



HAL
open science

Fours et maisons solaires de Mont-Louis-Odeillo

Pierre Teissier

► **To cite this version:**

Pierre Teissier. Fours et maisons solaires de Mont-Louis-Odeillo. Guy Boistel, Stéphane Le Gars. Dans le champ solaire. Cartographie d'un objet scientifique, Hermann, pp.181-219, 2015. halshs-01130485

HAL Id: halshs-01130485

<https://shs.hal.science/halshs-01130485v1>

Submitted on 11 Mar 2015

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.

Pour citer ce chapitre d'ouvrage : Pierre Teissier, « Fours et maisons solaires de Mont-Louis-Odeillo. Interstices, intersciences et internationalismes de la recherche contemporaine. », dans G. Boistel et S. Le Gars (dir.), *Dans le champ solaire. Cartographie d'un objet scientifique*, Paris, Hermann, 2015, p. 181-219.

Au milieu du XX^e siècle, la deuxième guerre mondiale pose de manière dramatique la question de l'approvisionnement pour les populations des pays acteurs et théâtres des affrontements. La pénurie internationale touche, entre autre, l'énergie. L'immédiat après-guerre fait émerger plusieurs champs de recherche et développement d'énergies nouvelles utilisant l'atome, le vent, l'eau des rivières, des sous-sols et des mers ainsi que le soleil. Le champ du solaire se structure au croisement de logiques d'émancipation des populations du Sud vis-à-vis de l'impérialisme du Nord et de logiques d'affrontement de guerre froide entre les États du Nord, notamment les États-Unis et l'Union soviétique. Source de paradoxe géopolitique, l'astre solaire apparaît comme un objet fragmenté au milieu du XX^e siècle, dont l'étude et l'utilisation sont entreprises par de multiples communautés professionnelles : agronomes, architectes, astronomes, biologistes, chimistes, géologues, médecins, météorologues, physiciens et urbanistes. À l'éclatement des communautés d'étude répond une cohérence instrumentale.

Le Laboratoire de l'énergie solaire (LES) dirigé par Félix Trombe au Centre national de la recherche scientifique (CNRS) est emblématique, pour la France, de la dynamique instrumentale qui s'établit dans les échanges scientifiques et techniques Est-Ouest et Nord-Sud. Le LES émerge au sortir de la guerre en chimie minérale à la croisée des traditions des hautes températures et des terres rares (§I). Il élargit ensuite ses thèmes de recherche grâce à une série d'acculturations en optique, thermique, météorologie, électronique, ingénierie des matériaux, architecture et agronomie. D'abord artisanal, le programme solaire profite de l'essor des Trente Glorieuses et de l'expansion universitaire pour développer une logique instrumentale à l'échelle semi-industrielle et un ensemble de maisons solaires dans la vallée d'Odeillo dans les Pyrénées orientales (§II). Ceci coïncide avec une « décennie solaire » au niveau international (1948-1958) durant laquelle l'énergie solaire porte un ensemble cohérent d'espairs techniques pour résoudre les difficultés des civilisations présentes et futures, c'est-à-dire une « utopie solaire ». Avec la politique de la « grandeur » de la France et des grands projets technico-économiques de la présidence de Charles de Gaulle (1958-1969), le LES passe à l'échelle industrielle de construction d'un four solaire géant à Odeillo (§III). Mais, ce programme solaire industriel ne s'impose pas durablement face aux aléas énergétiques et économiques des décennies 1970 et 1980.

Suivre la trajectoire du LES est intéressant au moins pour trois raisons. Premièrement, le LES mène une recherche originale en instrumentation solaire et met successivement en œuvre trois régimes de production de savoir et savoir-faire : artisanal au début, le régime est interstitiel, quasiment clandestin dans les locaux des astronomes ; il institue par la suite un projet « solaire passif » qui cherche à embrasser la totalité des utilisations solaires pour la climatisation thermique et la production de très hautes températures ; caractérisé par une forte composante industrielle enfin, le régime est accaparé par le prototype géant de four solaire pour la science des matériaux. Deuxièmement, le LES est au cœur du champ international de recherche et développement de l'énergie solaire. Étudier sa trajectoire permet de suivre les relations internationales entre Nord et Sud, Est et Ouest, des années 1940 aux années 1980, notamment à travers des alliances entre les chercheurs avec des institutions militaires, coloniales et de haute technologie (aéronautique, nucléaire, etc.). Le champ solaire est alors caractérisé par une triple dimension transversale : interstitielle par rapport aux institutions, interdisciplinaire par rapport aux sciences reconnues et internationale par rapport aux acteurs engagés. Troisièmement, des recherches comme celles de Mont-Louis-Odeillo ont contribué à façonner le soleil selon une épistémologie inédite : objet en partage entre plusieurs communautés savantes et industrielles ; objet utilisable qui joue le rôle de fournisseur de lumière pouvant être artificiellement convertie en chaleur ; objet-frontière enfin, qui fait fondre aux endroits les plus ductiles l'espace social et redessine le paysage économique et culturel autour du soleil pour résoudre les problèmes énergétiques.

I- UN LEVER DE SOLEIL ENTRE LES TRADITIONS DE CHIMIE ET DES HAUTES TEMPÉRATURES

I.1 Le régime transversal de production des hautes températures des années 1920

L'étude des minéraux et métaux a été renouvelée au XIX^e siècle grâce à de nouvelles techniques produisant des températures au-delà de 2000°C : le chalumeau oxyhydrique de Henri Sainte-Claire Deville (1818-1881) dans les années 1850 puis le four électrique de Henri Moissan (1852-1907) dans les années 1880. Ces techniques permettent de tester la résistance thermique des solides réfractaires (tungstène, magnésite, chaux, alumine) et de fabriquer des cristaux en faisant fondre (puis refroidir) des poudres inorganiques¹. Tandis que Moissan publie *Le four électrique* en 1897, un chimiste de la même génération, Henry Le Chatelier (1850-1936), fait le point sur la mesure des températures élevées en 1900 avec son disciple Octave Boudouard (1872-1923)². Esprit éclectique, théoricien, expérimentateur

¹ Pour plus de détails, voir TEISSIER Pierre, *Une histoire de la chimie du solide. Synthèses, formes, identités*, Paris, Hermann, 2014, §1.

² LETTÉ Michel, *Henry Le Chatelier (1850-1936) ou la science appliquée à l'industrie*, Rennes, Presses universitaires de Rennes, 2004, p. 183-189.

et concepteur d'instruments, Le Chatelier s'inspire de l'approche de l'ingénieur américain, Frederick Taylor (1856-1915), pour défendre la « science industrielle ». Par leur approche, Moissan et Le Chatelier hybrident savoirs universitaires et problèmes industriels. De telles interactions entre laboratoire et usine sont rares à l'époque en France. La première guerre mondiale montre l'importance des applications de la science à travers la Direction des inventions de la Défense nationale, initiée en 1915 par Paul Painlevé (1863-1933). L'Inspection des études et expériences chimiques, sous la responsabilité du chimiste organicien Charles Moureu (1863-1929), développe des gaz de combat. Les chimistes minéralistes participent activement à l'effort de guerre : Paul Lebeau (1868-1959) et Georges Urbain (1872-1938) à la Sous-commission des produits agressifs ; Louis Hackspill (1880-1963) à l'Établissement central du matériel chimique.

Après-guerre, l'intervention publique reste faible pour croiser recherches universitaires et industrielles. Mais, en 1921, l'un des héritiers de la famille Rothschild, Edmond (1845-1934), fonde une institution pluridisciplinaire d'aide aux recherches physiques et chimiques en lien avec les applications industrielles. La Fondation Edmond de Rothschild pour le développement de la recherche scientifique se dote d'un comité scientifique et d'un conseil d'administration dominés par les « mandarins »³ de l'université parisienne, avec une majorité de chimistes⁴. Elle soutient savants et laboratoires « dans la voie des applications de la Science au développement des forces économiques de la Nation ». Un Comité Rothschild des hautes températures est créé dont Lebeau, héritier de Moissan, prend la direction. La première tâche que fixe Lebeau au Comité est la rédaction d'un ouvrage collectif qui paraît en 1924 sous le titre *Fours électriques et chimie*. Lebeau a sollicité deux proches collaborateurs, Augustin Damiens et Marius Picon, un ancien élève de Moissan, Pierre Jolibois (1884-1954), et trois physiciens : Pierre Fleury (1894-1974), Gustave Ribaud (1884-1963) et Henri Weiss. L'ouvrage recense sept types de fours électriques : à résistance métallique, à résistance de carbone, à vide et sous pression, à induction, à arc, à étincelle et à gaz. Il aborde la question de la production et la mesure des hautes températures et souligne leur intérêt pour la détermination de constantes physiques des composés

³ Le concept de « mandarin » a été introduit, en référence aux hauts fonctionnaires de l'empire chinois, pour désigner les universitaires allemands du début du XX^e siècle par RINGER Fritz, *The decline of the German mandarins: the German academic community, 1890-1933*, Cambridge (Mass.), Harvard University Press, 1969, 528 p. Il désigne un savant cumulant positions institutionnelles, honneurs académiques et prestige scientifique dans la sphère universitaire, avec de possibles extensions vers les sphères industrielles, politiques ou culturelles.

⁴ Le comité scientifique, présidé par le doyen de la faculté des sciences de Paris (le mathématicien P. Appell), est composé de trois chimistes (A. Job, P. Lebeau, C. Moureu), d'un physicochimiste (J. Perrin) et d'un physicien (H. Abraham). Le conseil d'administration, plus fourni, est plus éclectique : quatre chimistes (A. Haller, H. Le Chatelier, C. Matignon, G. Urbain), un métallurgiste (G. Charpy), un minéralogiste (A. Lacroix), un physicien (P. Langevin) et un industriel (A. Rateau). D'après MAYER André et LEBEAU Paul, *Cérémonie en l'honneur du 25^e anniversaire de l'Institut de biologie physico-chimique : 2^e fondation Edmond de Rothschild pour le développement de la recherche scientifique*, Paris, Hermann, 1953, 29 p.

chimiques (tensions de vapeur, points d'ébullition, de fusion, de volatilisation, conductibilité thermique).

Le domaine des hautes températures s'apparente à un « régime transversal » de production de savoirs et savoir-faire⁵. Centré sur l'instrumentation, un tel régime se caractérise par trois éléments : 1°) le développement des possibilités « génériques » (par opposition à spécifiques) de l'instrument et son utilisation au-delà du milieu de conception ; 2°) un milieu de conception « interstitiel » où les acteurs se meuvent entre les institutions ; 3°) un champ d'action qui n'est pas limité par les « frontières » disciplinaires. Les hautes températures remplissent ces trois conditions. Les fours sont mis au point par des chercheurs et ingénieurs, qui circulent entre laboratoires et usines ; une fois optimisés, ils sont réutilisés par diverses communautés scientifiques (chimie, métallurgie, minéralogie, physique, thermique) et différents milieux industriels (aéronautique, céramique, réfractaire, verre), pour la fabrication et la caractérisation de substances inorganiques (solides et gaz). Le champ des hautes températures suscite la formation d'une culture interdisciplinaire de recherche, soutenue par l'industrie des matériaux. Les fours permettent la synthèse par voie sèche à haute température de solides inorganiques mieux cristallisés et plus purs que les précipités obtenus par voie humide en solution aqueuse. Outre Lebeau, deux autres chefs d'école conduisent leur programme chimique grâce aux hautes températures : Georges Chaudron (1891-1976)⁶ sur les métaux et oxydes d'éléments de transition ; Urbain sur les éléments des terres rares.

I.2 Le programme interdisciplinaire de Georges Urbain sur les terres rares

Les terres rares forment une famille spécifique peu étudiée au début du XX^e siècle parce qu'elles sont difficiles à extraire des minerais naturels. Leur proximité chimique les rend délicates à isoler. Leurs propriétés optiques en revanche permettent une caractérisation par spectroscopie, mise au point par Gustav Kirchhoff (1824-1887) et Robert Bunsen (1811-1899) vers 1860⁷. Urbain introduit deux innovations majeures dans l'étude des terres rares. D'abord, il transpose les techniques de purification de la chimie organique grâce à son directeur de thèse, Charles Friedel (1832-1899)⁸. Ensuite, il met au point une caractérisation quantitative des terres rares par mesure de leur susceptibilité magnétique grâce à une collaboration avec ses amis physiciens, Pierre Curie (1859-1906) et Paul Langevin (1872-1946).

⁵SHINN Terry et RAGOUET Pascal, *Controverses sur la science. Pour une sociologie transversaliste des activités scientifiques*, Paris, Raisons d'agir, 2006, §3, en particulier p. 171-172.

⁶CORNET Michel, « Histoire du centre d'études de chimie métallurgique », *Cahiers pour l'histoire du CNRS*, vol. 5, 1990, p. 59-109.

⁷LE GARS Stéphane, *Une histoire de la lumière. La spectroscopie*, Paris, Vuibert, 2012.

⁸CLARO-GOMÈS José Manuel, *Georges Urbain (1872-1938) : chimie et philosophie*, Thèse de philosophie, Université de Paris 10, 2003, 267 p.

Son travail interdisciplinaire entre chimie minérale, chimie organique et physique expérimentale permet l'identification d'une nouvelle terre rare en 1907 : le lutécium. La focalisation sur une famille d'éléments – les terres rares – est caractéristique de la chimie minérale française du premier XX^e siècle. Il est en effet d'usage que les minéralistes organisent leurs recherches autour d'un élément chimique ou d'une famille d'éléments : Hackspill sur les alcalins et alcalino-terreux, Jolibois sur les silicates, Chaudron sur le fer, Picon sur les sulfures, etc. L'ordre épistémique du tableau de Mendeleïev a induit un ordre social dans la chimie française du début du siècle. Les résultats d'Urbain le font connaître à l'étranger et il devient un mandarin parisien : chaire de chimie minérale (1908-1928) puis de chimie générale (1928-1938) de l'université de Paris, académicien en 1921 et président de la Société chimique de France en 1926.

Nommé directeur de l'Institut de chimie de Paris en 1928, Urbain y établit un programme de recherche en chimie et métallurgie des terres rares avec l'aide de Maurice Billy, ancien collaborateur de Moissan. Il équipe ce Laboratoire de chimie minérale avec des fours électriques car les hautes températures sont indispensables pour la synthèse et la purification des terres rares. Les doctorants sont recrutés parmi les diplômés de l'Institut de chimie, notamment Félix Trombe (1906-1985) et Marc Foëx (1910-1991). Trombe mène une thèse en métallurgie des terres rares (1930-1936) qui comporte deux aspects : la préparation de métaux purs (cérium en 1931, lanthane en 1932, néodyme en 1933, samarium en 1934, gadolinium en 1935) ; leur caractérisation magnétique à l'Institut de physique de Pierre Weiss (1865-1940) à Strasbourg. Il révèle ainsi le ferromagnétisme du gadolinium et du dysprosium, qui deviennent les premiers éléments à exhiber une telle propriété en-dehors de la famille du fer, ce qui conduira au stockage magnétique dans les années 1950⁹. Foëx, de son côté, soutient une thèse en 1939 en physico-chimie des verres. Les deux condisciples sont remarqués pour leurs excellentes aptitudes expérimentales¹⁰. Alors, les terres rares sont devenus des matériaux industriels pour leurs propriétés incandescentes dans les pierres à briquet et manchons de gaz et leurs propriétés optiques dans les verres et porcelaines¹¹. C'est avec l'idée des applications industrielles en tête qu'Urbain fonde, en mars 1937, à Thiais, le Laboratoire des gros traitements chimiques pour produire à l'échelle quasi-industrielle des métaux de terres rares. Mais il décède brutalement en novembre 1938, avant d'avoir eu le temps d'organiser le laboratoire. Hackspill succède à Urbain à la direction de l'Institut de chimie de Paris et du Laboratoire de chimie minérale. Trombe est vu comme « le seul qui soit actuellement qualifié pour poursuivre les travaux de son Maître concernant les terres rares et l'élaboration des métaux

⁹ CARO Paul, *Entretien* avec P. TEISSIER, Paris, 2005, 28 p., p. 1-2.

¹⁰ Pochettes 1933, 1934, 1935-1936, *Dossier scientifique de Félix Trombe*, AN n°20070296, art. 528 ; Pochettes 1939-1940, 1948-1949, *Dossier scientifique de Marc Foëx*, AN n°20070296, art. 202.

¹¹ CARO Paul, *Entretien* avec B. BENSUADE-VINCENT et J. CLARO GOMES, Paris, juin 2002 : accessible au lien suivant : <https://sho.spip.espci.fr/spip.php?article56>

correspondants ». Mais, après la déclaration de guerre de la France à l'Allemagne en septembre 1939, la situation est incertaine et les chercheurs mobilisés.

I.3 Recherches de guerre et relances d'après-guerre, 1939-1946

Réserviste, Trombe est mobilisé le 2 septembre 1939 comme maréchal des logis au 22^e bataillon des ouvriers d'artillerie. Il passe trois mois à la poudrerie du Bouchet puis rejoint l'École militaire d'artillerie de Poitiers dont il sort aspirant fin avril 1940. Il participe à la bataille de France. Capturé le 20 juin, il est prisonnier en France (Marly) puis en Allemagne. Libéré en mars 1941, il passe plusieurs mois en convalescence chez ses parents à Ganties-les-Bains, ville thermale dont est originaire la famille Trombe en Haute-Garonne,¹² avant de rejoindre Paris où il retrouve son épouse et leur fille, Michèle, dans leur logement du Quartier latin. Désormais chargé de recherches du Centre national de la recherche scientifique (CNRS), Trombe reprend la direction du Laboratoire des hautes températures (LHT) de l'Institut de chimie de Paris fin 1941. Il y retrouve son camarade. Réformé, Foëx a participé à l'effort de guerre à l'Institut avec Georges Champetier (1905-1980) sur la nitration de la cellulose pour les explosifs. Les deux condisciples reprennent leurs travaux sur les terres rares. Ils convainquent Hackspill d'utiliser des crédits CNRS pour l'achat d'un four à haute fréquence pour la synthèse à haute température.

À la Libération, le CNRS prend deux décisions qui ont des conséquences pour Trombe et Foëx. La première est l'établissement d'un nouveau « Centre de recherches appliquées » à Meudon-Bellevue, au sud-ouest de Paris¹³. Le directoire du CNRS y crée un Laboratoire des terres rares (LTR) sous la direction de Trombe avec Foëx comme adjoint. Cette décision s'inscrit dans l'essor international des terres rares dû à la deuxième guerre mondiale. En effet, le *Projet Manhattan* de fabrication de bombes atomiques aux États-Unis a nécessité la mise au point de procédés industriels de séparation d'isotopes d'uranium. Ces méthodes, plus efficaces que les fastidieuses techniques d'Urbain, rendent plus facile l'obtention de terres rares et accroît leur importance en recherche. La seconde action est la création d'une trentaine de commissions CNRS d'études transdisciplinaires. Parmi elles, la Commission des hautes températures et des réfractaires est instituée dans le prolongement du Comité Rothschild des hautes températures. Le transfert du patronage privé au financement public étoffe le groupe d'universitaires et d'industriels d'entre-deux-guerres sans remettre en cause sa transversalité. Une mosaïque de chercheurs (chimie, cristallographie, électrochimie, ingénierie, métallurgie, minéralogie, physique des plasmas, thermodynamique) se rassemble autour d'un projet instrumental de haute

¹² DUPIN Jules, *Célébrités, personnalités marquantes et personnes pittoresques du canton d'Aspet (disparues)*, Tarbes, Société des études de Comminges, 1973, p. 367-371.

¹³ *Compte-rendu de l'activité du CNRS de septembre 1944 à octobre 1945*, Paris, CNRS, 1945, p. 17, AN n°990001, art. 64.

température. Dès 1945, Lebeau lance un projet éditorial ambitieux pour établir un nouvel état de l'art faisant suite aux *Fours électriques et chimie* de 1924 qui paraîtra en 1950 sous le titre *Les hautes températures et leurs utilisations en chimie*. Trombe, qui est secrétaire général de l'ouvrage, rédige un chapitre sur les fours solaires durant l'année 1946¹⁴. Ce travail bibliographique le pousse à lancer en parallèle un projet de production de haute température par concentration de l'énergie solaire, en marge de la physico-chimie des terres rares du LTR.

I.4 L'artisanat du soleil entre chimie, hautes températures et astronomie, 1946-1949

Trombe entreprend cette aventure avec Foëx et une doctorante du LTR, Charlotte Henry La Blanchetais. Avec peu de moyens, plusieurs collaborations et beaucoup d'ingéniosité, le trio forme le « Laboratoire solaire de Meudon ». Cette structure informelle est accueillie au début de l'année 1946 dans une dépendance de l'observatoire de Meudon grâce à l'appui du nouveau directeur de l'observatoire de Paris-Meudon, André Danjon (1890-1976)¹⁵. Trombe a trouvé dans la littérature la description d'un four solaire (*sun furnace*) utilisé en 1935 par le consultant américain Willi Conn pour fabriquer de la zircone (ZrO_2), une céramique très réfractaire¹⁶. Le four utilisé par Conn a été mis au point à Iéna, au début des années 1920, par Rudolf Straubel de la compagnie allemande Zeiss. Ce système optique composé de deux miroirs concentre la lumière solaire en une image focale de huit millimètres de diamètre : le premier miroir, plan et mobile, suit le mouvement de l'astre solaire et oriente sa lumière par réflexion vers le second miroir, parabolique et fixe, qui focalise la lumière sur la tache focale où la température dépasse 3000°C. Les chimistes font acheter par le CNRS au ministère des Armées deux miroirs de projecteurs de défense antiaérienne récupérés par les militaires français en Allemagne en 1945. Ces miroirs paraboliques ont un diamètre de 2 mètres et une distance focale de 85 centimètres. Contrairement au dispositif de Straubel et Conn, le miroir orienteur est supprimé et le miroir parabolique monté sur le support du projecteur qui permet de suivre manuellement la course du soleil (Figure 1, gauche). Ce montage présente l'inconvénient de concentrer les rayons au-dessus du miroir, ce qui empêche de traiter des solides dans un creuset. Aussi, un miroir plan en aluminium est

¹⁴ « En France, c'est sur l'initiative de la Commission des Hautes températures du CNRS, présidée par le professeur Lebeau, qu'une documentation sur la question fut établie. » TROMBE Félix, « Les installations de Mont-Louis et le four solaire de 1000 kW d'Odeillo-Font-Romeu », in CNRS (éd.), *Applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie*, Paris, CNRS, 1961, p. 87-127, p. 89.

¹⁵ TROMBE Félix, « Le grand four solaire de Mont-Louis », *L'Astronomie*, vol. 69, 1955, p. 45-60.

¹⁶ CONN Willi M., « The Crystal Modifications of Zirconia. A Clear, Fused Zirconia Produced in the Sun Furnace », *Transactions of the Electrochemical Society*, vol. 68, 1935, p. 574-580 ; et DUWEZ Paul, « The Solar Furnace », *Engineering and Science*, vol. 19, fév. 1956, p. 13-16.

interposé sur le trajet des rayons concentrés pour réfléchir la lumière vers le bas (Figure 1, droite). Cette pièce sur mesure, en aluminium aluminé de type Brytal de 45 centimètres de diamètre, a été « gracieusement » confectionnée par la Société de l'aluminium français¹⁷. Les chimistes bénéficient en outre de la participation amicale des astronomes du site de Meudon, sous la responsabilité de Lucien d'Azambuja (1884-1970), pour la mise au point des systèmes optiques et les questions de thermodynamique du rayonnement solaire.

En quelques mois à peine, le four solaire est opérationnel. C'est un système optique de fabrication artisanale qui concentre l'énergie solaire environ 50 mille fois, la lumière solaire réfléchiée par le miroir parabolique de 3 mètres carré de surface formant une tache focale d'une surface de 0,6 centimètre carré. Sa puissance thermique est de l'ordre de 2 à 3 kilowatts (kW) thermiques ; la température au cœur de la tache focale supérieure à 3200°C ; et jusqu'à 50 grammes de composés peuvent être traités dans un creuset de silice¹⁸. Introduits par Lebeau à la séance du 12 août 1946 de l'Académie des sciences, Trombe, Foëx et Henry La Blanchetais présentent le « Four solaire pour la réalisation de très hautes températures »¹⁹. Après avoir détaillé l'instrument, l'article expose son utilité pour produire des températures supérieures à 3000°C et fondre des réfractaires ayant des températures de fusion entre 1800° et 3000°C : oxydes métalliques dans l'air (ThO₂, MgO, ZrO₂, CeO₂, CaO, BeO, Cr₂O₃, La₂O₃, Al₂O₃, TiO₂) ; et métaux en atmosphère neutre (Co, Cr), c'est-à-dire un creuset fermé par une glace de silice transparente. Outre l'obtention de hautes températures sans dépense d'énergie, l'article souligne deux autres avantages du four solaire : la rapidité du procédé, moins de 10 secondes sont ainsi nécessaires pour fondre 30 grammes de fer ; et l'absence de pollution par le creuset car seule la matière contenue dans la tache focale est fondue. Ce dernier avantage est particulièrement intéressant pour le LTR car les composés des terres rares ont tendance à réagir avec le creuset²⁰. Ces premières expériences de l'été 1946 témoignent des promesses de l'énergie solaire pour la production de très hautes températures et la fusion de matériaux réfractaires avec de bonnes conditions de pureté et de vitesse.

Trombe, qualifié de *condottiere*, a de bonnes aptitudes au commandement et dirige simultanément trois laboratoires : LTR, LHT et le Laboratoire solaire de Meudon²¹. Malgré ces multiples activités et la position marginale du programme solaire, Trombe, Foëx et Henry La

¹⁷ TROMBE Félix, « Les fours solaires », in LEBEAU Paul (éd.), *Les hautes températures et leurs utilisations en chimie*, Paris, Masson, 1950, p. 158-197.

¹⁸ TROMBE Félix, « Les fours solaires », in LEBEAU Paul (éd.), *Les hautes températures et leurs utilisations en chimie*, Paris, Masson 1950, p. 158-197.

¹⁹ TROMBE Félix, FOËX Marc, HENRY LA BLANCHETAIS Charlotte, « Four solaire pour la réalisation de très hautes températures », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, vol. 223, 1946, p. 317-319.

²⁰ Pochette 1942-1943, « Activité scientifique de Félix Trombe », *Dossier scientifique de Félix Trombe*, AN n°20070296, art. 528.

Blanchetais publie six articles sur les fours solaires en trois ans, de 1946 à 1949, surtout aux *Comptes rendus de l'Académie des sciences*. Leurs recherches s'orientent suivant trois directions : l'instrumentation solaire ; le traitement et la caractérisation de solides réfractaires (zircone) ; la fabrication de produits chimiques (barreau d'alumine, oxyde d'azote). La Figure 2 représente un appareil mis au point à Meudon permettant de fabriquer, par fusion au four solaire, de longues tiges contrôlées de réfractaires grâce à une alimentation continue en réactifs²². Au début de l'expérience, le plan focal coïncide avec un creuset en silice (A), monté sur un support métallique (B), en rotation lente (C) entre un et dix tours par minute. À mesure que la vis d'Archimède (D) pousse les poudres qui tombent et sont fondues dans le plan focal, le support métallique descend. Lorsque la matière en fusion sort du plan focal, elle refroidit en cristallisant et forme une tige de plus en plus longue. Un tel exemple de mise au point d'appareils annexes s'inscrit dans le régime transversal des hautes températures qui lie de manière indissociable l'optimisation instrumentale et la recherche. Plus généralement, l'expérience menée à Meudon par le trio de chimistes constitue un projet original qui hybride, de manière artisanale, des pratiques de haute température, de chimie minérale et d'optique. Elle se situe entre « interscience » et « technoscience » et vise à terme la rentabilité économique des fours solaires pour la fabrication de produits (acide nitrique, alumine) à moindre coût grâce à l'économie d'énergie permise par la lumière solaire par rapport à l'électricité dépensée par l'industrie. Le dynamisme, l'originalité et l'ingéniosité du trio font émerger un programme solaire à Meudon avec l'aide des astronomes du laboratoire de Paris-Meudon, le soutien financier du CNRS et la contribution de diverses institutions (ministère des Armées, Société de l'aluminium français). Ce programme reste marginal au LTR à la fin des années 1940. Ce sont leurs recherches en chimie des terres rares qui valent à Trombe et à Foëx d'être respectivement nommés directeur de recherches en janvier 1949 et maître de recherches en octobre 1948. Pourtant, au fil des expériences, des conférences et des publications, le projet solaire gagne en importance à leurs yeux et prend une nouvelle dimension durant l'année 1949.

²¹ CARO Paul, *Entretien* avec B. BENSUADE-VINCENT et J. CLARO GOMES, Paris, juin 2002 : accessible au lien suivant : <https://sho.spip.espci.fr/spip.php?article56>

²² TROMBE Félix, FOËX Marc, HENRY LA BLANCHETAIS Charlotte, « Sur la fusion continue des substances au four solaire », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, vol. 226, 1948, p. 83-85.

II- LA « DÉCENNIE SOLAIRE », 1948-1958 : MONT-LOUIS DANS LES RAPPORTS NORD/SUD ET EST/OUEST²³

II.1 L'échelle semi-industrielle du Laboratoire de l'énergie solaire (LES)

En plus d'être un excellent chercheur et un chef charismatique, Trombe est un spéléologue actif et reconnu. Durant sa jeunesse, il a exploré avec son ami Gabriel Dubuc les grottes et cavernes du canton d'Aspet autour de Ganties-les-Bains dans les Pyrénées. Doctorant à Paris, il a rejoint le Spéléo-Club de Paris nouvellement formé²⁴. Avec d'autres universitaires comme Henry Pierre Guérin (1901-1981), Louis Balsan (1903-1988) ou Bernard Gèze (1913-1996), Trombe contribue en France au développement de la spéléologie scientifique, qu'il nomme avec humour la « Science des cavernes »²⁵. Il participe d'ailleurs à la Commission de spéléologie du CNRS créée en 1945 en même temps que celle des hautes températures et des réfractaires. Il fait découvrir la spéléologie à Henry La Blanchetais, qui participe à partir de 1945 au comité éditorial de *Spelunca*, la revue nationale du domaine²⁶. Trombe oriente le Spéléo-Club de Paris vers l'exploration du gouffre de la Henne-Morte en Haute-Garonne. Il conduit avec succès l'expédition de 1946-1947 grâce au soutien de l'armée en hommes et matériel²⁷. C'est à cette occasion que Trombe se lie avec le général Jean-Paul Bergeron. Par la suite, celui-ci prend la direction du Comité d'action scientifique de l'Armée et visite le laboratoire solaire de Meudon en 1949. Bergeron voit dans le four solaire un moyen de réaliser des chocs thermiques pour tester la résistance des matériaux militaires. Il convainc sa hiérarchie de soutenir l'implantation des chimistes du CNRS sous des cieux plus ensoleillés que ceux de Meudon, soit dans le fort de Cimiez à Nice, soit dans la citadelle Vauban de Mont-Louis, située dans la commune d'Odeillo-Via-Font-Romeu, en Cerdagne, dans les Pyrénées orientales²⁸. Ces deux sites disposent d'un ensoleillement annuel de 2750 heures, de mille heures supérieur à celui de la région parisienne (Figure 3). La puissance thermique fournie par le

²³ En 1955, Farrington Daniels appelle de ses vœux une « décennie solaire » (*solar decade*) pour les dix ans à venir (1955-1964), DANIELS Farrington, "The Sun's Energy", in *Proceedings of the World Symposium on Applied Solar Energy, Phoenix, Arizona, November 1-5, 1955*, Menlo Park, Stanford Research Institute, 1956, p. 19-26. Rétrospectivement, il semble plus approprié de qualifier la période 1948-1958 de décennie solaire en raison de la dynamique internationale en terme d'espoirs suscités et d'activités menées pour la recherche et le développement des applications solaires.

²⁴ CHABERT Claude et DUBOIS Paul, « Le Club alpin français et le développement de la spéléologie en France », in SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE SPÉLÉOLOGIE (éd.), *Cent ans de spéléologie française*, *Spelunca* n°17, 1993, p. 121-124.

²⁵ L'expression vient de TROMBE Félix, *La spéléologie*, Paris, PUF, Que sais-je ?, 1956, p. 5.

²⁶ SCHUT Pierre-Olaf, *L'exploration souterraine. Une histoire culturelle de la spéléologie*, Paris, L'Harmattan, 2007, p. 195

²⁷ TROMBE Félix, *Le Mystère de la Henne-Morte*, Paris, Susse, 1948, p. 48.

²⁸ CARO Paul, *Entretien avec B. BENSUADE-VINCENT et J. CLARO GOMES*, Paris, juin 2002 : accessible au lien suivant : <https://sho.spip.espci.fr/spip.php?article56>

soleil est dans ces régions de l'ordre d'un kilowatt par mètre carré. À ensoleillement égal, Trombe choisit Mont-Louis, en raison de ses origines familiales, pour établir le Laboratoire de recherches sur l'utilisation de l'énergie solaire (LES).

Le projet solaire est porté par trois types d'institution publique : scientifique, colonial et militaire. Il est soutenu par une douzaine d'Académiciens, qui rédigent une motion en sa faveur²⁹. Le directoire du CNRS y est favorable pour répondre à l'une des missions du Centre : la promotion des « études et recherches présentant pour l'avancement de la science ou l'économie nationale un intérêt reconnu, c'est-à-dire de pousser les disciplines nouvelles »³⁰. Le projet est aussi financé par le Gouvernement général de l'Algérie et le Protectorat français au Maroc qui espèrent ainsi « résoudre certains problèmes très actuels concernant l'équipement industriel des territoires déshérités », notamment la zone ensoleillée du Maghreb³¹. Enfin, la citadelle de Mont-Louis, mise à disposition par l'armée, est rénovée par la Direction générale des poudres durant le printemps 1949. Si l'armée prend en charge la plupart des dépenses d'installation, le CNRS équipe le laboratoire³². Dès l'été 1949, un premier four solaire fonctionne à Mont-Louis. Inauguré en mars 1950, le LES a le statut de laboratoire propre du CNRS de la section chimie minérale avec deux ministères de tutelle : l'Éducation nationale et la Défense nationale. Trombe est nommé directeur, Foëx directeur-adjoint et Henry La Blanchetais régisseur. Pour lancer le LES, le trio utilise le LHT comme moyen logistique pour des essais instrumentaux préliminaires, puis comme ressource humaine. Ainsi, à l'automne 1950, deux « collaborateurs techniques » de Trombe, Mademoiselle Valet et Monsieur Fabre, sont mutés de l'Institut de chimie de Paris à Mont-Louis. Dans le même temps, le laboratoire parisien réduit son activité avant de disparaître.

Tout en s'inscrivant dans la tradition des hautes températures, le LES conduit deux programmes originaux en France au début des années 1950. Premièrement, à la suite de Meudon, la fabrication et la mise au point de petits fours solaires de 2-3kW de puissance thermique. Contrairement à Meudon, ces prototypes sont conçus suivant le principe de la compagnie Zeiss : ils disposent d'un miroir orienteur plan, appelé héliostat, qui réfléchit la lumière du soleil vers un miroir focalisant, de forme parabolique. Le suivi par l'héliostat de la trajectoire du soleil dans le ciel est réalisé par un asservissement

²⁹ Une motion en faveur du projet de Mont-Louis a été signée par les membres suivants de l'Académie des sciences : A. Cotton, A. Danjon, L. Hackspill, P. Jolibois, P. Lebeau, C. Mauguin, C. Maurain, P. Pascal, J. Pérès, A. Portevin, G. Ribaud, d'après TROMBE Félix, « allocution », in CNRS (éd.), *Applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie. Colloque international du CNRS n°85. Montlouis 23-28 Juin 1958*, Paris, CNRS, 1961.

³⁰ *Rapport sur l'activité générale du CNRS*, Mai 1951 – Oct. 1952, Paris, CNRS, 1952, p. 19, AN n°990001, art. 64. La citation est extraite de l'ordonnance du 2 novembre 1945.

³¹ *Rapport sur l'activité générale du CNRS*, Mai 1950 – Oct. 1951, Paris, CNRS, 1951, p. 11 et *Rapport sur l'activité générale du CNRS*, Mai 1951 – Oct. 1952, Paris, CNRS, 1952, p. 19, AN n°990001, art. 64.

³² *Rapport sur l'activité générale du CNRS*, Mai 1950 – Oct. 1951, Paris, CNRS, 1951, p. 11, AN n°990001, art. 64.

automatique. Comme à Meudon, les petits fours solaires permettent de mener des recherches de chimie du solide : synthétiser des cristaux, purifier des minerais et traiter des matériaux réfractaires (frittage). Trombe dépose un brevet en 1957 sur l'application de l'énergie solaire à l'obtention de produits chimiques purs³³. Deuxièmement, le LES entreprend, dès 1950, un programme semi-industriel de fabrication d'un four solaire d'une centaine de kilowatts à l'intérieur de la citadelle³⁴. Basé sur le même principe (orienteur-focalisant) que les petits fours solaires, le four semi-industriel pose des problèmes techniques de changement d'échelles et nécessite l'acquisition par les ingénieurs et techniciens d'une expertise pointue en électronique et automatique. Le miroir orienteur, asservi par des cellules photoélectriques, est un rectangle plat de 13 m de large sur 10 m 50 de haut qui réfléchit la lumière vers un paraboloïde de verre argenté de 9 mètres de diamètre (Figure 4). Le système est opérationnel en 1952-1953. Sa puissance atteint 75kW et la température sur la tache focale plus de 3000°C. Sa réalisation a pris trois ans et nécessité la coopération du CNRS, du Service des poudres de l'armée et du Comité d'action scientifique de la Défense nationale dirigé par Bergeron. Le four semi-industriel intéresse les militaires pour tester des matériaux dans des conditions thermiques extrêmes mais contrôlées³⁵. Le « grand four solaire » est capable de fondre 60 kilogrammes de fer à l'heure, soit une demi-tonne par jour³⁶. Ceci est faible par rapport aux productions industrielles de l'époque au four électrique mais Trombe espère un débouché économique futur. Une telle approche industrielle rappelle le projet du maître Urbain lors de la création du Laboratoire des gros traitements chimiques en 1937. En décembre 1953, sur proposition de l'Académie des sciences, Trombe reçoit le premier prix Jaffé de l'Institut de France pour ses recherches sur les terres rares et ses travaux sur les fours solaires.

II.2 L'internationalisme solaire du Sud au Nord et d'Ouest en Est

Le LES fait l'objet d'un article dans le *New York Times* du 3 juillet 1954 soulignant l'intérêt scientifique du plus grand four solaire du monde tout en relativisant son intérêt commercial. Il existe alors une trentaine de centres de recherche et développement disposant de fours solaires, dont les quatre cinquièmes recensés aux États-Unis³⁷. Depuis la fin des années 1940, des industriels tels AT&T, Bendix Corporation, RCA, General Electric utilisent des fours solaires de petite taille pour tester les

³³ Brevet FRX2793018 – 19520724, « Application de l'énergie solaire à l'obtention de produits chimiques purs » ; inventeur : Félix Trombe ; demandeur : CNRS. Les informations juridiques sur les brevets proviennent de l'Office européen des brevets. Source : <http://worldwide.espacenet.com>

³⁴ Pochette 1950-1951, « Activité scientifique de Félix Trombe », *Dossier scientifique de Félix Trombe*, AN n°20070296, art. 528.

³⁵ *Rapport sur l'activité générale du CNRS*, Octobre 1950 – Octobre 1951, Paris, CNRS, 1951 ; *Rapport sur l'activité générale du CNRS*, Oct. 1953 – Oct. 1954, Paris, CNRS, 1954, AN n°990001, art. 64.

³⁶ TROMBE Félix, « Sur la réalisation d'un four solaire semi-industriel au Laboratoire de Mont-Louis (Pyrénées-Orientales) », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, vol. 235, n°14, 1952, p. 704-705.

matériaux de haute technologie, en particulier électronique. Mais l'utilisation solaire à haute température, pour laquelle Mont-Louis est à la pointe des recherches mondiales, ne constitue qu'une partie des recherches et développements solaires. Le champ s'est construit dans l'immédiat après-guerre en lien avec la question des ressources énergétiques. Suite à un rapport du secrétariat de l'UNESCO en 1947, la délégation indienne a fait adopter, lors de la troisième conférence générale de l'UNESCO en 1948 à Beyrouth, une résolution diligentant une enquête mondiale sur les sources d'énergie accessibles et bon marché³⁸. Ceci conduit à la formation en 1951 d'un programme UNESCO des zones arides, piloté par un conseil représentant sept pays : Égypte, États-Unis, France, Inde, Israël, Mexique et Royaume Uni. Avec l'aide des Bureaux régionaux de coopération scientifique, le programme vise à développer les potentialités des zones arides et semi-arides en facilitant la coopération entre pays et l'assistance à des projets innovants. Un premier symposium est organisé en avril 1952 à Ankara sur l'hydrologie puis un second en novembre 1953 à Montpellier sur l'écologie végétale. Un troisième *Symposium international sur les énergies éoliennes et solaires* rassemble à New Delhi en octobre 1954 une assemblée pluridisciplinaire. Pour la partie solaire, on y discute de cuisson des aliments, de distillation et de chauffage de l'eau, de climatisation des bâtiments ainsi que du traitement des matériaux à haute température. La France est bien représentée avec trois experts invités parmi la vingtaine de communicants : Trombe ; Henri Masson, qui mène, à l'Institut des hautes études de Dakar, un programme de pompage solaire ; et Charles Beau, haut fonctionnaire de l'État, président-fondateur de la société d'économie mixte Énergie des mers. Globalement, le symposium décrit les énergies éoliennes et solaires comme des solutions pour les « régions non industrialisées » sans réseau électrique, ni énergie fossile³⁹. Une démarcation est ainsi tracée entre les pays riches du Nord (Allemagne, Angleterre, Danemark, États-Unis, France), pour lesquels l'énergie solaire constituerait une œuvre humanitaire envers les pays pauvres du Sud (Afrique du Sud, Inde, Liban, Pakistan) qui n'auraient pas d'autre choix de « développement ».

Dans le même temps, le champ s'organise aux États-Unis. Ainsi, Farrington Daniels (1889-1972), professeur de chimie à l'université du Wisconsin, organise à Madison en septembre 1953 un premier colloque national sur l'énergie solaire. Une trentaine d'experts y prennent part, dont quatre étrangers, parmi lesquels Trombe s'exprime sur les fours solaires. L'année suivante, à Phénix, industriels, financiers et chercheurs fondent l'Association for Applied Solar Energy (AASE), qui fait office de société nationale de l'énergie solaire alors que les financements fédéraux restent faibles pour le

³⁷ JENSEN Jean Smith (éd.), *A directory of world activities and bibliography of significant literature*, Phoenix, Association for Applied Solar Energy, 1959, p. 3-21.

³⁸ Pour un historique administratif, voir, *Arid Zone Programm. Report on Activities of Unesco related to Arid Zone Research and Development*, Paris, UNESCO, NS87, 31 août 1951.

³⁹ Par exemple, FARRINGTON Daniels, « Utilization of Solar Energy, » in *Wind and Solar Energy, Proceedings of the New Delhi Symposium, October 22-25, 1954*, Paris, Unesco, 1956, p.129-135.

solaire⁴⁰. L'AASE structure la communauté états-unienne en organisant une série de conférences savantes, qui commence en novembre 1955 à Phénix avec un *World Symposium on Applied Solar Energy*, en éditant un journal spécialisé à partir de 1957, *Journal of Solar Energy Science and Engineering*, et en vulgarisant le thème avec une publication grand public, *Sun at Work*, à partir de 1956⁴¹. Les universités du sud en particulier (Arizona, Californie, Floride, Texas) entreprennent des recherches solaires. Comme en France, les militaires s'intéressent aussi à la concentration de rayonnement solaire pour tester les matériaux. Un four solaire de 30kW est ainsi monté en 1958 sur la base de Quartermaster Research and Engineering Center, à Natick (Massachusetts). Trombe est invité à l'inauguration par le directeur scientifique du site, Stuart A. Hunter⁴². Le coût du four solaire de Natick est estimé à 10 millions de francs, ce qui donne l'ordre de grandeur du coût du four semi-industriel de Mont-Louis dont il est dérivé⁴³. L'une de ses fonctions du four de Natick est de simuler des chocs thermiques semblables par leur puissance aux explosions nucléaires. Ainsi, l'énergie solaire est développée aux États-Unis à la conjonction d'investisseurs privés, d'universitaires, d'industriels civils et militaires. À la fin des années 1950, une cinquantaine d'institutions états-uniennes mènent un programme solaire contre une quinzaine en Europe⁴⁴. Que ce soit aux États-Unis ou en Europe, le champ de l'énergie solaire révèle une structure organisationnelle en « triple hélice université-industrie-gouvernement » caractéristique des recherches scientifiques au XX^e siècle⁴⁵.

La France ne fait pas exception car le programme solaire s'inscrit dans sa politique universitaire (CNRS), industrielle, militaire et coloniale. Deux centres de recherche solaire ont été établis dans les colonies africaines durant la décennie 1950. Le premier est le Laboratoire de recherche solaire à l'Institut des hautes études de Dakar. Sous la direction de Masson, il s'est spécialisé sur les prototypes de machines thermiques convertissant la chaleur du soleil en travail mécanique pour le pompage de l'eau⁴⁶. Le second est l'Institut de l'énergie solaire d'Alger, incluant la station solaire de Bouzaréah, dans

⁴⁰ STRUM Harvey, « The Association for Applied Solar Energy/Solar Energy Society, 1954-1970 », *Technology and Culture*, vol. 26, n°3, 1985, p. 571-78.

⁴¹ DUFFIE John A. et TABOR Harry Z., « The International Solar Energy Society: The First 25 Years, 1955 to 1980, » in BOËR Karl W. (dir.), *The Fifty-Year History of the International Solar Energy Society and its National Sections*, vol. 1, Boulder, American Solar Energy Society, 2005, p. 1-64.

⁴² Lettre de F. Trombe au directeur général du CNRS, 5 août 1958, Pochette 1958-1959, *Dossier scientifique de Félix Trombe*, AN n°20070296, art. 528.

⁴³ Le chiffre de 275 000 dollars est donné par le journaliste du *New York Times*, FENTON John H., « New Army Device Rivals Atom Heat. Solar Furnace to Simulate Nuclear Flash to Test Materials and Gear », *The New York Times*, 1 Oct. 1958, p. 3. Or, un dollar vaut 350 francs entre 1949 et 1958, selon CARROUÉ Laurent, COLLET Didier, RUIZ Claude, *Les mutations de l'économie mondiale du début du XX^e siècle aux années 1970*, Paris, Bréal, 2005, 333 p., p. 239.

⁴⁴ « World Research Activities », *Solar Energy*, vol. 1, n°4, 1957, p. 36-37.

⁴⁵ ETZKOWITZ Henry and LEYDESDORFF Loet, *Universities and the global knowledge economy: a triple helix of university-industry-government relations*, London, Cassel Academic Press, 1997.

⁴⁶ GIRARDIER Jean-Pierre, « Les pompes solaires thermodynamiques et leur histoire », in HERLÉA A. (dir.), *L'énergie solaire en France*, Paris, éditions du CTHS, 1995, p. 127-143.

la banlieue ouest d'Alger. Sous la direction de Marcel Perrot (1908-2006), il développe l'« héliotechnique », un domaine qui recouvre l'ensemble des procédés de captation et de conversion du rayonnement solaire, de la distillation solaire à l'utilisation chimique du soleil en passant par la concentration de rayonnement⁴⁷. Le Gouvernement général de l'Algérie développe un programme semi-industriel de fabrication d'un « héliodyne » géant à Bouzaréah. Comme le four solaire de Meudon, un héliodyne est un miroir qui concentre directement le rayonnement solaire sans miroir orienteur. La focalisation de la lumière vers le haut n'est pas un problème car il s'agit de synthétiser de l'acide azotique gazeux à partir d'oxygène et d'azote gazeux (atmosphériques). Sous la responsabilité d'un ingénieur des Arts et métiers, Maurice Touchais, le projet vise le développement de l'industrie des engrais en Algérie. Le prototype est opérationnel à l'automne 1955 : avec un poids de 40 tonnes, une envergure de huit mètres de diamètre et une puissance de 30kW, l'héliodyne de Bouzaréah est le plus grand du monde à l'époque. Par ses dimensions et son objectif industriel, il est comparable au four solaire de Mont-Louis.

II.3 Le « solaire passif » et les maisons solaires de Mont-Louis

Trombe et Foëx ne se sont jamais installés dans les Pyrénées. Ils vivent à Paris et, environ dix jours par mois, chacun effectue un déplacement dans les Pyrénées pour s'occuper du LES⁴⁸. Pourtant le LES a une activité dense et variée. Trombe a pris conscience aux symposiums de Madison (1953) et de New Delhi (1954) de la dynamique des applications solaires à température ambiante. S'il se méfie du faible rendement des moteurs solaires, il est prêt en revanche à explorer le domaine du solaire dit « passif »⁴⁹. Le solaire passif désigne l'ensemble des techniques de collecte, emmagasinage et distribution d'énergie thermique par radiation, conduction et convection naturelles. Il n'implique pas la conversion d'énergie thermique en énergie mécanique (moteurs solaires) ou en énergie électrique (systèmes photoélectriques). Le LES oriente une partie de ses recherches vers la domotique solaire : climatisation des maisons, chauffage et réfrigération de l'air, purification de l'eau. Des premiers tests sont effectués pour chauffer diverses substances par effet de serre, à travers une paroi vitrée, durant

⁴⁷ Pour une histoire racontée par l'un des acteurs (M. Perrot), voir sur le site du Groupe italien d'histoire de l'énergie solaire : <http://www.gses.it/pub/perrot.php>

⁴⁸ Lettre de Félix Trombe au directeur général du CNRS, 6 juillet 1960, Pochette 1960-1961, *Dossier scientifique de Félix Trombe*, AN n°20070296, art. 528.

⁴⁹ « Cette énergie, concentrée optiquement, peut être transformée en énergie mécanique, avec le faible rendement qui caractérise le fonctionnement des moteurs thermiques, ou directement utilisée, dans de bien meilleures conditions, pour porter les corps à de très hautes températures. », TROMBE Félix, FOËX Marc, HENRY LA BLANCHETAIS Charlotte, « Four solaire pour la réalisation de très hautes températures », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, vol. 223, 1946, p. 317.

l'année 1953⁵⁰. Ils permettent de chauffer certaines pièces du laboratoire dans la citadelle pour faire des économies. Ils ouvrent la voie au « mur Trombe »⁵¹.

Produire de la chaleur modérée grâce au soleil : le « mur Trombe », ca. 1957

Le principe du mur Trombe est simple. Le mur sud des maisons est vitré afin de récupérer, en saison froide, la chaleur piégée par effet de serre entre la vitre et le mur. L'air froid de la maison entre dans la serre par un trou en bas du mur, s'échauffe lorsque les rayons du soleil frappent la vitre puis s'élève progressivement. L'air chaud retourne dans la maison par un trou en haut du mur. Un courant de convection s'établit naturellement entre l'intérieur plus froid de la maison et la serre vitrée chauffée par le soleil (Figure 5). Le mur, en ciment noir, absorbe la chaleur durant la journée puis la restitue par rayonnement la nuit, chauffant ainsi l'intérieur de la maison. Trombe obtient un premier brevet en France en 1958⁵². Plusieurs maisons solaires sont construites dans la commune d'Odeillo pour démontrer la viabilité du système en conditions réelles. Par la suite, Trombe collabore avec un architecte, Jacques Michel, pour construire une maison plus performante, achevée au début de la décennie 1970. Un nouveau brevet est obtenu en 1972 par Trombe pour protéger les améliorations depuis 1958. Le mur Trombe devient, en raison de sa simplicité et de son efficacité, un classique de l'architecture solaire⁵³. Les économies d'énergie peuvent atteindre 60 % sur une année pour des régions ensoleillées comme la Cerdagne, pour un faible prix d'équipement.

Produire du froid grâce au soleil : le réfrigérateur solaire, ca. 1955

Le LES utilise aussi la chaleur du soleil pour produire du froid. Pour mettre au point la machine thermique à absorption utilisant un cycle d'ammonium, les chercheurs français se sont inspirés des recherches de l'Héliolaboratoire de Tachkent (Ouzbékistan) dirigé par Valentin Baum⁵⁴. En fonctionnement depuis 1952, le prototype soviétique produit 250 kilogrammes de glace par jour pour

⁵⁰ *Rapport sur l'activité générale du CNRS*, Oct. 1952 – Oct. 1953, Paris, CNRS, 1953, p. 37, AN n°990001, art. 64.

⁵¹ *Rapport sur l'activité générale du CNRS*, Oct. 1956 – Oct. 1957, Paris, CNRS, 1957, p. 95-96, AN n°990001, art. 65.

⁵² Brevet FR1152129 (A), « Dispositifs pour la climatisation naturelle des maisons » ; inventeur : Félix Trombe ; demandeur : CNRS ; date d'obtention : 12/02/1958 ; date de priorité : 01/03/1956.

⁵³ « The most significant of the current examples of the indirect heat transfer approach are the Odeillo house by Michel and Trombe and the Atascadero house by Harold Hay. » JOHNSON T.E., JOHNSON T.C., « Performance of Passively Heated Buildings », *Journal of Architectural Education*, vol. 30, n°3, 1977, p. 16-20. Un ouvrage généraliste comme celui de PAUL J.K. (dir.), *Passive Solar Energy Design and Materials*, Park Ridge (NJ), Noyes Data Corporation, 1979, consacre quarante pages au mur Trombe, soit 10% de l'ouvrage.

⁵⁴ TROMBE Félix , FOËX Marc, « Sur la production de froid à l'aide du rayonnement solaire », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, vol. 242, n°8, p. 1000-1003.

une surface insolée de 80 mètres carré de miroirs paraboloides, soit environ 400 grammes de glace par kWh. Les Français ont opté pour une insolation plus modeste (1,5m²) et un appareil moins perfectionné avec orientation fixe des miroirs afin de répondre aux besoins des populations des « zones arides ». La Figure 6 schématise le fonctionnement du prototype de Mont-Louis opérationnel dès l'été 1955. La lumière solaire est concentrée avec des miroirs pour chauffer une solution ammoniacale eau/NH₃ (n°4 sur la figure). Ceci provoque le dégagement d'ammoniac qui s'élève sous forme de gaz (n°5) puis passe dans un serpentin refroidi par de l'eau (n°10) qui condense la vapeur sous forme liquide. L'ammoniac liquide récupéré dans un récipient (n°14) calorifugé (n°15) constitue la réserve de froid. Lorsque le soleil cesse de briller et que l'utilisateur a besoin de froid, il ferme le robinet n°18 et ouvre le n°19, ce qui provoque l'évaporation de l'ammoniac liquide (n°16), la transition de phase liquide/vapeur produisant du froid (n°17). L'utilisation d'un seul fluide calorifique et le système de condensation-évaporation sont des innovations techniques brevetées par Trombe en août 1955⁵⁵. La production journalière de glace atteint alors 6 kilogrammes, soit un kilogramme de glace par kWh reçu, deux fois et demi supérieur au rendement de Tachkent. Durant l'année 1956-1957, le LES met au point un réfrigérateur plus grand, produisant 90 kilogrammes de glace par jour, à un prix de revient de sept francs le kilogramme, soit 30 à 40% au-dessus du prix du marché des réfrigérateurs électriques⁵⁶. Le Comité d'action de la Défense nationale s'intéresse aux machines à absorption solaire et, l'année suivante, une maison solaire climatisée est construite à Colomb-Béchar, dans le désert algérien, par les militaires en collaboration avec le LES⁵⁷.

Faire de la « culture intensive » avec le soleil : la serre de Banyuls-sur-mer, 1957-1961

Le troisième système de domotique solaire remarquable est la fabrication d'une serre de culture permettant l'utilisation d'eau saumâtre. La teneur trop élevée en sel de cette eau la rend généralement impropre à la culture. Or un grand nombre de zones côtières des zones arides manquent d'eau suffisamment pure pour servir à l'irrigation des plantations. Trombe et Foëx imaginent une serre dont le schéma est représenté sur la Figure 7. L'eau saumâtre, contenue dans le récipient (n°15) sous le toit de la serre, est chauffée par le rayonnement solaire. La chaleur permet l'évaporation de l'eau pure, qui s'élève puis se condense sur le verre du toit (n°18). Elle coule alors jusqu'à une rigole (n°19) qui récupère l'eau évaporée et la redirige vers les cultures⁵⁸. L'invention, simple, est brevetée en 1957. Un

⁵⁵ Brevet FR1130157 (A) « Cycle réfrigérateur intermittent à récupération de calories et à faible inertie calorifique » ; inventeur : F. Trombe ; demandeur : CNRS ; date de priorité : 5 août 1955 ; date d'obtention : 31 janvier 1957.

⁵⁶ *Rapport sur l'activité générale du CNRS*, Oct. 1956 – Oct. 1957, Paris, CNRS, 1957, p. 95-96, AN n°990001, art. 65.

⁵⁷ *Rapport sur l'activité générale du CNRS*, Oct. 1957 – Oct. 1958, Paris, CNRS, 1958, p. 107, AN n°990001, art. 65.
⁵⁸ Brevet FR1168575, « Dispositif pour la culture intensive dans des régions arides et ensoleillées », inventeurs : F. Trombe, M. Foëx ; demandeur : CNRS ; date d'obtention : 10/12/1958 ; date de priorité : 12/02/1957. Brevet FR1162162 (A), « Dispositif pour la distillation de l'eau à l'aide de l'énergie solaire » ; inventeurs : F. Trombe, M. Foëx ; demandeur : CNRS ; date d'obtention : 10/12/1958.

procédé de purification de l'eau est breveté par la suite. Au début des années 1960, alors que le soutien colonial faiblit, le LES entreprend une nouvelle collaboration avec le Laboratoire d'océanographie Arago, à Banyuls-sur-Mer, à une centaine de kilomètres d'Odeillo, sur la côte catalane⁵⁹. Les chercheurs de Mont-Louis désirent ainsi utiliser les savoir-faire des océanographes en agronomie.

Le programme solaire de Mont-Louis des années 1950 est un élargissement du mode transversal de production des hautes températures. En effet, le développement de prototypes solaires opératoires constitue un objectif en soi, différent de la culture disciplinaire initiale en chimie minérale et des hautes températures. S'il poursuit encore la mise au point de prototypes à hautes températures, le programme s'est considérablement diversifié vers la domotique solaire à température ambiante et à basse température : chauffage modéré, réfrigération, climatisation, purification de l'eau. Chaque nouveau prototype est protégé par un dépôt de brevet avec Trombe comme inventeur (parfois avec Foëx) et le CNRS comme demandeur. Cette dynamique instrumentale vise la réalisation d'une « utopie solaire » au sens de l'*Utopia* (1516) de Thomas More : le gouvernement idéal d'une population sauvage insulaire. Dans le contexte colonial français des années 1950, l'utopie solaire de Mont-Louis devient *le gouvernement idéal des populations des zones arides* par l'utilisation des techniques solaires du Nord pour résoudre les problèmes économiques du Sud. Ce projet néocolonial est emblématique des espoirs suscités par la « décennie solaire » (1948-1958) du programme UNESCO des zones arides. Pour le mettre en œuvre, chercheurs et techniciens de Mont-Louis rassemblent un corpus métissé de savoirs et savoir-faire interstitiels par rapport aux disciplines : agronomie, automatique, chimie, hautes températures, ingénierie des matériaux, météorologie, optique, physique, thermique. Ils visent la fabrication d'appareils génériques pouvant servir largement à la recherche fondamentale et aux applications économiques. Ceci stabilise un certain nombre de règles de fonctionnement métrologiques par la précision requise par l'instrumentation et développe un langage hybride entre cultures disciplinaires. Par l'articulation de ces trois dimensions (interstitiel, générique, métrologique), le LES s'apparente à une « recherche technico-instrumentale »⁶⁰.

Au niveau international, Mont-Louis est un nœud du champ de l'énergie solaire où se croisent la recherche sur les matériaux, enjeu de la guerre froide entre l'Est et l'Ouest, et la recherche sur le solaire passif, enjeu des politiques énergétiques entre Nord et Sud. En juin 1958, le LES organise le troisième colloque international majeur après New Delhi (1954) et Phénix (1955) sur les *Applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie*⁶¹. Une cinquantaine de participants et auditeurs viennent discuter d'applications solaires aussi variées que machines et moteurs, fours et

⁵⁹ *Rapport sur l'activité générale du CNRS*, Oct. 1960 – Oct. 1961, Paris, CNRS, 1961, p. 192, AN n°990001, art. 65.

⁶⁰ SHINN Terry et RAGOUET Pascal, « Formes de division du travail scientifique et convergence intellectuelle. La recherche technico-instrumentale », *Revue française de sociologie*, vol. 41, n°3, 2000, p. 447-473.

⁶¹ CNRS (di.), *Applications thermiques de l'énergie solaire dans le domaine de la recherche et de l'industrie, Mont-Louis, 23-28 juin 1958*, Paris, CNRS, 1961.

cuisinières, chauffe-eau et distillateurs, réfrigérateurs, chauffages et climatiseurs. Avec quatorze communications, le LSE se montre prolifique et éclectique en couvrant l'ensemble des thèmes. Parmi les prototypes discutés lors des cinq journées de colloque, le plus grandiose est, sans conteste, le four solaire industriel annoncé qui formerait « l'image de mille soleils »⁶².

III. LE SOLEIL À SON ZÉNITH : LA DÉMESURE INDUSTRIELLE DANS LES PYRÉNÉES FRANÇAISES

III.1 Montée en puissance des fours solaires d'Odeillo, 1952-1969

Dès 1952, alors que le four de 75kW est à peine monté, Trombe le présente comme une étape intermédiaire vers des « installations beaucoup plus puissantes qui seraient facilement réalisables suivant le même principe »⁶³. Avec une courbure plus faible, de plus grands miroirs pourraient être composés de verres plus épais (car moins courbés) et mieux polis, ce qui faciliterait le montage et induirait un gain énergétique en réflexion et, donc, un gain en température. En février 1954, Trombe conclut une conférence sur le « grand four solaire de Mont-Louis » à la Société astronomique de France en ces termes : « Les résultats obtenus à Mont-Louis, tant avec les petites installations qu'avec l'installation semi-industrielle, montrent des perspectives de rentabilité des fours solaires. Il n'est pas du domaine de l'utopie de construire une unité prototype de 1000 kilowatts basé sur le principe précédent. »⁶⁴ Trombe utilise le mot « utopie », non comme un gouvernement idéal, mais dans le sens courant d'une idée qui paraît irréalisable jusqu'à sa réalisation effective.

Malgré l'ampleur des dépenses prévisibles, cinq éléments soutiennent l'optimisme des « sorciers du soleil » autour de Trombe⁶⁵. Premièrement, un four plus grand devrait améliorer les rendements grâce à des miroirs plus épais sans poser, selon Trombe, de difficulté technique supplémentaire⁶⁶. Cette confiance technique s'appuie sur des essais sur le terrain entrepris dès 1954. Des « fragments de miroirs convergents de l'installation de 1000 kW » ont été installés ainsi que des miroirs orienteurs d'une surface de 30 mètres carré. Initialement de 50 %, le taux d'énergie réfléchi par les verres orienteurs

⁶² DOUGLAS John H., « Solar Furnace: Image of a Thousand Suns », *Science News*, vol. 109, n°15, 1976, p. 235-236.

⁶³ TROMBE Félix, « Sur la réalisation d'un four solaire semi-industriel au Laboratoire de Mont-Louis (Pyrénées-Orientales) », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, vol. 235, n°14, 1952, p. 705. TROMBE Félix, « Sur quelques détails de montage du four solaire semi-industriel de Montlouis », *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, vol. 235, n°14, 1952, p. 1213.

⁶⁴ TROMBE Félix, « Le grand four solaire de Mont-Louis », *L'Astronomie*, vol. 69, 1955, p. 60.

⁶⁵ L'expression « sorciers du soleil » aurait été forgée et utilisée par les paysans de la vallée d'Odeillo dans les années 1950 à propos de Trombe et son équipe, selon BEHRMAN Daniel, *Solar Energy: the Awakening Science*, Boston, Little, Brown and Company, 1976, p. 38.

⁶⁶ *Rapport sur l'activité générale du CNRS*, Mai 1951 – Oct. 1952, Paris, CNRS, 1952, p. 34 ; *Rapport sur l'activité générale du CNRS*, Oct. 1953 – Oct. 1954, Paris, CNRS, 1954, p. 34, AN n°990001, art. 64.

augmente jusqu'à 70 % grâce à l'amélioration de la planéité des verres fournis par la société Saint-Gobain. Deuxièmement, un four plus grand traiterait des quantités plus importantes de produits, ce qui pourrait le rendre rentable par rapport aux usines à fours électriques consommant de grandes quantités d'électricité alors que la lumière du soleil est gratuite. Troisièmement, au niveau institutionnel, le nouveau directeur du CNRS depuis 1951, Gaston Dupouy (1900-1985), physicien en spectroscopie électronique, encourage la politique des grands instruments⁶⁷. Trombe lui-même est une figure importante de la communauté scientifique française : directeur de recherche première classe au CNRS, à partir de juin 1954 ; ancien condisciple de Champetier, qui est alors directeur-adjoint du CNRS ; chercheur internationalement reconnu en chimie du solide, en métallurgie des terres rares et sur les applications de l'énergie solaire⁶⁸. Quatrièmement, la prospérité économique des Trente Glorieuses en France permet une croissance forte du CNRS, de l'ordre de 7 % en effectifs et en budget, au cours de la décennie 1950. Cinquièmement, au niveau politique, les essais dans des conditions extrêmes intéressent deux domaines cruciaux de l'industrie française : le militaire, pour tester la résistance des matériaux à des effets semblables aux explosions nucléaires, notamment via le Comité d'action de la Défense nationale ; le nucléaire civil, pour tester les matériaux réfractaires utilisables dans les piles atomiques du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) comme la « pile Zoé » à partir de décembre 1948. Ces atouts techniques, institutionnels, humains, économiques et politiques décident le CNRS à se lancer dans l'aventure industrielle de l'énergie solaire.

En novembre 1955 au *World Symposium on Applied Solar Energy* de Phénix, Dupouy crée la sensation en annonçant un investissement du CNRS de 500 millions de francs pour construire le four solaire à 1000kW, soit cinquante fois le prix du prototype de 75kW⁶⁹. Deux ans plus tard, un vaste terrain est acheté par le CNRS à Odeillo, à une dizaine de kilomètres de la citadelle de Mont-Louis⁷⁰. Une maquette au 1/100^e circule, présentée à l'exposition universelle 1958 de Bruxelles, dédiée à « un monde plus humain »⁷¹. Malgré des débuts prometteurs, le projet industriel d'Odeillo se heurte à plusieurs circonstances défavorables : le départ de Dupouy de la direction du CNRS en 1957, remplacé par son adjoint, Jean Coulomb (1904-1999), un géophysicien moins enthousiaste pour les grands instruments ; un affaiblissement des enjeux coloniaux à partir de l'indépendance de la Tunisie et du Maroc en 1956 ; une inflexion de la politique énergétique nationale vers l'importation de pétrole à partir

⁶⁷ PICARD Jean-François, *La République des savants : La recherche française et le CNRS*, Paris, Flammarion, 1990.

⁶⁸ Lettres, Pochettes 1954-1955 et 1955-1956, *Dossier scientifique de Félix Trombe*, AN n°20070296, art. 528.

⁶⁹ Dupouy annonce un investissement d'un million et demi de dollars à la table ronde de clôture, « Roundtable »” *Proceedings of the World Symposium on Applied Solar Energy*, Phoenix, Arizona, November 1-5, 1955, Menlo Park, Stanford Research Institute, 1956, p. 300. Cette somme représente, à l'époque, 26 années de salaire d'un directeur de recherche 1^o classe comme Trombe.

⁷⁰ *Rapport sur l'activité générale du CNRS*, Oct. 1956 – Oct. 1957, Paris, CNRS, 1957, p. 22, AN n°990001, art. 65.

⁷¹ GUTHLEBEN Denis, « Coup de soleil au CNRS. La genèse du PIRDES », *La revue pour l'histoire du CNRS*, n°17, 2007, p. 36-39.

de la fin de la décennie 1950⁷². Trombe se souvient d'une période difficile où le soutien militaire faiblit tandis que les monopoles d'État tels Gaz de France (GDF) et Électricité de France (EDF) se montrent hostiles au programme solaire⁷³. La guerre de libération algérienne provoque une crise de régime en métropole et le retour au pouvoir de Charles de Gaulle (1890-1970) en juin 1958. Alors que l'idée d'« Algérie française » perd de sa force de 1958 à 1962, le gouvernement de Michel Debré (1959-1962) réoriente les aspirations nationales vers la modernisation du pays dont la science devient un élément central. La recherche publique est reconfigurée par la création de trois institutions : le Centre national d'études spatiales (CNES) pour mener un programme aérospatial national à Toulouse ; la Délégation ministérielle pour l'armement (DMA) pour adapter les armes conventionnelles aux stratégies de guerre froide ; et la Délégation générale à la recherche scientifique et technique (DGRST) pour coordonner les recherches et développements publics à l'exception du spatial (CNES), du militaire (DMA) et du nucléaire (CEA)⁷⁴. Dans cette période de réorganisation, le LES tire son épingle du jeu en mettant en avant sa notoriété internationale et l'enjeu des matériaux dans la guerre froide. Trombe est un excellent porte-parole puisqu'il a été choisi par de Gaulle pour siéger au premier « conseil des douze sages », entre 1958 et 1960, qui donne au président de la V^e République son avis sur la politique scientifique et technique. Il utilise cette tribune au profit du projet solaire d'Odeillo qu'il fait inscrire dans la politique de la « grandeur » et de la « souveraineté » voulue par de Gaulle pour la France dans la guerre froide entre les États-Unis et l'Union soviétique.

Les travaux de terrassement du four géant débutent à l'automne 1961. Sous la direction d'Henri Vicariot (1910-1986), polytechnicien, ingénieur en chef de l'Aéroport de Paris, la construction dure huit ans. Elle nécessite l'action conjuguée de trois ministères (Éducation, Défense et Travaux publics) et d'une quinzaine de contractants privés⁷⁵. À la fin des années 1960, le touriste pyrénéen peut découvrir dans la paisible vallée de la Cerdagne un bâtiment de huit étages portant un miroir immense, parabolique brillante de 40 mètres de haut et 50 mètres de large, formée par l'assemblage méticuleux de 12 000 pièces de verre argenté, taillé et incurvé (Figure 8). Face à lui, huit terrasses transversales abritent 63 héliostats plats de 45 mètres carrés (6 mètres de haut et 7,5 mètres de large) qui réfléchissent la lumière solaire vers la parabole focalisant qui la concentre 18 mètres devant elle sur une tache focale 0,2 mètre carré. La mise au point de l'ensemble des asservissements mécaniques nécessite un subtil et patient réglage des employés de Saint-Gobain Techniques Nouvelles et de Thomson Automatismes.

⁷² PUISEUX Louis, « Les bifurcations de la politique énergétique française depuis la guerre », *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*, 37, 4 (1982): 609-620, p. 611-612.

⁷³ Cité par BEHRMAN Daniel, *Solar Energy: the Awakening Science*, Boston, Little, Brown and Company, 1976, p. 39.

⁷⁴ DUCLERT Vincent et CHATRIOT Alain (dir.), *Le gouvernement de la recherche. Histoire d'un engagement politique, de Pierre Mendès France à Charles de Gaulle (1953-1969)*, Paris, La Découverte, 2006.

⁷⁵ « Le Four solaire de 1000 kW du CNRS à Odeillo-Font Romeu (séance 1^{er} mars 1966) », *Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics*, n°228, déc. 1966, p. 1387-1414.

Mais, les techniciens du LES dirigés par l'ingénieur, Albert Le Phat Vinh, ainsi que Claude Royère et J.F. Laurent ont joué un rôle crucial dans les réglages électroniques⁷⁶. La première plaque d'aluminium est fondue à 3000°C le 31 janvier 1969. Le four peut alors traiter entre cent et mille kilogrammes de minerais en une seule fois.

Trombe annonçait en 1966 que le four solaire à 1000kW « restera[it] parmi les réalisations audacieuses de notre période moderne ». Plus grand four solaire du monde, sa longévité est étonnante puisqu'il fonctionne encore aujourd'hui après quarante-cinq ans d'exploitation par le CNRS. Centre d'essais matériaux et instrument de recherche, le four géant n'a pas engendré, comme le prédisait Trombe, une exploitation industrielle rentable pour la fabrication ou la purification de matériaux solides. Les contrats extérieurs n'ont jamais représenté plus de 10 % du budget du laboratoire hors salaire sur la décennie 1970, somme dérisoire par rapport au coût total du prototype, estimé 600 millions de francs 1955⁷⁷. Au-delà de la prouesse technique, de l'utilité scientifique et de l'échec économique, le four solaire géant a rempli son rôle géopolitique. Opérationnel trois mois avant le retrait de de Gaulle du pouvoir en avril 1969, il s'inscrit dans la politique gaullienne des grandes réalisations techniques (1958-1969) : la confection d'une bombe atomique (1960) ; le lancement d'un programme spatial européen (ESRO) dominé par le CNES (1964) ; la fabrication, avec les Britanniques, du Concorde, premier avion supersonique civil à transporter des voyageurs (1969). Ainsi, Odeillo participe à la politique de la « grandeur » scientifique et technique de la France sur la scène internationale des années 1960. Le succès médiatique outre-atlantique est d'ailleurs important puisque le *New York Times* relaie régulièrement, entre 1954 et 1970, la construction et l'opération du four solaire géant. Odeillo reçoit la visite de nombreux professionnels, chercheurs, industriels et administrateurs, venus de l'Ouest, de l'Est et du Sud. Pour l'année 1970-1971, la trentaine de visites officielles viennent, pour moitié, de France, pour un tiers, des pays de l'OTAN, pour un dixième, des pays du Sud et, pour un quinzième, des pays du pacte de Varsovie. Malgré le siège occupé par le département de la Défense états-unien au comité de direction du LSE et les contrats militaires américains pour le test de matériaux stratégiques,⁷⁸ la plupart des contractants sont français : la DMA et le CEA pour les tests de matériaux militaires et nucléaires sous « chocs thermiques » ; la Société européenne de propulsion (SEP) pour les matériaux

⁷⁶ *Rapport d'activité du Laboratoire de l'énergie solaire*, Janvier 1973 – Avril 1974, Paris, CNRS, 1974, p. 3, AN n°850001, art. 14.

⁷⁷ Si Dupouy avançait le chiffre de 1,5 million de dollars en 1955, un témoignage de Claude Royère à la fin des années 1970 propose le chiffre de 2 millions de dollars, d'après BEHRMAN Daniel, *Solar Energy: the Awakening Science*, Boston, Little, Brown and Company, 1976, p. 39. Au début des années 1970, les contrats rapportent environ dix mille dollars par an (60 000 francs 1971), d'après <http://fxtop.com/en/currency-convert-past.php>

⁷⁸ J. D. Walton (Georgia Institute of Technology) est membre du comité de direction en tant que délégué pour l'Armée états-unienne pour les recherches matériaux et mécaniques, *Rapport d'activité du Laboratoire de l'énergie solaire, 1967-1972*, Paris, CNRS, 1972, p. 8 et 15-16, AN n°850001, art. 14. « The United States has contracted with the French to use the Odeillo facility to subject radomes to thermal shock » d'après DOUGLAS John H., « Solar Furnace: Image of a Thousand Suns », *Science News*, vol. 109, n°15, 1976, p. 235-236.

aéronautiques ; Ceraver, Uguine Kuhlmann et la Compagnie générale d'électricité pour la fabrication de matériaux industriels (respectivement bauxite, zircone et alumine bêta). Le débit de traitement des minerais s'avère beaucoup trop faible par rapport aux usines électriques.

III.2 Du rayonnement d'Odeillo à l'échec de la politique solaire en France, 1964-1986

Alors que Farrington Daniels annonce l'ouverture d'une « décennie solaire » en 1955, il est piètre prophète. Avec un budget solaire de 100 mille dollars par an entre 1950 et 1970, la National Science Foundation soutient moins la recherche universitaire états-unienne sur vingt ans que le seul coût du four solaire géant d'Odeillo. L'AASE est à la limite de la banqueroute jusqu'aux années 1970. L'UNESCO cesse sa politique en faveur du solaire durant la décennie 1960 après qu'elle a été conquise par la rhétorique « des atomes pour la paix » du président Eisenhower initiée en 1953. La seule action du programme des zones arides est l'établissement du Power Engineering Research Institute à Bhopal et à Bangalore. Aucune conférence internationale sur l'énergie solaire ne rassemble plus de cent personnes entre 1955 (Phénix) et 1970 (Melbourne)⁷⁹. Une structuration est tentée autour de la Méditerranée avec la mise en place d'une Coopération méditerranéenne pour l'énergie solaire (COMPLES) mais son audience reste faible durant la décennie 1960. Une initiative de la Société française des thermiciens institue en février 1966 l'Association française pour l'étude et le développement des applications de l'énergie solaire (AFEDES), présidée par Robert Delsol, inspecteur général de Gaz de France. Son rôle est essentiellement éditorial avec la publication des *Cahiers de l'AFEDES*, dont le comité de rédaction est présidé par Trombe avec Foëx comme secrétaire. Entre 1955 et 1973, les financements solaires suivent des logiques de guerre froide qui dépassent la seule énergie solaire. Les photopiles solaires sont fabriquées industriellement pour la conquête spatiale. L'US Signal Corps, qui a reçu la mission de prévoir l'alimentation électriques des satellites, lance un programme photopile en 1955, qui s'accélère après le lancement réussi du Spoutnik soviétique, premier satellite artificiel. À partir de 1962 en France, le CNES charge la Société anonyme de télécommunications (SAT) de développer les photopiles mises au point par l'équipe de Michel Rodot au Laboratoire CNRS de Bellevue⁸⁰. Le soutien de l'État aux fours solaires d'Odeillo s'inscrit dans la même logique de guerre froide que les photopiles états-unienne pour l'espace. Il vise le développement de matériaux réfractaires stratégiques pour les industries militaires, nucléaires et aéronautiques. Par son

⁷⁹ DUFFIE John A. et TABOR Harry Z., « The International Solar Energy Society: The First 25 Years, 1955 to 1980 », in Karl W. Böer (dir.), *The Fifty-Year History of the International Solar Energy Society and its National Sections*, vol. 1, Boulder, American Solar Energy Society, 2005, p. 1-64, p. 27 & 37.

⁸⁰ RODOT Michel, « Les photopiles solaires : du laboratoire au seuil de la diffusion massive », in HERLÉA A. (éd.), *L'énergie solaire en France*, Paris, éditions du CTHS, 1995, p. 85-106.

ampleur incarnée par le four géant, le programme solaire français des années 1960 rend compte d'une « hubris technologique »⁸¹. Plus que la réalisation d'une utopie solaire, il apparaît en effet comme une démesure technico-industrielle de « la politique de la grandeur » des années 1960. La démesure s'incarne dans le couplage intime, *a priori*, d'une logique de recherche et d'un projet industriel économiquement rentable au sein d'un même instrument. Une commission de l'AFEDES, présidée par Ivan Peychès, conclut son rapport de 1971 sur l'« étude économique sur les fours solaires » en soulignant « la difficile compatibilité de la recherche simultanée de très hautes puissances [1000kW] et de très hautes températures [3500°C] », les industriels étant demandeurs de températures moins élevées (2500°C), qui pourraient être compatibles avec des fours solaires rentables⁸².

Alors que l'espoir économique faiblit, le projet solaire d'Odeillo perd son unité. Face à la dispersion des recherches, le directoire du CNRS scinde le LES en 1964 et crée le Laboratoire des ultra-réfractaires (LUR). Placé sous la responsabilité de Foëx, le LUR se positionne en recherche physico-chimique sur les matériaux et en recherche technico-instrumentale sur les fours solaires, à plasma et à arc électrique ainsi qu'en construction de serres de culture à Mont-Louis et à Banyuls-sur-mer. Le LUR revient vers la communauté des hautes températures et utilise son expertise solaire au profit des autres techniques. Foëx et ses collaborateurs, Jean-Pierre Traverse et Jean-Pierre Coutures, montent des appareils de diffraction des rayons X à haute température permettant d'étudier la structure cristalline des réfractaires dans des conditions extrêmes en collaboration avec le Laboratoire des hautes pressions de Meudon-Bellevue de Boris Vodar⁸³ et du Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide de Robert Collongues, disciple de Chaudron. Foëx et Collongues comparent les performances des fours à images et des fours solaires, tous deux basés sur la concentration de rayonnement (lampes à arc ou à xénon versus lumière solaire), et concluent à l'équivalence des deux technologies. De son côté, le LES sous la responsabilité de Trombe quitte progressivement la recherche fondamentale pour les sciences de l'ingénieur à travers les fours solaires et la climatisation des maisons. Des Services généraux complètent l'organisation tripartite du Groupe des laboratoires d'Odeillo⁸⁴. À partir de 1969, Trombe quitte la direction du LTR pour se consacrer à plein temps à celle du LES au moment où le four géant devient opérationnel. Le Groupe d'Odeillo comporte alors une cinquantaine d'employés répartis par tiers entre les trois entités (LES, LUR, Services) dont les trois quarts sont des personnels techniques et

⁸¹ HEYMANN Matthias, « Signs of Hubris: The Shaping of Wind Technology Styles in Germany, Denmark, and the United States, 1940-1990 », *Technology and Culture*, vol. 39, n°4, 1998, p. 641-670.

⁸² PEYCHÈS Ivan, « Étude économique sur les fours solaires. Conclusions présentées par la commission ad-hoc de l'AFEDES », *Journées d'études sur les fours solaires et les fours à images, Odeillo, 1-2 octobre 1971*. Fonds Marc Foëx : documents scientifiques et administratifs (1952-1977), AN n°920044 LABOS, art. 34 (AFEDES).

⁸³ *Rapport sur l'activité générale du CNRS*, Oct. 1963 – Oct. 1964, Paris, CNRS, 1964, p. 283-284, AN n°990001, art. 65.

⁸⁴ *Rapport d'activité du Laboratoire de l'énergie solaire*, Paris, CNRS, 1974, p. 2, AN n°850001, art. 14.

administratifs et un quart de chercheurs. Dans le même temps, les relations entre les deux vieux compagnons de route, Trombe et Foëx, se détériorent car Trombe semble vouloir faire cavalier seul⁸⁵.

Jusqu'au premier choc pétrolier de 1973, les divers programmes solaires (laboratoires Foëx, Perrot, Rodot, Trombe, le CNES, la DMA, Pechiney, Saint-Gobain) sont menés en ordre dispersé en France. La crise énergétique de la décennie 1970 met sur l'agenda politique les énergies alternatives au charbon et au pétrole. Une délégation aux Énergies nouvelles sous la direction de Jean-Claude Colli est établie en 1975 par le gouvernement de Jacques Chirac (1974-1976). L'énergie solaire devient enjeu de politique publique⁸⁶. Le CNRS lance un Programme interdisciplinaire pour le développement de l'énergie solaire (PIRDES) placé sous la direction de Robert Chabbal, directeur du département physique du CNRS. Malgré son ambition interdisciplinaire, le PIRDES est contrôlé par les physiciens. Ses principaux thèmes de recherche sont la conversion photovoltaïque, l'habitat solaire, la production de carburant solaire et la conversion thermodynamique. En 1974, le CNRS s'interroge sur la faisabilité de centrales électro-solaires, produisant de l'électricité à partir de fluides portés à haute température par la concentration de rayonnement. Il commande une étude au LES qui réalise un premier prototype de 64 kW électrique, opérationnel en 1976. Comme pour le réfrigérateur solaire, le LES s'inspire des travaux du groupe de Valentin Baum à l'Institut énergétique de l'Académie des sciences d'URSS.

Une fois démontrée la faisabilité, les pouvoirs publics prévoient la construction de deux centrales électro-solaires, l'une près de Marseille, l'autre près d'Odeillo, pour la fin de la décennie 1970⁸⁷. Avant même que les deux projets sortent de terre, est créée en mars 1979, par le gouvernement de Raymond Barre (1976-1977), le Commissariat à l'énergie solaire (COMES), sous la direction d'un ingénieur des Mines, Henry Durand. Sur le modèle du CEA, le COMES dépend du ministère de l'Industrie et dispose d'un budget de 100 millions de francs pour remplir deux missions : coordonner, à la suite du PIRDES, la recherche et le développement solaire ; financer des recherches solaires pour 40% du budget et des applications solaires pour 50%. Ses deux priorités sont la biomasse et le photovoltaïque tandis que l'habitat solaire est mal identifié⁸⁸. Les deux projets de centrales électro-solaire sont poursuivis. Le premier prototype, dont l'acronyme THEK signifie Thermo-Helio-Electric-Kilowatt, doit fournir au réseau électrique EDF une puissance moyenne, de l'ordre de 100kW. Il est construit grâce à l'action conjuguée de plusieurs laboratoires universitaires (astronomie, heliophysique,

⁸⁵ Lettre de Marc Foëx à F. Gallais (directeur scientifique du CNRS), 30 octobre 1970, Fonds Marc Foëx : documents scientifiques et administratifs (1952-1977), AN n°920044 LABOS, art. 32 (dépôt Gif-sur-Yvette).

⁸⁶ BOUVIER Yves et PEHLIVANIAN Sophie (éd.), *Les politiques publiques de l'énergie solaire, Annales historiques de l'électricité*, n°11, numéro spécial, 2013, 144 p.

⁸⁷ DEFLANDRE Jean, « Faire face à la crise du pétrole : l'énergie solaire au CNRS », Interview de Girolamo Ramunni, *La Revue pour l'histoire du CNRS*, n°4, 2001.

⁸⁸ Biomasse (32 %), photovoltaïque (30%), thermodynamique (19%), basse température (15%), météorologie et vent (4%), d'après le *Rapport d'activité du Commissariat à l'énergie solaire 1980*, Paris, COMES, 1980.

héliotechnique) et de sociétés privées (Bertin Technologies et CETHEL)⁸⁹. Plus grand, le second prototype, dont l'acronyme THEMIS (déesse grecque de la justice) signifie Thermo-Helio-Electric-Mégawatt, doit fournir au réseau EDF une puissance de 2,5MW. Au même titre que l'industrialisation des fours solaires, il nécessite un changement d'échelle par rapport au prototype de 64kW de Mont-Louis. Construite à Targassonne à quelques kilomètres dans la plaine en contrebas d'Odeillo, la centrale électro-solaire THEMIS est une réalisation commune du LES et d'EDF. Le demi-cercle des deux cents héliostats de cinquante mètres carrés chacun réfléchit et concentre la lumière solaire sur une tour de cent mètres de haut dans laquelle circule un fluide calorifique de sels fondus, chauffé par le rayonnement lumineux. À leur tour les sels fondus chauffent de l'eau qui actionne des turbines. Le mouvement des turbines produit de l'électricité à la façon d'une centrale thermique classique. Le savoir-faire acquis par le LES depuis trente ans dans le développement des fours solaires est crucial pour le réglage de l'ensemble des héliostats de THEMIS. La centrale THEMIS est mise en opération en 1983, un an après la disparition du COMES, intégré à la nouvelle Agence française pour la maîtrise de l'énergie. Mais elle est arrêtée par EDF lors du contre-choc pétrolier de 1986. Elle aura fonctionné par intermittence pendant trois ans et aura coûté 230 millions de francs 1980. La filière électro-solaire est rapidement abandonnée.

CONCLUSION

La recherche et le développement de l'énergie solaire sont caractérisés dans la deuxième moitié du XX^e siècle par une dynamique internationale de « triple hélice université-industrie-gouvernement », conforme au modèle sociologique de Henry Etzkowitz et Loet Leydesdorff. Ce champ hybride soutenu par les intérêts industriels, coloniaux, militaires, scientifiques et culturels met en jeu des logiques d'affrontement Est-Ouest de guerre froide et des logiques de domination Nord-Sud de décolonisation-néocolonialisme. Le Laboratoire de l'énergie solaire CNRS de Mont-Louis-Odeillo (LES) dirigé par Félix Trombe, secondé par Marc Foëx, constitue l'un des principaux nœuds de cette hélice internationale. Il développe un programme pionnier sur les fours solaires, qui intéresse les militaires américains et soviétiques en lien avec les recherches sur les matériaux de haute technologie, et un programme original de solaire passif, qui séduit les intérêts coloniaux français et les tenants du développement des pays du Sud, via l'UNESCO. Les activités du LES durant quatre décennies (1946-1986) peuvent être définies suivant quatre principales caractéristiques. Premièrement, elles s'apparentent à la « recherche technico-instrumentale » du modèle proposé par Terry Shinn. La mise au point de prototypes solaires à Mont-Louis-Odeillo articule des pratiques interstitielles, génériques et

⁸⁹ PERI G. , DESAUTEL J., IMBERT B., AUDIBERT M., PASQUETTI R., BATISTELLI J.-P., « Solar thermal conversion installations in the medium power range – The THEK project », *Revue Internationale d'Héliotechnique*, 2 (1978): 27-31.

météorologiques pour la réalisation de fours, de maisons, de serres et de réfrigérateurs solaires. Deuxièmement, ces activités opèrent par changement d'échelle et industrialisation progressive à partir d'un projet initial artisanal. Le prototype le plus emblématique est le four solaire dont la puissance passe de 2kW pour le premier appareil (1946) à 75kW pour le second (1952) puis 1000kW (1969) pour le troisième. Cette industrialisation progressive est permise par la mise en place d'alliances avec des institutions de recherche (CNRS, DGRST, « conseil des sages »), d'industries civile (CEA) et militaire (Comité d'action scientifique de la Défense nationale dirigé par Jean-Paul Bergeron) et d'intérêts coloniaux (gouvernements de l'Algérie et du Maroc). Troisièmement, les activités du LES sont marquées par une intense interdisciplinarité à partir d'acculturations successives en optique, thermique, météorologie, électronique, ingénierie des matériaux, architecture et agronomie. Cette culture de l'interscience a été transmise par la tradition des hautes températures (comités Rothschild et CNRS dirigés par Paul Lebeau), le programme sur les terres rares (de Georges Urbain) et les deux expériences de guerre en France (1915-1918 et 1939-1940). Elle se double d'emprunts, appropriations et améliorations au niveau international comme le montre l'inspiration vis-à-vis du programme soviétique conduit par Valentin Baum en réfrigération solaire et centrales électro-solaires. Quatrièmement, les activités de Mont-Louis sont entreprises par un groupe de chercheurs dynamiques, en perpétuelle effervescence dont Trombe, universitaire ingénieux, pragmatique et ouvert aux collaborations industrielles et militaires, est le principal maître d'œuvre.

Au-delà de ces quatre permanences, la trajectoire du Laboratoire de l'énergie solaire se décompose en trois périodes en fonction du statut social et culturel donné à l'énergie solaire et donc par extrapolation à l'objet-soleil. La première période, artisanale, ne dure que trois ans, à Meudon, de 1946 à 1949. Durant ce laps de temps court, l'énergie solaire occupe une place marginale, entreposée chez les astronomes de l'observatoire d'à-côté, quasiment clandestine par rapport à l'activité dominante du Laboratoire des terres rares de Meudon-Bellevue centrée sur la chimie minérale, la métallurgie et les hautes températures. Comme le soleil dans le ciel nuageux de la région parisienne, l'énergie solaire n'est quasiment nulle part. C'est la première phase de l'utopie solaire au sens étymologique « en aucun lieu », un lever de soleil hésitant après les pénuries de la deuxième guerre mondiale. La seconde période coïncide avec la « décennie solaire » qui se déploie dans le monde de 1948-1958. Entrepreneurs américains, universitaires occidentaux, chercheurs soviétiques, politiciens du Sud explorent de multiples directions, se rencontrent périodiquement et, sous l'égide de l'UNESCO, définissent un projet solaire cohérent pour le développement des zones arides. En France, le passage de Meudon à Mont-Louis est contingent, dû à l'attrait quasi-atavique de Trombe pour les obscures cavernes montagneuses de sa jeunesse à l'abri du soleil, mais il fait sortir le soleil au-dessus des sommets pyrénéens avec une deuxième utopie solaire au sens littéraire que lui a donné Thomas More au début du XVI^e siècle comme

« gouvernement idéal des populations », en l'occurrence celles des zones arides croyant sortir de cinq siècles de domination Nord-Sud. Mais, l'idéologie du « développement » remplaçait seulement l'impérialisme militaire par la coercition économique et culturelle. Le mouvement d'industrialisation du solaire passif à Mont-Louis devait ainsi résoudre les problèmes énergétiques des « pays en voie de développement » par la concentration de la lumière solaire pour produire du chaud et du froid modérés, purifier l'eau et la rendre potable et propre à la « culture intensive ». Les politiciens du Nord quant à eux ne se saisissent pas de ces techniques opérationnelles pour développer la climatisation solaire des habitations. La troisième période, des années 1960 aux années 1980, réalise en France une troisième utopie solaire, au sens courant d'un « projet irréalisable », par la construction du « four à mille soleils » d'Odeillo. Plus que d'une utopie, ce chantier monumental rend compte de la démesure technico-industrielle des années 1960 qui voulait être simultanément instrument de *big science* et usine rentable. Par comparaison, le programme états-unien dissocie les enjeux de recherche (militaire) à Natick et les enjeux économiques des industriels de haute technologie, ce qui donne des fours solaires plus petits, plus nombreux, moins coûteux et aussi efficaces. Mais, la France est à l'heure des grands travaux de la période gaullienne (1958-1969) pour construire « une troisième voie » dans la guerre froide. Le projet industriel d'Odeillo se montre incapable de résoudre les problèmes énergétiques des années 1970. La construction de gigantesques centrales électro-solaires au tournant de 1980 est un échec économique, peu soutenu par EDF. L'expertise solaire de Mont-Louis-Odeillo est ainsi mise au service non pas du solaire passif, voulu par Trombe et Foëx, intégrant l'habitat humain dans son environnement proche avec un rendement énergétique élevé, mais de la filière électro-solaire, attachant l'habitat humain aux réseaux électriques étendus à rendement énergétique faible. De nulle part dans les années 1940, l'utopie solaire est devenue *un gouvernement idéologique des zones arides* dans les années 1950 sans avoir la capacité de résoudre les problèmes énergétiques des zones industrialisées dans les années 1970 et 1980. Dans sa révolution astronomique, du lever au zénith, le Soleil devenait objet d'expérimentation, de l'artisanat à l'industrie, des fantasmes techniques des humains sur la Terre.