïncidence temporelle est troublante. En ville, le voisinage électrique peuple le quotidien d'artefacts inédits qui recompose le social ; à la campagne, l'aménagement agro-pastoral et industriel des montagnes et forêts est présenté comme un tissage harmonieux de la nature et de la culture. Les actions publiques et privées d'éducation populaire et d'artificialisation des territoires figurent une « modernité de la montagne » autour de quatre images entrelacées : l'effacement des montagnards du tableau général ; la bienfaisance de la forêt ; l'expansion du tourisme (et son aspect invasif) ; la puissance de la houille blanche (4.3.4). Les trois premières images rapprochent la montagne française de la notion de *wilderness* qui se développe aux États-Unis durant la deuxième moitié du XIX^e^ siècle. Les « motifs paysagers constitutifs du wilderness renvoient à l'extase sublime romantique » mêlant « grandeur et frayeur » tout en effaçant la présence indigène de cette « nature sauvage » entre forêts et montagnes (Joliet 2020, p. 824). Le mouvement écologique qui en résulte favorise la création de parcs « naturels » à partir du parc fédéral du Yellowstone en 1872. Cette sacralisation des espaces naturels se fait au détriment des indiens natifs, qui sont exclus du tableau idéalisé de la nature, et en faveur de la bourgeoisie urbaine pour son usage touristique et ponctuel des parcs des Montagnes rocheuses (Merchant 2003).

L'aménagement des montagnes et l'éducation populaire à la nature expriment l'asservissement de la montagne et de la forêt à un désir technicien de régulation. Pour Émile Cardot, la nature est semblable à un système muni de boucles de rétroaction, dont la stabilité peut être mise en péril par les dégradations des sociétés humaines. Elle doit donc être organisée et artificialisée autour de ce principe de régulation. Charles Gide exprime également l'idée d'un cycle de la nature dans lequel les sociétés humaines pourrait puiser sans l'épuiser. La houille blanche, égale des « dieux », « se donne sans se dépenser jamais [...] le ciel va se charger

de la redonner en évaporant l'eau pour la faire retomber sous forme de neige sur les montagnes, et le cycle peut recommencer indéfiniment ». Les protagonistes de la controverse sur l'usage de la houille blanche, malgré leurs différences idéologiques, envisagent tous la stabilisation des régimes hydrauliques par l'aménagement des forêts et des prairies et le creusement de réservoirs d'eau. Il y a donc un consensus autour de la régulation de la nature par l'activité humaine dans un voisinage qui s'étend progressivement des vallées aux montagnes puis à l'ensemble du cosmos. La nature est artificialisée et cultivée par un aménagement régulateur. Les notions de système naturel (A. Audebrand, É. Cardot), de solidarité nature-culture (C. Gide, B. Brunhes), d'harmonies cosmiques de l'énergie (L. Ward, G. Bataille), débouchent sur la construction d'un paysage mécanique de la houille blanche au début du XX^e^ siècle. Cette métaphore technicienne superpose les chaînes sociotechniques. La chaîne de montagne, administrée par des chaînes de commandement (M. Heidegger), abrite, en contrepartie, une chaîne de solidarités entre générations, entre espaces le long du fleuve. Lointain écho à la chaîne de montage (F. Taylor), les chaînes de valeur se déploient dans les vallées alpestres couplant les activités qu'elles soient agricoles, industrielles, touristiques, et les chaînes de conversion d'énergie assorties aux couleurs de la houille. Nervures centrales, les chaînes de régulation de flux et de stock de puissance dessinent un quadrillage électrique aux embranchements sans fin, dont le « fil à la patte » de Charles Gide trace des infrastructures sans limite, bien au-delà des cadres habituels de l'humaine condition.

Ce monde régulé, technicisé et électrisé, en expansion est celui dans lequel grandit, vit et travaille Simone Weil (1909-1943). Son « Journal d'usine » décrit l'abrutissement de l'ouvrière qu'elle a choisi d'être durant de longs mois à la Compagnie générale d'électricité (alors Alsthom) au milieu des années 1930. Il exprime l'expérience des cadences de manufacture de pièces électriques ou mécaniques, les fatigues et les douleurs de gestes répétitifs, la violence des rapports de hiérarchie et de genre, l'épuisement quotidien et hebdomadaire, l'aliénation permanente de *La Condition ouvrière*. Le régime technicien marque de son empreinte l'existence entière de la philosophe-ouvrière, en-dehors de l'usine, à travers le social, à l'intérieur de la sphère privée, jusqu'aux ramifications les plus intimes de la psyché individuelle. Ses *Réflexions sur les causes de la liberté et de l'oppression sociale* disent l'angoisse existentielle de l'individu contemporain face à l'appareil technicien. « Nous vivons dans un monde où rien n'est à la mesure de l'homme ; il y a une disproportion monstrueuse entre le corps de l'homme, l'esprit de l'homme et les choses qui constituent actuellement les éléments de la vie humaine » (Weil 1934, p. 158). Le technocosme quadrille l'espace social en étendant le voisinage électrique sur l'ensemble de la planète et colonise l'espace psychique en façonnant les manières de penser l'ensemble du cosmos.

L'emprise technicienne sur les comportements sociaux et les représentations de la nature est renforcée au cours du siècle par l'appréhension du monde sensible et psychique à travers l'énergétisme (7.2.3). Ce qui frappe est la similitude des modes de raisonnement économique et écologique. Les écologues de la fin du XX^e^ siècle utilisent les mêmes modèles de régulation par flux et stocks que les technocrates des années 1930 pour gérer et optimiser les parcs électriques (5.1). La biosphère est appréhendée comme un technocosme. La rhétorique de François Ost (1993, p. 29) est porteuse du schème technicien. Ce sont, en effet, des « mécanismes régulateurs qui conditionnent la survie même de la planète ». L'analogie suivante est encore plus explicite : « alors que la nature maximise des stocks (la biomasse) à partir d'un flux (le rayonnement solaire), l'économie maximise des flux marchands en épuisant des stocks naturels, sans que la diminution de ceux-ci, non comptabilisée, n'exerce d'action correctrice sur les flux ». Un même schème explicatif basé sur la régulation d'appareils (techniques ou vivants) rend compte de processus d'évolution opposés : « alors que les écosystèmes présentent une tendance naturelle à se diversifier, garantissant ainsi leur stabilité, la gestion humaine, qui favorise les

variétés économiquement performantes, introduit l'uniformisation et l'instabilité ».

Le cas de l'énergétisme est intéressant pour enrichir l'analyse de la mondialisation contemporaine. Dans *Les conséquences de la modernité*, Anthony Giddens (1990, p. 30-33) analyse deux mécanismes collectifs et impersonnels de délocalisation des rapports sociaux à l'échelle de la planète durant l'époque contemporaine : les « gages symboliques » tels que l'argent ; les « systèmes experts » qui rendent certaines « actions coutumières » et certains comportements désirables. Il me semble que l'énergétisme d'une manière générale et les schèmes techniciens d'une manière spécifique relèvent d'un troisième mécanisme plus inconscient que le gage symbolique, qui a un mode d'existence diplomatique, et plus idéel que le système expert, qui a un mode d'existence standardisé. De plus, l'énergétisme comme le schème énergétique comportent des facteurs d'intelligibilité, d'opérativité et d'affectivité. Ils rendent compte d'une « acculturation technicienne » des sociétés contemporaines, troisième mécanisme collectif et impersonnel de délocalisation des rapports sociaux.

Une réappropriation de l'énergétisme en économie et en écologie n'empêche pas des divergences idéologiques dont témoignent les promoteurs de la croissance économique d'un côté et les défenseurs de la primauté écologique de l'autre. Les rapports de force entre ces courants de pensée sont asymétriques. L'équation énergie-civilisation a justifié l'asservissement des cultures humaines où la disponibilité d'énergie par personne est moindre (5.3.1). À l'inverse, l'émancipation vis-à-vis de l'appareil sociotechnique est rarement considérée comme une marque de civilisation. Henry Thoreau (1854, p. 87-88) suggérait « les nations devraient chercher à se commémorer » non pas « leur architecture, mais [...] leur pouvoir de pensée abstraite ». Ainsi, affranchies de « la démente ambition de perpétuer leur mémoire par l'amas de pierre travaillée qu'elles laissent », les groupes humains pourraient réfléchir aux façons d'« adoucir et polir leurs mœurs ». Quatre-vingt ans après Thoreau, Simone Weil (Weil 1934, p. 98) formulait un parallèle entre l'asservissement des êtres humains et des existants naturels. En quoi consiste le lien qui semble jusqu'ici unir l'oppression sociale et le progrès dans les rapports de l'homme avec la nature ? Ce « problème fondamental » suggérait un « mystérieux équilibre » entre nature et culture matérielle. Il « semble que l'homme ne puisse parvenir à alléger le joug des nécessités naturelles sans alourdir d'autant celui de l'oppression sociale ». Leslie White serait resté interdit devant une telle réflexion mais Marshall Sahlins et Pierre Clastres auraient applaudi sans arrière-pensée.

Alors qu'une telle suggestion de bifurcation reste lettre morte, l'aménagement des territoires à des fins extractives et de stockage constitue une permanence du régime technicien sur la période 1850-2050 (5.3.2. Même les espaces souterrains, ces cavernes autrefois peuplées d'esprits de la nature, sont artificialisés pour mettre en réserve l'énergie ou cacher les déchets indésirables (5.3.3). Plus profondément encore, le schème énergétique ordonne les mondes cosmique et psychique. Comme le montre Gaston Bachelard, l'image du feu alimente une pensée de la puissance et du désir dans la tradition alchimique. Sa version contemporaine, l'énergétisme, a fait de l'homme industrialisé un alchimiste en puissance, en acte et en sensibilité.

7.4.2 Économie morale de la nature : synergies ou hétérogénéités du cosmos

La sociologie de Lester Ward met bien en scène la porosité entre nature et culture au sein du régime technicien (5.3.4). D'un côté, elle exporte un artefact emblématique de son époque – la batterie d'accumulateur – au cosmos pour rendre compte du principe de liberté. À l'inverse, elle importe une fonction naturelle – la synergie entre organes – à la culture pour expliquer les comportements coopératifs des groupes humains. Ces deux transferts vers les sciences de l'homme et de la société sont représentatifs de l'hégémonie culturelle des sciences de l'ingénieur et de la nature.

Mais, le troc entre nature et culture est une pratique généralisée de la modernité technicienne. La mora-

lisation de l'énergie s'exprime par la construction de la thermodynamique au milieu du XIXe siècle. la mise en équivalence conceptuelle du travail et de la chaleur par le principe de conservation de l'énergie (3.1.3) sanctionne une échelle de valeur conforme au productivisme de la civilisation du charbon. William Thomson juge supérieure l'« énergie disponible » pour la production de travail mécanique par rapport à l'« énergie diffuse » sous forme de chaleur, partie en fumée pour l'économie capitaliste (3.3.1). Le mode d'existence productif du travail est ainsi mis en valeur par rapport au mode d'existence diffusif de la chaleur. Par la suite, la modernité électrique fait espérer, à un chroniqueur de *The Spectator*, que l'électricité, cette « force qui n'a pas les limites qui rendent la lourde vapeur si inutile », puisse asservir les « forces aveugles de la Terre » pour combattre « la somme puissante de la misère humaine » (The Spectator 1881, p. 1162). Le geste technicien canalise le « gaspillage » de la nature à travers le stockage d'énergie (5.3.2). Batteries électriques et réservoirs d'air comprimé sociabilisent les forces intermittentes et capricieuses de la nature dans le cadre régulé de la production.

Une hiérarchie similaire est formulée au début du XXe siècle entre hydroélectricité et combustion de charbon (4.3.5). Le physicien écologiste Bernard Bruhnes interprète le principe d'évolution de l'entropie en faveur de la houille blanche contre la houille noire (Brunhes 1905a, p. 4). Il insiste sur le fait que la conversion mécanique-électrique de la houille blanche extrait l'énergie de l'univers sans la dégrader alors que la combustion d'énergies fossiles dégrade une partie de l'énergie cosmique. Charles Gide défend la même échelle de valeur que Brunhes par un détour vers la cosmologie animiste. La houille blanche, écrit-il, est « vivante [... et] semblable à nous » alors que la houille noire est « une chose morte, plus que morte, fossile » (Gide 1904a, p. 318). Celle-là est un flux vital, celle-ci un cadavre stocké. Le rapport aux flux et aux stocks d'énergie est ici central. Les réserves de force hydraulique sont reformées de manière continu par les cycles naturels alors que celles du charbon sont dépensées de manière irréversible. La métaphore vitaliste est redoublée par une analogie avec la magie. La houille noire, sorte de « magie noire », commerce avec les « esprits souterrains [... et les] revenants [...] des âges préhumains » (Gide 1904a, p. 318). À l'inverse, « la magie blanche » du torrent de montagne appelle « les esprits familiers » et porte « cette paix qui descend des neiges éternelles ». Comme Thomson et Brunhes, Gide socialise la nature en moralisant l'énergie. Tous trois hybrident les références et les pratiques technoscientifiques, morales et métaphysiques. Ces considérations économiques rejoignent également une économie morale de l'hydroélectricité. La dimension locale et nationale de la houille blanche participe aussi à la construction d'une économie morale de l'énergie (Courier 1982, p. 418), même si les choix productivistes l'emportent sur les choix autonomistes dans la techno-politique de l'énergie en France depuis 1945 (Puiseux 1982).

Le mélange des genres technoscientifiques avec la morale et la métaphysique parcourt tout le XXe siècle jusqu'aux experts de l'énergie d'aujourd'hui (1.6.4). Techniciens et technocrates du temps présent recourent au concept d'« exergie », défini comme la quantité d'énergie mobilisable. Ils intègrent au bilan comptable énergétique le travail comme Thomson mais aussi la chaleur, contrairement à Brunhes et Gide, à condition qu'elle soit canalisée pour chauffer des bâtiments. Ce qui est intéressant avec l'exergie, c'est la manière dont le schème technicien incorpore un geste ancestral à la geste moderne. Ainsi, les animaux de trait (chevaux, bovins) et de traite (bovins, ovins) servaient aussi à chauffer les habitations paysannes, accolées aux bergeries, écuries ou étables, bien avant l'époque moderne. La notion d'exergie et la pratique de cogénération réintroduisent des pratiques quasiment disparues avec le monde paysan sous une forme nouvelle et modernisée. Elles empruntent la démarche d'optimisation du régime technicien (1.6.1, 5.1.2). L'exergie est même introduite à propos de la chaleur dans le droit français de l'énergie (Lormeteau 2014, p. 205). La cogénération est l'un des objectifs de développement de la loi « relative à la transition énergétique pour la croissance verte » (Assemblée nationale

2015, art. 176). Elle s'inscrit dans la stratégie d'activation des « synergies » entre réseaux d'électricité, de chaleur et de gaz dans une logique d'optimisation. Les textes juridiques et politiques mentionnant l'exergie associent l'extraction énergétique au double sens d'une économie : comme échange marchand d'un côté, comme réduction de consommation de l'autre. Ce double sens traduit l'une des ambiguïtés, et peut-être l'une des hésitations possibles, du temps présent. En effet, la notion d'exergie contient le pilier séculaire du capitalisme industriel – la croissance économique – mais évoque également un horizon incertain, celui d'une écologie politique qui pourrait considérer la décroissance énergétique comme un objectif politique essentiel. Depuis deux siècles, la première option a prévalu sans partage. Pour les trois prochaines décennies, les cercles de la décision prétendent organiser une « transition écologique » sans dire le degré d'importance de la deuxième option. Mais, ils encombrent surtout l'arène politique de mots-valise comme « croissance verte » et cherchent à embarquer l'opinion publique dans un voyage métaphorique à force de mots-écran comme « économie de l'hydrogène ».

Une deuxième synergie évoquée par la loi « relative à la transition énergétique pour la croissance verte » est la récupération des « énergies fatales », chaleur emmagasinée dans les machines ou perdue par dégagement à l'extérieur d'une enceinte donnée (fuites thermiques des bâtiments, des moteurs à explosion, etc.). La récupération et la réutilisation de l'énergie fatale lors des essais moteur dans le port de Saint-Nazaire étaient l'un des objectifs du projet ESTUAIRE financé par l'Ademe et la région Pays de la Loire (2019-2022). La manière d'appréhender les liens entre le territoire et les formes d'énergie en synergie s'est alors faite dans le cadre méthodologique des sciences de l'ingénieur (6.4.3). Pourtant il s'agit également d'un problème philosophique et politique. L'étymologie de l'adjectif « fatal » présente une tension sémantique entre la fatalité du destin, indifférente à la fuite « naturelle » de chaleur, et la perte funeste, qui impose un devoir moral de lutte. Entre les deux attitudes, la techno-politique du temps présent tranche en faveur de la lutte morale pour mettre en réserve la chaleur pour l'utiliser ailleurs et plus tard. La fuite énergétique est aussi inacceptable que son repos improductif dans la culture technicienne.

La construction de synergies énergétiques est mise en œuvre de manière systématique dans l'économie de l'hydrogène 2.0 (6.3.4, 7.3.7). Mais, ce désir d'incorporer les « déchets » à l'appareil productif s'inscrit dans une histoire longue de l'industrialisation et de l'urbanisation de l'occident depuis le XVIII^e^ siècle au moins (Barles 2006). Au temps présent, il s'imagine dans le rêve technicien de recycler les déchets radioactifs pour produire de l'énergie et s'incarne dans les filières de biomasse et de méthanisation à partir des déchets agricoles et forestiers. Une telle pratique perturbe la typologie des artefacts de Krzysztof Pomian (2014, p. 33-36). Le sixième type concerne les déchets : ces artefacts, après avoir eu une fonction, n'en ont plus et doivent être détruits. Le recyclage des matériaux et l'optimisation énergétique transforment les déchets en « choses ». C'est le premier type : ces artefacts ont une action sur d'autres artefacts. Ce rebouclage de la typologie est intéressant parce que, selon Pomian (2014, p. 40), chaque type d'artefact ne prolonge pas le précédent mais s'inscrit en « rupture » par « une innovation radicale » de fonction. Néanmoins, dans le cadre des sociétés industrielles, la part de recyclage des déchets est faible, de l'ordre de quelques pour cent, si l'on prend en compte les approches de métabolisme urbain (Barles 2017). La plupart des déchets matériels sont enfouis ou éloignés (7.4.3). La transformation des déchets en matériaux utiles et en travail disponible devient un sujet médiatique dans le contexte de « verdissement » du capitalisme industriel.

Une telle pratique recompose la sociologie des artefacts et des humains dans le temps présent. Elle n'est pas suffisante pour construire une rupture fondamentale vis-à-vis du régime technicien. Au contraire, elle systématise l'optimisation chère aux schèmes techniciens et à la cosmologie naturaliste. Il serait nécessaire, en termes

idéologiques, de s'affranchir d'imaginaires encerclés par l'idéal d'optimisation quantitative dans la perspective d'un renouvellement de luttes sociales et environnementales au XXIe siècle. Car, la psyché contemporaine est profondément aliénée par deux siècles d'industrialisation. En parodiant Karl Marx, l'« esprit qui construit les systèmes philosophiques dans les cerveaux » a désormais bien du mal à s'affranchir du quadrillage ferroviaire qui habite son quotidien de manière si banale. Si aujourd'hui le corps social désirait rejoindre Henry David Thoreau au lac de Walden, son expérience sensible de la vie dans les bois baignerait tout entière dans le milieu technicien. Après deux siècles de banalisation technique, « [ce] n'est pas nous qui roulons en chemin de fer ; c'est lui qui roule en nous ». Nous adhérons par réflexe, comme le déplore Alain Gras (1997, p. 123) à l'« image des "rails de la civilisation" [... qui dessine la] vision d'un temps orienté par l'amélioration morale ».

L'« économie générale » du cosmos de Georges Bataille (5.3.4) s'efforce de tracer une alternative aux comportements productivistes et matérialistes qui dominent les sociétés industrielles du XXe siècle. Bataille imagine un cosmos hétérogène, où la « part maudite » de l'homme est inaccessible aux logiques consuméristes. Sa notion d'hétérologie désigne tout ce qui est irrécupérable et « improductif » dans la société : déchets, ordures, excréments, délires, etc. (Roudinesco et Plon 2011, p. 1302-1303). Dans *La part maudite*, Bataille (1949) oppose, à la consommation capitaliste et matérialiste, une dépense libre et individuelle d'énergie. Cette « consumation » mène, par l'excès, au plaisir et à la création de l'existence. Elle est un remède collectif à l'accumulation des surplus dont l'issue fatale est périodiquement la guerre ou le sacrifice. Bataille incite ses contemporains à s'affranchir du cycle inassouvi de désir-plaisir entretenu par la technique, également dénoncé par Jean Brun (1981) dans *Les masques du désir*. Il dessine une cosmologie générale où l'existence humaine transgresse la sphère capitaliste et productive. À « la suite des mystiques de tous les temps », il recherche « la conscience de soi » sur les marges de l'inconscient collectif (Bataille 1949, p. 179). Il oppose ainsi l'expérience de l'hétérogénéité du cosmos et la dépense par excès au schème technicien d'une nature régulée, stockée et asservie.

7.4.3 Lithium : coûts sociaux et environnementaux des régulations énergétiques

L'idée que des flux soient masqués dans les bilans comptables nous ramène à l'Angleterre victorienne (3.1.2). Dans le contexte d'anxiété lié à de possibles pénuries de charbon, les géologues du Geological Survey de 1861 sous la conduite d'Edward Hull modifièrent la façon d'estimer les réserves de charbon en incorporant les houillères difficiles d'accès, susceptibles de devenir rentables grâce aux futures améliorations technoscientifiques, et les houillères encore inconnues, ce « charbon caché » qui n'attendait que d'être découvert. Ils substituèrent aux « réserves prouvées en place » les « réserves raisonnablement assurées » (Madureira 2012, p. 405-407). Cette modification de comptabilité de la deuxième moitié du XIXe siècle correspond à une distinction sémantique devenue courante aujourd'hui. Pour les géographes et les géologues, les réserves désignent le « volume de minerai exploitable dans les conditions actuelles » tandis que les ressources désignent le « volume de minerai contenu dans le sous-sol et susceptible d'être exploité, si les conditions techniques et économiques se présentent » (Serandour 2020a, p. 18). C'est donc moins le repérage des minerais qui pose souvent problème au XXIe siècle que la faisabilité technico-économique de leur extraction. Dans l'arraisonnement de la nature au sens de Martin Heidegger, l'estimation du fond de ressources est moins critique que sa transformation en réserves disponibles puis en produits ou services commerciaux.

L'économie du lithium est instructive de ce point de vue. Par son rôle stratégique dans la fabrication des plus performantes des batteries commerciales, les batteries lithium-ion, le lithium est un matériau-régulateur

du monde contemporain au niveau énergétique [18]. Le marché mondial du lithium est dominé par les trois principaux pays fabricants de batteries au lithium. La Corée, le Japon et la Chine organisent une chaîne d'approvisionnement du lithium à l'échelle planétaire et gère la chaîne de valeur à leur profit, de l'extraction des minerais à la commercialisation des batteries lithium-ion en passant par la recherche et le développement. En 2019, le prix Nobel de chimie a récompensé trois chercheurs impliqués dans la technoscience des batteries au lithium durant la période 1970-1985, ayant abouti à sa commercialisation au début des années 1990. La nationalité des trois récipiendaires indique un décalage vers l'Asie par rapport à l'hégémonie états-unienne et européenne durant xx^{e} siècle. On trouve ainsi un chercheur japonais de Sony, Akira Yoshino, aux côtés d'un universitaire états-unien, John Goodenough, et d'un chercheur anglais d'Exxon, Stanley Whittingham. L'année du prix Nobel, le commerce mondial des batteries lithium-ion a un chiffre d'affaires de 35 milliards de dollars. Il est en croissance annuelle de 14 % du fait de l'expansion commerciale des appareils électroniques portatifs et des véhicules électriques. L'attribution du prix Nobel est donc fortement liée au succès commercial des batteries au lithium, principalement produites par deux multinationales des télécommunications – Sony au Japon et AT&T aux États-Unis – pour « le plus grand bénéfice de l'humanité » dit sans ambage le site officiel du prix Nobel [19].

Trois décennies de croissance du marché des batteries lithium-ion ont rendu le lithium et le cobalt plus « critiques » en termes d'approvisionnement que les terres rares. Le problème n'est pas tant la ressource géologique abondante que la réserve économique d'extraction et de traitement des minerais en quantité et en qualité suffisantes (Lepesant 2018, p. 43-44). La Bolivie, le Chili et l'Argentine forment ce qu'il est convenu d'appeler le « triangle du lithium » représentant 60 % des ressources mondiales estimées de cet élément (Serandour 2020a, p. 18). Pourtant, ces trois États n'ont pas construit d'infrastructures et d'usines de manière intégrée, qui leur permettraient d'avoir une maîtrise politique et diplomatique de leurs ressources sur le marché mondial (Serandour 2020b, p. 12). Comme le montre Audrey Serandour, les réseaux les plus solides au sein du « triangle du lithium » sont construits « par le bas » à partir de communautés autochtones, d'organisations scientifiques ou d'entreprises transnationales. Ce sont les États à l'autre bout de la chaîne de valeurs qui organisent le marché international du lithium : la Chine produit environ la moitié des batteries au lithium dans le monde, le Japon et la Corée du Sud se partageant l'autre moitié. Ces trois pays importent ainsi l'essentiel des minerais depuis l'Australie et le « triangle du lithium » et se partagent la majorité des bénéfices de la division internationale du travail. Toutes proportions gardées, la Chine joue pour le lithium de l'Amérique du Sud le rôle hégémonique des États-Unis pour le pétrole du Moyen-Orient.

L'Amérique du Nord et l'Europe de l'Ouest profitent de cette division internationale du travail en tant que consommatrices d'appareils électroniques portables et de véhicules électriques. Les politiques d'électro-mobilité ou d'économie de l'hydrogène sont ainsi vantées par les médias dominants en termes environnementaux (6.3.4). Or, ce « verdissement » économique du Nord fait migrer les désordres sociaux et environnementaux vers le Sud. L'histoire de l'Amérique latine est marquée par de nombreux problèmes environnementaux et sociaux induits par l'exploitation minière à grande échelle, comme le défend l'essai emblématique d'Eduardo Galeano (1971) : *Les veines ouvertes de l'Amérique latine : Cinq siècles de pillage d'un continent*. Il aborde le problème politique de la répartition des terres, des travaux, des dommages et des bénéfices entre les groupes autochtones et les entreprises transnationales. Il est intéressant de noter que la Bolivie est « l'un des pays les plus

18. Le lithium est un matériau doublement régulateur des sociétés contemporaines (Teissier 2022c). Outre sa régulation énergétique par les batteries lithium-ion, il est utilisé comme psychotrope pour réguler les systèmes nerveux de patients atteints de troubles neuronaux de type bipolarité. Dans les deux cas, la généralisation de l'usage de ces matériaux à base de lithium pose des problèmes d'ordre éthique dans le cas du psychotrope, d'ordre environnemental et social dans le cas de la batterie.

19. Les chiffres et citations sont extraits du site officiel du prix Nobel : https://www.nobelprize.org/

pauvres » d'Amérique du Sud alors qu'elle possède « l'une des plus longues histoires d'exploitation minière » (Santiago 2013).

Les batteries lithium-ion et les piles à combustible forment des sacs de nœuds dans le contexte de la « transition écologique » annoncée. Ce sont des agrégats économiques et sociaux héritiers d'une longue tradition de civilisation industrielle, productiviste et carbonifère. Que les énergies considérées soient dites « alternatives » – éolien ou solaire – ne changent pas grand-chose à la dimension « conservatrice » des politiques qui les déploient au niveau international (Marrec et Teissier 2020). Le cas du lithium montre que ce matériau reproduit aujourd'hui de classiques rapports de domination entre pays riches et industrialisés et pays pauvres et dominés. Le glissement de l'occident industriel vers l'orient industriel ne change pas grand-chose non plus dans les rapports hégémoniques qui se construisent le long de la chaîne de valeur. La construction en cours de chaînes internationales d'approvisionnement en hydrogène du Maroc ver l'Allemagne et de l'Australie vers le Japon projette des rapports de force similaires pour l'économie de l'hydrogène de demain. Contrairement au dicton qui dit que « l'herbe paraît plus verte chez le voisin », le « verdissement » de l'électricité en Europe passe par un noircissement social et environnemental des voisins du Sud, dont le sous-sol et la main-d'œuvre sont ou seront exploités pour la fabrication de convertisseurs énergétiques (éoliennes, panneaux photovoltaïques, batteries, piles à combustible) et pour la production du vecteur d'énergie (hydrogène). Le déploiement de chaînes commerciales longues, caractéristique du capitalisme commercial de Gênes et Venise au XIV^e^ siècle selon Fernand Braudel, aujourd'hui aux mains de sociétés transnationales régulièrement soutenues par les États riches, me semble difficilement compatible avec une réappropriation locale de l'énergie, qui serait produite et consommée par les sociétés européennes ou états-uniennes, en vue d'une émancipation collective des populations. La « démocratie technique » porte bien mal son nom.

7.4.4 Crises de culture : de l'anxiété occidentale à l'altérité humaine

L'histoire environnementale des sociétés industrielles regorge d'exemples de crises « propices à l'introspection » collective (Mathis 2021, p. 367). Charles-François Mathis conclut son étude de *La Civilisation du charbon en Angleterre* sur la période 1830-1940 par quelques enseignements pour les « sociétés "carbonifères" » du XXI^e^ siècle. En comparant l'année 1873 en Angleterre et l'année 1973 dans le monde, il montre qu'à un siècle de distance la crise énergétique fait réfléchir aux limitations potentielles des ressources fossiles. Dans les deux cas également, une fois que « la situation semble revenir à la normale », la société industrielle productiviste maintient la domination des ressources fossiles dans les domaines économique et idéologique (Mathis 2021, p. 368). La rhétorique de la crise mène rarement à un changement profond des pratiques. C'est un cas où la superstructure culturelle ne modifie pas l'infrastructure économique. Cette permanence depuis les débuts de l'industrialisation de l'Angleterre au XVIII^e^ siècle est une nouvelle raison d'être circonspect vis-à-vis de la rhétorique de la « transition écologique ». L'énergétisme incarne, sous différentes formes depuis le milieu du XIX^e^ siècle, un projet industriel de mise en cohérence du cosmos et une entreprise de modernisation de la société. Il a renforcé la croyance en la possibilité de maîtriser les aléas et les hasards de l'expérience du monde. Le stockage d'énergie et de matériaux est une manière d'avoir une certaine prise sur l'existence quotidienne de même que l'organisation de chaînes d'approvisionnement de plus en plus longues et de plus en plus denses à l'échelle de la planète.

La construction de la filière industrielle de la réfrigération alimentaire est un cas emblématique de cette organisation rationnelle de l'extraction et du stockage de ressources durant la première moitié du XX^e^ siècle (5.2.2). Elle met en place une administration des stocks et des flux dans un cadre d'économie dirigée et de

coopération entre civil et militaire, selon un schème technicien d'arraisonnement de la nature. Dans le cas de l'Europe, la réfrigération alimentaire synchronise les temps biologiques et économiques et interconnecte les espaces de pêche, d'élevage et d'alimentation à l'échelle océanique de l'Atlantique et à l'échelle intercontinentale avec l'Amérique du Sud et l'Australie. Mais, un espace énergétique n'est pas aussi fluide et intégré qu'un système énergétique. Il est composé de jointures sociales comme les « rivages techniques », qui résistent aux circulations des flux de matière, d'énergie et de capitaux et ouvrent des interstices de dialogue et de lutte par rapport aux entreprises transnationales du capitalisme mondialisé (Delaire et Teissier 2020). Les mondes du froid industriel ont néanmoins des effets sur l'espace-temps social. Ils suspendent, de manière artificielle, le temps de conservation dans une usine frigorifique. Loin de contredire la tendance moderne à l'accélération des modes de vie, cette suspension la stimule au contraire en concrétisant l'immédiateté de la consommation, en comprimant les durées de cuisine, en intensifiant les compétitions économiques entre des lieux de production jusqu'à englober tous les océans de la planète, en intensifiant les flux matériels et en allongeant les réseaux commerciaux. Une telle reconfiguration spatio-temporelle présente des similarités fortes avec le projet international des mondes hydrogène en cours de construction (7.3.7).

Les stratégies contemporaines de domestication des incertitudes par l'organisation industrielle des flux et des stocks de matière et d'énergie s'accompagnent d'un discours triomphaliste de puissance et de bonheur. L'enchantement du contemporain par les techniques reste néamoins fragile. Le surgissement récurrent de problèmes de régulation des ressources estimées et des stocks effectifs suffit à réanimer le spectre de l'anxiété moderne. Évoquer la possibilité d'une pénurie d'énergies fossiles, du charbon en 1873, du pétrole en 1973 ou du gaz en 2022, fait ressurgir des discours alarmés sur la menace qui pèse sur la civilisation bourgeoise. L'équation énergie-civilisation hante les catacombes contemporains de l'inconscient collectif. En régime technicien, la plupart des problèmes existentiels ne sont pas résolus mais régulés. C'est le cas de la psyché comme le montre la psychiatrie du XX^{e} siècle. Les « diagnostics font en sorte que l'individualité soit laissée dans l'ombre et que disparaisse la lutte de l'individu pour la liberté, la domination et l'autonomie » (Birkholm 2016, p. 142). C'est le cas du social. L'inégalité sociale est un fait structurel des sociétés contemporaines alors que sa « voix » n'est audible que de manière conjoncturelle, lors de mouvements sociaux notamment (Touraine 1978). C'est le cas de l'environnement. Depuis deux siècles, les pollutions industrielles n'ont pas été supprimées ni réduites mais rendues « plus tolérable[s] » par la législation, l'éducation ou l'éloignement (Fressoz et al. 2014, p. 37). L'aptitude des schèmes techniciens à réguler plutôt qu'à résoudre les problèmes d'ordre psychologique, social ou environnemental suggère, une nouvelle fois, la nécessité de ne pas se reposer sur la technique pour construire les démocraties contemporaines.

La culpabilité individuelle n'offre pas non plus de solutions constructives. C'est l'une des leçons émancipatrices de l'ouvrage *Temps-paysage. Pour une écologie des crises*. Bernadette Bensaude-Vincent (2021) conseille de s'arracher au temps prospectif qui écrase le présent de l'ombre démesuré du temps climatique. Elle propose, à la place, de prendre la mesure de son propre « temps-paysage », personnel et intime, où chaque être humain peut agencer, selon ses affinités et ses réalités, les temps multiples d'une existence hétéroclite et plurielle. Une telle spatialisation du temps est « propice à l'introspection » pour reprendre la formule de Charles-François Mathis (2021, p. 367). Elle ouvre également vers une réappropriation collective de l'espace et du temps. C'est une piste intéressante pour passer d'un discours sur les multiples crises environnementales et planétaires en termes de pollution multiple et à long terme, de destruction de nombreuses espèces à court terme, de transformation profonde de la quasi-totalité des écosystèmes planétaires et de modifications des climats terrestres, à une rupture profonde, politique et collective, du capitalisme et du productivisme.

Rendre raison à d'autres formes collectives d'expérience du monde que l'entreprise occidentale, c'est l'invitation de Philippe Descola dans *Par-delà nature et culture*. Plutôt qu'une attitude condescendante vis-à-vis d'autres formes de pensée et de vie, la cosmologie naturaliste des sciences contemporaines devrait prendre au sérieux ses propres limites. C'est d'ailleurs l'une des forces de la science, selon Georges Bataille. « En elle-même, la science limite la conscience aux objets, elle ne mène pas à la *conscience de soi* (elle ne peut connaître le sujet qu'en le prenant pour un objet, pour une *chose*) » (Bataille 1949, p. 128). Comment alors expliquer qu'en régime technicien le périmètre des technosciences est étendu de l'étude des objets et des artefacts à la sociabilité et à la psyché ? Les sociétés contemporaines auraient intégré la conviction des technocrates que, pour un problème donné, il y a « une meilleure solution et une seule ». La « pensée calculante » (Martin Heidegger) et la recherche de « l'optimum » (Pierre Massé) indiquent désormais « l'une des conditions de la bonne gouvernance : l'efficacité » (Cérézuelle 2011, p. 232).

Alors que la technostructure glisse du pôle technicien vers le pôle managérial, les sociétés occidentales contemporaines deviennent moins industrielles et plus « programmées » (Touraine 1978). Elles incorporent une part croissante d'« ingénierie du social » mise au service de la mondialisation capitaliste néo-libérale. Le bricolage du social par les techniciens est remplacé par une professionnalisation du management. Les milieux professionnels portant la transformation sociale par l'organisation managériale sont multiples : « les sciences de l'éducation, le travail social, le marketing, jusqu'au droit, aux sciences du management, la macroéconomie normative, la stratégie militaire et la diplomatie » (Cérézuelle 2011, p. 232). L'Union européenne est caractéristique de cette évolution managériale : réduction de la place politique du Parlement, expansion gestionnaire d'institutions technocratiques. Mais, le mouvement est beaucoup plus général depuis les années 1990. Le milieu universitaire notamment est aussi recomposé par la fascination managériale depuis le début des années 2000 (7.1.2). Les principes d'autonomie de la recherche et de contrôle académique par les pairs perdent de leur évidence devant des logiques managériales et administratives. Le mouvement international prend des déclinaisons locales [20].

Lorsque la technoscience ne perçoit plus ses limites épistémologiques, elle devient idéologique. L'hégémonie culturelle des techniciens et le pouvoir politique et administratif octroyé aux technocrates en « démocratie technique », depuis le projet saint-simonien jusqu'à la construction des mondes hydrogène, sont caractéristiques de la manière dont un savoir peut se constituer en pouvoir. Le problème de démocratie qui se pose ici n'est pas tant la cosmologie naturaliste en tant que telle que la manière dont elle a été utilisée depuis le XVIII^e^ siècle pour discréditer les autres cosmologies dans la représentation et l'expérience collective du monde. Car, l'épistémologie naturaliste est réductrice en termes culturels. Descola (2005, p. 226) regrette la fascination des anthropologues contemporains pour la cosmologie naturaliste et le manque d'attention et d'empathie qu'ils ont pour les autres « combinaisons permises par le jeu des ressemblances et des différences entre moi et autrui sur les plans de l'intériorité et de la physicalité ». Il identifie trois autres types de cosmologie dans les sociétés humaines existantes : l'animisme, le totémisme et l'analogisme. Chacune de ces cosmologies propose une composition différente du « grand continuum social brassant humains et non-humains ». Une approche inclusive des

20. À Nantes, ce mouvement de bureaucratisation a pris une forme singulière récemment. Un nouvel établissement, Nantes Université, a été créé en janvier 2022. Il dissout l'université de Nantes dans un conglomérat d'établissements dont le Centre hospitalier universitaire (CHU), l'INSERM et l'école centrale de Nantes, contrôlé par comité exécutif de quatre directeurs et un conseil d'administration où les représentants des personnels ne représentent plus que 50 % des membres contre 70 % auparavant. Il y a ainsi une transformation structurelle donnant plus de poids aux instances dont les membres sont nommés pour leur expertise et non élus parmi les personnels et les étudiants. Toutes les organisations syndicales ont critiqué, en vain, la perte de pouvoir des instances élues au profit des « personnalités » nommées sur des critères plus ou moins obscurs. Il est vrai que le nouvel établissement s'est doté dans le même temps d'une « mission démocratie », pilotée par le comité exécutif. Belle démonstration d'un mot-valise qui « passe son contraire en contrebande » (Bihr 2007, p. 2007).

différentes cosmologies permettrait de considérer que « de multiples expériences du monde peuvent cohabiter sans se contredire » (Descola 2005, p. 36-37). Elle substituerait ainsi comme « référent commun aux entités qui habitent le monde [non pas] l'homme en tant qu'espèce [... que] l'humanité en tant que condition ». Que l'humanité devienne une condition universelle plutôt que le privilège d'une espèce aurait des conséquences imprévisibles et heureuses pour construire au XXIe siècle les « trois écologies » de Félix Guattari (1987) en termes psychiques, sociaux et environnementaux. Une telle inclusion humaniste romprait de manière radicale avec trois exclusivités du régime technicien depuis deux siècles : un désir inassouvi de puissance, une organisation capitaliste inégalitaire, un extractivisme industriel de la nature.

Troisième partie

Projet de recherche (2023-2027)

L'estuaire de la Loire comme espace énergétique (1980-présent)

Le travail que j'ai présenté dans cette habilitation à diriger des recherches s'inscrit dans le programme de recherche du Centre François Viète intitulé « Énergies, techniques et sociétés », sous la responsabilité d'Anaël Marrec [21]. Il rencontre, depuis l'année 2020, et se nourrit de la formation d'un collectif pluridisciplinaire d'universitaires nantais intéressé.es par l'étude de l'estuaire de la Loire : Jean-Baptiste Bahers (ingénieur et géographe), Jean-Baptiste Comby (sociologue), Étienne Delaire (ingénieur et historien), Annabelle Duval (géographe), Aurélien Évrard (politiste), Gaëtan Levillain (historien), Anaël Marrec (historienne), Eve Meuret-Campfort (sociologue), Séverine Misset (sociologue) et moi-même.

Nous avons choisi pour objet d'étude l'estuaire de la Loire comme espace énergétique depuis les années 1970 [22]. Au fil des discussions, nous avons défini trois perspectives entrelacées : l'aménagement énergétique du territoire ; les luttes sociales, foncières et écologiques des habitants et des militants de la zone ; l'analyse métabolique des flux de matière et d'énergie traversant et stocké dans cet espace. Nous voulons ainsi souligner que « [l]es réseaux énergétiques ne sont qu'une partie de l'espace énergétique, au même titre que les lieux et les échelles avec lesquels ils sont articulés, souvent sans cohérence d'ensemble (Bridge et Gailing 2020). Ils s'inscrivent dans des zones habitées et travaillées qui ne se réduisent pas à leur dimension énergétique et donnent lieu à des conflits dans les pratiques et les représentations du territoire » (Teissier 2022a, p. 2). Le projet de recherche que nous avons formalisé au cours de l'année 2021 associe quatre laboratoires de Nantes Université : Centre François Viète (UR 1161), Centre nantais de sociologie (UMR 6025), Droit et changement social (UMR 6297) et Espaces et sociétés (UMR 6590).

Le projet, intitulé *ESTUaire de la Loire comme espace Énergétique (1980-présent). Regards croisés des sciences humaines et sociales* (ESTUER) a été sélectionné au cours de l'année 2021-2022 dans la cadre de l'appel à projet générique de l'Agence nationale de la recherche (ANR). Ce projet débutera en avril 2023 pour une durée de quatre ans (2023-2027). Voici le résumé du projet soumis à l'ANR. Il peut être lu en regardant la carte réalisée pour le projet sur la figure 7.5.

FIGURE 7.5 – Cartographie des sites énergétiques de l'estuaire de la Loire (Jean-Baptiste Bahers)

Le projet ESTUER appréhende l'estuaire de la Loire comme « un espace énergétique », c'est-

21. Voir la description et la composition du groupe à l'adresse suivante : https://cfv.univ-nantes.fr/activites-de-recherche/axe-3-artefacts-et-systemes-1

22. Cet objet d'étude se trouve au croisement de deux thèses que j'ai co-encadrées, celle de Philippe Martin (2018), intitulée *Développement et essor de l'industrie chimique des engrais dans l'estuaire de la Loire (1815-1970)*, et celle d'Anaël Marrec (2018a), intitulée *Histoire des énergies renouvelables en France, 1880-1990*.

à-dire un nœud traversé par des flux multiples de matière et d'énergie (charbon, gaz, pétrole, électricité mais aussi marée, soleil et vent), un lieu de projection d'infrastructures énergétiques (réseaux, centrales, ports) et un territoire contrasté dont les ressorts politiques sont multiples, des mobilisations environnementales locales aux échelles métropolitaine, régionale, nationale et européenne. Notre hypothèse est l'existence d'une articulation forte entre les histoires matérielle, politique et sociale des espaces énergétiques. Notre ambition est d'éclairer cette articulation dans l'estuaire de la Loire depuis les années 1980 par une démarche interdisciplinaire entre géographie, histoire, science politique et sociologie. Le principal terrain d'investigation est le site du Carnet au milieu de l'estuaire où se rejoignent, depuis 40 ans, des mutations infrastructurelles, des politiques d'innovation et des mobilisations sociales autour de l'énergie. Chacun des deux projets d'aménagement du Carnet – une centrale nucléaire par EDF (1981-1997) puis récemment un parc écotechnologique par le port autonome – a rencontré des contestations de la part de collectifs de riverains, paysans, étudiants, écologistes, dans un contexte de perte d'autonomie énergétique et agricole de la Loire Atlantique. Notre étude entrelace trois axes : 1) la techno-politique de l'énergie examine les politiques énergétiques des administrations régionales, nationales et européennes et les stratégies d'appropriation des espaces physiques, discursifs et mentaux par les acteurs de l'aménagement ; 2) la sociopolitique des mobilisations environnementales s'intéresse aux groupes mobilisés contre les projets d'aménagement énergétiques depuis 40 ans dans une démarche socio-historique ; 3) l'analyse du métabolisme territorial articule l'analyse des flux matériels et énergétiques aux conflits sociaux dans l'estuaire.

Ce programme de recherche ANR est issu d'une réflexion collective et pluridisciplinaire [23]. Il est aussi marqué par ma recherche propre dans la mesure où le programme « Énergies, techniques et sociétés » du Centre François Viète a été moteur dans la formation du groupe et que je suis le coordinateur scientifique du projet ANR – le Centre François Viète étant laboratoire porteur. Il prolonge mon travail d'habilitation à diriger des recherches à plusieurs niveaux. J'en retiendrais trois : coordination institutionnelle, encadrement de la recherche, épistémologie des sciences humaines et sociales.

Premièrement, en termes institutionnels, je serai coordinateur du programme de recherche réunissant une dizaine d'universitaires nantais. Ce programme articule trois axes de recherche décrit dans le résumé précédent. Il est également organisé en sept tâches à effectuer tout au long des quatre années de financement. La première de ces tâches, dont je serai responsable, concerne l'« organisation et animation du projet ». La figure 7.6 schématise cette organisation conçue durant l'écriture du projet ANR. Les tâches 2, 3 et 7 impliquent une collaboration soutenue avec le Centre d'histoire du travail (CHT) de Nantes, où nous travaillons avec Christophe Patillon et Manuella Noyer. Le CHT possède en effet un fond d'archives professionnelles et syndicales important pour notre terrain d'études (tâches 2 et 3). À l'inverse, son fond sera enrichi par le corpus d'entretiens que nous constituerons. Une centaine d'interviews sont prévus dans une forme orale et retranscrite. Le CHT offrira aussi un lieu d'exposition, de diffusion et de valorisation des résultats du projet ESTUER. Ces différentes activités de coordination sont liées au principe de l'habilitation à diriger des recherches.

Deuxièmement, en termes d'encadrement de recherche, je serai plus spécifiquement investi sur « l'espace énergétique comme enjeu de politiques d'aménagement territorialisées » (axe 1). L'axe 1, dont je suis responsable, accueillera le travail d'un ou d'une post-doctorante durant deux années (2023-2025) au Centre François

23. Les documents officiels relatifs à ce programme de recherche (projet complet, rapport final de l'ANR et budget accepté par l'ANR) sont disponibles à l'adresse internet suivante : https://uncloud.univ-nantes.fr/index.php/s/irkF9YYYa2iBL58

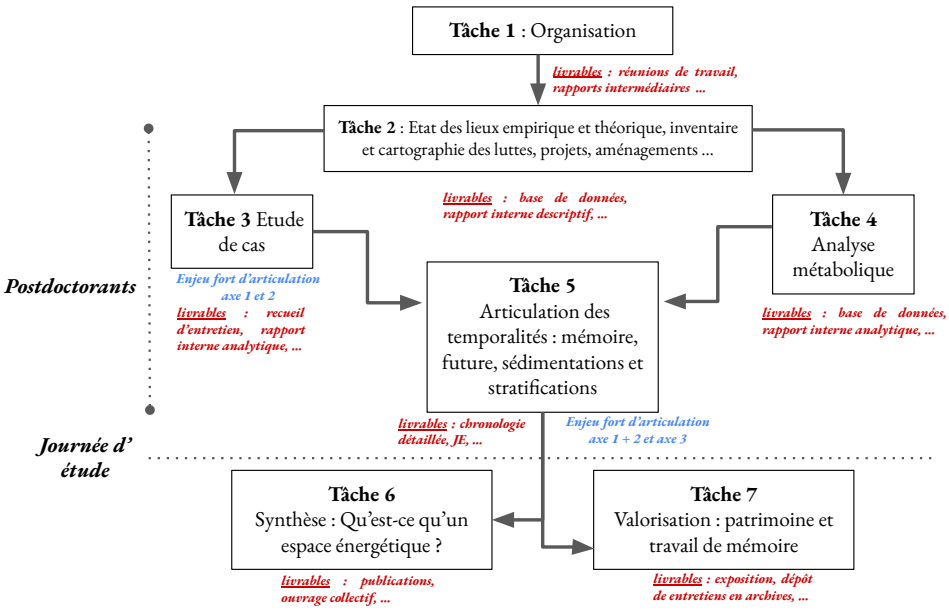

FIGURE 7.6 – Schématisation de l'organisation du projet ESTUER en sept tâches

Viète. Le contrat post-doctoral vise l'étude de cas énergétiques, choisis dans l'estuaire de la Loire (archives, revues, interviews, traitement, analyse des cas) et la conceptualisation des temporalités inscrites dans l'espace énergétique. Jusqu'à présent, je n'ai participé qu'à des encadrements de recherche au niveau doctoral. Cette expérience là-encore s'inscrit dans un processus logique après la soutenance d'une habilitation à diriger des recherches. Par rapport à cet essai dont l'ambition était de couvrir près de deux siècles et deux sous-régions continentales, se recentrer sur un espace délimité dans le temps – 50 ans – et dans l'espace – un département – permettra de tester de manière manière mieux argumentée des propositions sur le régime technicien.

Troisièmement, notre projet ESTUER est original en termes épistémologiques par le croisement des méthodes de sciences humaines et sociales. Il s'ouvre avec la tâche 2 d'un « état des lieux empirique et théorique » de la notion d'espace énergétique (resp. A. Évrard) et se termine au niveau de la recherche par la tâche 6 d'une « synthèse empirique-théorique » de l'étude socio-historique de l'estuaire de la Loire (resp. A. Évrard et P. Teissier). Ces deux tâches ont une dimension pluridisciplinaire entre géographie, histoire, sciences politiques, sociologie, et une ambition transdisciplinaire de construction d'un cadre argumentatif en sciences humaines et sociales. Le premier objectif de la tâche 6 est de développer une approche comparatiste avec l'estuaire de l'Elbe, similaire au nôtre autour de Hambourg et une situation analogue sur les bords de la Méditerranée, de Marseille à Fos-sur-Mer. Son second objectif interroge le caractère heuristique et opérationnel de notre approche interdisciplinaire et analyse l'articulation de nos modalités de problématisation. Comme le dit le projet de recherche, « quelle peut être la place respective des scénarios contrefactuels (analyse métabolique) et des études de cas dans l'administration de la preuve en sciences humaines et sociales ? » (Teissier 2022c, p. 11-12).

Plutôt formé à l'épistémologie des sciences de la nature puis passé par la technologie pour mon habilitation à diriger des recherches, je trouve intrigante l'administration de la preuve en sciences de l'homme et de la société. C'est un champ insuffisamment travaillé, me semble-t-il, d'une manière transversale et compréhensive. Dans un « plaidoyer pour un pluralisme sous contraintes », Jean-Michel Berthelot (2003, p. 38, 35) en appelait à la formation d'« un espace de discussion commun » pour dépasser « l'infinie cacophonie de l'empilement

incessant des textes » en sciences sociales. Le faible écho de sa réflexion épistémologique depuis *L'intelligence du social. Le pluralisme explicatif en sociologie* (Berthelot 1990) suggère qu'il est temps encore d'essayer de construire ces espaces de dialogue pour les sciences humaines et les sciences sociales dans leurs complémentarités et leurs hétérogénéités. Notre projet ESTUER, par son ancrage empirique, ses perspectives conceptuelles et son pluralisme disciplinaire, offre un espace de dialogue adéquat pour aborder, de manière sereine, les problèmes épistémologiques et ontologiques dans la diversité et la largeur des sciences humaines et sociales. Notre éventail argumentatif est, en effet, étendu : études empiriques, à la fois singulières et reliées ; comparaison de territoires (Loire, Elbe, littoral méditerranéen) ; modélisations à travers des modèles conceptuels (espace énergétique), des modèles quantitatifs (métabolisme, sémantique), des modèles opératoires (approche technico-économique des aménageurs) ; multiplication des temporalités et des échelles d'espace, de la micro-histoire à l'analyse de flux internationaux et de la techno-politique européenne.

Bibliographie

I. Travaux personnels et collaboratifs cités dans le mémoire original

I.1. Publications, thèses et mémoires

Auvity Bruno et Teissier Pierre (2023), *Déconstruire la notion d'« innovation » par les* low-tech *: transformations économiques, sociales et culturelles du temps présent*, Journées scientifiques de Nantes Université, 5 juin 2023, Nantes.

Bensaude-Vincent Bernadette et Eastes Richard-Emmanuel (éd.) (2020), *Philosophie de la chimie*, Louvain-la-Neuve, De Boeck Supérieur.

Bensaude-Vincent Bernadette et Teissier Pierre (2008), « Robert Collongues », in Noretta Koertge (éd.), *New Dictionary of Scientific Biography*, Detroit, Charles Scribner's Sons / Thomson Gale, p. 159-164.

— (2015), *Building, Preserving and Using Oral Archives on Materials Research. An Attempt towards the Biography of Research Communities*, 10th International Conference on the History of Chemistry (ICHC), 8-10 septembre 2015, Aveiro (Portugal).

Boucard Jenny et Teissier Pierre (2018), « Physique, chimie, mathématiques : les deux premières décennies des Ie et IIe sections », in Patrick Henriet (éd.), *L'École pratique des hautes études. Invention, érudition, innovation, de 1868 à nos jours*, Paris, France, Somogy, Éditions d'art, p. 141-152.

Clecio Mocellin Ronei et Teissier Pierre (2020a), « Introduction : Les mondes atlantiques dans le premier tiers du XXe siècle. Un essai d'interprétation », *Cahiers François Viète*, t. III, nº 8, p. 5-13. Rivages et horizons techniques des mondes atlantiques au vingtième siècle, Ronei Clecio Mocellin et Pierre Teissier (éd.).

— (éd.) (2020), *Rivages et horizons techniques des mondes atlantiques au vingtième siècle*, t. III, Cahiers François Viète 8, Université de Nantes.

Delaire Étienne et Teissier Pierre (2020), « Horizons, chaînes et rivages frigorifiques en France, 1900-1930. Marchés alimentaires, modernités techniques et pêches industrielles », *Cahiers François Viète*, t. III, nº 8, p. 51-90, Ronei Clecio Mocellin et Pierre Teissier (éd.).

Deruelle Benjamin, Blachère Camille, Ruellet Aurélien et Teissier Pierre (2016), *Sciences, techniques, pouvoirs et sociétés, 1500-1789*, Clefs Concours, Paris, Atlande.

Duplaquet Laura (2025), « Science des futurs possibles et sciences historiques, croisements épistémologiques », En cours de rédaction (2021-2025). Encadrement de F. Le Blay et P. Teissier, thèse de doctorat en épistémologie, histoire des sciences et des techniques, Université de Nantes, Nantes.

Ferrière Hervé (2022), *Le treizième travail d'Hercule. Pour une histoire pointilliste des savoirs sur la mer et les pollutions pétrolières (1816-1907)*, Nantes Université. Habilitation à diriger des recherches soutenue le 7 juin 2022.

Hervy Benjamin (2014), « Contribution à la mise en place d'un PLM muséologique dédié à la conservation et la valorisation du patrimoine : Modélisation et intégration de données hétérogènes sur un cycle de vie

produit complexe », thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur, Université de Nantes & École centrale de Nantes, Nantes.

Kolomdja Pauline (2017), « L'Architecture de l'habitat chez les peuples Moundang de l'extrême Nord Cameroun à la deuxième moitié du XXe siècle : Évolution des structures, des techniques de constructions, usages et importance des bâtiments », Encadrement de P. Teissier, mémoire de master en épistémologie, histoire des sciences et des techniques, Université de Nantes.

Lafait-Boisson Marion (2016), « Les machines hydrauliques dans l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert : définition, commentaires et analyses », Encadrement d'A. Guilbaud et P. Teissier, mémoire de master en épistémologie, histoire des sciences et des techniques, Université de Nantes.

Levillain Gaëtan (2023), « L'enrésinement des forêts et l'industrialisation du bois en France (XIXe-XXe siècles) : une histoire technologique, culturelle et environnementale de la redéfinition d'un matériau traditionnel », En cours de rédaction (2019-2023). Encadrement de C. Bonneuil, P. Teissier et S. Tirard, thèse de doctorat en épistémologie, histoire des sciences et des techniques, Université de Nantes, Nantes.

Marrec Anaël (2018a), « Histoire des énergies renouvelables en France, 1880-1990 », Encadrement de D. Pécaud et P. Teissier, thèse de doctorat en épistémologie, histoire des sciences et des techniques, Université de Nantes, Nantes.

— (2021), *Futurs énergétiques dans l'estuaire de la Loire, 1980-2050*, Séminaire annuel du GIS Perle, 20 octobre 2021, Université de Nantes.

— (2022a), *A Nuclear Power Plant in the Loire Estuary : Water Histories of a Failed Project (1974-1997)*, Workshop « Water-Nuclear Nexus », juin 2022, KTH Royal Institute of Technology Stockholm.

Marrec Anaël et Teissier Pierre (2020), « Les énergies alternatives... aux prises avec les politiques conservatrices », in François Jarrige et Alexis Vrignon (éd.), *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, Paris, La Découverte, p. 238-248.

Martin Philippe (2018), « Développement et essor de l'industrie chimique des engrais dans l'estuaire de la Loire (1815-1970). Construction d'un macro-système technique Port-Usines-Autorités régulatrices à l'échelle d'un territoire régional », Encadrement de J.-L. Kerouanton, P. Teissier et S. Tirard, thèse de doctorat en épistémologie, histoire des sciences et des techniques, Université de Nantes, Nantes.

Naegel Paul, Marrec Anaël et Teissier Pierre (déc. 2015), « Le profit à court terme est préféré aux problèmes à long terme », *Terra Eco*.

Naegel Paul et Teissier Pierre (2013), « Obtaining a Royal Privilege in France for the Watt Engine, 1776-1786 », *The International Journal for the History of Engineering & Technology*, t. 83, n° 1, p. 96-118.

Quantin Matthieu (2018), « Proposition de chaînage des connaissances historiques et patrimoniales Approche multi-échelles et multi-critères de corpus textuels », thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur, Université de Nantes & École centrale de Nantes, Nantes.

Teissier Pierre (2006), « Le laboratoire de Robert Collongues (1950-2000). Une école de recherche aux débuts de la chimie du solide », *L'Actualité Chimique*, n° 294, p. 50-59.

— (2007), « L'émergence de la chimie du solide en France (1950-2000). De la formation d'une communauté à sa dispersion », Encadrement de B. Bensaude-Vincent, thèse de doctorat en épistémologie, histoire des sciences et des techniques, Université de Nanterre - Paris X.

— (2008), « Paul Hagenmuller. Itinéraire de l'enfant terrible de la chimie du solide française. », *L'Actualité Chimique*, n° 319, p. I-XV.

Teissier Pierre (2012a), *Énergie nucléaire et énergies renouvelables en France. Histoire et controverses*, Journées scientifiques de l'université de Nantes, 8 juin 2012, Nantes.
— (2012b), *L'énergie en Europe depuis quatre siècles. Un choix de civilisation*, Fête de la science, 11 octobre 2012, Centre de culture scientifique, technique et industrielle, Lorient.
— (2013a), *Du minéral au matériau, une pré-histoire de l'IMN*, Journée « 25 ans de l'IMN », 25 juin 2013, Université de Nantes.
— (2013b), « Le solaire passif à l'ombre de la politique énergétique de la France, 1945-1986 », *Annales historiques de l'électricité*, Les politiques publiques de l'énergie solaire, n° 11, p. 11-25.
— (2014), *Une histoire de la chimie du solide. Synthèses, formes, identités*, Intersciences, Paris, Hermann.
— (2015), « Bonnemay, Maurice, chaire d'électrochimie », *Cahiers d'histoire du CNAM*, t. 4, p. 41-55, André Grelon et Claudine Fontanon (éd.).
— (2017a), « From the Birth of Fuel Cells to the Utopia of Hydrogen World », in Bernadette Bensaude-Vincent, Sacha Loeve, Alfred Nordmann et Astrid Schwarz (éd.), *Research Objects in their Technological Setting*, London & New York, Routledge, p. 70-86.
— (2017b), « The Exotic Glasses of Rennes (France) : Local Knowledge-Making in Global Telecommunication », *Cahier François Viète*, III, t. 2, p. 117-151.
— (2019), *Histoire de l'énergie et sciences de l'ingénieur : des espaces de dialogue ?*, 3e Séminaire annuel du GIS Perle, 26 mars 2019, Université de Nantes.
— (2021), *Une économie de l'hydrogène est-elle réalisable en Pays de la Loire ? Réflexions épistémologiques*, Journée scientifique « Hydrogène, de la production aux usages », 20 septembre 2021, Le Mans Université.
— (éd.) (2022), *ESTUaire de la Loire comme espace Énergétique (1980-présent). Regards croisés des sciences humaines et sociales*, Nantes Université. Projet ESTUER sélectionné en juillet 2022 pour financement par l'Agence nationale de la recherche, période 2023-2027.
— (2022b), *Le stockage de l'énergie (1870-2020)*, séminaire de recherche de l'équipe Récits, FEMTO-ST, université de technologie de Belfort-Montbéliard.
— (2022c), « Lithium », in Bernadette Bensaude-Vincent (éd.), *Biography of Materials*, Singapore, World Scientific Publishing, p. 219-234.
Teissier Pierre et Marrec Anaël (2019), « Usage des métaphores en histoire de l'énergie : de la dynamique du point à la psychologie des nénuphars », *Artefact. Techniques, histoire et sciences humaines*, t. 11, p. 309-339.
Teissier Pierre, Quantin Matthieu et Hervy Benjamin (2018), « Humanités numériques et archives orales : cartographies d'une mémoire collective sur les matériaux », *Cahiers François Viète*, t. III, n° 4, p. 141-177.
Teissier Pierre et Tomic Sacha (2020), « Questions d'épistémologie », in Bernadette Bensaude-Vincent et Richard-Emmanuel Eastes (éd.), *Philosophie de la chimie*, Louvain-la-Neuve, De Boeck Supérieur, p. 103-110.
Wieber Frédéric et Hocquet Alexandre (2020), « Méthodes de modélisation en chimie computationnelle : pluralisme et pragmatisme, software et benchmarking », in Bernadette Bensaude-Vincent et Richard-Emmanuel Eastes (éd.), Louvain-la-Neuve, De Boeck Supérieur, p. 170-176. Section II. Épistémologie, éd. par P. Teissier et S. Tomic.

I.2. Entretiens utilisés

Auvity Bruno (2022), *Entretien*, 23 juin 2022, 10h-11h30, Maison des sciences de l'homme Ange-Guépin, Nantes, réalisé par P. Teissier, 17 pages.

Beuzit Pierre (2010), *Entretien*, 12 février 2010, 13h50-15h15, Paris (12e arrdt.), réalisé par P. Teissier, 18 pages.

Bonhoff Klaus (2010), *Interview*, 13 July 2010, N.O.W. headquarters, Berlin, Germany, conducted by P. Teissier, 11 pages.

Chrenko Daniela (2022), *Entretien*, 1er avril 2022, 14h-15h20, visioconférence entre Nantes et Belfort, réalisé par P. Teissier, 14 pages.

Clément Alain (2020), « Entretien avec Anaël Marrec, École centrale de Nantes, 21 octobre & 2 novembre 2015 (extraits) », *Cahiers François Viète*, t. III, n° 8, p. 119-139.

Coutanceau Christophe (2022), *Entretien*, 17 juin 2022, 11h-12h30, visioconférence à distance entre Poitiers et Nantes, réalisé par P. Teissier, 19 pages.

Hagenmuller Paul (2004), *Entretien*, 7 et 8 décembre 2004, Institut de chimie de la matière condensée de Bordeaux (ICMCB), réalisé par P. Teissier, 18 pages.

Hissel Daniel (2022), *Entretien*, 29 mars 2022, 8h-9h10, visioconférence Belfort-Nantes, réalisé par P. Teissier, 13 pages.

Jakowski Jochen (2010), *Interview*, 26 May 2010, 15h-16h20, Adam Opel GmbH, Fuel Cell Activities, Mainz-Kastel, Rüsselsheim (Germany), conducted by P. Teissier, 11 pages.

Lisse Jean-Pierre (2009), *Entretien*, 5 janvier 2009, 10h-12h30, Paris (12e arrdt.), réalisé par P. Teissier, 19 pages.

Lucas Jacques (2005), *Entretien*, 9 mai 2005, 18h-20h, rue des écoles, Paris (5e arrdt.), réalisé par P. Teissier, 19 pages.

Lucchese Paul (2016), *Entretien*, 21 avril 2016, 10h-13h, Maison de la Chimie, Paris (5e arrdt.), réalisé par P. Teissier, 31 pages.

Péra Marie-Cécile (2022), *Entretien*, 24 février 2022, 11h10-12h45, université de technologie de Belfort-Montbéilard, locaux du FC Lab, réalisé par P. Teissier, 21 pages.

Roche Robin (2022), *Entretien*, 24 février 2022, 10h-11h, université de technologie de Belfort-Montbéliard, locaux du FC Lab, réalisé par P. Teissier, 13 pages.

Winter Martin (2010), *Interview by Pierre Teissier*, 29th July 2010, 9h-10h, Münster Electrochemical Energy Technology, Institute of Physical Chemistry, Münster University, conducted by P. Teissier, 12 pages.

II. Corpus : technocrates, techniciens, technologues

II.1. Technocrates

Abbott Arthur V. et Dommerque Franz J. (1895), « Accumulator Economics », *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, t. 12, p. 637-643.

Ademe (2009), *Le stockage de l'énergie électrique*. Rapport technique, 20 pages.

Ademe, Artelys, Enea et G2Elab (2013), *Étude sur le potentiel du stockage d'énergies*. Rapport technique Ademe, Atis, Dgcis, 235 pages.

Ademe, Consultants E-Cube Strategy et Ceren (2017), *L'effacement de consommation électrique en France*, Angers. Rapport technique de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, 179 pages.

Agence France Presse (2022), « Voitures thermiques : le Parlement européen vote pour l'interdiction de leur vente neuves à partir de 2035 », *Le Monde*. Article Le Monde-AFP, 8 juin 2022.

Allen Michael J. (2016), « Energy Storage : The Emerging Legal Framework (And Why It Makes a Difference) », *Natural Resources and Environment*, t. 30, n° 4, p. 20-26.

Assemblée nationale (2005), « Loi n°2005-781 du 13 juillet 2005 de programme fixant les orientations de la politique énergétique », *Journal officiel de la République française*. n°163 du 14 juillet 2005, p. 11 570, texte 2.

— (2015), « Loi n°2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte », *Journal officiel de la République française*. n°189 du 18 août 2015, p. 14 263, texte 1.

Audebrand A. (1904a), « À propos de "La houille noire et la houille blanche" », *La Houille blanche*, t. 3, n° 10, p. 318-320.

— (1904b), « La houille blanche en France. Son état présent, son avenir », *Annales de géographie*, t. 13, n° 67, p. 37-55.

— (1905), « À propos du "droit à l'abus" », *La Houille blanche*, t. 4, n° 11, p. 264-265.

Bal Jean-Louis et Philibert Cédric (2013), « Les caractéristiques des énergies intermittentes électriques sont-elles problématiques ? Les particularités techniques du solaire et de l'éolien », *Annales des Mines – Respnsabilité et environnement*, t. 69, n° 1, p. 8-15.

Beuzit Pierre (2007), *Hydrogène : l'avenir de la voiture ?*, Paris, L'Archipel.

Boeing Company (1971), *Lunar Roving Vehicle Operations Handbook*, Huntsville. Boeing Company, document LS006-002-2H.

Boutteville Roger (1946), « Préface », in Massé Pierre, *Les Réserves et la régulation de l'avenir dans la vie économique*, Paris, Hermann, p. iii-v.

British Petroleum (2021), *Statistical Review of World Energy*, Londres. 70th edition.

Bush Vannevar (1945), *Science The Endless Frontier*, Washington, D.C., United States Government Printing Office. A Report to the President Roosevelt by Vannevar Bush, Director of the Office of Scientific Research and Development.

Cardot Émile (1907), *Manuel de l'arbre pour l'enseignement sylvo-pastoral dans les écoles : l'arbre, la forêt et les pâturages de montagne*, Paris, Touring-Club de France.

Carhart H. S. (1895), « General Discussion at Chicago and San Francisco Sessions », *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, t. 12, p. 644-661.

Childs Arthur E. (1895), « The Storage Battery for Central Stations », *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, t. 12, p. 585-591.

Courier M. (1982), « La place du transfert d'énergie par pompage dans le parc de production d'E.D.F. et l'aménagement de Grand'Maison », *La Houille blanche*, n° 5-6, p. 403-419.

Crocker Francis B. (1895), « Use of Storage Batteries in Electric Lighting », *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, t. 12, p. 602-608.

Descombes Paul (1914), « Encouragements aux initiatives privées ou collectives, spécialement en matière de reboisement et de retenue des eaux », *Deuxième congrès de la Houille blanche, Lyon, septembre 1914. Rapports qui auraient dû être présentés au congrès*, Grenoble, Société hydrotechnique de France.

Duncan Louis (1895), « General Discussion at the New York Session », *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, t. 12, p. 617-636.

Durance Philippe (éd.) (2008), *De la prospective. Textes fondamentaux de la prospective française, 1955-1966. Gaston Berger, Jacques de Bourbon-Busset, Pierre Massé*, 2e, Paris, L'Harmattan.

Edgar C. L. (1895), « Practical Experience with Storage Batteries in Central Stations », *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, t. 12, p. 592-598.

European Commission (2020), *Hydrogen generation in Europe : Overview of costs and key benefits*, Bruxelles, Publications Office of the European Union. ASSET Project, report of the European Commission.

Foucart Stéphane (2014), « Climat, énergie : la croissance peut-elle continuer ? », *Le Monde*. Article du 12 novembre 2014.

— (2021), « Pour Emmanuel Macron, la transition écologique est avant tout une transition technologique », *Le Monde*. Chronique du 30 octobre 2021.

Franklin Institute (1897), « The Storage Battery in Europe », *Journal of the Franklin Institute*, p. 156.

Gauchard Yan (2021), « Avec sa proposition d'accueillir une mini-centrale, la présidente des Pays de la Loire ravive les tensions locales autour du nucléaire », *Le Monde*. Article du 6 novembre 2021.

Gérard P. (1972), « Moyens d'estimer la valeur économique des installations de transfert d'énergie par la simulation mathématique d'exploitation. Application de ces données à l'aménagement et au choix des sites », *La Houille blanche*, n° 6-7, p. 487-498.

Gregory Derek P. (1973), « The Hydrogen Economy », *Scientific American*, t. 228, n° 1, p. 13-21. January.

GridWise-Architecture-Council (2019), *GridWise Transactive Energy Framework*, GWAC.

H2-Mobile (2022a), *A propos de H2-mobile.fr*, site consulté le 6 août 2022, `https://www.h2-mobile.fr/pages/h2-mobile-a-propos/`.

— (2022b), *Vert, bleu, gris, rose : connaissez-vous les couleurs de l'hydrogène ?*, site internet consulté le 6 août 2022, `https://www.h2-mobile.fr/dossiers/vert-bleu-gris-rose-connaissez-vous-couleurs-hydrogene/`.

Hering Carl (1895), « Past and Present Obstacles in the Storage Battery Development », *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, t. 12, p. 608-615.

Hospitalier Édouard et Bainville A. (1901), *L'électricité à l'Exposition de 1900. Volume 4. Transformation de l'énergie électrique*, Paris. 93 pages.

Hospitalier Édouard et Montpellier Jules-Armand (1902), *L'électricité à l'Exposition de 1900. Volume 8. Traction électrique*, Paris. 36 pages.

Institute of Electrical and Electronics Engineers (2015), *IEEE Guide for the Interoperability of Energy Storage Systems Integrated with the Electric Power Infrastructure*, New York. Standards Coordinating Committee 21 on Fuel Cells, Photovoltaics, Dispersed Generation, and Energy Storage.

International Energy Association (2019), *The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities*. édition IEA.

Lacoste Jacques (1986), « Interconnexion des réseaux d'énergie électrique. Raisons et enjeux de l'interconnexion en France 1919-1941 », *Cahier / Groupe Réseaux*, n° 4, p. 105-141.

Massé Pierre (1946), *Les Réserves et la régulation de l'avenir dans la vie économique*, Paris, Hermann.

Mendenhall Thomas Corwin (1887), *A Century of Electricity*, Boston, Houghton.

Ministère de l'Économie (2011), « Ordonnance 2011-504 du 9 mai 2011 portant codification de la partie législative du code de l'énergie », *Journal officiel de la République française*. 10 mai 2011, texte 56 sur 123.

Ministère de l'Industrie (1959), « Constitution de stocks de réserve par l'industrie pétrolière », *Journal officiel de la République française*. Arrêt du 13 avril 1959 signé par Jean-Marcel Jeanneney, publié le 21 avril.

Ministère de la Transition écologique et solidaire (2020), *Bilan énergétique de la France pour 2018*, Paris. Service des données et études statistiques.

Pavarini Claudia (2019), *Battery storage is (almost) ready to play the flexibility game*, Commentary, 07/02/2019, IEA website, `https://www.iea.org`.

Pays de la Loire (2021), *Rapport d'orientations budgétaires 2021 de la région pays de la Loire*. Site internet de la région.

Perry Nelson W. (1895), « The Storage Battery or the Gas Engine as an Auxiliary », *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, t. 12, p. 598-602.

Pieiller Évelyne (2023), « Imaginaires de l'avenir. D'"Avatar" aux dissidents de Polytechnique », *Le monde diplomatique*, p. 3. Février 2023.

Ract-Madoux X. (1972), « Exposé introductif sur les usines d'accumulation et de transfert d'énergie par pompage », *La Houille blanche*, n° 6-7, p. 483-485.

Reckenzaun Frederick (1895), « Past Experience with Storage Batteries », *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, t. 12, p. 615-616.

Remenieras Gaston (1956), *Vue d'ensemble sur les divers procédés de stockage de l'énergie*, Paris. Rapport technique de la Direction des études et recherches, 40 pages, Archives d'Électricité de France (Blois), 852756. « EDF, Service des études et recherches hydrauliques. Dossiers de Gaston Remeniéras (Soleil, courants, pluie) ».

Rifkin Jeremy (2002), *The Hydrogen Economy*, New York, Tarcher/Putnam.

RTE (2021), *Futurs énergétiques 2050. Résumé exécutif*, Paris, Réseau de transport d'électricité (RTE).

Scientific American (1897), « The Hartford Electric Light and Power Plant », *Scientific American*, t. 77, n° 15, p. 233-234.

Union européenne (1992), *Traité sur l'Union européenne*, Maastricht, NE. Office for Official Publications of the European Communities.

Warshay M. et Prokopius P. R. (1989), « The Fuel Cell in Space : Yesterday, Today and Tomorrow », *Grove Anniversary (1839-1989) Fuel Cell Symposium*, Londres, Royal Institution, p. 1-10. NASA Technical Memorandum 102366.

II.2. Techniciens

Andraud Antoine (1839), *De l'air comprimé employé comme moteur, ou De la force obtenue gratuitement et mise en réserve*, Paris, Guillaumin.

Auscher Léon (1899), « La voiture Stanley », *La Nature*, t. 27, n° 1382, p. 387-389.

Barnett Maurice (1896), « The Evolution of the Storage Battery », *Journal of the Franklin Institute*, t. 141, p. 296-320. Franklin Institute Stated Meeting, January 28th 1896.

Bell Louis (1897), *Electric Power Transmission. A Practical Treatise for Practical Men*, New York, The W. J. Johnston Company.

Bockris John O'M. (2013), « The hydrogen economy : Its history », *International Journal of Hydrogen Energy*, t. 38, n° 6, p. 2579-2588.

Camara Mohamed Ansoumane (2011), « Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs », thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur, Université Paris Est Créteil.

Cassaz Maurice (1992), « L'expérience d'EDF dans le fonctionnement des stations de transfert d'énergie par pompage (S.T.E.P.) Maurice Cassaz EDF - Service de la Production Hydraulique », *La Houille blanche*, n° 4, p. 187-293.

Chen Haisheng et al. (2009), « Progress in electrical energy storage system : A critical review », *Progress in Natural Science*, n° 19, p. 291-312.

Chisholm Hugh (éd.) (1910), « Energy », *The Encyclopædia Britannica : A dictionary of arts, sciences, literature and general information*, 11e éd., t. 9, New York, Horace Everett Hooper, p. 398-402.

Crompton R. E. (1905), « Unsolved Problems in Electrical Engineering », *Nature*, t. 71, no 1851, p. 595-596.

Dawood Furat, Shafiullah G. M. et Anda Martin (2020), « A hover view over Australia's Hydrogen Industry in recent history : The necessity for a Hydrogen Industry Knowledge-Sharing Platform », *International Journal of Hydrogen Energy*, t. 45, no 10, p. 32916-32939.

De Vaucher Jean-Baptiste (1851), *M. Andraud, ingénieur civil, auteur du « Traité de l'air comprimé comme force motrice », etc.* Paris, Imprimerie de Madame de Lacombe.

Electrician Western (1889), « The Detroit Storage Battery », *Scientific American Supplement*, no 688, p. 10994-10996.

Fabre L. A. (1913), « Économie montagneuse », *La Houille blanche*, t. 12, no 11, p. 328-333.

Friedrich Guy (2010), *Modélisation du comportement des systèmes de stockage d'énergie embarqués pour véhicules routiers*. Fiche projet SIMSTOCK, université de technologie de Compiègne, 2 pages.

Fumagalli Elena (2016), « The many lives of energy storage », *Nature Energy*, no 96, p. 1-2.

Grove William R. (1842), « On a Gaseous Voltaic Battery », *The London, Edinburgh and Dublin Philo- sophical Magazine and Journal of Science*, t. 21, no 140, p. 417-420.

— (1846), *On the Correlation of Physical Forces : Being the Substance of Course of Lectures Delivered in the London Institution, in the Year 1843*, Londres, London Institution.

Hache Emmanuel, Sokhna Seck Gondia, Simoen Marine, Bonnet Clément et Carcanague Samuel (2019), « Critical raw materials and transportation sector electrification : A detailed bottom-up analysis in world transport », *Applied Energy*, no 240, p. 6-25.

Haefele W. et Sassin W. (1970), « The Global Energy System », *Annual Review of Energy*, t. 2, p. 1-30.

Higgs Paget (1879), *The Electrical Light and its Practical Application*, Londres, E. & F. N. Spon.

Hospitalier Édouard (1880), « L'utilisation des forces naturelles et leur emmagasinement », *La Nature*, no 388, p. 354-355, 379-380.

Houston Edwin J. et Thomson Elihu (1879), « A System of Electrical Storage », *Journal of the Franklin Institute*, p. 388-392. December.

Howarth Robert W. et Jacobson Mark Z. (2021), « How green is blue hydrogen ? », *Energy Science & Engineering*, t. 9, p. 1676-1687.

— (2022), « Reply to comment on "How green is blue hydrogen ?" », *Energy Science & Engineering*, p. 1-6.

Kintner C. J. (1886), « History of the Electrical Art in the United States Patent Office », *Journal of the Franklin Institute*, p. 377-396.

Laboulaye Charles (éd.) (1853), *Dictionnaire des arts et manufactures, de l'agriculture, des mines, etc.* Paris, Imprimerie de Gustave Gratiot.

— (éd.) (1861), *Complément du dictionnaire des arts et manufactures*, Paris, Imprimerie de E. Lacroix.

Laffargue J. (1907), « Nécrologie de E. Hospitalier », *La Nature*, t. 35, no 1764, p. 256.

Larousse Pierre (éd.) (1867-1876), *Grand dictionnaire universel du* xixe *siècle*, Paris, Larousse. 15 tomes.

Lepesant Gilles (2018), *La transition énergétique face au défi des métaux critiques*. Rapport de l'Institut français des relations internationales (IFRI), 54 pages.

Lockwood Thomas Dixon (1894), *Electricity, magnetism, and electric telegraphy : A practical guide and handbook of general information for electrical students, operators, and inspectors*, New York, D. Van Nostrand Co.

Ngô Christian (2016), « Stockage de l'énergie », *Techniques de l'ingénieur*, p. 1-23. WEKA, éditions Techniques de l'ingénieur, BE 8 090.

Perry M. L. et Fuller T. F. (2002), « A Historical Perspective of Fuel Cell Technology in the 20th Century », *Journal of The Electrochemical Society*, t. 149, n° 7, S59-S67.

Reckenzaun Anthony (1887), « Storage Batteries for Electric Locomotion », *Scientific American Supplement*, n° 620, p. 9903-9904.

Rey-Debove Josette et Rey Alain (éd.) (2004), *Le Nouveau Petit Robert*, Paris, Dictionnaires Le Robert.

Romano Matteo C., Antonini Cristina, Bardow André et al. et (2022), « Comment on "How green is blue hydrogen?" », *Energy Science & Engineering*, p. 1-11.

Salom Pedro G. (1893), « The Storage Battery Question », *Journal of the Franklin Institute*, t. 136, n° 5, p. 321-338. Lecture, 2-01-1893.

— (1896), « Automobile Vehicles », *Journal of the Franklin Institute*, t. 141, p. 278-296. Lecture, 18-12-1895.

Salomons David (1893), *Electric Light Installations. A Practical Handbook*, 7th edition, t. 1 - Management of Accumulators, Londres, Whittaker & Co.

— (1894), *Electric Light Installations. A Practical Handbook*, 7th edition, t. 2 - Installation, Londres, Whittaker & Co.

Science (1888), « Another New Storage-Battery », *Science*, t. 12, n° 307, p. 309.

— (1889), « The Storage of Electricity », *Science*, t. 13, n° 312, p. 53-56.

Scientific American (1883), « Storing the Power of the Wind », *Scientific American*, t. 49, n° 3, p. 33. Signé « A. »

Sutton Henry (1881), « On a New Electrical Storage Battery », *Transactions of the Royal Society of London*, p. 187-190.

Swan Joseph W. (1882), « Storage of Electricity », *Scientific American Supplement*, n° 323, p. 5150-5052. Compte rendu d'une conférence de J. W. Swan intitulée « Voltaic Accumulation » à la Société chimique de Newcastle.

Tarascon Jean-Marie (2010), *L'énergie : stockage électrochimique et développement durable*, Leçon inaugurale du Collège de France, Paris, Collège de France. Chaire annuelle (2010-2011) de Développement durable – Environnement, énergie et société (Total).

— (2011), *Histoire et évolution des technologies d'accumulateurs*, Chaire annuelle (2010-2011) de Développement durable – Environnement, énergie et société, Cours du 2 février 2011, Collège de France.

The Spectator (1881), « Electricity as a Factor in Happiness », t. 54, n° 2776, p. 1161-1162.

Thomas Nicholas C. (1988), « The role of hydrogen as a future fuel », *Science Progress*, t. 72, n° 1, p. 37-52.

Thomson William (1852a), « On a Universal Tendency in Nature to the Dissipation of Mechanical Energy », *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 1851-1852, t. 3, n° 42, p. 139-142.

— (1852b), « On the Mechanical Action of Radiant Heat or Light ; On the Power of Animated Creatures over Matter ; On the Sources available to Man for the production of Mechanical Effect. », *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 1851-1852, t. 3, n° 42, p. 108-113.

— (1881), « On the Sources of Energy in Nature Available to Man for the Production of Mechanical Effect », *Journal of the Franklin Institute*, p. 376-385.

Tomaschek Katharina, Olechowski Alison, Eppinger Steven et Joglekar Nithin (2016), « A Survey of Technology Readiness Level Users », *INCOSE International Symposium*, t. 26, n° 1, p. 2101-2117. 26th Annual INCOSE International Symposium (IS 2016) Edinburgh, Scotland, UK, July 18-21, 2016.

Treadwell Augustus (1898), *The Storage Battery. A practical Treatise on the Construction, Theory, and Use of Secondary Batteries*, New York, The MacMillan Company.

Trevert Edward (1891), *Electricity and its recent applications : A practical treatise for students and amateurs with an illustrated dictionary of electrical terms and phrases*, Lynn, Mass., Bubier Publishing Co.

Von Meier Alexandra (2012), *To 33 % and Beyond : Grid Integration Challenges for Renewable Generation*, UCLA Smart Grid Thought Leadership Forum, March 28, 2012. Council on International Educational Exchange, Los Angeles.

Winter Carl-Jochen (2006), « Energy policy is technology politics. The hydrogen energy case », *International Journal of Hydrogen Energy*, t. 31, n° 2, p. 1623-1631.

II.3. Technologues

A. de Beaune Sophie, Hilaire-Pérez Liliane et Vermeir Koen (2017), « L'analogie, les techniques et les savoirs. Approches cognitives et historiques », in Sophie A. de Beaune, Liliane Hilaire-Pérez et Koen Vermeir (éd.), *L'analogie dans les techniques*, Paris, CNRS Éditions, p. 7-56.

Akrich Madeleine (1993), « Technique et médiation », *Réseaux*, t. 11, n° 60, p. 87-98.

Anders Günther (1960), *Le rêve des machines*, trad. par Benoît Reverte, édition utilisée : 2022, Paris, Éditions Allia.

Arnoux Mathieu (2013), « Quelle histoire pour l'énergie ? », in Rémy Mosseri et Catherine Jeandel (éd.), *L'énergie à découvert*, Paris, CNRS Éditions, p. 29-31.

— (2019), « Ressources renouvelables et croissance économique : suggestions médiévales et questions contemporaines », *Revue de la régulation. Capitalisme, institutions, pouvoirs*, t. 26, p. 1-18.

Audebrand A. (1907a), « La houille blanche et la question sylvo-pastorale (partie 1) », *La Houille blanche*, t. 6, n° 7, p. 160-165. Conférences aux élèves de l'Institut électrotechnique de Grenoble.

— (1907b), « La houille blanche et la question sylvo-pastorale (partie 2) », *La Houille blanche*, t. 6, n° 8, p. 169-173. Conférences aux élèves de l'Institut électrotechnique de Grenoble.

Ausubel Jesse H. et Marchetti Cesare (1996), « Elektron : Electrical Systems in Retrospect and Prospect », *Daedalus*, t. 125, n° 3, p. 139-169.

Aykut Stefan C., Évrard Aurélien et Topçu Sezin (2017), « Au-delà du consensus : l'impératif de la "transition énergétique" à l'épreuve du regard comparatif », *Revue internationale de politique comparée*, t. 24, n° 1, p. 7-15.

Bahers Jean-Baptiste, Tanguy Audrey et Pincetl Stéphanie (2020), « Metabolic relationships between cities and hinterland : a political-industrial ecology of energy metabolism of Saint-Nazaire metropolitan and port area (France) », *Ecological Economics*, n° 167, p. 106447.

Balibar Françoise (1999), « Énergie », in Dominique Lecourt (éd.), *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, Paris, Presses universitaires de France, p. 342-345.

Barles Sabine (2017), « Écologie territoriale et métabolisme urbain : quelques enjeux de la transition socioécologique », *Revue d'économie régionale & urbaine*, t. 5, n° 12, p. 819-836.

Barthes Roland (1957), *Mythologies*, édition utilisée : 2014, Paris, Seuil.

Bartle Ian (2002), « When Institutions No Longer Matter : Reform of Telecommunications and Electricity in Germany, France and Britain », *Journal of Public Policy*, t. 22, n° 1, p. 1-27.

Basalla George (1982), « Énergie et civilisation », *Culture technique. Numéro spécial : Robotique, automation*, n° 7, p. 169-179.

Baudrillard Jean (1968), *Le Système des objets*, Paris, Denoël-Gonthier.

Becherif M. et al. (2015), « Hydrogen Energy Storage : New Techno-Economic Emergence Solution Analysis », *Energy Procedia*, t. 74, p. 371-380. International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES15.

Beck Ulrich (1998), « Politics of Risk Society », in Jane Franklin (éd.), *The Politics of Risk Society*, Cambridge, Polity Press, §1.

Belhoste Bruno et Chatzis Konstantinos (2007), « From Technical Corps to Technocratic Power : French State Engineers and their Professional and Cultural Universe in the First Half of the 19th Century », *History and Technology*, t. 23, n° 3, p. 209-225.

Beltran Alain (2018), « Conclusion », in Pierre Lamard et Nicolas Stockopf (éd.), *La transition énergétique, un concept historique ?*, Villeneuve d'Ascq, Presses du Septentrion, p. 305-309.

Beltran Alain, Bouneau Christophe, Bouvier Yves, Varaschin Denis et Williot Jean-Pierre (éd.) (2009), *État et énergie. XIXe-XXe siècle*, Comité pour l'histoire économique et financière de la France, Paris, Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi. séminaires 2002-2006.

Beltran Alain et Bungener Martine (1987), « Itinéraire d'un ingénieur. Pierre Massé avant le Plan », *Vingtième Siècle, revue d'histoire*, t. 15, p. 59-68. Dossier : Quatre visages d'une modernisation française.

Beltran Alain et Carré Patrice (2016), *La vie électrique. Histoire et imaginaire (XVIIIe-XXIe siècle)*, Paris, Belin.

Beltran Alain et Griset Pascal (1990), *Histoire des techniques aux XIXe et XXe siècles*, Paris, Armand Colin.

Benjamin Walter (1935), « L'œuvre d'art à l'heure de sa reproductibilité technique », *Œuvres*, édition utilisée : 2000, t. III, Paris, Gallimard, p. 67-113.

Bensaude-Vincent Bernadette (1992), « The Balance : Between Chemistry and Politics », *The Eighteenth Century*, t. 33, n° 3, p. 217-237.

— (2021), *Temps-paysage. Pour une écologie des crises*, Paris, Le Pommier.

Bento Nuno (2010), « La transition vers une économie de l'hydrogène : Instrastructures et changement technique », thèse de doctorat en sciences économiques, Université de Grenoble, Grenoble.

Bernanos Georges (1947), *La France contre les robots*, Paris, Robert Laffont.

Bertrand Emanuel et Bensaude-Vincent Bernadette (2011), « Materials Research in France : A Short-lived National Initiative (1982–1994) », *Minerva*, t. 49, p. 191-214.

Bijker Wiebe E. (1997), *Of Bicycles, Bakelites, and Bulbs. Toward a Theory of Sociotechnical Change*, Cambridge (Mass.), États-Unis, The MIT Press.

Bijker Wiebe E., Hughes Thomas P. et Pinch Trevor (éd.) (1987), *The Social Construction of Technological Systems : New Directions in the Sociology and History of Technology*, Cambridge (Mass.), États-Unis, The MIT Press.

Bijker Wiebe E. et Law John (éd.) (1992), *Shaping Technology/Building Society. Studies in Sociotechnical Change*, Cambridge (Mass.), États-Unis, The MIT Press.

Birkholm Klavs (2016), « The ethical judgment : Chemical psychotropics », *Hyle – International Journal for Philosophy of Chemistry*, t. 22, p. 127-148.

Bouet Paul (2017), « Le mur Trombe, 1952-1986. Expérimentation et marginalisation d'une énergie alternative », Mémoire de master 2, EHESS, Paris.

— (2020), « Le *mur* Trombe », in François Jarrige et Alexis Vrignon (éd.), *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, Paris, La Découverte, p. 249-263.

Boumans Marcel (1999), « Built in justification », in Mary Morgan et Margaret Morrison (éd.), *Models as mediators : Perspectives on natural and social science*, Cambridge, Cambridge University Press, p. 66-96.

Bouneau Christophe (1985), « L'UPEPO, 1922-1946 : genèse et logiques de l'interconnexion », *Bulletin d'histoire de l'électricité*, n° 6, p. 75-102.

— (1990), « Chemins de fer et développement régional en France de 1852 à 1937 : la contribution de la compagnie du Midi », *Histoire, économie et société*, t. 9, n° 1, p. 95-112.

— (1994), « Croissance des réseaux et interconnexion », in Maurice Lévy-Leboyer et Henri Morsel (éd.), *Histoire de l'électricité en France. Tome deuxième 1919-1946*, Paris, Fayard, p. 800-852.

Bouvier Yves (2008), « Les revues d'électricité et la construction d'une communauté internationale de pratique technologique à la fin du XIXe siècle », *Le Temps des médias*, t. 2, n° 11, p. 72-81.

— (éd.) (2012), *Les défis énergétiques du XXIe siècle. Transition, concurrence et efficacité au prisme des sciences humaines*, Histoire de l'énergie 2, Bruxelles, Peter Lang.

— (2012b), « Les transitions énergétiques dans l'histoire, entre succession des techniques et sédimentation des enjeux », in Yves Bouvier (éd.), *Les défis énergétiques du XXIe siècle. Transition, concurrence et efficacité au prisme des sciences humaines*, Histoire de l'énergie 2, Peter Lang, p. 23-36.

— (2014), *Connexions électriques. Technologies, hommes et marchés dans les relations entre la Compagnie générale d'électricité et l'État, 1898-1992*, Bruxelles, Peter Lang.

Bridge Gavin et Gailing Ludger (2020), « New energy spaces : Towards a geographical political economy of energy transition », *EPA : Economy and Space*, t. 52, n° 6, p. 1037-1050.

Brock David C. (2006), *Understanding Moore's Law : Four Decades of Innovation*, Philadelphie, Chemical Heritage Foundation.

Brun Jean (1981), *Les masques du désir*, Paris, Éditions Buchet et Chastel.

Brunhes Bernard (1905a), « Houille blanche, déboisement et droit de propriété », *Revue de Fribourg*, n° mars-avril, p. 1-41.

— (1905b), « Le progrès de la dégradation des pentes du Puy de Dôme », *La Houille blanche*, t. 4, n° 10, p. 246-247.

Bruyerre Philippe (2017), « Dynamiques d'innovation technique et d'intégration socio-économique. Le cas de l'éolienne en Allemagne, au Danemark et en France », *e-Phaïstos*, t. 6, n° 1, p. 1-8.

— (2019), « Accident technique et panne sociale : le cas des aérogénérateurs d'Électricité de France des années 1950-1960 », *Artefact. Techniques, histoire et sciences humaines*, t. 11, p. 143-162. *Pannes et accidents (XIXe -XXIe siècle)*.

Callon Michel (1979), « L'État face à l'innovation technique : le cas du véhicule électrique », *Revue française de science politique*, t. 29, n° 3, p. 426-447.

Callon Michel, Lascoumes Pierre et Barthe Yannick (2003), *Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique*, Paris, Seuil.

Cardot Fabienne (1991), « Le milieu des électriciens », in François Caron et Fabienne Cardot (éd.), *Histoire de l'électricité en France. Tome premier 1881-1918*, Paris, Fayard, p. 17-53.

Caron François (1991a), « Histoire économique et dynamique des structures », *L'Année sociologique*, t. 41, p. 107-128.

— (1991b), « Introduction générale », in François Caron et Fabienne Cardot (éd.), *Histoire de l'électricité en France. Tome premier 1881-1918*, Paris, Fayard, p. 7-14.

— (1997), *Les deux révolutions industrielles du XXe siècle*, Paris, Albin Michel.

Caron François et Cardot Fabienne (éd.) (1991), *Histoire de l'électricité en France. Tome premier 1881-1918*, Paris, Fayard.

Cérézuelle Daniel (2011), *La technique et la chair*, édition utilisée : 2021, L'Échappée.

Cheney Margaret (1987), *Tesla (1856-1943) : la passion d'inventer*, Paris, Belin.

Chevalier Jean-Marie (1981), « Les nouvelles technologies énergétiques : leur impact sur l'évolution des prix de l'énergie », *Revue d'économie industrielle*, t. 17, n° 3, p. 1-25.

Corbin Alain (1991), « Préface », in Beltran Alain et Carré Patrice, *La fée et la servante : La société française face à l'électricité,* XIX^e^ -XX^e^ *siècle*, Paris, Belin, p. 2-5.

Coutard Olivier (2001), « Imaginaire et développement des réseaux techniques. Les apports de l'histoire de l'électrification rurale en France et aux États-Unis », *Réseaux*, t. 5, n° 109, p. 76-94.

Dalmasso Anne (2002), « Grenoble (1880-1960) : un district industriel autour de la "houille blanche" ? », in Jean-François Eck et Michel Lescure (éd.), *Villes et districts industriels en Europe occidentale (XVIIe-XXe siècle)*, Tours, Presses universitaires François-Rabelais, p. 224-236.

Daumas Maurice (1962), *Histoire générale des techniques*, Paris, Presses universitaire de France. 4 volumes publiés entre 1962 et 1979.

Debeir Jean-Claude, Deléage Paul et Hémery Daniel (1986), *Une histoire de l'énergie. Les servitudes de la puissance*, édition utilisée : 2013, Paris, Flammarion.

Deneault Alain (2019), *L'économie de la nature*, Montréal, Lux Éditeur.

Descola Philippe (2005), *Par-delà nature et culture*, Paris, Gallimard.

Didry Claude et Marty Frédéric (2016), « La politique de la concurrence comme levier de la politique industrielle dans la France de l'après-guerre », *Gouvernement et action publique*, t. 5, n° 4, p. 23-45.

Diemer Arnaud (2016), « Les symbioses industrielles : un nouveau champ d'analyse pour l'économie industrielle », *Innovations*, t. 50, n° 2, p. 65-94.

Dodier Nicolas (1995), *Les hommes et les machines. La conscience collective dans les sociétés technicisées*, Paris, Métailié.

Dubey Gérard et Jouvancourt Pierre de (2018), *Mauvais Temps. Anthropocène et numérisation du monde*, Dehors, Bellevaux.

Edgerton David (1998), « De l'innovation aux usages : Dix thèses éclectiques sur l'histoire des techniques », *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, t. 53, n° 4-5, p. 815-837.

Eisler Matthew N. (2009), « A Modern "Philosopher's Stone" : Techno-Analogy and the Bacon Cell », *Technology and Culture*, t. 50, n° 2, p. 345-365.

— (2012), *Overpotential. Fuel Cells, Futurism, and the Making of Power Panacea*, New Brunswick, Rutgers University Press.

Ellul Jacques (1954), *La Technique ou l'Enjeu du siècle*, Paris, Armand Colin.

— (1977), *Le Système technicien*, édition utilisée : 2012, Le Cherche midi.

Évrard Aurélien (2013), *Contre vents et marées. Politiques des énergies renouvelables en Europe*, Paris, Presses de Sciences Po.

Febvre Lucien (1935), « Réflexions sur l'histoire des techniques », *Annales d'histoire économique et sociale*, t. 7, n° 36, p. 531-535.

Fréry Frédéric (2000), *Un cas d'amnésie stratégique : l'éternelle émergence de la voiture électrique*, 9^e^ Conférence internationale de management stratégique, 24-26 mai 2000, Montpellier.

Fressoz Jean-Baptiste (2013), « Pour une histoire désorientée de l'énergie », *Entropia*, t. 15, p. 173-187. volume thématique : *L'histoire désorientée*.

— (2021), « Pour une histoire des symbioses énergétiques et matérielles », *Annales des Mines – Respnsabilité et environnement*, t. 101, p. 7-11.

Fridenson Patrick (2012), « L'histoire de l'incertitude technique et ses enjeux », *Revue d'histoire moderne et contemporaine*, t. 59, n° 3, p. 7-18.

Galbraith John Kenneth (1967), *Le nouvel État industriel. Essai sur le système économique américain*, trad. par J.-L. Crémieux-Brilhac et Maurice Le Nan, édition utilisée : 1968, Paris, Gallimard.

Galich Anton (2015), « European Union Research and Innovation Policy : The Co-Production of Policy and Expertise in the Case of Hydrogen and Fuel Cell Technologies », thèse de doctorat en science politique, Université du Luxembourg, Luxembourg.

Garçon Anne-Françoise (2003a), « Introduction : autos mobiles, autos coincées... l'innovation et ses temporalités », *Cahiers François Viète*, t. I, n° 5, p. 3-11.

— (2003b), « La voiture électrique dans *La Nature* (1890-1900), approche micro-historique d'un échec technique », *Cahiers François Viète*, n° I-5, p. 17-43.

— (2012), *L'imaginaire et la pensée technique*, Paris, Garnier.

— (2015), « Des modes d'existence du geste technique », *e-Phaïstos*, t. 4, n° 2, p. 84-92.

Gide Charles (1904a), « Extrait de la conférence de M. Charles Gide, de la Faculté de droit de Paris », *La Houille blanche*, t. 3, n° 10, p. 317-318.

— (1904b), « Le lendemain de la révolution sociale », *Le Devoir : mutualité, solidarité, fraternité : association du capital et du travail*, t. 28, n° 12, p. 746-748.

Gille Bertrand (éd.) (1978), *Histoire des techniques*, Paris, La Pléiade.

Godelier Maurice (1984), *L'idéel et le matériel. Pensée, économies, sociétés*, Paris, Flammarion.

Godin Benoît (2005), *The Linear Model of Innovation : The Historical Construction of an Analytical Framework*, 30, Montreal. Project on the History and Sociology of S&T Statistics Working Paper, 36 pages.

Gonzalez George A. (2013), *Energy and Empire. The Politics of Nuclear and Solar Power in the United States*, New York, Suny Press.

Gras Alain (1997), *Les Macro-systèmes techniques*, Paris, Presses universitaires de France.

— (2003), *Fragilité de la puissance. Se libérer de l'emprise technologique*, Paris, Fayard.

Grimaud Emmanuel, Tastevin Yann Philippe et Vidal Denis (2017), « Low Tech, High Tech, Wild Tech. Réinventer la technologie ? », *Techniques & Culture*, n° 67, p. 12-29.

Griset Pascal et Bouvier Yves (2012), « De l'histoire des techniques à l'histoire de l'innvation. Tendances de la recherche française en histoire contemporaine », *Histoire, Économie et Société*, t. 31, n° 2, p. 29-43.

Guchet Xavier (2012), « Technology, Sociology, Humanism : Simondon and the Problem of the Human Sciences », *SubStance*, t. 41, n° 3, p. 76-92.

— (2017), « L'éthique des nanotechnologies », *Esprit*, n° 433, p. 149-156.

Guillerme Jacques et Sebestik Jan (1966), « Les commencements de la technologie », *Thalès*, t. 12, p. 1-72.

Haudricourt André-Georges (1964), « La technologie, science humaine », *La Pensée*, t. 115, p. 28-35.

— (1987), *La technologie science humaine. Recherches d'histoire et d'ethnologie des techniques*, Paris, Éditions de la Maison des sciences de l'homme.

Hecht Gabrielle (1994), « Political Designs : Nuclear Reactors and National Policy in Postwar France », *Technology and Culture*, t. 35, n° 4, p. 657-685.

Hecht Gabrielle (2004), *Le Rayonnement de la France, énergie nucléaire et identité nationale après la Seconde Guerre mondiale*, 2e édition 2014, Édition Amsterdam.

Heidegger Martin (1954), « La question de la technique », *Essais et conférences*, édition utilisée : 1980, Paris, Gallimard, p. 9-48.

Heymann Matthias (1998), « Signs of Hubris : The Shaping of Wind Technology Styles in Germany, Denmark, and the United States, 1940-1990 », *Technology and Culture*, t. 39, n° 4, p. 641-670.

Hottois Gilbert (1984), *Le signe et la technique. La philosophie à l'épreuve de la technique*, édition utilisée : 2018, Paris, Vrin.

Hughes Thomas P. (1979), « Thomas Alva Edison and the Rise of Electricity », in Carroll W. Purcell (éd.), *Technology in America : A History of Individuals and Ideas*, Cambridge (Mass.), États-Unis, MIT Press, p. 117-128.

— (1983), *Networks of Power. Electrification in Western Society, 1880-1930*, édition utilisée : 1986, Baltimore, The Johns Hopkins University Press.

— (1989), *American Genesis : A Century of Invention and Technological Enthusiasm*, New York, Penguin Books.

— (1998), « L'histoire comme systèmes en évolution », *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, t. 53, n° 4-5, p. 839-857.

Hultman Martin et Yaras Ali (2012), « The socio-technological history of hydrogen and fuel cells in Sweden 1978–2005 ; mapping the innovation trajectory », *International Journal of Hydrogen Energy*, t. 37, n° 6, p. 12043-12053.

Illich Ivan (1973), *La Convivialité*, édition utilisée : 2003, Paris, Seuil.

— (1975), *Énergie et équité*, trad. par Luce Giard, édition utilisée : 2018, Paris, Flammarion.

Jarrige François (2014), *Technocritiques. Du refus des machines à la contestation des technosciences*, édition utilisée : 2016, Paris, La Découverte.

Jarrige François et Vrignon Alexis (éd.) (2020), *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, Paris, La Découverte.

Jones Christopher F. (2014), *Routes of Power. Energy and Modern America*, Cambridge, MA, Harvard University Press.

Jordheim Helge (2017), « Synchronizing the world : Synchronism as historiographical practice, then and now », *History of the Present*, t. 7, p. 59-95.

Josephson Matthew (1959), *Edison : A Biography*, New York, McGraw-Hill.

Kander Astrid, Malanima Paolo et Warde Paul (2014), *Power to the People : Energy in Europe over the Last Five Centuries*, Princeton University Press.

Kasdi Mohamed et Jarrige François (2020), « "Moteurs animés" des filatures », in François Jarrige et Alexis Vrignon (éd.), *Face à la puissance. Une histoire des énergies alternatives à l'âge industriel*, Paris, La Découverte, p. 71-83.

Kirsch David (2000), *The Electric Vehicle and the Burden of History*, New Brunswick (NJ), Rutgers University Press.

Klausner Samuel K. (1979), « The Energy Social System », *The Annals of the American Academy of Political and Social Sciences*, t. 444, n° The Environment and the Quality of Life : A World View, p. 1-22.

Kroichvili Nathalie et Simoncini Nicolas (2022), *Hydrogène et sciences sociales. Appel à contribution de la Journée d'étude Femto-ST Récits du 8 février 2022*, Université de technologie de Belfort-Montbéliard.

Lagendijk Vincent (2008), *Electrifying Europe. The Power of Europe in the Construction of Electricity Networks*, Amsterdam, Aksant.

Lamard Pierre et Lequin Yves-Claude (2005), *La technologie entre à l'université. Compiègne, Sevenans, Belfort-Montbéliard...* Belfort-Montbéliard, éditions UTBM.

— (2017), « Elements of Technical Democracy », *Journal of Innovation Economics & Management*, t. 22, n° 1, p. 171-181.

Lambert Guy et Raveux Olivier (2019), « Pannes et accidents, mises en question et révélateurs des relations entre techniques, économie et société (XIXe -XXIe siècle) », *Artefact. Techniques, histoire et sciences humaines*, t. 11, p. 9-17. *Pannes et accidents (XIXe -XXIe siècle)*.

Lanthier Pierre (2012), « Les transitions énergétiques du point de vue de la consommation », in Yves Bouvier (éd.), *Les défis énergétiques du XXIe siècle. Transition, concurrence et efficacité au prisme des sciences humaines*, Histoire de l'énergie 2, Bruxelles, Peter Lang, p. 11-22.

Latour Bruno (1991), *Nous n'avons jamais été modernes. Essai d'anthropologie symétrique*, édition utilisée : 1997, Paris, La Découverte.

— (1992), *Aramis ou l'Amour des techniques*, Paris, La Découverte.

— (2011), « Reflections on Etienne Souriau's Les Modes d'existence », in Graham Harman, Levi Bryant et Nick Srnicek (éd.), *The Speculative Turn. Continental Materialism and Realism*, Victoria, Australia, re.press, p. 304-333.

Law John (1987), « Technology and Heterogeneous Engineering : The Case of Portuguese Expansion », in Wiebe E. Bijker, Thomas P. Hughes et Trevor Pinch (éd.), *The Social Construction of Technological Systems : New Directions in the Sociology and History of Technology*, Cambridge (Mass.), États-Unis, The MIT Press, p. 111-134.

Le Bon Gustave (1881), « Les forces de l'avenir », *Revue scientifique de la France et de l'étranger*, n° octobre, p. 269-272.

Le Moigne Jean-Louis (1999), « Système », in Dominique Lecourt (éd.), *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*, Paris, Presses universitaires de France, p. 900-909.

Le Roux Thomas et Letté Michel (éd.) (2013), *Débordements industriels : environnement, territoire et conflit, XVIIIe-XXIe siècle*, Rennes, Presses universitaires de Rennes.

Lescure Michel (2002), « Introduction générale », in Jean-François Eck et Michel Lescure (éd.), *Villes et districts industriels en Europe occidentale (XVIIe-XXe siècle)*, Tours, Presses universitaires François-Rabelais, p. 8-12.

Letté Michel (2011), « Le rapport d'Étienne Clémentel (1919). L'avènement administratif des technocrates et de la rationalisation », *Documents pour l'histoire des techniques*, n° 20, p. 167-195.

Lévy-Leboyer Maurice (1994), « Panorama de l'électrification, de la Grande guerre à la nationalisation », in Maurice Lévy-Leboyer et Henri Morsel (éd.), *Histoire de l'électricité en France. Tome deuxième 1919-1946*, Paris, Fayard, p. 27-127.

Lévy-Leboyer Maurice et Morsel Henri (éd.) (1994), *Histoire de l'électricité en France. Tome deuxième 1919-1946*, Paris, Fayard.

Leydesdorff Loet et Meyer Martin (2007), « The scientometrics of a Triple Helix of university-industry-government relations », *Scientometrics*, t. 70, n° 2, p. 207-222.

Loeve Sacha et Bensaude-Vincent Bernadette (2018), *Carbone. Ses vies, ses oeuvres*, Paris, Seuil.

Loeve Sacha et Deldicque Timothée (2018), « Les malentendus de la technologie », *Artefact*, t. 8, p. 215-254.

Loisel Rodica, Baranger Laurent, Chemouri Nezha, Spinu Stefania et Pardo Sophie (2015), « Economic evaluation of hybrid off-shore wind power and hydrogen storage system », *International Journal of Hydrogen Energy*, t. 40, n° 4, p. 6727-6739.

Lormeteau Blanche (2014), « L'énergie thermique et son droit. Éléments de qualification du service public de l'efficacité énergétique », thèse de doctorat en droit public ; spécialité : droit de l'environnement, Université de Nantes, Nantes.

MacLeod Christine (2012), « Reluctant Entrepreneurs : Patents and State Patronage in New Technosciences, circa 1870–1930 », *Isis*, t. 103, n° 2, p. 328-339.

Madureira Nuno Luis (2012), « The anxiety of abundance : William Stanley Jevons and Coal scarcity in the nineteenth century », *Environment and History*, t. 18, p. 395-421.

Marrec Anaël (2018b), « Les îles industrielles dans l'histoire des énergies renouvelables. Récurrence d'un projet », in Pierre Lamard et Nicolas Stockopf (éd.), *La transition énergétique, un concept historique ?*, Villeneuve d'Ascq, Presses du Septentrion, p. 177-196.

— (2022b), « Introduction – Histoire de l'énergie et approches systémiques : les synergies et les imaginaires énergétiques en question », *Cahiers François Viète*, t. III, n° 12, p. 5-26. numéro thématique : Synergies et persistances dans l'histoire des techniques de l'énergie.

Marty Frédéric (2007), « La privatisation des services publics : fondements et enjeux », *Regards croisés sur l'économie*, t. 2, n° 2, p. 90-105.

Massard-Guilbaud Geneviève (2018), « From the history of sources and sectors to the history of systems and transitions : how the history of energy has been written in France and beyond », *Journal of Energy History / Revue d'histoire de l'énergie*, n° 1, p. 1-37.

Mathis Charles-François (2020), « L'impossible transition ? La fatalité du charbon au Royaume-Uni », *Journal of Energy History / Revue d'histoire de l'énergie*, t. 4, p. 1-13.

— (2021), *La Civilisation du charbon en Angleterre, du règne de Victoria à la Seconde Guerre mondiale*, Paris, Vendémiaire.

Mauss Marcel (1936), « Les techniques du corps », *Journal de psychologie*, t. 32, n° 3-4, p. 4-23. Communication présentée à la Société de psychologie le 17 mai 1934.

McGuire Patrick, Granovetter Mark et Schwartz Michael (1993), « Thomas Edison and the Social Construction of the Early Electricity Industry in America », in Richard Swedberg (éd.), *Explorations in Economic Sociology*, Russell Sage Foundation, p. 213-246.

Meadows Donnella H., Meadows Dennis L., Randers Jørgen et Behrens III William W. (1972), *The Limits to Growth. A Report of the Club of Rome*, Potomac Associates – Universe Books. abstract by Eduard Pestel.

Millard Andre (1990), *Edison and the Business of Innovation*, Baltimore, The Johns Hopkins University Press.

Mirecki Zac (2020), « Let There Be Light : An Early History of the Hartford Electric Light Company », *Your Public Media*, `https://connecticuthistory.org/let-there-be-light-in-hartford/`.

Misa Thomas J. (1988), « How Machines Make History, and How Historians (and Others) Help Them to Do So », *Science, Technology, and Human Values*, t. 13, n° 3-4, p. 308-331.

Missemer Antoine (2022), « Un imaginaire fossilisé ? Les représentations économiques de l'énergie au défi de la transition bas-carbone », *Cahiers François Viète*, t. III, n° 12, p. 73-94, Anaël Marrec (éd.).

Mom Gijs (2004), *The Electric Vehicle. Technology and Expectations in the Automobile Age*, Baltimore, The Johns Hopkins University Press.

— (2009), « Compétition et coexistence : la motorisation des transports terrestres et le lent processus de substitution de la traction équine », *Le Mouvement social*, n° 229, p. 13-39.

Morgan Mary et Morrison Margaret (éd.) (1999), *Models as mediators : Perspectives on natural and social science*, Cambridge, Cambridge University Press.

Morozov Evgeny (2014), *To Save Everything Click Here : The Folly of Technological Solutionnism*, Public Affair.

Morsel Henri (1991a), « L'électricité dans l'économie générale du pays », in François Caron et Fabienne Cardot (éd.), *Histoire de l'électricité en France. Tome premier 1881-1918*, Paris, Fayard, p. 505-550.

— (1991b), « Les producteurs d'électricité. Leur organisation et leurs politiques », in François Caron et Fabienne Cardot (éd.), *Histoire de l'électricité en France. Tome premier 1881-1918*, Paris, Fayard, p. 733-800.

— (éd.) (1996), *Histoire de l'électricité en France. Tome troisième 1946-1987*, Paris, Fayard.

Mumford Lewis (1934), *Technique et civilisation*, trad. par Natacha Cauvin et Anne-Lise Thomasson, édition utilisée : 2015, Marseille, Parenthèses.

Naegel Paul (2018), « L'usine marémotrice de la Rance : réussite ou échec ? », in Pierre Lamard et Nicolas Stockopf (éd.), *La transition énergétique, un concept historique ?*, Villeneuve d'Ascq, Presses du Septentrion, p. 197-206.

Ndiaye Pap (2001), *Du nylon et des bombes : Du Pont de Nemours, le marché et l'Etat américain, 1900-1970*, Paris, Belin.

Nicolon A. (1976), *Les contraintes au développement du véhicule électrique*, Grenoble. Rapport technique de l'université de Grenoble.

— (1984), *Le véhicule électrique : mythe ou réalité ?*, Paris, Maison des sciences de l'homme.

Nizard Lucien (1973), « Administration et société : planification et régulations bureaucratiques », *Revue française de science politique*, t. 23, n° 2, p. 199-229.

Nye David (1990), *Electrifying America : Social Meanings of a New Technology, 1880-1940*, Cambridge (Mass.), États-Unis, MIT Press.

Ortar Nathalie et Subrémon Hélène (2016), « Introduction. Le quotidien de la transition énergétique », in Nathalie Ortar et Hélène Subrémon (éd.), *L'énergie et ses usages domestiques. Anthropologie d'une transition en cours*, Paris, Éditions Petra, p. 7-35.

Paine Chris (2006), *Who Killed the Electric Car ?*, English, Film documentaire, Sony Picture Classics.

Palle Angélique (2016), « Les dynamiques d'évolution des réseaux de transport d'électricité européens, des réseaux techniques entre croissance et décroissance », *Flux*, t. 105, n° 3, p. 18-32.

— (2017), « Géopolitique des infrastructures énergétiques en Europe », *Revue internationale et stratégique*, t. 107, n° 3, p. 133-143.

Pécaud Dominique (2021), « L'acceptabilité sociale au bout de la transgression », *VertigO – la revue électronique en sciences de l'environnement*, t. 34, p. 1-31.

Pehlivanian Sophie (2014), « Histoire de l'énergie solaire en France : science, technologies et patrimoine d'une filière d'avenir », thèse de doctorat en épistémologie, histoire des sciences et des techniques, Université de Grenoble, Chambéry.

Pestre Dominique (2014), « Introduction. Du gouvernement du progrès technique et de ses effets », in Dominique Pestre (éd.), *Le gouvernement des technosciences. Gouverner le progrès et ses dégâts depuis 1945*, Paris, La Découverte, p. 7-30.

Petersen Arthur C. (2000), « Models as Technological Artefacts », *Social Studies of Science*, t. 30, n° 5, p. 793-799.

Pflugmann Fridolin et De Blasio Nicola (2020), « The Geopolitics of Renewable Hydrogen in Low-Carbon Energy Markets », *Geopolitics, History, and International Relations*, t. 12, n° 1, p. 9-44.

Picon Antoine (2002), *Les saint-simoniens. Raison, imaginaire et utopie*, Paris, Belin.

Plassard François (2004), « Rétrospective de la prospective. Dans les transport et l'aménagement du territoire », *Travaux et recherches de prospective*, n° 20, p. 6-122.

Poirot-Delpech Sophie (1995), « Biographie du CAUTRA. Naissance et développement d'un système d'informations pour la circulation aérienne », thèse de doctorat en sociologie des techniques, Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, Paris.

Pomian Krzysztof (2014), « De l'exception humaine », *Le Débat*, t. 180, n° 3, p. 31-44.

Puiseux Louis (1982), « Les bifurcations de la politique énergétique française depuis la guerre », *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*, t. 37, n° 4, p. 609-620.

— (1984), « Compte rendu », *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*, t. 39, n° 2, p. 324-326. Jean-Marcel Jeanneney, « La politique énergétique du gouvernement Debré ». Pierre Massé, « Autocritique des années soixante par un commissaire au Plan », *Bulletin de l'Institut d'histoire du temps présent*, 1981, n° 1.

Quemada Bernard (1978), « Technique et langage », in Bertrand Gille (éd.), *Histoire des techniques*, Paris, bibliothèque de La Pléiade, p. 1146-1240.

Ramunni Girolamo (1991), « L'électromagnétisme de Coulomb à Gramme », in François Caron et Fabienne Cardot (éd.), *Histoire de l'électricité en France. Tome premier 1881-1918*, Paris, Fayard, p. 54-115.

Regis Ed (2015), *The Hindenburg Disaster and the Birth of Pathological Technology*, Basic Books.

Rioux Jean-Pierre (1989), *La Révolution industrielle, 1780-1880*, Paris, Seuil.

Rousso Henry (1985), « Le Plan, objet d'histoire », *Sociologie du travail*, t. 27, n° 3, p. 239-250. L'action industrielle de l'État.

Sayes Edwin (2014), « Actor-Network Theory and methodology : Just what does it mean that nonhumans have agency ? », *Social Studies of Science*, t. 44, n° 1, p. 134-149.

Simoncini Nicolas (2018), « Histoire de la recherche sur les piles à combustible en France des années soixante aux années quatre-vingt », thèse de doctorat en épistémologie, histoire des sciences et des techniques, Université de Bourgogne Franche-Comté, Belfort-Montbéliard.

Simondon Gilbert (1958), *Du mode d'existence des objets techniques*, édition utilisée : 1989, Paris, Aubier.

Smith Crosbie et Wise Norton (1989), *Energy and Empire : A Biographical Study of Lord Kelvin*, Cambridge, Cambridge University Press.

Souriau Étienne (1943), *Les différents modes d'existence*, édition utilisée : 2009, Paris, Presses universitaires de France, p. 76-193.

Sovacool Benjamin K. (2014), « What are we doing here ? Analyzing fifteen years of energy scholarship and proposing a social science research agenda », *Energy Research & Social Science*, t. 1, p. 1-29.

Spengler Oswald (1931), *L'homme et la technique*, édition utilisée : 2016, R&N Éditions.

Stengers Isabelle (1997), *Cosmopolitiques*, Paris, La Découverte.

Stengers Isabelle et Latour Bruno (2015), « The Sphinx of the Work », *The Different Modes of Existence. On the Work to Be Made*, Minneapolis, Univocal Publishing, p. 11-90.

Thoenig Jean-Claude (1987), *L'Ère des technocrates. Le cas des Ponts et Chaussées*, 2e édition, Paris, L'Harmattan.

Varaschin Denis (1996), « De la centrale au réseau. Au fil de la SLFMR », *Bulletin d'histoire de l'électricité*, n° 28, p. 27-66.

Vasudeva Gurneeta, Zaheer Akbar et Hernandez Exequiel (2013), « The Embeddedness of Networks : Institutions, Structural Holes, and Innovativeness in the Fuel Cell Industry », *Organization Science*, t. 24, n° 3, p. 645-663.

Verne Jules (1860), *Paris au* xx*e siècle*, édition utilisée : 1994, Paris, Hachette / Le Cherche midi.

Villareal Axel (2014), « L'industrie automobile à l'épreuve des voitures électriques. Entre changement et continuité », thèse de doctorat en science politique, Université de Bordeaux, Bordeaux.

Vincenti Walter G. (1995), « The Technical Shaping of Technology : Real-World Constraints and Technical Logic in Edison's Electrical Lighting System », *Social Studies of Science*, t. 25, n° 3, p. 553-574.

Ward Lester F. (1877), « Cosmic and Organic Evolution », *Popular Science Monthly*, t. 11, n° 10, p. 672-682.

— (1895), « The Natural Storage of Energy », *The Monist*, t. 5, n° 2, p. 247-263.

Weaver Glenn (1969), *The Hartford Electric Light Company*, Hartford, The Hartford Electric Light Company.

Weil Simone (1934), *Réflexions sur les causes de la liberté et de l'oppression sociale*, édition utilisée : 2020, Paris, éditions Payot & Rivages.

— (1935), *La condition ouvrière*, édition utilisée : 2002, Paris, Gallimard. écrit en 1934-1935, publié en 1951.

White Leslie A. (1943), « Energy and the Evolution of Culture », *American Anthropologist*, t. 45, n° 3, p. 335-356.

Williot Jean-Pierre (2009), « Introduction à la partie I. L'État et ses moyens d'intervention », in Alain Beltran, Christophe Bouneau, Yves Bouvier, Denis Varaschin et Jean-Pierre Williot (éd.), *État et énergie. XIXe-XXe siècle*, Comité pour l'histoire économique et financière de la France, Paris, Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi, p. 37-41. séminaires 2002-2006.

— (2020), « Gaz noir, gaz bleu, gaz vert : à la recherche des transitions gazières », *Journal of Energy History / Revue d'histoire de l'énergie*, n° 4, p. 1-17.

Yon Guillaume (2014), « L'intérêt général et l'investissement. Coût marginal de long terme et tarification à Électricité de France (1948-1949) », *Annales historiques de l'électricité*, n° 12, p. 43-63.

Zachmann Karin (2012), « Past and Present Energy Societies. How Energy Connects Politics, Technologies and Cultures », in Nina Möllers et Karin Zachmann (éd.), *Past and Present Energy Societies. How Energy Connects Politics, Technologies and Cultures*, Transcript Verlag, p. 7-41.

III. Littérature secondaire : sciences humaines et sociales

Arkoun Mohammed (1975), *La Pensée arabe*, Quadrige 2012, Paris, Presses universitaires de France.

Armatte Michel et Dahan Dalmedico Amy (2004), « Modèles et modélisations, 1950-2000 : Nouvelles pratiques, nouveaux enjeux », *Revue d'histoire des sciences*, t. 57, n° 2, p. 243-303.

Aron Raymond (1962), *Dix-huit leçons sur le société industrielle*, édition utilisée : 2004, Paris, Gallimard.

Bachelard Gaston (1934), *La Psychanalyse du feu*, édition utilisée : 1992, Paris, Gallimard.

— (1940), *La Philosophie du non. Essai d'une philosophie du nouvel esprit scientifique*, édition utilisée : 1988, Paris, Presses universitaires de France.

Balandier Georges (1967), *Anthropologie politique*, 3e édition, 1978, Paris, Presses universitaires de France.

— (2001), *Le grand système*, Paris, Fayard.

Balandier Georges (2004), *Sens et puissance. Les dynamiques sociales*, Paris, Presses universitaires de France.
Balibar Françoise (1985), « Bohr entre Einstein et Dirac », *Revue d'histoire des sciences*, t. 38, n° 3-4, p. 293-307.
Barles Sabine (2006), *L'invention des déchets urbains, France, 1790-1970*, Champ Vallon.
Bastide Roger (1975), *Le sacré sauvage et autres essais*, 2e édition, 1997, Paris, Stock.
Bataille Georges (1949), « La Part maudite. Essai d'économie générale », *Œuvres complètes, tome VII*, édition utilisée : 1976, Paris, Gallimard, p. 17-179.
Becquemont Daniel et Mucchielli Laurent (1998), *Le cas Spencer : religion, science et politique*, Paris, Presses universitaires de France.
Bensaude-Vincent Bernadette (1993), *Lavoisier. Mémoires d'une révolution*, Paris, Flammarion.
— (2005), *Faut-il avoir peur de la chimie ?*, Empêcheurs de penser en rond.
— (2020), « Interdisciplinarité ou mélange des genres en histoire des sciences ? », *Cahiers François Viète*, t. III, n° 9, p. 37-52. 20 ans des Cahiers François Viète.
Bernardi Walter (2001), « La controverse sur l'électricité animale dans l'Italie du XVIIIe siècle », *Revue d'histoire des sciences*, t. 54, n° 1, p. 53-70.
Berthelot Jean-Michel (1990), *L'intelligence du social. Le pluralisme explicatif en sociologie*, Paris, Presses universitaires de France.
— (2003), « Plaidoyer pour un pluralisme sous contraintes », *Revue européenne des sciences sociales*, t. 41, n° 126, p. 35-49.
Bihr Alain (2007), *La novlangue néolibérale. La rhétorique du fétichisme capitaliste*, Lausanne, éditions Page deux.
Bloch Marc (1949), *Apologie pour l'histoire ou Métier d'historien*, édition utilisée : 1997, Paris, Armand Colin.
Blondel Christine (1993), *Histoire de l'électricité*, Paris, Pocket.
Bonneuil Christophe et Pestre Dominique (2015), « Le siècle des technosciences (depuis 1914) », in Christophe Bonneuil et Dominique Pestre (éd.), *Histoire des sciences et des savoirs. Tome 3. Le siècle des technosciences (depuis 1914)*, Paris, Éditions du Seuil, p. 10-24.
Bonte Pierre et Izard Michel (2010), « Agriculture », in Pierre Bonte et Michel Izard (éd.), *Dictionnaire de l'ethnologie et de l'anthropologie*, Paris, Presses universitaires de France, p. 33-35.
Boudia Soraya (2007), « Naissance, extinction et rebonds d'une controverse scientifique », *Société d'études soréliennes*, n° 1, p. 157-170.
Braudel Fernand (1949), « Préface », *La Méditerranée et le monde méditerranéen à l'époque de Philippe II*, 9e édition : 1990, Paris, Armand Colin, p. 11-24.
— (1985), *La Dynamique du capitalisme*, Paris, Flammarion.
Burguière André (1971), « Histoire et structure », *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*, t. 26, n° 3-4, p. 1-7.
Camps Gabriel (1982), *Introduction à la préhistoire. À la recherche du paradis perdu*, édition utilisée : 1994, Paris, Librairie académique Perrin.
Cape Emily P. (1922), *Lester F. Ward : a personal sketch*, New York, G. P. Putnam's Sons.
Chang Hasok (2012), *Is H2O water? Evidence, realism and pluralism*, Dordrecht, Springer.
Chareix Fabien (2013), « Schème », in Michel Blay (éd.), *Dictionnaire des concepts philosophiques*, Paris, Larousse et CNRS éditions, p. 734.
Clastres Pierre (1975), « Préface », in Sahlins Marshall, *Âge de pierre, âge d'abondance. L'économie des sociétés primitives*, trad. par Tina Jolas, édition utilisée : 2017, Paris, Gallimard, p. 11-35.

Clecio Mocellin Ronei (2019), *Philosophie de la chimie dans l'enseignement : discussions possibles et dialogues de sourds*, Conférence 8 octobre 2019, Université de Nantes.

Collins Harry M. (1985), *Changing Order. Replication and Induction in Scientific Practice*, édition utilisée : 1992, Chicago, The University of Chicago Press.

Courtecuisse Claire (2012), « Les professeurs de la faculté de droit de Grenoble face aux enjeux économiques nouveaux (1870-1919) », in Jean-Christophe Gaven et Frédéric Audren (éd.), *Les Facultés de droit de province aux* XIX^e^ *et* XX^e^ *siècles. Tome 3 : Les conquêtes universitaires*, Toulouse, Presses de l'université de Toulouse 1 Capitole, p. 75-99.

Dagognet François (1989), *Éloge de l'objet. Pour une philosophie de la marchandise*, Paris, Vrin.

Degryse Lucas (2004), « L'auto-destruction comme essence de l'humain », *Le Philosophoire*, t. 23, n° 2, p. 116-125.

Dethan Georges (1984), « Le quai d'Orsay de 1914 à 1939 », *Opinion publique et politique extérieure en Europe, t. II, 1915-1940. Actes du Colloque de Rome du 16 au 20 février 1981, Rome, École française de Rome*, p. 157-163.

Dockès Pierre et Rosier Bernard (1991), « Histoire "raisonnée" et économie historique », *Revue économique*, t. 42, n° 2, p. 181-208. Économie et histoire : Nouvelles approches.

Durkheim Émile (1894), *Les règles de la méthode sociologique*, édition utilisée : 1967, Paris, Presses universitaire de France.

Dye Thomas R. (1969), *Understanding Public Policy*, édition utilisée : 12^e^, 2006, Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall.

Elias Norbert et Dunning Eric (1994), *Sport et civilisation. La violence maîtrisée*, Paris, Fayard.

Elsberg Marc (2012), *Black-Out. Demain, il sera trop tard*, édition utilisée : 2016, Paris, Le Livre de Poche.

Elster Jon (1978), *Logic and Society*, New York, Wiley.

Etzkowitz Henry et Leydesdorff Loet (1997), *Universities and the Global Knowledge Economy. A Triple Helix of University-Industry- Government Relations*, Londres, Pinter.

Evrard Aurélien, Gourgues Guillaume et Ribémont Thomas (2019), « Acteurs », in Laurie Boussaguet, Sophie Jacquot et Pauline Ravinet (éd.), *Dictionnaire des politiques publiques*, 5e, Références, Paris, Presses de Sciences Po, p. 29-36.

Fabiani Jean-Louis (2007), « La généralisation dans les sciences historiques. Obstacle épistémologique ou ambition légitime ? », *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, t. 62, n° 1, p. 9-28.

Finlay Barbara (1999), « Lester Frank Ward as a Sociologist of Gender : A New Look at His Sociological Work », *Gender and Society*, t. 13, n° 2, p. 251-265.

Foucault Michel (1969), *L'Archéologie du savoir*, édition utilisée : 1996, Paris, Gallimard.

— (1976), *Histoire de la sexualité, 1. La Volonté de savoir*, Paris, Gallimard.

Fressoz Jean-Baptiste, Graber Frédéric, Locher Fabien et Quenet Grégory (2014), *Introduction à l'histoire environnementale*, Paris, La Découverte.

Frosini Fabio (2016), « De la mobilisation au contrôle. Les formes de l'hégémonie dans les "Cahiers de prison" de Gramsci », *Mélanges de l'École française de Rome - Italie et Méditerranée modernes et contemporaines*, t. 128, n° 2, p. 403-412.

Frost Robert L. (1991), *Alternating Currents. Nationalized Power in France, 1946-1970*, Ithaca et Londres, Cornell University Press.

Furet François (1982), *L'atelier de l'histoire*, Paris, Flammarion.

Galaty John et Leavitt John (2010), « Culture », in Pierre Bonte et Michel Izard (éd.), *Dictionnaire de l'ethnologie et de l'anthropologie*, Paris, Presses universitaires de France, p. 190-196.

Galeano Eduardo (1971), *Les veines ouvertes de l'Amérique latine : Cinq siècles de pillage d'un continent*, édition utilisée : 2001, Babelio. trad. de Claude Couffon.

Galey Jean-Claude et Lenclud Gérard (2010), « Émile Durkheim », in Pierre Bonte et Michel Izard (éd.), *Dictionnaire de l'ethnologie et de l'anthropologie*, Paris, Presses universitaires de France, p. 206-209.

Giddens Anthony (1990), *Les conséquences de la modernité*, édition utilisée : 1994, Paris, L'Harmattan.

Gillispie Charles Coulston et Pisano Raffaele (2013), *Lazare and Sadi Carnot. A Scientific and Filial Relationship*, Dordrecht, Springer.

Gras Alain (1979), *Sociologie des ruptures. Les pièges du temps en sciences sociales*, Paris, Presses universitaires de France.

— (2015), *Oil. Petite Anthropologie de l'or noir*, Éditions B2.

Guattari Félix (1987), *Les Trois Écologies*, Paris, Galilée.

Guy Jean-Michel (2000), *La culture cinématographique des Français*, Paris, Ministère de la Culture.

Halbwachs Maurice (1925), *Les cadres sociaux de la mémoire*, Paris, Félix Alcan.

Hardy Thomas (1888), « The Withered Arm », *Short Stories from the XIXth Century*, édition utilisée : 2000, Ware, UK, Wordsworth Classics, p. 14-39.

Hartog François (2003), *Régimes d'historicité. Présentisme et expériences du temps*, édition utilisée : 2012, Paris, Seuil.

— (2013), *Croire en l'histoire*, Paris, Flammarion.

Henriet Patrick (éd.) (2018), *L'École pratique des hautes études. Invention, érudition, innovation, de 1868 à nos jours*, Paris, France, Somogy, Éditions d'art.

Hiebert Erwin N. (1966), « The Uses and Abuses of Thermodynamics in Religion », *Daedalus*, t. 95, n° 4, p. 1046-1080.

Hubert Annie (2010), « Alimentation », in Pierre Bonte et Michel Izard (éd.), *Dictionnaire de l'ethnologie et de l'anthropologie*, Paris, Presses universitaires de France, p. 750-751.

Jarrige François (2012), « Discontinue et fragmentée ? Un état des lieux de l'histoire sociale de la France contemporaine », *Histoire, Économie et Société*, t. 31, n° 2, p. 45-59.

Jeanneney Jean-Noël (1984), « Préface », in Kuisel Richard F., *Le capitalisme et l'État en France. Modernisation et dirigisme au XXe siècle*, trad. par André Charpentier, Paris, Gallimard, p. 7-15.

Joliet Fabienne (2020), « Wilderness », in Cynorhodon (éd.), *Dictionnaire critique de l'anthropocène*, Paris, CNRS éditions, p. 823-826.

Kafka Franz (1926), *Le Château*, édition utilisée : 1965, Paris, Gallimard.

Kant Emmanuel (1787), *Critique de la raison pure*, édition utilisée : 1980, Gallimard.

Koselleck Reinhart (1997), *L'expérience de l'histoire*, Seuil, Paris, Gallimard.

— (2000), « Les ressorts du passé », *Espaces Temps*, t. 74-75, n° Transmettre aujourd'hui. Retour vers le futur, p. 144-159.

Kragh Helge (2000), « Confusion and Controversy : Nineteenth-Century Theories of the Voltaic Pile », in F. Bevilacqua et L. Fregonese (éd.), *Nuova Voltiana : Studies on Volta and his Times*, t. 1, Pavia et Milan, Hoepli, p. 133-157.

Krige John (2006), *American Hegemony and the Postwar Reconstruction of Science in Europe*, Boston, MA, The MIT Press.

Kuhn Thomas Samuel (1962), *La structure des révolutions scientifiques*, édition utilisée : 2008, Flammarion.
— (1975), « Tradition mathématique et tradition expérimentale dans le développement de la physique », *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*, t. 30, n° 5, p. 975-998.
Kuisel Richard F. (1981), *Capitalism and the State in Modern France : Renovation and Economic Management in the Twentieth Century*, trad. par André Charpentier, Le capitalisme et l'État en France. Modernisation et dirigisme au xx^e siècle, Paris, Gallimard, 1984., New York, Cambridge University Press.
Lakoff George (1979), « The Contemporary Theory of Metaphor », in Andrew Ortony (éd.), *Metaphor and Thought*, édition utilisée : 1993, Cambridge (GB), Cambridge University Press, p. 202-251.
Lakoff George et Johnson Mark (1980), *Metaphors We Live By*, Chicago, University of Chicago Press.
Latouche Serge (1989), *L'occidentalisation du monde. Essai sur la signification, la portée et les limites de l'uniformisation planétaire*, édition utilisée : 2005, Paris, La Découverte.
Latour Bruno (1989), *La science en action. Introduction à la sociologie des sciences*, Paris, La Découverte.
— (1999), *Politiques de la nature*, Paris, La Découverte.
— (2001), *L'espoir de Pandore. Pour une version réaliste de l'activité scientifique*, Paris, La Découverte.
Lefort Isabelle (2020), « Naturalisme », in Cynorhodon (éd.), *Dictionnaire critique de l'anthropocène*, Paris, CNRS éditions, p. 569-571.
Lévi-Strauss Claude (1958), *Anthropologie structurale*, édition utilisée : 2012, Paris, Plon.
Limousin Christian et Poirier Jacques (éd.) (2015), La Part Maudite *de Georges Bataille. La dépense et l'excès*, Paris, Classiques Garnier.
Lyotard Jean-François (1979), *La condition postmoderne. Rapport sur le savoir*, Paris, Les Éditions de minuit.
Macherey Pierre (2011), *De l'utopie !*, édition utilisée : 2019, Cherbourg, De l'incidence éditeur.
Marcuse Herbert (1964), *L'Homme unidimensionnel. Essai sur l'idéologie de la société industrielle avancée*, édition utilisée : 1968, Paris, Éditions de Minuit.
Martinez-Alier Juan (1992), « Valeur économique. Valeur écologique », *Revue d'écologie politique*, n° 1.
Mathiot Pierre (2019), « Élites », in Laurie Boussaguet, Sophie Jacquot et Pauline Ravinet (éd.), *Dictionnaire des politiques publiques*, 5e, Références, Paris, Presses de Sciences Po, p. 221-226.
Mauss Marcel (1924), « Essai sur le don. Forme et raison de l'échange dans les sociétés primitives », *L'Année sociologique*, p. 30-186.
Mény Yves et Thoenig Jean-Claude (1989), *Politiques publiques*, Paris, Presses universitaires de France.
Merchant Carolyn (2003), « Shades of Darkness : Race and Environmental History », *Environmental History*, t. 8, n° 3, p. 380-394.
Mong-Hy Cédric (2012), *Bataille cosmique. Du système de la nature à la nature de la culture*, Édition Lignes.
— (2015), « Vers la thermodynamique de l'anthropos. Georges Bataille, Georges Ambrosino et les naissances du paradigme énergétique », in Christian Limousin et Jacques Poirier (éd.), *La Part Maudite de Georges Bataille. La dépense et l'excès*, Paris, Classiques Garnier, p. 337-351.
Muller Pierre (2018), *Les politiques publiques*, 12e, Que sais-je ?, Paris, Presses universitaires de France.
Nizet Jean (2007), *La sociologie de Anthony Giddens*, Repères, Paris, La Découverte.
Ost François (1993), « Le juste milieu. Pour une approche dialectique du rapport homme-nature », in Philippe Gérard, François Ost et Michel Van de Kerchove (éd.), *Images et usages de la nature en droit*, Bruxelles, Presses de l'université Saint-Louis, p. 13-73.
— (1995), *La nature hors la loi. L'écologie à l'épreuve du droit*, Textes à l'appui, Paris, La Découverte.

Ottaviani Didier (2014), « Foucault - Deleuze : de la discipline au contrôle », in Emmanuel Da Silva (éd.), *Lectures de Michel Foucault*, t. 2. Foucault et la philosophie, Lyon, ENS édition, p. 59-73.

Passeron Jean-Claude (1991), *Le raisonnement sociologique*, édition utilisée : 2006, Paris, Albin Michel.

Passet René (1990), « Une économie respectueuse de la biosphère », *La planète mise à sac. Manière de voir*, t. 8, n° 5.

— (2010), *Les grandes représentations du monde et de l'économie à travers l'histoire. De l'univers magique au tourbillon créateur*, Arles, Actes Sud.

Pera Marcello (1992), *The Ambiguous Frog : The Galvani-Volta Controversy on Animal Electricity*, Princeton, NJ, Princeton University Press.

Pessis Céline, Topçu Sezin et Bonneuil Christophe (éd.) (2013), « Introduction. Pour en finir avec les Trente Glorieuses », *Une autre histoire des « Trente Glorieuses ». Modernisation, contestations et pollutions dans la France d'après-guerre*, Paris, La Découverte, p. 5-31.

Pestre Dominique (2003), *Science, argent et politique. Un essai d'interprétation*, Paris, INRA.

Petit Annie (1990), « La Science en procès : Edison et "L'Eve future" », *Romantisme*, n° 69, p. 61-77.

Poivet Émile (2020), « Comment la SF est récupérée par les multinationales et l'armée », *Le réveil des imaginaires*, p. 41-45. Numéro thématique du magazine *Socialter*.

Porter Michael E. (1985), *Competitive Advantage : Creating and Sustaining Superior Performance*, New York, Free Press.

Rancière Jacques (1998), *Aux bords du politique*, Paris, Gallimard.

Rey Alain (éd.) (2012), *Dictionnaire historique de la langue française*, Paris, Le Robert.

Robinson Kim Stanley (1993), *Mars la Rouge*, édition utilisée : 1994, Paris, Presses de la Cité. traduit de l'anglais (États-Unis) par Michel Demuth et Dominique Haas.

Rosa Harmut (2005), *Accélération. Une critique sociale du temps*, édition utilisée : 2010, Paris, La Découverte.

Roudinesco Élisabeth et Plon Michel (2011), *Dictionnaire de la psychanalyse*, Paris, Fayard.

Sahlins Marshall (1972), *Âge de pierre, âge d'abondance. L'économie des sociétés primitives*, édition utilisée : 2017, Paris, Gallimard.

Santiago Myrna (2013), « Extracting histories : Mining, workers, and environment », *Rachel Carson Center Perspectives*, t. 7, p. 81-88. New Environmental Histories of Latin America and the Caribbean.

Schut Pierre-Olaf et Delalandre Matthieu (2016), « Un arbre, une forêt, un paysage. La contribution du Touring Club de France en faveur du reboisement », *Natures Sciences Sociétés*, t. 24, n° 3, p. 230-241.

Scott James (2017), *Homo domesticus : une histoire profonde des premiers États*, édition utilisée : 2019, Paris, La Découverte.

Serandour Audrey (2020a), « Le "triangle du lithium" à l'heure globale : marges et intégrations territoriales (Argentine, Bolivie, Chili) », thèse de doctorat en géographie, Université Panthéon-Sorbonne - Paris I, Paris.

— (2020b), « Le "triangle du lithium" existe-t-il ? Géographie politique d'une régionalisation andine (Argentine, Bolivie, Chili) », *Belgeo*, n° 4, p. 1-17.

Serres Michel (1989), « Préface », in Michel Serres (éd.), *Éléments d'histoire des sciences*, Paris, Bordas.

Shelley Mary W. (1818), *Frankenstein ou le Prométhée moderne*, édition utilisée : 1994, Paris, J'ai lu.

Snow Charles Percy (1959), *The Two Cultures*, Cambridge, Cambridge University Press.

Solla Price Derek de (1964), *Little Science, Big Science... and Beyond*, édition utilisée : 1986, New York, Columbia University Press.

Sōseki Natsume (1908), *Le mineur*, édition utilisée : 2020, Paris, Cambourakis. traduit du japonais par Hélène Morita.

Stengers Isabelle et Bensaude-Vincent Bernadette (2003), *100 mots pour commencer à penser la science*, Les Empêcheurs de penser en rond.

Stern Bernhard J. (1933), « The Letters of Albion W. Small to Lester F. Ward », *Social Forces*, t. 12, n° 2, p. 163-173.

Stiglitz Joseph (1999), *Principes d'économie moderne*, 2e édition : 2004, Louvain-la-Neuve, De Boeck.

Taylor Peter J. (1996), « What's Modern about the Modern World-System ? Introducing Ordinary Modernity through World Hegemony », *Review of International Political Economy*, t. 3, n° 2, p. 260-286.

Thoreau Henry David (1854), *Walden ou la vie dans les bois*, édition utilisée : 2020, Paris, Albin Michel.

Touraine Alain (1978), *La voix et le regard*, Paris, Seuil.

Verne Jules (1875), *L'Île mystérieuse*, Paris, J. Hetzel et C^ie^. Illustration de 154 dessins par Férat ; gravés par Barbant.

Veyne Paul (1971), *Comment on écrit l'histoire. Essai d'épistémologie*, édition utilisée : 2007, Paris, Seuil.

Vickers John et Yarrow George (1991), « Economic Perspectives on Privatization », *Journal of Economic Perspectives*, t. 5, n° 2, p. 111-132.

Wagner Anne-Catherine (2010), « Habitus », in Serge Paugam (éd.), *Les 100 mots de la sociologie*, Paris, Presses universitaires de France, p. 69-70.

Wallerstein Immanuel (1974), *The Modern World-System*, New York, Academic Press.

— (2005), « The Discovery of World-Economy », *Review (Fernand Braudel Center)*, t. 28, n° 4, p. 351-364.

Ward Lester F. (1883), *Dynamic sociology, or Applied social science, as based upon statical sociology and the less complex sciences*, New York, D. Appleton et Company.

— (1903), *Pure Sociology : A Treatise on the Origin and Spontaneous Development of Society*, New York, Macmillan.

Weber Max (1905), *L'Éthique protestante et l'esprit du capitalisme*, 2e édition : 1967, Paris, Plon.

— (1919), « Le métier et la vocation de savant », *Le savant et le politique*, édition utilisée : 1963, Paris, Union générale d'éditions.

Wise George (1980), « A New Role for Professional Scientists in Industry : Industrial Research at General Electric, 1900-1916 », *Technology and Culture*, t. 21, n° 3, p. 408-429.

Woolf Virginia (1925), *Mrs Dalloway*, trad. par Pascale Michon, édition utilisée : 1993, Paris, Livre de Poche.

Zilsel Edgar (1941), « The Origins of William Gilbert's Scientific Method », *Journal of the History of Ideas*, t. 2, n° 1, p. 1-32.

Zinn Howard (2002), *Une histoire populaire des États-Unis de 1492 à nos jours*, Marseille, Agone.

SEPT
ÉCOLE DOCTORALE

Titre : Le stockage de l'énergie (1850-2050). Problème de techniciens, concept de technologues, désir de technocrates

Mots clés : énergie, histoire contemporaine, modernité occidentale, régime technicien, technologie, sciences humaines et sociales.

Résumé : L'énergie est la colonne vertébrale du capitalisme industriel. La gestion des flux d'approvisionnement et des réserves fossiles structure profondément les économies occidentales depuis le XIX^e^ siècle. Elle fait du stockage de l'énergie un problème spécifique et central de la modernité à travers la construction des temporalités et des espaces contemporains. Cet essai de sciences humaines et sociales analyse de multiples aspects de la régulation sociale, culturelle et écologique en jeu dans le stockage de l'énergie en Europe de l'Ouest et en Amérique du Nord sur la période 1850-2020. Il examine la mise en place d'infrastructures matérielles et de contraintes administratives et la mise en forme de désirs collectifs et d'imaginaires énergétiques et, ce faisant, documente l'emprise de la technique sur les sociétés contemporaines. L'exploration d'un tel *régime technicien* s'appuie sur la mise en dialogue interdisciplinaire et contradictoire de professionnels de la technique, techniciens, technocrates et technologues. En montrant combien les sociétés et les mondes de demain (2020-2050) sont déjà en partie fabriqués et organisés par les milieux techniciens et technocratiques d'hier et d'aujourd'hui, elle suggère que la technologie comme réflexion sur les hommes et les techniques en société est un enjeu politique fondamental dans la perspective d'une réappropriation populaire du temps présent.

Title: The Storage of Energy (1850-2050). Problem of Technicians, Concept of Technologists, Desire of Technocrats

Keywords: energy, modern history, Western modernity, technical regime, technology, humanities and social sciences.

Abstract: Energy is the backbone of industrial capitalism. The management of supply flows and fossil reserves has profoundly structured Western economies since the 19th century. It makes energy storage a specific and central problem of modernity through the construction of contemporary times and spaces. This essay of humanities and social sciences analyzes multiple aspects of the social, cultural and ecological regulation at stake in energy storage in Western Europe and North America over the period 1850-2020. It examines the establishment of material infrastructures and administrative constraints and the shaping of collective desires and images of energy and, in so doing, documents the hold of technology on contemporary societies. The exploration of such a *technical regime* relies on the interdisciplinary and contradictory dialogue of professionals of the technique, technicians, technocrats and technologists. By showing how much the societies of tomorrow (2020-2050) are already partly manufactured and organized by the technical and technocratic worlds of yesterday and today, it suggests that technology as a reflection on people and techniques in society is a fundamental political stake in the perspective of a popular reappropriation of the present time.