

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBÉLIARD – UNIVERSITÉ DE
BOURGOGNE-FRANCHE-COMTÉ

ÉCOLE DOCTORALE « SOCIÉTÉS, ESPACES, PRATIQUES, TEMPS »

THÈSE

en vue de l'obtention du titre de docteur en

ÉPISTÉMOLOGIE, HISTOIRE DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

**HISTOIRE DE LA RECHERCHE SUR LES PILES À COMBUSTIBLE EN FRANCE DES
ANNÉES SOIXANTE AUX ANNÉES QUATRE-VINGT**

Présentée et soutenue publiquement à Sevenans par

NICOLAS SIMONCINI

le 3 décembre 2018

JURY

Robert BELOT, Professeur en Histoire contemporaine, Chaire européenne Jean Monnet, Université Jean Monnet de Saint-Étienne/Université de Lyon (directeur de thèse)

Fabienne PICARD, Maître de conférences HDR en Sciences économiques à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (co-encadrante de thèse)

Alain BELTRAN, Directeur de recherches en Histoire au Centre national de la recherche scientifique (rapporteur)

Bernadette BENSAUDE-VINCENT, Professeure émérite en Histoire et Philosophie des sciences à l'Université de Paris I Panthéon-Sorbonne (rapporteur)

Daniel HISSEL, Professeur en Génie électrique et systèmes pile à combustible à l'Université de Bourgogne-Franche-Comté, directeur de la fédération de recherche CNRS FC Lab, responsable de l'équipe SHARPAC, FEMTO-ST (examineur)

Pierre TEISSIER, Maître de conférences en Histoire des sciences et des techniques à l'Université de Nantes (examineur)

RÉSUMÉ

Les piles à combustible, dont le principe de fonctionnement est connu depuis le milieu du XIX^{ème} siècle, permettent de produire simultanément de l'électricité, de l'eau et de la chaleur à partir de combustibles et comburants tels que l'hydrogène et l'oxygène. À la fin des années cinquante, ces générateurs électrochimiques connaissent des perfectionnements majeurs, notamment grâce aux travaux de l'Anglais Francis T. Bacon, et sont utilisés aux États-Unis par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) au sein de ses programmes spatiaux. En France, des études sont mises en place au même moment dans des laboratoires publics et privés, tels que ceux d'Alstom, de l'Institut français du pétrole et du CNRS (Centre national de la recherche scientifique), sous l'égide des Armées et de la DGRST (Délégation générale à la recherche scientifique et technique), organisme d'État chargé de la politique de la recherche. Jusqu'au début des années quatre-vingt, des millions de francs sont ainsi investis et des centaines de chercheurs, ingénieurs et techniciens sont mobilisés pour améliorer la technique, travailler à son adaptation aux automobiles électriques, aux trains, aux sous-marins, à la construction de centrales de production industrielle d'électricité ou encore à la fourniture de solutions militaires. Alors que de nos jours les piles à combustible apparaissent en France comme des options majeures pour la transition énergétique, c'est tout l'objet de cette thèse que de retracer, restituer et analyser cette partie de leur histoire grâce à une enquête de terrain fondée sur la récolte d'archives et la réalisation d'entretiens avec des acteurs ayant participé aux recherches. Nous mettrons tout d'abord au jour les conditions socio-historiques et les dynamiques structurelles qui font que les piles à combustible deviennent un thème d'intérêt en France à la fin des années cinquante. Nous montrerons ensuite comment les études sont organisées puis réorientées dans les années soixante et soixante-dix en fonction de l'évolution du collectif de pensée et du réseau social créés autour de la technique. Enfin, nous examinerons l'ensemble des raisons politiques, économiques, scientifiques et sociales pour lesquelles ces travaux sont presque tous abandonnés au début des années quatre-vingt.

Mots-clés : pile à combustible – électrochimie – hydrogène – histoire des sciences et des techniques – épistémologie

Fuel cells, which operation principle has been known since the middle of the 19th century, allow to produce electricity, water and heat simultaneously from fuels and combustives like hydrogen and oxygen. At the end of the 50s, these electrochemical generators are perfected, particularly thanks to the work of Francis T. Bacon in England, and are used in the USA by NASA (National Aeronautics and Space Administration) for space programs. In France at the same period, private and public laboratories as Alstom, the IFP (French Petroleum Institute) and the CNRS (French National Center for Scientific Research) start their own studies under the supervision of the Ministry of Defense and the DGRST (General Commission for Scientific and Technical Research), a national institution in charge of scientific research policy. Until the beginning of the 80s, millions are thus invested and hundreds of researchers, engineers and technicians are mobilized to improve fuel cells, work on their adaptation to electrical cars, trains, submarines, on the construction of fuel cell power plants or specific military equipment. Now that in France fuel cells are considered as major options for energy transition, the objective of this dissertation paper is to analyze this period of their history thanks to a field investigation based on numerous archives and interviews with stakeholders who contributed to researches. We will first expose socio-historical conditions and structural dynamics which make fuel cells become a theme of national interest at the end of the 50s. We will then show how studies are organized and reoriented in the 60s and 70s according to the evolution of the thought collective and the social network created around fuel cells. Finally, we will examine all political, economic, scientific and social reasons which led to drop almost all fuel cell researches in the country at the beginning of the 80s.

Keywords: fuel cell – electrochemistry – hydrogen – history of science and technology – epistemology

REMERCIEMENTS

L'écriture d'une thèse a beau être un exercice éminemment solitaire,
La mienne n'aurait rien été sans toutes les personnes et institutions qui m'ont entouré.

Je tiens donc à les remercier par ces quelques vers,
Et leur exprimer ma reconnaissance quant au soutien qu'elles m'ont procuré.

Au ministère des Armées qui a financé ces années d'études,
Par le biais de l'IRSEM et du Service historique de la Défense,
Ces écrits traduisent ma gratitude ;
J'espère avoir répondu à vos espérances.

À vous Robert Belot et Fabienne Picard,
Qui avez cru en moi pour l'accomplissement de ce travail,
À vous les membres du jury pour votre concours et votre regard,
Vous qui joignez vos forces à la soutenance, cette dernière bataille.

À vous qui composez l'équipe de FEMTO-ST RECITS,
Pierre, Mathieu, Bénédicte, Laurent, Hui, Catherine,
Ne pas vous mentionner serait une hérésie,
Nastasya, Nathalie, Katy, Marina, Christine.

À vous tous qui avez bien voulu participer à mon enquête,
En particulier messieurs Bronoël, Pouchard, Chéron, Le Floch-Prigent et Bréelle.
Sans vos témoignages, mon œuvre aurait été des plus imparfaites,
Sans oublier vos si précieuses archives personnelles.

À vous les archivistes qui m'avez ouvert les portes de vos armoires secrètes,
Sachez que votre aide n'aura pas été vaine.
La vôtre non plus Bastien, Marie, Lola, âmes charitables toujours prêtes,
À parler et relire, vous devez en avoir marre du mot hydrogène.

À vous ma famille, mes amis,
Papa, Maman, Manène, Papi, Mamie, Guillaume, Thibaud, Emma,
Martine, Brigitte, Bénédicte, Jean-Michel, Catherine et les Mary,
Jigmé, Florent, Ali, Laetitia, Camille, Hannah.

À toi Audrey, ma douce, mon aimée,
Toi qui m'accompagnes depuis notre rencontre bordelaise,
De la Guadeloupe à Paris, tu fais de ma vie un conte de fées.
Enfin, à vous que je n'ai pas cités mais que je n'ai pas oubliés, je vous dois aussi cette thèse.

« Le physicien est comme Œdipe : c'est le sphinx qui interroge, lui, il doit trouver la bonne réponse ; l'historien est comme Perceval : le Graal est là, devant lui, sous ses yeux, mais ne sera à lui que s'il pense à poser la question. »

Paul Veyne, *Comment on écrit l'histoire*.

SOMMAIRE

RÉSUMÉ	2
REMERCIEMENTS	3
INTRODUCTION	7
I. Contexte académique de la recherche.....	8
II. Principe de fonctionnement de la pile à combustible.....	10
III. Cadres méthodologique et théorique.....	12
IV. Problématique et annonce du plan	19
PREMIÈRE PARTIE. Prolégomènes	22
PREMIER CHAPITRE. De l'expérience scientifique à l'objet technique.....	23
1.1 Francis T. Bacon, figure de l'entrepreneuriat scientifique.....	23
1.2 « Un stade de développement similaire à l'aéroplane de Blériot ».....	30
1.3 Les piles à combustible à la conquête de l'espace	35
DEUXIÈME CHAPITRE. Vers une politique nationale de la recherche en France	47
2.1 La réorganisation de la science et de la technique après la Seconde Guerre mondiale : la difficile mise en œuvre de politiques de la recherche et l'avènement de la technoscience.....	47
2.2 Les États-Unis et le complexe du retard	55
2.3 Du gouvernement des sciences aux sciences du gouvernement	64
TROISIÈME CHAPITRE. Les conditions socio-historiques d'un engouement technologique	72
3.1 Le développement de l'électrochimie française.....	72
3.2 L'objectif de la conversion des énergies.....	77
3.3 Les enjeux de la recherche scientifique à caractère militaire.....	84
DEUXIÈME PARTIE. Acteurs, pratiques et savoirs en action.....	93
QUATRIÈME CHAPITRE. Les moyens d'essais comme régime de production des savoirs (1958-1962)	94
4.1 La construction d'un réseau d'acteurs autour des piles à combustible en France	94
4.2 Dynamiques d'interaction entre militaires, universitaires et industriels.....	109
4.3 La vie des laboratoires : analyses croisées.....	120
CINQUIÈME CHAPITRE. La transformation du cadre des recherches (1963-1965).....	134
5.1 Le Laboratoire d'électrolyse du CNRS au centre des recherches fondamentales	135
5.2 Penser les piles à combustible dans leurs cadres de fonctionnement et d'usage	145
5.3 L'exposition « Piles à combustible » du Palais de la découverte	154
SIXIÈME CHAPITRE. Redirections socio-techniques (1966-1969).....	165
6.1 L'émergence d'un collectif de pensée hybride	166
6.2 La France dans l'espace des recherches internationales	181

6.3 Aux sources du retrait de la DGRST	191
TROISIÈME PARTIE. Les piles à combustible entre enjeux scientifiques et prises de position technologiques	206
SEPTIÈME CHAPITRE. Les piles à combustible à l'épreuve de la politique énergétique (1970-1973)	207
7.1 Une transition difficile : le nouveau comité « Électrotechnique nouvelle » comme espace de conflit entre électrochimistes	207
7.2 D'Alstom à GDF : résiliences et stratégies des acteurs en temps de crise.....	217
7.3 L'EDF et le véhicule électrique au centre de la reconfiguration des recherches	232
HUITIÈME CHAPITRE. Des piles à combustibles à la pile à hydrogène (1974-1975).....	248
8.1 Une « révolution » ? La construction d'un nouveau paradigme au regard des promesses de la production d'hydrogène par voie nucléaire	249
8.2 Diffusion, renforcement et institutionnalisation du paradigme hydrogénique	260
NEUVIÈME CHAPITRE. L'arrêt des recherches : « une affaire d'hommes » (1976-1981)	278
9.1 Un « retour en grâce » anodin pour l'Institut français du pétrole	279
9.2 Le repositionnement des études vers la recherche électrochimique fondamentale et les applications spéciales	291
9.3 Le démantèlement du réseau social	302
CONCLUSION.....	318
I. Une technique, une politique, des phénomènes structurels	318
II. Réaliser des prototypes, maîtriser les phénomènes électrochimiques.....	319
III. L'importance de la politique énergétique dans l'orientation des recherches.....	321
IV. Le redémarrage des études au début des années quatre-vingt-dix : quel réseau social pour quelles recherches ?.....	325
LISTE DES FIGURES.....	329
BIBLIOGRAPHIE	330
INDEX DES NOMS PROPRES ET DES NOMS COMMUNS	354
GLOSSAIRE.....	361
ANNEXES	364

INTRODUCTION

Le 12 juin 2018, le journal *Le Monde* fait état d'une « accélération prodigieuse »¹ des projets relatifs à l'hydrogène et aux piles à combustible en France, parmi lesquels la création d'une station hydrogène et d'une flotte d'utilitaires à Rungis, la présentation d'un bateau à hydrogène à Nantes, un test d'injection d'hydrogène dans le réseau de gaz à Dunkerque et la mise au point de bus équipés de piles à combustible à Pau. D'autres concernent encore l'adaptation de piles à combustible sur des avions par Safran, la mise en service par Alstom d'un train à hydrogène sur les voies ferrées allemandes et le lancement d'une collaboration entre Peugeot et General Motors dans le domaine des systèmes de traction automobile à piles à combustible². Au même moment, le ministre de la Transition écologique et solidaire Nicolas Hulot annonce la mobilisation de cent millions d'euros pour « accompagner »³ le déploiement général de la filière hydrogène.

Le 26 avril 1968, l'ORTF (Office de radiodiffusion-télévision française) diffuse un reportage consacré à l'automobile électrique. Un représentant de Renault y intervient pour déclarer que le constructeur s'intéresse aux « piles à combustible fonctionnant à basse température et susceptibles d'être montées à bord de véhicules » : « Notre accord avec le groupement comprenant la Compagnie générale de télégraphie sans fil, l'Institut français du pétrole et le Carbone Lorraine », explique-t-il, « a pour objet l'étude d'une telle pile d'une puissance de vingt-quatre kilowatts ». Tel qu'il est établi, le projet doit d'abord permettre de réaliser une fourgonnette de type Estafette, puis de construire d'autres véhicules une fois la technique maîtrisée. Un de ses collègues ajoute croire que « c'est une formule possible de l'avenir », que le bureau d'études de Renault « y travaille » et que dans cette mesure il « ne peut pas » en parler. À ces discours succède celui d'un représentant de Peugeot : « Les automobiles Peugeot et Alsthom ont signé un contrat en 1967 pour l'étude de la réalisation de piles à combustible », dit-il. Il précise que les deux entreprises visent essentiellement l'adaptation à « des véhicules à propulsion électrique ». Enfin, le directeur des recherches d'Alsthom Bogdan Broniewski présente la technique comme un dispositif « nouveau » et « révolutionnaire » transformant « directement l'énergie chimique en énergie électrique ». Tout en s'adressant au journaliste avec qui il s'entretient, il prend dans ses mains une pile à combustible développée par sa société : « Vous voyez, une telle pile, elle fait plusieurs kilowatts. Elle pèse quelques kilos à peine ; c'est donc extrêmement léger et très compact »⁴.

¹ *Le Monde*, 74^{ème} année, n°22834, Cahier Eco&Entreprise, le 12 juin 2018, p. 6.

² PSA Groupe-General Motors, « Opel/Vauxhall to join PSA Group », Press Release, le 6 mars 2017, p. 3.

³ Ministère de la Transition écologique et solidaire, « Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique », dossier de presse, le 1^{er} juin 2018, p. 3.

⁴ INA, « A quand la voiture électrique ? », émission Panorama, ORTF, le 26 avril 1968.

Les cinquante années qui séparent ces deux ensembles d'événements similaires le montrent bien : la recherche et le développement ayant trait aux piles à combustible ne sont pas des phénomènes nouveaux en France. De la fin des années cinquante au début des années quatre-vingt, l'engouement pour ces générateurs électrochimiques bat même son plein ; de très nombreuses études sont entreprises dans les laboratoires privés et dans le milieu académique sous l'égide des Armées et de la DGRST (Délégation générale à la recherche scientifique et technique), organisme d'État chargé de la politique de la recherche. Des millions de francs sont investis et des dizaines – sinon des centaines – de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens sont mobilisés pour améliorer la technique, travailler à l'équipement d'automobiles, de trains, de sous-marins, à la construction de centrales de production industrielle d'électricité ou encore à la fourniture de solutions militaires. Alors que de nos jours les piles à combustible apparaissent comme des options majeures pour la transition énergétique en ce qu'elles constituent des alternatives à la fois en tant que convertisseurs énergétiques⁵ et comme modes de stockage des énergies renouvelables⁶, c'est tout l'objet de cette thèse que de retracer, restituer et analyser cette partie de leur histoire.

I. Contexte académique de la recherche

L'écriture de cette thèse s'inscrit dans un processus de réflexion, porté par l'axe transversal RECITS (Recherche et étude sur le changement industriel, technologique et sociétal) au sein de l'Institut Femto-ST (UMR 6174), sur l'appréhension du champ de la technique au travers de recherches interdisciplinaires en sciences humaines et sociales (histoire, économie, sociologie, philosophie, épistémologie). La singularité de cette approche se manifeste par une insertion de l'équipe dans une université de technologie – l'UTBM (Université de technologie de Belfort-Montbéliard) – et par un dialogue opératoire avec les sciences de l'ingénieur. L'étude de la filière hydrogène et des piles à combustible constitue justement pour ces dernières, et en particulier pour la fédération de recherche FC Lab (FR CNRS 3539), un domaine de spécialité de la recherche universitaire de la région Grand Est. Paradoxalement, les développements français en matière de piles à combustible n'ont jusqu'à présent que peu fait l'objet d'une approche socio-historique. Or, au contraire du physicien Pierre Aigrain qui déclarait en 1965 que « le chercheur scientifique est probablement de tous les intellectuels le moins à même d'apprécier la valeur des travaux épistémologiques »⁷, nous pensons qu'une vision diachronique et analytique de la constitution de ce domaine peut apporter un cadre d'intelligibilité et

⁵ EDWARDS, Peter P. et *al.*, « Hydrogen and Fuel Cells: Towards a Sustainable Energy Future », in *Energy Policy*, Vol. 36, 2008, pp. 4356-4362.

⁶ EBERLE, Ulrich, FELDERHOFF, Michael, SCHÜTH, Ferdi, « Chemical and Physical Solutions for Hydrogen Storage », in *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 48, 2009, pp. 6608-6630.

⁷ CHARBONNIER, Georges, *Entretiens avec Pierre Aigrain sur l'homme de science dans la société contemporaine*, Presses universitaires de France, 1966, p. 108.

des éléments de réponse à certaines interrogations de ceux qui y travaillent. Ceux qui s'intéressent aux piles à combustible, qu'ils soient rattachés à la recherche publique, au monde de l'entreprise ou au corps politique, sont en effet confrontés à de nombreuses problématiques, aussi bien scientifiques qu'économiques et sociales⁸, qui font que l'avènement de la technique est souvent renvoyé à un « futur proximal »⁹, toujours proche mais qui n'advient jamais.

De là découle pour RECITS la nécessité de mieux comprendre – entre autres – les tensions, les dynamiques écosystémiques et les verrous qui jalonnent le chemin de cette « technologie éternellement émergente »¹⁰. Depuis 2012, les recherches de l'axe transversal se sont ainsi focalisées sur l'analyse de l'activité des acteurs contemporains (chercheurs, utilisateurs, industriels, politiques, etc.), la collaboration avec les sciences de l'ingénieur pour la réalisation d'études technico-économiques, et le repérage des régularités historiques. Concernant le premier point, Fabienne Picard et Bénédicte Rey se sont par exemple attelées à décrypter la mécanique des représentations construites par les chercheurs par le biais d'une approche socio-cognitive de l'activité scientifique¹¹. Il en ressort que l'orientation du cadre paradigmatique guidant les études sur les systèmes à piles à combustible ne dépend pas uniquement des performances propres à la technique mais aussi de la vision qu'ont les chercheurs du jeu d'interactions sociales complexe auquel ils participent. D'autres travaux, auxquels nous avons pu prendre part, ont mis l'accent sur l'importance des réseaux socio-techniques pour le déploiement de projets expérimentaux relatifs à l'hydrogène et leur transfert vers la société¹². À partir d'une enquête ethnographique réalisée en 2015 sur la station Myrte en Corse, qui couple des panneaux photovoltaïques, un électrolyseur et des piles à combustible, nous avons ainsi montré que l'instabilité du réseau d'acteurs hétérogènes soutenant la station ralentissait son processus de légitimation.

D'autre part, la collaboration avec les chercheurs en sciences de l'ingénieur de FC Lab a mené à la publication d'un article sur les techniques de production et du stockage de l'hydrogène, leur validité et l'impact du contexte politique sur leur développement¹³. Enfin, Robert Belot et Fabienne Picard se

⁸ BENTO, Nuno, ANGELIER, Jean-Pierre, « La transition vers l'hydrogène est-elle bloquée par un verrouillage technologique au profit des énergies fossiles ? », *Cahier de recherche LEPH*, n°27, 2009, pp. 1-21.

⁹ BELL, Genevieve, DOURISH, Paul, « Yesterday's Tomorrows: Notes on Ubiquitous Computing's Dominant Vision », in *Personal and Ubiquitous Computing*, Vol. 11, n°2, 2007, p. 134.

¹⁰ FRERY, Frédéric. « “Où en est l'innovation aujourd'hui ?” », in *Entreprendre & Innover*, Vol. 18, n°2, 2013, p. 85.

¹¹ PICARD, Fabienne, REY, Bénédicte, « Diffusion socio-technique de la pile à combustible en France. Éléments d'appréciation à partir du regard des chercheurs », in ZELEM, Marie-Christine, BESLAY, Christophe, *Sociologie de l'énergie. Gouvernance et pratiques sociales*, CNRS Éditions, 2015, pp. 205-212.

¹² SIMONCINI, Nicolas, et al., « Social Aspects of H2 Supply Chains – Hydrogen Technologies Genesis and Development. The Case of Myrte Platform », in AZZARO-PANTEL, Catherine, *Hydrogen Supply Chain: Design, Deployment and Operation*, Elsevier, 2018, pp. 293-307.

¹³ BECHERIF, Mohamed, et al., « Hydrogen Energy Storage: New Techno-Economic Emergence Solution Analysis », in *Energy Procedia*, Vol. 74, 2015, pp. 371-380.

sont penchés sur l'histoire institutionnelle de la recherche sur les piles à combustible et ont repéré trois périodes se succédant¹⁴ : une première phase d'emballement, s'étalant des années soixante à quatre-vingt et marquée par l'intervention publique ; une deuxième phase de retrait courant des années quatre-vingt à quatre-vingt-dix, s'expliquant par les perspectives limitées des applications industrielles et l'affaiblissement du rôle stratégique de l'État ; une troisième phase de renouveau, courant depuis la fin des années quatre-vingt-dix, portée par la mobilisation des entreprises, de l'ANR (Agence nationale de la recherche) française et de l'Union européenne. Ce sont précisément l'étude des phases d'emballement et de retrait que nous nous proposons d'approfondir ici. Avant d'entrer plus en détail dans le vif du sujet, il convient cependant de définir ce qu'est une pile à combustible, d'explicitier notre démarche méthodologique et théorique et de poser la problématique qui a guidé notre travail.

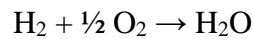
II. Principe de fonctionnement de la pile à combustible

La découverte du principe de fonctionnement de la pile à combustible est encore sujette à controverses. Pour certains, le chimiste allemand naturalisé suisse Christian Friedrich Schönbein est le premier à avoir publié les résultats d'une expérience scientifique rattachée au phénomène dans les pages du *Philosophical Magazine* en janvier 1839. Pour d'autres, c'est le juriste anglais William Robert Grove qui a véritablement introduit, la même année, le concept de la pile à hydrogène en produisant un courant électrique à partir de l'immersion d'électrodes de platine dans une solution d'acide sulfurique d'une part et dans des récipients contenant de l'hydrogène et de l'oxygène d'autre part¹⁵. Depuis cette date, la technique a subi de multiples perfectionnements – notamment grâce aux travaux de Francis T. Bacon à partir des années trente – que nous détaillerons dans les pages qui suivent. Il reste qu'une pile à combustible est fondamentalement constituée d'une anode alimentée en combustible, d'une cathode alimentée en comburant, ces deux électrodes étant séparées par un électrolyte. À ces éléments s'ajoutent également des catalyseurs permettant d'orienter la vitesse des réactions électrochimiques. Si la pile à combustible convertit l'énergie *chimique* en énergie *électrique* et en énergie *thermique*, elle se différencie des accumulateurs et des piles classiques par la nature de ses électrodes qui ne subissent aucune altération de structure au cours des réactions et ne servent que de supports à ces dernières.

¹⁴ BELOT, Robert, PICARD, Fabienne, « The Three Ages of Fuel Cell Research in France: A Socio-Technical System's Resistance to Change », in *Fuel Cells*, Vol. 14, n°3, 2014, pp. 525-532.

¹⁵ ANDÚJAR, J. M., SEGURA, F., « Fuel Cells: History and Updating. A Walk along Two Centuries », in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, 2009, pp. 2309-2322.

Il existe plusieurs types de piles à combustible pouvant être classés en fonction de la température de fonctionnement, des combustibles (dihydrogène, méthanol, monoxyde de carbone) et comburants (air, dioxygène) utilisés, de l'oxydation directe ou indirecte ou encore de la nature de l'électrolyte (liquide, solide). Bien que différents modèles existent, les piles à combustible sont en majorité le lieu « d'une combustion électrochimique contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production d'électricité, d'eau et de chaleur »¹⁶, selon la formule établie :



Cette réaction générale est le fruit de deux demi-réactions, l'une d'*oxydation* du dihydrogène et l'autre de *réduction* du dioxygène. Dans une pile à membrane échangeuse de protons par exemple¹⁷, l'électrolyte polymère bloque le passage des électrons (e^-) du dihydrogène, qui sont captés par l'anode, mais laisse circuler ses ions (H^+) :



Arrivés à la cathode après avoir traversé l'électrolyte, les ions H^+ se combinent avec le dioxygène et les électrons, dégageant par là même de l'eau et de la chaleur (Q) :

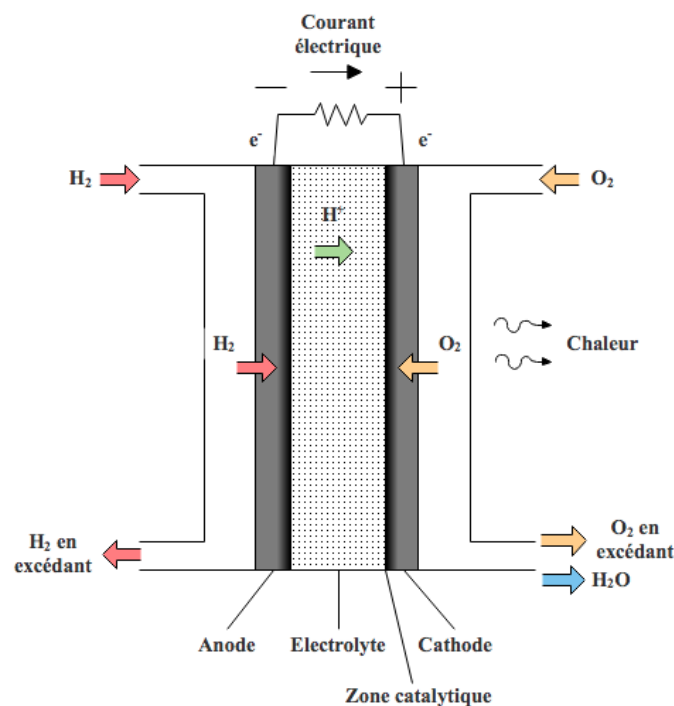
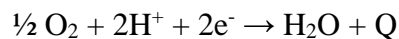


Fig. 1 – Schéma de fonctionnement d'une pile $\text{H}_2\text{-O}_2$ à membrane échangeuse de protons

¹⁶ BLUNIER, Benjamin, MIRAOUI, Abdellatif, *Piles à combustible. Principes, modélisation, applications avec exercices et problèmes corrigés*, Ellipses, 2007, p. 7.

¹⁷ MAYE, Pierre, *Générateurs électrochimiques*, Dunod, 2010, p. 132.

Type de pile à combustible	Électrolyte	Combustible	Comburant	Température de fonctionnement	Puissance
Alcaline	Hydroxyde de potassium	H ₂	O ₂	80 à 250°C	Jusqu'à 100 kW
Carbonates fondus	Carbonates de lithium et de potassium fondus	H ₂ et/ou CO	O ₂ + CO ₂	600 à 700°C	De 500 kW à 10 MW
Acide phosphorique	Acide phosphorique liquide	H ₂	O ₂ /Air	180 à 210°C	Jusqu'à 50 MW
Membrane échangeuse de protons	Membrane polymère	H ₂	O ₂ /Air	60 à 80°C	Jusqu'à 10 MW
Oxyde solide	Céramique solide	H ₂ et/ou CO	O ₂	800 à 1000°C	Jusqu'à 10 MW

Fig. 2 – Les principaux types de piles à combustible étudiés

III. Cadres méthodologique et théorique

Si cette recherche s'est fondée sur un plan de travail qui « multiplie les regards »¹⁸ en mobilisant les outils et les connaissances rattachés à plusieurs disciplines – en particulier à la sociologie, à l'histoire des sciences et des techniques et à l'épistémologie – on trouve avant toute chose à sa source une volonté d'inscription dans une démarche compréhensive et inductive de la réalité étudiée. L'intérêt étant de ne pas partir d'une théorie qui pourrait parfaitement « coller » au terrain ethnographique chaque fois que nécessaire mais d'un terrain ethnographique à partir duquel nous avons adapté des outils adéquats, tout en nous prémunissant contre des procédés interprétatifs inappropriés¹⁹. L'élaboration d'un corpus de sources s'est trouvée de fait au cœur de notre recherche, en ce que nous nous sommes appuyés sur une argumentation empirique et des acteurs « identifiables »²⁰. L'objectif de cette thèse n'était en effet pas de produire une histoire des piles à combustible concentrée sur

¹⁸ LES ANNALES, « Tentons l'expérience », in *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*, 44e année, N. 6, 1989, p. 1323.

¹⁹ BEAUD, Stéphane, WEBER, Florence, *Guide de l'enquête de terrain*, La découverte, 2010, pp. 50-51.

²⁰ OFFENSTADT, Nicolas, entrée « Socio-histoire », in DELACROIX, Christian, DOSSE, François, GARCIA, Patrick, OFFENSTADT, Nicolas (dir.), *Historiographies. Concepts et débats*, Gallimard, 2010, p.621.

l'unique évolution de la technique dans le temps mais de conduire une histoire de la *recherche* sur les piles à combustible. En somme, c'est bien une histoire *sociale* faite à la fois d'individus, d'institutions, d'objets et de discours pris dans un ensemble de relations que nous proposons ici. Pour véritablement nous « enfoncer » dans la situation humaine, comme le prescrivait Maurice Merleau-Ponty²¹, nous avons donc opté pour une méthode principalement constituée autour de deux types enquêtes que nous avons croisés : une enquête archivistique et une enquête par entretiens.

La première enquête a porté sur le recueil d'archives issues de fonds divers : ceux d'institutions publiques, d'entreprises privées, de personnes, en majeure partie en France mais aussi à l'étranger. Ils composent un vaste ensemble de comptes rendus de réunions, de rapports, de plans techniques, de contrats chiffrés, de conventions, d'études, de photographies, de notes internes, de lettres, etc. Des éléments de littérature scientifique, tels que des articles publiés, de littérature grise et de presse, généraliste ou scientifique, ont également été joints au corpus. La liste est longue car ce sont plus de dix mille pages de documents qui ont été photographiées, récupérées, scannées, etc. Nous pouvons toutefois expliciter comment nous avons peu à peu rassemblé ces éléments. Ayant connaissance des travaux de Michel Callon²², de Robert Belot et de Fabienne Picard qui faisaient état du rôle prédominant de la DGRST dans la recherche sur les piles à combustible pour la période étudiée, nous nous sommes en premier lieu orientés vers les fonds de cet organisme aux Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine. Il s'agissait de notre point d'entrée dans le terrain : ceux-ci sont extrêmement riches mais les archives concernant de près ou de loin les piles à combustible, l'hydrogène et plus généralement la question énergétique y sont inégalement réparties. Plusieurs consultations ont donc dû y être effectuées. L'analyse de ces fonds nous a ensuite permis de comprendre deux choses : d'une part que la DGRST était effectivement l'organe décisionnel central pour l'orientation des recherches sur la technique et son financement des années soixante aux années quatre-vingt ; d'autre part qu'elle entretenait des relations sur le sujet avec de nombreux acteurs extérieurs à ses bureaux. C'est ce qui nous a mené à parcourir les fonds du CNRS (Centre national de la recherche scientifique), non seulement aux Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine mais aussi aux archives du Centre à Gif-sur-Yvette, du ministère des Armées à Vincennes, de l'IFP (Institut français du pétrole) à Rueil-Malmaison, d'Alstom aux Archives nationales du monde du travail à Roubaix et aux Archives départementales à Belfort, de Peugeot au Centre d'archives de Terre Blanche situé à Hérimoncourt, de l'EDF (Électricité de France) à Blois, du CNAM (Conservatoire national des arts et métiers) à Paris, ou encore du Sénat et de l'Assemblée nationale en ligne.

²¹ MERLEAU-PONTY, Maurice, *Éloge de la philosophie et autres essais*, Les classiques des sciences sociales, 2011 (1953), p. 19.

²² CALLON, Michel, « L'État face à l'innovation technique : le cas du véhicule électrique », in *Revue française de science politique*, Vol. 29, n°3, 1979, pp. 426-447.

Ces consultations se sont parfois avérées difficiles ou ont présenté des limites. Par exemple, l'IFP ne nous a accordé l'accès qu'à une infime partie de ses archives et nous a interdit de les photographier. De même, les fonds du ministère des Armées concernés, en particulier la série R « Cabinet du ministre », sont soumis à des dérogations de communicabilité et des déclassifications qu'il nous a fallu demander. Nous ne les avons pas toutes obtenues et, dans les cas où nous les avons, elles ne permettaient pas toujours la reproduction²³. Les archives de l'EDF sur les piles à combustible ou le véhicule électrique, pour leur part, étaient restreintes à quelques cartons : une grande partie de ces recherches ont été détruites, déplacées, voire égarées du fait d'un déménagement du centre de Blois. Nous avons dû étendre notre recherche à d'autres dossiers, tels que les archives personnelles du directeur de l'EDF Marcel Boiteux pour trouver un rapport, une note ou une lettre se rapportant à notre sujet. D'autres tentatives de recherche de fonds n'ont donné aucun résultat, comme celles auprès des archivistes du CEA et de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), qui détient une partie des documents de l'AFME (Agence française pour la maîtrise de l'énergie). La recherche des noms et prénoms des personnes a encore été un autre problème de taille à gérer : nous détenions souvent soit les uns, soit les autres. Pour le confort du lecteur, nous avons donc entamé un travail d'investigation minutieux et tenté de recoller les morceaux.

Car à chaque nouveau carton d'archives, de nouveaux individus mais aussi de nouvelles situations, de nouvelles institutions ou entreprises faisaient leur entrée dans l'histoire que nous essayions de retracer. Aussi, nous avons encore étendu notre recherche aux fonds de l'INA (Institut national de l'audiovisuel), de la BNF (Bibliothèque nationale de France), du Palais de la découverte à Paris, de la NASA (National Air and Space Agency) et de la CIA (Central Intelligence Agency) en ligne (grâce au NASA Technical Reports Server), de la Commission européenne, etc. Un tournant décisif s'est produit grâce à la consultation des fonds personnels de l'ingénieur de l'IFP Yves Bréelle. En effet, ceux-ci sont particulièrement volumineux : constitués de manuscrits, de lettres, de rapports, etc., provenant non seulement de l'IFP mais aussi entre autres de Matra, du Gaz de France, de Renault, de la SNCF (Société nationale des chemins de fer français), de la CEE (Communauté économique européenne), du CNEXO (Centre national pour l'exploitation des océans) et du CNES (Centre national d'études spatiales), ils nous ont permis de réunir une somme colossale de données que nous n'aurions sans doute pas atteinte autrement. Il nous faut néanmoins indiquer que certains fonds ont été laissés de côté : mentionnons ceux de la SNCF au Mans, de l'Institut Battelle à Genève, du CNEXO aux Archives historiques de l'IFREMER à Plouzané et de Francis T. Bacon à l'Université

²³ Cette interdiction de reproduction découle du caractère sensible de certains documents présents dans les archives du ministère des Armées, susceptibles de porter atteinte à la sûreté de l'État, à la défense nationale ou à la sécurité des personnes.

de Cambridge en Angleterre. Deux raisons l'expliquent : un manque de temps pour la consultation de telles archives et le recueil alternatif de certains documents produits par ces institutions dans d'autres fonds. Nous avons donc pris la décision, certes à contrecœur, de faire l'impasse dessus mais nous n'estimons pas que leur lecture aurait fondamentalement changé la nature de notre travail : les informations accumulées par ailleurs couvrent la totalité de la contribution de ces acteurs à la recherche et au développement des piles à combustible pour la période étudiée.

Les archives collectées ont été croisées et analysées au regard de notre problématique puisque, selon l'expression du politiste Michel Offerlé, ce n'est pas le carton d'archives qui fait l'objet mais l'objet qui fait le carton d'archives²⁴. Dans l'interrogation et l'utilisation des documents, des règles déontologiques ont de plus toujours été scrupuleusement suivies : nous avons tenté de ne pas faire preuve d'anachronisme, de ne pas attribuer des motivations ou des sentiments aux individus sans fondement et de respecter des principes d'honnêteté en citant nos sources chaque fois que possible. L'enquête archivistique ne nous paraissait pourtant pas suffisante ; nous souhaitions aller plus loin et, dans une certaine mesure, retrouver les hommes derrière les textes. Une seconde enquête a donc porté sur la réalisation d'entretiens semi-directifs approfondis avec des individus ayant travaillé sur les piles à combustible des années soixante à quatre-vingt. Celle-ci présentait un double intérêt. D'une part, elle permettait d'entrer dans le détail de l'histoire des individus ayant directement participé à la recherche et au développement, de retracer leur parcours, de comprendre leurs représentations, d'entendre leur point de vue sur leurs actions accomplies et surtout de combler les « interstices »²⁵ des archives écrites en recueillant des informations sur des situations et échanges informels qui n'y transpirent pas toujours. D'autre part, c'était l'occasion d'établir une saine connexion avec les fonds dans un mouvement de va-et-vient, c'est-à-dire de vérifier la validité de certains documents et d'atténuer le décalage entre les régimes narratifs ; en retour, ces derniers permettaient aussi de se défaire de l'illusion du « contact spontané »²⁶ en considérant objectivement la pertinence de certains témoignages subjectifs et les « principes de sélectivité »²⁷ qui les animent.

Il restait à retrouver les personnes en question. Comment procéder ? Quelle base de données interroger ? Dans le cas d'Alstom, nous avons d'abord mené deux entretiens exploratoires avec Gilbert Ruelle, ancien chef de département de la société, et Yves Laumont, ayant travaillé sur les

²⁴ BUTON, François, MARIOT, Nicolas, entrée « Socio-histoire » du Dictionnaire des idées, 2^{ème} volume de la collection des « Notionnaires » de l'Encyclopédie Universalis, 2006, pp. 731-733.

²⁵ DESCHAMPS, Florence, *L'historien, l'archiviste et le magnétophone. De la constitution de la source orale à son exploitation*, Institut de la gestion publique et du développement économique, 2005 (en ligne).

²⁶ JOUHAUD, Christian, SHAPIRA, Nicolas, RIBARD, Dinah, *Histoire, Littérature, Témoignage - Écrire les malheurs du temps*, Gallimard, 2009, p.12.

²⁷ POLLACK, Michaël, *L'Expérience concentrationnaire, essai sur le maintien de l'identité sociale*, Métailié, 2000, p. 191.

supraconducteurs, puis nous avons contacté Jean-Pierre Hauet, à la tête des Laboratoires de Marcoussis de 1984 à 1988. Outre le plaisir d'échanger sur le sujet, ces efforts n'ont rien donné de concret. Nous avons également demandé des adresses et numéros de téléphone à l'IFP mais là encore, aucune information utile ne nous est parvenue. Nous nous sommes alors redirigés vers les Pages blanches et internet, avec succès. Ont finalement été réalisés des entretiens avec : Guy Bronoël, chercheur ayant majoritairement travaillé au Laboratoire d'électrolyse du CNRS à Bellevue ; Yves Bréelle, ingénieur de l'IFP ; Jacques Chéron, ingénieur de l'IFP ; Michel Pouchard du Laboratoire de chimie du solide de l'Université de Bordeaux ; et Loïk Le Floch-Prigent, ayant occupé plusieurs postes à la DGRST. Si ces entretiens, qui nous ont fait voyager du Pas-de-Calais à la Gironde en passant par la région parisienne, laissaient une grande liberté au dialogue, nous avons pris soin de poser un ensemble de questions de base identiques à chaque fois, l'objectif étant de pouvoir comparer les réponses. En complément, notre grille d'entretien visait à reprendre chronologiquement le déroulement des carrières de ces individus et à les replacer dans les actions de leurs organisations respectives. Les entretiens se sont tous très bien déroulés, les personnes interrogées étant en général ravies de pouvoir revenir sur des études auxquelles elles ont consacré des années de leurs vies. À ces témoignages, nous pouvons ajouter un court entretien avec Jean-Pierre Chevènement, ministre de la Recherche et de l'Industrie de 1981 à 1983, et un extrait d'entretien avec un chercheur en sciences de l'ingénieur (dont nous préférons préserver l'anonymat) issu d'une autre enquête menée sur l'actualité du milieu de l'hydrogène en France. Certains de ces entretiens ont pu être complétés par des échanges par courrier, courrier électronique et téléphone, la distance géographique empêchant parfois de pouvoir revoir régulièrement les enquêtés en face à face. D'autres entretiens avaient été prévus, notamment avec Claude Lamy, du Laboratoire d'électrolyse du CNRS à Bellevue, et avec le directeur des recherches d'Alstom Bogdan Broniewski. Malheureusement, le premier n'a pas donné suite à nos sollicitations et le second est décédé peu de temps après notre première prise de contact en 2015.

Pour terminer cette analyse du cadre méthodologique, il faut encore dire un mot de notre démarche personnelle et de notre mode d'entrée sur le terrain car comme le rappelle Florence Weber, « si l'on ne s'étudie pas soi-même, on ne peut pas dire grand-chose sur ce que l'on a vu de l'univers social. »²⁸ Cette thèse portant sur l'histoire de sciences de la nature, il nous paraissait inopportun de ne pas plonger dans la technique. Nous nous serions en effet interdits de voir les controverses, les points de complexité et les décisions là où elles ont réellement porté. Une démarche que récusait déjà Marc Bloch lorsqu'il écrivait que « raconter le combat sans les armes, le paysan sans la charrue, la société

²⁸ NOIRIEL, Gérard, « Journal de terrain, journal de recherche et auto-analyse. Entretien avec Florence Weber », in *Genèses*, Vol. 2, 1990, p. 138.

entière sans l'outil, c'est assembler de vaines nuées. »²⁹ Or uniquement formé aux sciences humaines et sociales, la compréhension de hautes notions de physique et de chimie a représenté un coût d'entrée important dans le cœur de notre sujet. Nous nous sommes efforcés de combler nos manques de connaissances originelles du mieux que nous avons pu, en nous documentant personnellement et en échangeant avec des chercheurs en sciences de l'ingénieur, mais nous prions d'avance le lecteur initié d'accepter nos excuses s'il ne trouve pas dans ce texte toute la profondeur savante qu'il en attendait sur ces points. À dire vrai, nous ne connaissions même rien des piles à combustible ou de leur histoire en commençant cette thèse. Les seuls travaux français sur lesquels nous pouvions nous appuyer étaient ceux de Robert Belot, de Fabienne Picard et de Michel Callon. Dans son article daté de 1979 et publié dans la *Revue française de science politique*, ce dernier faisait d'ailleurs état du rôle majeur de l'EDF dans l'orientation des recherches et de leur intime relation avec le développement du véhicule électrique. C'est donc de ce postulat que nous sommes partis. Mais plus nous récoltions d'archives et de témoignages, plus nous nous sommes rendus compte que les études dépassaient ce cadre, tout en y étant reliées. Nous nous sommes alors progressivement écartés de la voie tracée pour arpenter d'autres chemins et étayer d'autres pistes.

De l'application de notre méthodologie ont découlé les éléments théoriques que nous avons mis en relation avec notre matériau ethnographique. Nous ne voulions pas, nous l'avons dit, que cette thèse soit l'illustration d'une théorie mais bien plutôt bien disposer d'une boîte à outils théoriques dans laquelle nous pouvions « piocher » les éléments dont nous avons besoin le moment venu³⁰. Notre souci était de ramener les acteurs de la recherche sur les piles à combustible – plus précisément leurs trajectoires, leurs pratiques, leurs représentations, leurs discours et leurs actions – aux cadres historiques, sociaux, politiques, économiques et culturels dans lesquels ils ont été amenés à évoluer. Pour cela, nous avons utilisé de multiples travaux d'histoire politique, d'histoire contemporaine, de philosophie des sciences et des techniques, d'épistémologie, de sociologie de l'innovation ou encore de théorie économique. Une articulation entre deux concepts, ceux de réseau social et de collectif de pensée, revient néanmoins souvent dans l'analyse et mérite d'être détaillée. Ce qui a motivé l'adoption d'un tel cadre théorique, utilisé par ailleurs par Per Wisselgren dans son étude sur l'établissement des sciences sociales en Suède au XIX^{ème} siècle³¹, c'est le type d'organisation sociale qui vient régir la recherche sur les piles à combustible des années soixante à quatre-vingt. Des relations entre des organismes, des entreprises et entre les individus qui y sont rattachés, soutenues

²⁹ BLOCH, Marc, *Les caractères originaux de l'histoire rurale française*, Armand Colin, 1931, p. 87.

³⁰ NOIRIEL, Gérard, *Introduction à la socio-histoire*. La Découverte, 2008, pp. 3-7.

³¹ WISSELGREN, Per, *The Social Scientific Gaze. The Social Question and the Rise of Academic Social Science in Sweden*, Routledge, 2017 (2015).

au niveau national par la DGRST et la Défense, caractérisent majoritairement ce dernier, en particulier pour ce qui a trait à l'orientation et au financement de la recherche.

Le premier concept de réseau social a ainsi été pris dans son sens large pour considérer cette dynamique. Il renvoie à un ensemble cohérent de relations produites par des acteurs sociaux – c'est-à-dire les individus et les institutions – dont il faut comprendre les implications pour saisir les comportements de ces derniers et les décisions qu'ils produisent³². Comme le souligne Michel Forsé, la forme du réseau a en effet « une incidence sur les ressources qu'un individu peut mobiliser et sur les contraintes auxquelles il est soumis. Elle ne le détermine pas, mais elle explique que tout ne soit pas possible pour lui et que dès lors certains comportements ou stratégies soient, en raison de la place occupée dans le réseau, plus probables que d'autres »³³. L'utilisation de cette notion permet par exemple de prendre en compte le réseau de partenariats, de passation de contrats, de ressources matérielles et financières qui contribuent à la recherche sur les piles à combustible, tout en les replaçant dans leurs contextes socio-historiques. Cependant, les relations au sein du réseau se développent plus spécifiquement dans des comités se réunissant de façon régulière tout au long de la période étudiée et il nous est apparu qu'un autre niveau d'analyse, celui de collectif de pensée, était nécessaire pour entrer dans les décisions scientifiques prises au sujet de la technique. Ce second concept est issu de l'œuvre de Ludwik Fleck. Dans son ouvrage *Genèse et développement d'un fait scientifique*, il définit en effet le collectif de pensée comme « une communauté de personnes qui échangent des idées ou qui interagissent intellectuellement », produisant par là même un *style de pensée* particulier³⁴ sur les pratiques, les méthodes et les théories. Le style tel que nous le considérons ici n'est pas à rapprocher de l'utilisation que peuvent en faire Alistair Crombie³⁵ ou Ian Hacking³⁶. Ils l'envisagent dans des perspectives historiques trop générales pour notre cas d'étude, l'un traitant notamment de style scientifique européen et l'autre de style de raisonnement comme le style de laboratoire. C'est plutôt dans un sens restreint, temporellement et géographiquement, que nous nous sommes servis du concept en admettant avec Ludwik Fleck qu'un collectif de pensée peut être composé *a minima* « de deux personnes »³⁷.

³² FREEMAN, Linton C., *The Development of Social Network Analysis. A Study in the Sociology of Science*, Empirical Press, 2004, p. 2.

³³ FORSE, Michel, « Définir et analyser les réseaux sociaux. Les enjeux de l'analyse structurale », in *Informations sociales*, Vol. 3, n°147, 2008, p. 11.

³⁴ FLECK, Ludwik, *Genèse et développement d'un fait scientifique*, Flammarion, 2008, p. 74.

³⁵ CROMBIE, Alistair C., *Styles of Scientific Thinking in the European Tradition: The History of Argument and Explanation Especially in the Mathematical and Biomedical Sciences and Arts*, Duckworth, 1994.

³⁶ HACKING, Ian, « Styles of Scientific Thinking or Reasoning: A New Analytical Tool for Historians and Philosophers of the Sciences », in GAVROGLU, Kostas, CHRISTIANIDIS, Jean, NICOLAIDIS, Efthymios (éd.), *Trends in the Historiography of Science*, Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 151, Springer-Dordrecht, 1994, pp. 31-48.

³⁷ FLECK, Ludwik, *op. cit.*, 2008, p. 81.

IV. Problématique et annonce du plan

Notre problématique est résolument simple par son énonciation mais complexe par les développements qu'elle appelle. Ce sont ainsi des questions classiques qui ont d'abord guidé notre démarche : comment en vient-on à s'intéresser aux piles à combustible en France à la fin des années cinquante ? Comment les recherches se sont-elles déroulées dans les années soixante et soixante-dix ? Et pour quelles raisons y met-on un terme au début des années quatre-vingt ? Pour y répondre, il nous fallait pourtant proposer un cadre d'analyse qui puisse permettre la prise en compte d'une multitude de facteurs hétérogènes car au fil de notre travail, d'autres questions ont rapidement fait leur apparition pour s'ajouter aux premières : quel était l'état des piles à combustible avant leur arrivée en France ? Quels acteurs français se sont ensuite investis dans le sujet ? L'ont-ils tous fait de manière égale ou certains d'entre eux ont-ils eu plus d'importance que d'autres ? Quelles étaient les spécificités des recherches ? Que devaient-elles aux contextes scientifiques, politiques, sociaux, historiques ou encore économiques au sein desquels elles ont pris place ? Et, plus généralement, que disent les phénomènes observés sur la relation entre science, technique et société ? Le plan que nous avons ici mis en œuvre est le reflet de ces questionnements et de notre volonté de les traiter chronologiquement dans de mêmes ensembles.

La première partie de notre thèse visera à mettre au jour les conditions socio-historiques qui font que les piles à combustible deviennent un thème d'intérêt en France à la fin des années cinquante. Pour ce faire, nous agencerons notre raisonnement autour de trois chapitres, eux-mêmes organisés autour de l'histoire d'un élément de réponse. Le premier chapitre retracera le parcours de l'objet pile à combustible, de sa prise en main par Francis T. Bacon au début des années trente – et des changements scientifiques et techniques majeurs qu'il opère à son égard par rapports aux développements précédents – à son intégration au programme spatial américain au début des années soixante. Dans le deuxième chapitre, nous axerons notre propos sur l'étude de la politique de la recherche en France après la Seconde Guerre mondiale, du complexe du retard sur les États-Unis qui se met progressivement en place à cette période et des évolutions qui mènent à la création de la DGRST. Enfin, le troisième chapitre abordera les raisons structurelles qui poussent à entamer des recherches sur les piles à combustible, à savoir la légitimation de l'électrochimie dans l'espace académique, la conversion des énergies qui devient un domaine de préoccupations nationales et internationales, et l'importance croissante prise par la recherche scientifique au sein des Armées.

Si nous traiterons ces sujets en profondeur en nous éloignant parfois des piles à combustible elles-mêmes, c'est bien parce qu'ils s'activent et s'entrecroisent à partir de notre deuxième partie. Le

quatrième chapitre sera ainsi consacré à l'examen de leur importance pour l'impulsion des études en 1959, sous la direction de la DGRST et de la Défense, aux interactions sociales entre universitaires, militaires et industriels qui viennent régir ces dernières en même temps que se créent un collectif de pensée et un réseau social autour de la technique, et aux effets qu'elles produisent sur les laboratoires concernés par les piles à combustible. Ce sera ensuite la transformation du cadre des recherches qui retiendra notre attention dans le cinquième chapitre : nous y détaillerons le rôle grandissant du Laboratoire d'électrolyse du CNRS au sein du collectif de pensée, la place nouvelle qu'occupent les réflexions sur les cadres de fonctionnement et d'usage dans les études, et leurs conséquences sur le déroulement de l'exposition « Piles à combustible » au Palais de la découverte à la fin de l'année 1965. Le sixième chapitre décrira pour sa part les changements dans le réseau social qui influencent le développement des recherches à partir de 1966 et mènent à leur abandon presque total en 1969 : nous y montrerons notamment comment se recompose le collectif de pensée agissant autour des piles à combustible, le poids que prennent les recherches internationales, en particulier américaines, sur les recherches françaises et les logiques qui gouvernent au retrait de la DGRST et des Armées du financement des études.

La troisième partie de cette thèse couvrira les recherches effectuées du début des années soixante-dix au début des années quatre-vingt. Notre septième chapitre définira en premier lieu de quelle manière une rupture s'établit dans le collectif de pensée, et comment les individus, les entreprises et les institutions souhaitant ne pas renoncer aux piles à combustible – en particulier Alstom, l'IFP, le Gaz de France et le Laboratoire d'électrolyse du CNRS – élaborent des stratégies pour y faire face. Cette analyse sera complétée par une attention portée au rôle joué par l'EDF dans le développement du véhicule électrique et à ses répercussions sur l'espace de la technique. Dans le huitième chapitre, nous nous intéresserons aux processus qui conduisent à partir de 1974 à l'insertion des piles à combustible dans un nouveau paradigme fondé sur l'utilisation de l'énergie nucléaire pour la production d'hydrogène. Nous examinerons plus spécifiquement les modalités discursives et pratiques qui permettent l'émergence d'un tel paradigme, son renforcement, sa stabilisation et la façon dont les piles à combustible évoluent en son sein. Dans notre neuvième et ultime chapitre, nous tenterons de comprendre les raisons à l'œuvre dans l'arrêt général des recherches en 1981 : nous mettrons l'accent sur l'échec du paradigme hydrogénique et du développement de piles à combustible pour la traction électrique automobile, la réorientation des études vers la recherche électrochimique fondamentale et les applications spéciales et l'affaiblissement de la structure du réseau social supportant la technique. Enfin, précisons que le lecteur trouvera à la fin de chaque chapitre des deuxième et troisième parties des cartographies du réseau social évoluant autour des piles à combustible, réalisées avec le logiciel Pajek. Ces différentes cartographies ne s'appuient pas sur des données statistiques. Elles reprennent

simplement les liens entre les individus, les institutions, les laboratoires, les entreprises, les types de piles à combustible développés et les objectifs qui leur sont attribués, dont nous faisons déjà état dans notre texte, et ont vocation à en donner une lecture visuelle.

PREMIÈRE PARTIE
Prolégomènes

PREMIER CHAPITRE

De l'expérience scientifique à l'objet technique

Pour véritablement comprendre comment les piles à combustible en arrivent à retenir l'attention en France à la fin des années cinquante, il est tout d'abord nécessaire de retracer leur parcours antérieur. S'il est de notoriété publique que ce sont les travaux de Francis T. Bacon qui mènent à une accélération des recherches internationales à leur sujet, on connaît moins, cependant, les conditions selon lesquelles il s'est lui-même intéressé à la technique. De même, en considérant parfois ce regain d'intérêt comme l'effet d'une sorte de rencontre fortuite entre un procédé redécouvert et les préoccupations nouvelles de la conquête spatiale, on s'est peu préoccupé de la manière dont l'Anglais a œuvré pour la reconnaissance de sa propre activité et des possibilités offertes par celle-ci. En effet, les fonctions des piles à combustible ne peuvent expliquer, à elles seules, l'engouement suscité au Royaume-Uni puis dans le reste du monde. Il a fallu que s'exerce tout un ensemble d'opérations sur les corps académique, militaire et industriel, que de nombreuses stratégies soient mises en œuvre et que se transforment des pratiques et des discours. Dans la première section de ce chapitre, nous examinerons comment Francis T. Bacon fait passer les piles à combustible du statut d'expérience scientifique à celui d'objet technique. Nous analyserons ensuite la manière dont il tente de les améliorer et de les développer. Enfin, nous nous intéresserons à leur prise en main aux États-Unis dans le cadre du programme spatial.

1.1 Francis T. Bacon, figure de l'entrepreneuriat scientifique

Lorsque Francis T. Bacon entame ses recherches dans les années trente, il ne tire pas les piles à combustible de l'oubli. C'est d'ailleurs après la lecture de deux articles parus dans la revue *Engineering* en novembre 1932 - « Gas Operated Vehicle » et « The Erren Hydrogen Engine » d'Edwin P.A. Heinze³⁸ -, lesquels décrivent un système de production d'hydrogène et d'oxygène à partir de l'électrolyse de l'eau et visant à alimenter un véhicule motorisé, qu'il décide d'acquérir des connaissances approfondies sur le sujet³⁹. La consultation postérieure qu'il fait de l'ouvrage *The Principles of Applied Electrochemistry* d'Allmand et Ellingham (1924), qui comprend un chapitre sur les piles à combustible, ainsi que d'une étude publiée par les chimistes allemands Emil Baur et Jakob Tobler en 1933⁴⁰ démontrent également que la technique fait déjà couler beaucoup d'encre à

³⁸ HEINZE, E.P.A., « The Erren Hydrogen Engine », in *Engineering*, Nov. 1932, pp. 607-608.

³⁹ BACON, Francis T., « The Development and Practical Application of Fuel Cells: Keynote Adress », in *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 10, n°7/8, 1985, pp. 423-430.

⁴⁰ L'article « Fuel Couples » d'Emil Baur et Jakob Tobler, initialement publié dans *Zeitschrift für Elektrochemie* (Vol. 39, n°3, 1933, pp. 169-180) sous le titre « Brennstoffketten » fait partie des archives personnelles de Francis T. Bacon déposées au Churchill Archives Centre (NCUAS 68.6.97/B.35).

cette période. En réalité, les travaux sont, sinon nombreux, tout du moins divers en Europe. Tandis que Setsurō Tamaru et Minoru Kamada (1935)⁴¹ ou Baur et ses collègues testent en Suisse et en Allemagne la conversion du charbon en électricité (Baur et Ehrenberg, 1912 ; Baur et Brunner, 1935, 1937) et les oxydes solides (Baur et Preis, 1937), le physicien allemand Walter Schottky (1935, 1937)⁴² et le scientifique arménien Oganés K. Davtyan du Moscow G. M. Krzizhanovsky Power Institute of the Russian Academy⁴³ s'appliquent à améliorer la stabilité des électrolytes.

Avant eux, et depuis les travaux fondateurs de Christian Friedrich Schönbein et William Grove, les piles à combustible avaient déjà subi de multiples perfectionnements. Ludwig Mond et Carl Langer leur donnent notamment en 1889 leur nom et leur forme actuelle : des cellules connectées et intercalées entre des plaques bipolaires. En visant la conversion directe du charbon en électricité, William W. Jacques (1896), contribue lui aussi à des avancées : il est le premier à réaliser une pile de puissance (1,5 kW) en usant d'un électrolyte à base d'hydroxyde de potassium (KOH) fondu à près de 450°C, d'une anode consommable de coke et d'une cathode à air en fer. Une solution rapidement empoisonnée par l'absorption d'acide carbonique et la dissolution du dioxyde de carbone dans le liquide qui ne l'empêche pas d'imaginer des applications nombreuses et variées telles que des moyens de transport maritimes et terrestres silencieux, ou encore l'assainissement de l'air de la ville de Londres. Haber et Bruner remarquent néanmoins en 1904 que la pile de Jacques est une pile indirecte étant donné que le charbon réagit d'abord avec le manganèse contenu dans l'électrolyte et que, de toute façon, ce dernier était consommé bien trop vite pour en faire une technique avantageuse⁴⁴.

Sans aller jusqu'à affirmer avec Thomas S. Khun que les progrès induits par la science normale tout au long de cette période préparent la voie à une rupture d'équilibre qu'il s'apprête à réaliser⁴⁵, on peut au moins noter que Francis T. Bacon dispose de quelques éléments de littérature pour élaborer ses premières réflexions. Sa trajectoire sociale et professionnelle renseigne aussi sur les dispositions acquises qu'il met en jeu dans leur développement. Descendant direct de Sir Nicholas Bacon et fils d'un ingénieur en électricité ayant travaillé à la Eastern Telegraph Company, il est très tôt encouragé à poursuivre une carrière scientifique. Il étudie à la St Peters Court Preparatory School à Broadstairs, à Eton, où il y gagne le prix de physique en 1922 puis au Trinity College à Cambridge dont il sort

⁴¹ HAUSER, Victor Emerald Jr., *A study of a Carbon Anode Polarization in Fused Carbonate Fuel Cells*, Thèse soutenue à l'Oregon State University, 1964, p. 12 ; TAMARU, Setsurō, KAMADA, Minoru, « Brennstoffketten, deren Arbeitstemperatur unterhalb 600° C liegt », in *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, Vol. 41, n°2, 1935, pp. 93-96.

⁴² MÖBIUS, Hans-Heinrich, « On the History of Solid Electrolyte Fuel Cells », in *Journal of Solid State Electrochemistry*, n°1, 1997, pp. 2-16.

⁴³ BAGOTSKY, Vladimir S., *Fuel Cells, Problems and Solutions*, Wiley, 2012, pp. 28-30.

⁴⁴ CHEN, Eric, « History », in HOOGERS, Gregor (éd.), *Fuel Cell Technology Handbook*, CRC Press, 2003, pp. 2/8-2/9.

⁴⁵ KHUN, Thomas S., *La structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, 2008 (1962), p. 84.

diplômé en sciences mécaniques. Il obtient ensuite un apprentissage puis un emploi à la C. A. Parsons and Co. Ltd., une entreprise spécialisée en ingénierie et située à Newcastle. Francis T. Bacon passe aussi beaucoup de temps chez son fondateur, Sir Charles Parsons, par ailleurs inventeur de la turbine à vapeur moderne, avec lequel il partage des liens de parenté. Là-bas, il évolue parmi la noblesse anglaise, rencontre de nombreux scientifiques et ingénieurs distingués et assimile les codes des « gentlemen scientists ». Son statut d'entrepreneur s'observe, dans un premier temps, dans la stratégie « d'intéressement »⁴⁶ qu'il met en œuvre pour tenter de convaincre son employeur du potentiel de la pile hydrogène-oxygène⁴⁷. Il établit ainsi dans son argumentation une connexion entre celle-ci et la spécialité de l'entreprise : « le temps est venu d'attaquer le problème en utilisant de hautes pressions, des températures modérées et des catalyseurs améliorés », écrit-il dans un rapport qu'il transmet aux directeurs de l'entreprise en 1937 et intitulé « Proposed Electric Storage Battery »⁴⁸. Débouté, il se tourne vers Sir Frank Smith, alors à la tête du Government's Department of Scientific and Industrial Research, qu'il a rencontré chez les Parsons. Ce dernier lui conseille de persévérer en menant d'abord ses propres expériences pratiques⁴⁹.

Les premiers essais qu'il fait suite à cette discussion représentent essentiellement une répétition des expériences antérieures. Celle de Grove d'abord, qu'il réalise en 1938, où il use d'un électrolyte acide et d'électrodes en platine. La revue de littérature qu'il entreprend en parallèle, notamment des travaux de Mond et Langer, le conforte dans le choix de la pile hydrogène-oxygène, dont les résultats sont « beaucoup plus prometteurs que les autres types »⁵⁰. Mais, dès le départ, Francis T. Bacon souhaite amener sa pile à combustible, pensée comme un dispositif de stockage réversible dans lequel l'hydrogène et l'oxygène peuvent être produits par électrolyse de l'eau, « à un stade suffisamment avancé pour qu'elle soit envisagée pour des applications commerciales »⁵¹. La traction routière et ferroviaire est spécifiquement envisagée. Pour cela, il approche le problème d'une façon originale qu'il tire de sa position d'ingénieur, différente de celle « d'un pur chimiste »⁵². Habitué aux hautes pressions, il s'oriente en 1939 vers l'utilisation d'un électrolyte alcalin composé d'hydroxyde de potassium. Portée à un peu plus de 200 atmosphères pour empêcher le bouillonnement, ainsi qu'à une

⁴⁶ AKRICH, Madeleine, « La construction d'un système socio-technique. Esquisse pour une anthropologie des techniques », in *Anthropologie et sociétés*, Vol 2, n°13, 1989, pp. 31- 51.

⁴⁷ TEISSIER, Pierre, « From the Birth of the Fuel Cells to the Utopia of the Hydrogen World », in BENSUAUDEVINCENT, Bernadette, *et al.* (éd.), *Research Objects in Their Technological Setting*, Routledge, 2017, p. 77.

⁴⁸ BACON, Francis T., « Fuel Cells, Past, Present and Future », in *Electrochimica Acta*, Vol. 14, 1969, p. 573.

⁴⁹ WILLIAMS, K.R., « Francis Thomas Bacon, 21 December 1904-24 May 1992 », in *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, Vol. 39, 1994, pp. 2-18.

⁵⁰ BACON, Francis T., *Ibid.*, 1969, p. 574.

⁵¹ BACON, Francis T., « The Fuel Cell: Some Thoughts and Recollections », in *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 126, n°1, 1979, p. 7C.

⁵² BACON, Francis T., « Research into the Properties of the Hydrogen-Oxygen Cell », in *The Engineer*, 13 août 1954, p. 226.

température de plus de 100°C, cette solution lui permet à la fois de disposer d'une meilleure conductivité, d'une meilleure activité chimique et de favoriser les électrodes en nickel, moins coûteuses que celles en platine :

« [...] j'étais convaincu que l'emploi de métaux précieux dans les cellules et les catalyseurs devait être évité pour que des applications se généralisent enfin. La seule façon de faire cela à l'époque était d'utiliser un électrolyte alcalin et des catalyseurs en nickel ; au vu des structures électrolytiques brutes qui étaient alors disponibles, il était nécessaire d'élever la température à plus de 100°C et d'user de hautes pressions gazeuses (Bacon, 1969) pour atteindre des performances raisonnables. Les fabricants d'électrolyseurs avaient acquis une expérience considérable concernant les problèmes de corrosion des systèmes alcalins et l'emploi d'électrodes ou de composants en nickel ou en acier nickelé, bien que la température de fonctionnement soit toujours en dessous de 100°C. Il semblait donc qu'il y avait de bonnes chances pour qu'une résistance convenable soit obtenue à des températures auxquelles nous savions, notamment grâce à l'emploi de catalyseurs en nickel dans l'industrie agroalimentaire et la production d'acides gras saturés, que le nickel pouvait agir comme catalyseur, même pour l'hydrogène. »⁵³

De fait, et comme l'analyse A. J. Appleby, le premier appareil de type Bacon est « un condensé des travaux des chercheurs précédents : de l'hydrogène et de l'oxygène pur qu'il tient de Grove, la structure parallèle de Mond et Langer, l'électrolyte de Jacques sans l'erreur de la carbonatation et un compromis dans la température et la composition vis-à-vis des systèmes électrolytiques fondus et purement aqueux. »⁵⁴ Elle est aussi le résultat d'une inscription de « désirs humains dans la technique »⁵⁵, dans la mesure où elle apparaît comme le produit d'une négociation entre des questionnements scientifiques et une volonté sociale, à savoir : a) le nickel jouera-t-il son rôle de catalyseur ? ; b) le platine est trop dispendieux pour une généralisation commerciale du système. Enfin, elle atteste d'un registre d'action particulier dans les sciences, dans la mesure où l'Anglais fait montre d'une perception du problème des piles à combustible fondée sur la technique plutôt que sur la théorie.

⁵³ BACON, Francis T., FRY, T.M., « The Development and Practical Applications of Fuel Cells », in *Proceedings of the Royal Society A*, Vol. 334, 1973, p. 431.

⁵⁴ APPLEBY, A.J., « From William Grove to Today: Fuel Cells and the Future », in *Journal of Power Sources*, n°29, 1990, p. 8.

⁵⁵ BARTHE, Yannick, « Les qualités politiques des technologies. Irréversibilité et réversibilité dans la gestion des déchets nucléaires », in *Tracés. Revue de Sciences humaines* [en ligne], n°16, 2009, mis en ligne le 20 mai 2011.

Après avoir transmis un autre rapport à ses supérieurs, qui le rejettent encore une fois, Francis T. Bacon finit par démissionner en 1940. Conscient que la guerre approche, il voit en sa technique un moyen de développer des systèmes de propulsion de sous-marins, des projecteurs silencieux, ou encore des stations énergétiques. Il se met donc en quête de nouvelles sources de financement. Or, et bien que la Grande-Bretagne connaisse un accroissement significatif de sa part de recherche et développement dans l'entre-deux guerres⁵⁶, les réseaux de relations conservent toute leur importance dans le milieu scientifique⁵⁷. Ainsi, Francis T. Bacon obtient une série d'entretiens avec le Docteur Charles Mertz, fondateur du cabinet de consultants en ingénierie Merz & MacLellan, qui lui trouve une place au King's College où il peut continuer ses travaux sous la direction du professeur Allmand. Le temps n'est désormais plus au « cellier à pommes de terre », pour reprendre l'expression consacrée de Wilhelm Ostwald à propos du laboratoire de Marie Curie⁵⁸. Un nouveau prototype est construit dans les ateliers de l'université : deux cellules sont connectées, l'une agissant en tant qu'électrolyseur générant l'hydrogène et l'oxygène, l'autre fonctionnant comme pile à combustible. Des tests sont menés en continu durant vingt-deux heures mais les résultats sont peu probants. De plus, Francis T. Bacon doit tout arrêter en 1941 ; la guerre s'intensifie, les fenêtres du laboratoire ayant même été soufflées par une explosion. Charles Mertz meurt également à l'occasion d'un raid aérien mené par les Nazis sur la ville de Londres. Mobilisé en Écosse, Francis T. Bacon passe enfin le reste de la Seconde Guerre mondiale au service de l'Amirauté, à travailler sur les systèmes de détection sonars. Une période qu'il met à profit pour accroître ses connaissances en matière de propulsion sous-marine.

En 1946, il se lance à la recherche d'un nouveau mécène. La situation sociale, économique et politique d'après-guerre en Grande-Bretagne lui est favorable. Un enthousiasme certain parcourt le pays⁵⁹, où la victoire des Alliés est perçue, de même qu'en France⁶⁰, comme le triomphe éclatant de la science et de la technique. Un phénomène de promotion de la recherche et développement est porté par le gouvernement et les élites, dont le but est de soutenir la défense nationale et la reconstruction économique, et auquel l'industrie répond. Celui-ci se traduit notamment par « des conférences régionales et nationales, des articles dans la presse technique et grand public, des débats parlementaires, des discours et l'établissement de structures formelles pour la promotion de la

⁵⁶ EDGERTON, D.E.H., HORROCKS, S.M., « British Industrial Research and Development Before 1945 », in *Economic History Review*, Vol. 47, n°2, 1994, pp. 213-238.

⁵⁷ FOX, Robert, GOODAY, Graeme, *Physics in Oxford, 1839-1939. Laboratories, Learning and College Life*, Oxford University Press, 2005.

⁵⁸ GIDEL, Henry, *Marie Curie*, Flammarion, 2008.

⁵⁹ HORROCKS, Sally M., « Enthusiasm Constrained? British Industrial R&D and the Transition from War to Peace, 1942-51 », in *Business History*, Vol.41, n°3, 1999, pp. 42-63.

⁶⁰ BELOT, Robert, *L'atome et la France. Aux origines de la technoscience française*, Odile Jacob, 2015.

recherche industrielle »⁶¹. En premier lieu, Francis T. Bacon tape aux portes de grandes firmes britanniques, sans succès :

« Je me rappelle bien avoir eu un entretien avec deux directeurs d'une importante entreprise de l'industrie chimique. Après avoir exposé mon propos, l'un des deux directeurs m'a demandé : « Comment allez-vous l'utiliser ? » Ce que je pouvais dire de mieux à l'époque était qu'on pouvait électrolyser l'eau, transférer l'hydrogène et l'oxygène dans des réservoirs sous pression à bord d'un véhicule et générer de l'énergie électrique à partir d'un ensemble de piles pour le propulser. Je n'oublierai jamais leurs éclats de rire ! Bien évidemment, je comprenais leur point de vue. L'autre directeur m'a demandé : « Pourquoi êtes-vous venu nous voir ? » C'était une question à laquelle il était plus simple de répondre et j'ai dit qu'ils avaient une longue expérience dans beaucoup de domaines de connaissances, ce qui pouvait être un atout certain dans le développement d'un système pratique durable. Cependant, l'entretien est rapidement parvenu à sa fin. J'ai aussi obtenu un entretien avec le directeur d'une organisation de recherche en carburants ; il m'a questionné sur mes connaissances en chimie et j'ai dû admettre que tout ce que j'en savais provenait de mon enseignement scolaire. Bien sûr, cette réponse a déplu et, encore une fois, l'entretien s'est rapidement terminé. »⁶²

Au-delà de l'anecdote, le récit qu'il propose de ces deux événements renseigne sur les dispositifs discursifs qu'il tente de mettre en œuvre à cette période pour faire adhérer d'autres acteurs à son projet. En effet, face à ses interlocuteurs, il ne se contente pas d'évoquer des faits scientifiques ou des preuves de ses avancées en la matière. Il alloue des compétences et des objectifs à sa machine et en déplace le sens pour l'inscrire dans un scénario pratique - la voiture électrique - dans lequel il espère que les autres se retrouveront. En d'autres termes, il crée à la fois un cadre d'interprétation et une solution à des problèmes qu'il construit : la mobilité et l'énergie.

D'autre part, si ses caractéristiques sociales, en particulier sa formation d'ingénieur, lui permettent de réaliser des progrès notables dans le domaine technique par rapport aux chimistes et aux électrochimistes, elles s'avèrent difficilement convertibles en ressources mobilisables dans ce cas précis. Cet aveu d'incompétence scientifique a un autre sens : il le place dans une posture stratégique de défi symbolique par rapport à l'ordre dominant. En signifiant sa distance à la chimie et à son

⁶¹ HORROCKS, Sally M., « The Royal Society, its Fellows and Industrial R&D in the Mid Twentieth Century », in *Notes and Records of the Royal Society of London*, Vol. 64, Sup. 1, p. S.32.

⁶² BACON, Francis T., *op. cit.*, 1979, p. 8C.

apprentissage, Francis T. Bacon opère un renversement de valeur dans lequel il s'oppose à l'idée que les progrès au sujet des piles à combustible doivent s'effectuer par le biais des disciplines classiques. Désormais, c'est bien plutôt grâce à un talent technique associé au savoir-faire de l'ingénieur que se constituent les connaissances autour de ces appareils. Francis T. Bacon finit par intéresser l'ERA (Electrical Research Association), une organisation de coopération industrielle financée conjointement par l'État et des entreprises privées. Apparu à partir de 1918 pour encourager l'effort d'innovation au sein du pays mais peu influente dans l'économie de l'entre-deux guerres, ce type d'institution voit son rôle grandir dans les années quarante sous la pression de l'État. Ce qui fait dire à Matthew N. Eisler que la pile à combustible de Bacon est, « dans une large mesure, le produit du mouvement de mobilisation de la science au service de l'industrie ». Cependant, il note aussi qu'au sein même de l'organisation, Francis T. Bacon bénéficie de conditions particulières qui aident au financement de son projet. En effet, sa technique permet de lier entre eux les intérêts d'acteurs multiples :

« Dans la situation initiale du positivisme techno-scientifique d'après-guerre, la technologie était attractive pour de nombreux groupes. Les producteurs d'équipement électrique étaient intrigués par les qualités inhabituelles du dispositif. Pour les dirigeants de l'ERA, s'associer à une source d'énergie potentiellement révolutionnaire était la promesse d'un rôle plus important joué par l'association dans l'effort de reconstruction. La pile à combustible de Bacon avait un attrait similaire pour les technocrates d'État déterminés à placer la Grande-Bretagne à l'avant-garde de l'innovation technologique. Cette alliance tacite a servi à donner de l'élan au projet. »⁶³

Francis T. Bacon se rend aussi à l'Université de Cambridge, où il rencontre le professeur E. K. Rideal, co-auteur d'une publication sur les piles à combustible en 1922⁶⁴, qui lui octroie un espace de travail au sein du Department of Colloid Science. Mais ce n'est qu'après un déménagement au sein du Department of Metallurgy qu'une nouvelle pile est construite. Composée d'électrodes poreux en nickel pour améliorer le contact avec l'hydrogène, technique que Francis T. Bacon tient pour partie d'Alfred Schmid⁶⁵ - qui fait lui usage d'électrodes poreux en carbone platiné - celle-ci se différencie des prototypes précédents par la fourniture d'hydrogène et d'oxygène sous forme gazeuse plutôt que directement dans la solution électrolytique. Là encore, si l'Anglais profite de conditions favorables à

⁶³ EISLER, Matthew N., « A Modern 'Philosopher Stone': Techno-Analogy and the Bacon Cell », in *Technology and Culture*, Vol. 50, n°2, 2009, pp. 351-352.

⁶⁴ RIDEAL, E.K., EVANS, U.R., « The Problem of the Fuel Cell », in *Transactions of the Faraday Society*, Vol. 17, pp. 466-482.

⁶⁵ SCHMID, Alfred, « Die Diffusionselektrode », in *Helv. Chim. Acta*, Vol. 7, 1924, pp. 370-373.

l'amélioration de son procédé - des progrès importants ayant été réalisés dans la fabrication du nickel poreux au cours de la Seconde Guerre mondiale - il continue de déployer les fils de son réseau en demandant à la Mond Nickel Company de produire des électrodes spécifiques à ses besoins⁶⁶. Le reste de la pile est, lui, assemblé au sein de l'université, en majeure partie par ses soins. De meilleurs résultats sont obtenus, bien que le système cesse de fonctionner après une trentaine d'heures du fait de l'oxydation des électrodes.

1.2 « Un stade de développement similaire à l'aéroplane de Blériot »

Au fil des années, les objectifs attribués à la technique sont redéfinis en fonction des forces en jeu. Initialement, l'ERA avait alloué des fonds pour savoir si le système, qui, rappelons-le, est encore pensé comme un dispositif réversible composé d'une pile et d'un électrolyseur, pouvait s'avérer un moyen efficace de remplacer les batteries au plomb. Les conclusions des recherches s'avérant négatives, l'idée n'est pas abandonnée mais d'autres pistes sont envisagées. Au sein de réunions auxquelles assistent notamment des délégations du DSIR (Department of Scientific and Industrial Research), du Ministry of Supply, ou encore du Royal Aircraft Establishment, le directeur de l'ERA, Stanley Whitehead, milite en faveur de la technologie. Le professeur Allmand recommande pour sa part que l'électrolyseur soit supprimé, la pile à combustible seule étant plus prometteuse. Et si certains parmi les membres du sous-comité F, en charge du dossier à l'ERA, commencent à émettre des doutes sur la place de cette technique dans le champ d'action de l'institution, d'autres estiment au contraire que des résultats satisfaisants dans les prochaines années pourront éventuellement s'avérer payants. On pense même que, sur le long terme, l'hydrogène pourrait être remplacé comme carburant par des hydrocarbures. Les applications potentiellement alimentées varient elles-aussi dans les esprits : source d'énergie auxiliaire, technique de stockage à grande échelle, générateur d'électricité pour tracteurs agricoles, traction ferroviaire, etc. Ainsi, « intentionnellement ou non, sous l'effet de l'action de l'ERA, la pile de Bacon signifiait beaucoup de choses pour beaucoup de monde ; elle était définie comme un convertisseur d'énergie universel capable d'utiliser une variété de substances comme carburant. »⁶⁷ Le Ministry of Fuel and Power et l'Amirauté se montrent eux aussi bientôt concernés et contribuent à une augmentation du budget respectivement en 1951 et en 1954.

Au même moment, Francis T. Bacon est rejoint par l'électrochimiste Reginald G. H. Watson, de l'Imperial College of Science and Technology⁶⁸. Dans le laboratoire du professeur T. R. C. Fox, ils

⁶⁶ BACON, Francis T., *op. cit.*, 1969, p. 577.

⁶⁷ EISLER, Matthew N., *Ibid.*, 2009, p. 354.

⁶⁸ BOCKRIS, John O'M, REDDY, Amulya K.N, *Modern Electrochemistry, Volume 2*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000, p. 1794.

tentent de résoudre ensemble le problème posé par la corrosion de la cathode. Les tests menés montrent rapidement que le nickel poreux oxydé à 700°C devient très résistant lorsqu'il est plongé dans une solution d'hydroxyde de potassium. Malheureusement, enveloppée de la sorte, l'électrode empêche le passage des électrons. Tom M. Fry, avec qui Francis T. Bacon travaille depuis 1946 sur la conception de la pile à combustible, porte alors à leur attention un article signé par E. J. W. Verwey aux Pays-Bas qui met en évidence le rôle que peut jouer le lithium dans le processus. En effet, trempée dans une solution d'hydroxyde de lithium, séchée puis chauffée quelques instants entre 800 et 1000°C à l'air libre, l'électrode ne s'oxyde plus à des températures de fonctionnement de près de 200°C. Mais un autre problème persiste du côté de l'anode, rendant les performances du système insuffisantes. Voyant que ce sont les joints utilisés qui empoisonnent l'électrode filtrant l'hydrogène, Francis T. Bacon les remplace par du Téflon, un polymère thermoplastique découvert en 1938 par Roy J. Plunkett⁶⁹. Une fois ces difficultés dépassées, l'équipe, bientôt rejointe par un autre chimiste, W. J. Davis, un métallurgiste, J. G. Bowers, et trois techniciens (Billet, Pike et Young)⁷⁰, se lance dans la réalisation d'un prototype de batterie. Celui-ci, composé de six piles, est présenté à l'occasion de la *Production Exhibition and Conference* à Londres en juillet 1954⁷¹. Il opère à une température de 200°C, à une pression de 41 atmosphères (réduite plus tard à 27 atmosphères) et génère près de 150 W. La même année, Francis T. Bacon signe un article dans le *BEAMA Journal (British and Electrical Allied Manufacturers' Association Journal)* qui atteint de façon inhabituelle une diffusion internationale. Sur le conseil de l'éditeur, le remplacement du titre original « Hydrogen/Oxygen Cell » par celui de « Hydrogen/Oxygen Fuel Cell »⁷² est un succès⁷³. Il faut dire que la solution trouvée à l'oxydation de la cathode avait déjà attiré l'attention des observateurs initiés. En avril 1953, l'attaché de la marine à l'ambassade des États-Unis à Londres envoie même, avec l'autorisation de l'ERA, un émissaire scientifique au laboratoire de Cambridge pour se rendre compte des progrès.

Cependant, les sept de Cambridge ne sont pas les seuls, à l'époque, à tenter d'améliorer les piles à combustible. S'il n'est pas encore possible de parler de la constitution d'un véritable espace disciplinaire, la recherche universitaire s'active tout de même en Europe dans le domaine et participe à l'accumulation de savoirs pratiques et de connaissances théoriques. Oganés K. Davtyan publie

⁶⁹ PLUNKETT, Roy J., « The History of Polytetrafluoroethylene: Discovery and Development », in KIRSHENBAUM, Gerald S., *High Performance Polymers: Their Origin and Development*, Proceedings of the Symposium on the History of High Performance Polymers at the American Chemical Society Meeting held in New York, April 15–18, 1986, pp. 261-266.

⁷⁰ WILLIAMS, K.R., *op. cit.*, 1994, p. 8.

⁷¹ BACON, Francis T., FORREST, J.S., « High-Pressure Hydrogen-Oxygen Fuel Cell », in *The Engineer*, Vol. 202, n°5243, 20 juillet 1956, p. 93.

⁷² BACON, Francis T., « Research into the Properties of the Hydrogen/Oxygen Fuel Cell », in *BEAMA Journal*, n°61, 1954, pp. 6-12.

⁷³ BACON, Francis T., *op. cit.*, 1979, p. 9C.

notamment en 1947 son ouvrage majeur, *The Problem of Direct Conversion of the Chemical Energy of Fuels into Electrical Energy*⁷⁴, dont Francis T. Bacon lit la traduction. Dans ce livre, il expose les résultats de ses recherches menées depuis la fin des années trente sur les piles à carbonates fondus et les piles alcalines. Il développe par exemple une pile à haute température dotée d'un conducteur ionique solide et teste des mélanges électrolytiques exotiques de monazite, de carbonate de sodium, de trioxyde de tungstène ou encore de verre sodocalcique. Sa pile alcaline utilise quant à elle une solution d'hydroxyde de potassium, une anode en carbone trempée dans de l'argent pour l'activation de l'hydrogène et une cathode en carbone nickelée pour l'oxygène⁷⁵. Au début des années cinquante, J. A. A. Ketelaar et G. H. J. Broers de l'Université d'Amsterdam passent un contrat avec la TNO, une organisation semi-gouvernementale hollandaise pour les recherches scientifiques appliquées, dans le but de travailler sur les piles à combustibles. En reproduisant tout d'abord les expériences de Davtyan, ils constatent que ni les électrolytes ni les électrodes ne restent stables plus de quelques jours. La décision est ensuite prise de fabriquer une pile à carbonates fondus, dans laquelle la solution électrolytique est plongée dans un disque d'oxyde de magnésium poreux, avec des catalyseurs en argent, en platine ou en nickel. À l'Université de Technologie de Braunschweig en Allemagne, E. W. Justi et A. Winsel innovent aussi dès 1948 dans la réalisation des piles alcalines à basse température en utilisant des électrodes de type DSK (à double squelette) en nickel poreux⁷⁶. Hans-Heinrich Möbius et Horst Peters poursuivent pour leur part, à partir de 1954 à Rostock, les travaux de Carl Wagner et Karl Haufe sur les mélanges d'oxydes⁷⁷ en expérimentant sur les piles à électrolytes solides. Ils mettent ainsi au point des solutions à base d'oxyde de fer et de ferrite de magnésium⁷⁸. Concernant les électrodes, des composites de fer et d'alumine sont d'abord utilisés avant d'être remplacées par des couches poreuses de platine, de nickel et de fer⁷⁹.

En 1955, les principaux pourvoyeurs de fonds de Francis T. Bacon se retirent. Tandis que l'Amirauté délaisse le projet par manque d'intérêt, l'ERA et le Ministry of Fuel and Power estiment avoir accompli leur part : les problèmes de recherche fondamentale étant résolus, la technologie est considérée comme prête à être développée pour des applications commerciales et il est attendu de l'industrie britannique qu'elle prenne désormais le relais. Pour autant, cette dernière s'avère réticente

⁷⁴ DAVTYAN, Oganés K., *The Problem of Direct Conversion of the Chemical Energy of Fuels into Electrical Energy*, Moscow: Publishing House of the URSS Academy of Sciences, 1947.

⁷⁵ CHEN, Eric, *op. cit.*, 2003, pp. 2/14-2/17.

⁷⁶ KETELAAR, J.A.A., « History », in BLOMEN, Leo J.M.J, MUGERWA, Michael N. (éd.), *Fuel Cell Systems*, Springer, 1993, pp. 28-31.

⁷⁷ GUTH, Ulrich, « Hans-Heinrich Möbius and the Development of Electrochemistry with Solid Electrolytes », in SCHOLZ, Fritz (éd.), *Electrochemistry in a Divided World*, Springer International Publishing, 2015, pp. 431-443.

⁷⁸ KENDALL, Kevin, KENDALL, Michaela, *High-Temperature Solid Oxide Fuel Cells for the 21st Century. Fundamentals, Design and Applications*, Elsevier, 2016, pp. 30-32.

⁷⁹ MÖBIUS, Hans-Heinrich, *op. cit.*, 1997, p. 5.

à s'engager. Bien qu'un certain nombre d'entreprises pétrolières, dont l'AIOC (Anglo-Iranian Oil Company), aient approché l'ERA pour s'enquérir de la possibilité de faire fonctionner des piles à combustible à partir de l'hydrogène de raffinage, Francis T. Bacon est contraint de quitter son laboratoire de Cambridge et de démanteler son équipe. Une fois de plus, il doit se mettre en quête d'un nouveau bienfaiteur. Après avoir essuyé un refus de la part de la Central Electric Authority, il se met en relation avec la NRDC (National Research Development Corporation). Créée en 1948 et financée par le secrétariat d'État à l'Industrie pour continuer à encourager l'innovation technologique en Grande Bretagne au sortir de la guerre, cette institution gouvernementale est décrite par son directeur, le Comte d'Halsbury, comme « un rouage dans le plus grand système de liaison au sein duquel les résultats de la recherche scientifique obtenus dans les laboratoires sont transférés au secteur industriel, où il deviennent finalement des biens à destination des producteurs ou des consommateurs. »⁸⁰ En réalité, le sentiment général qui règne à cette période est que, depuis la Seconde Guerre mondiale, le pays met au point trop d'inventions qui sont ensuite exploitées commercialement ailleurs, les exemples de la pénicilline et des moteurs de jet étant les plus frappants⁸¹. La NRDC ne se contente donc pas de promouvoir la recherche publique en avançant l'argent nécessaire pour que de nouvelles techniques britanniques atteignent un stade de développement commercial. Elle prend également des parts dans des entreprises où les risques courus par l'engagement dans des projets d'innovation limitent « la volonté des investisseurs privés à entamer leurs propres capitaux », en se focalisant spécifiquement sur les inventions « non développées ou non exploitées »⁸².

Néanmoins, la pile à combustible de Bacon ne remplit pas parfaitement les critères de sélection de l'institution, qui attache une grande importance à la viabilité économique et à la valeur stratégique représentées par les technologies financées. D'autre part, le Comte d'Halsbury se montre lui-même sceptique ; il argue en particulier que les années de recherche précédentes n'ont révélé que peu d'applications pratiques. Son changement d'avis sur la question est vraisemblablement motivé par deux événements : le faible nombre d'activités soutenues par la NRDC en 1956 et l'intérêt croissant accordé à la technique outre-Atlantique⁸³. La même année en effet, Anthony Moos, vice-président de

⁸⁰ HALSBURY, The Earl of, « The work of the National Research Development Corporation », in *Journal of the Royal Society of Arts*, Vol. 100, n°4875, 1952, p. 510.

⁸¹ HAGUE, D. C., *et al.*, *Public Policy and Private Interests. The Institutions of Compromise*, The MacMillan Press Ltd., 1975, p. 93.

⁸² KEITH, S. T., « Inventions, Patents and Commercial Development from Governmentally Financed Research in Great Britain: The Origins of the National Research Development Corporation », in *Minerva*, Vol. 10, n°1, 1981, p. 92.

⁸³ EISLER, Matthew N., *op. cit.*, 2009, p. 360.

l'entreprise new-yorkaise Patterson Moos⁸⁴ entame des discussions pour l'acquisition de brevets sur la pile de Bacon⁸⁵. Les fonds finalement alloués, Francis T. Bacon contacte Arthur Marshall de l'entreprise d'ingénierie industrielle Marshall of Cambridge Electronics qui accepte en 1957 de lancer un projet de construction d'une unité composée de 40 cellules en série, chacune comprenant deux électrodes de dix pouces de diamètre. Placée sous la direction de J. C. Frost, une équipe de quatorze personnes est montée, comprenant trois ingénieurs, un métallurgiste et un chimiste. Des chercheurs de l'université sont aussi régulièrement embauchés comme consultants pour régler certaines questions relatives à l'électrochimie, aux contrôles automatiques ou encore à l'écoulement des fluides. Achevée au cours de l'été 1959, la nouvelle pile à combustible, baptisée pile « Hydrox » est bien plus élaborée que les précédents prototypes. Francis T. Bacon considère même qu'elle a atteint « un stade de développement similaire à l'aéroplane de Blériot »⁸⁶. Bien qu'elle souffre encore de problèmes d'empoisonnement au niveau de l'anode, elle est désormais capable de produire 6 kW d'électricité et est entièrement automatisée, de la régulation des gaz au maintien de la température en passant par l'évacuation de l'eau générée par le processus. Lors d'une démonstration organisée le 24 août au sein des locaux de l'entreprise, elle permet même de faire fonctionner un chariot élévateur et une scie circulaire. Si la presse vante les mérites de la technique qui « s'approche de l'offre commerciale d'une batterie fiable et complètement automatique », elle remarque cependant qu'il est « peu probable qu'une batterie de type pile à combustible concurrence un jour les accumulateurs de petite taille existants » ou qu'elle serve à « la propulsion de véhicules » tant que de nouvelles méthodes de stockage de l'hydrogène et de l'oxygène ne sont pas au point⁸⁷.

Le mois suivant, Francis T. Bacon est invité à s'exprimer lors d'un symposium organisé à Atlantic City par l'American Chemical Society. L'Anglais avait déjà eu l'opportunité de partager ses travaux avec des chercheurs internationaux au cours de la *Fifth World Power Conference* à Vienne en juin 1956 mais son premier voyage aux États-Unis le renseigne sur l'engouement que suscite la technologie de ce côté de l'Atlantique et qui contraste avec les réserves émises jusqu'à présent par l'industrie britannique. En effet, les recherches se terminent à Marshall of Cambridge Electronics en janvier 1961, la NRDC n'ayant pas trouvé d'autre partenaire pour écouler ses brevets que la Universal

⁸⁴ Filiale de la Universal Wanding Company puis de la Leeson Corporation, Patterson Moos est spécialisée dans les activités de recherche théoriques et appliquées en matière de physique et de chimie. En 1960, elle est composée de cinq chimistes, cinq ingénieurs, un métallurgiste, un physicien, et trois techniciens. Voir : RAND, Myron J., *Industrial Research Laboratories of the United States Including Consulting Research Laboratories*, Bulletin of the National Research Council, 1950 (9^{ème} édition augmentée), p. 275.

⁸⁵ BACON, Francis T., *op. cit.*, 1979, p. 10C.

⁸⁶ BACON, Francis T., « The Fuel Cell: Power Source for the Future », in *The New Scientist*, Vol. 6, n°145, 27 août 1959, p. 272.

⁸⁷ « Fuel Cell Progress », in *The Engineer*, Vol. 208, n°5405, 28 août 1959, p. 154.

Wanding, maison-mère de Patterson Moos⁸⁸. Une fois encore, Francis T. Bacon est contraint de démanteler son équipe, dont plusieurs membres se voient très vite proposer des postes par la General Electric aux États-Unis⁸⁹ dans un contexte marqué par la Guerre froide et l'intensification des échanges scientifiques entre pays occidentaux⁹⁰. La politique scientifique du gouvernement peut paraître paradoxale car, si elle retire son soutien à l'Anglais, elle le donne à d'autres. Sans doute peut-on y voir l'expression d'une stratégie des autorités qui se détournent des techniques faisant usage de l'hydrogène pur, que le Central Electricity Generating Board perçoit comme trop coûteux et difficilement productible, pour s'orienter vers des piles utilisant des combustibles différents. Le pétrolier Shell est financé par le Ministry of Fuel and Power dès 1957 pour ses recherches menées au sein de son Soudes Place Research Institute sur les piles à hautes températures et, en 1962, la NRDC, British Petroleum, GKN (Guest, Keen & Nettlefolds) et British Ropes forment ensemble la Energy Conversion Limited pour commercialiser les piles à combustible. British Petroleum et GKN voient dans la machine un débouché potentiel, le premier pour ses hydrocarbures, le second pour ses procédés électrochimiques, tandis que British Ropes mise sur la diversification de ses compétences. Le consortium embauche même Francis T. Bacon comme consultant⁹¹ mais l'essentiel des avancées se fait désormais en dehors du pays : en 1962, la division Pratt & Whitney de la United Aircraft Corporation, qui avait elle aussi acheté les brevets du système de type Bacon en 1959, est sélectionnée par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) pour fournir l'énergie auxiliaire de la capsule Apollo⁹².

1.3 Les piles à combustible à la conquête de l'espace

Contrairement à une idée répandue, les recherches sur les piles à combustible aux États-Unis ne démarrent pas en même temps que le programme spatial. Au milieu des années cinquante, plusieurs entreprises américaines s'attèlent déjà à la construction de prototypes et les différents objectifs qu'elles énumèrent pour justifier de cet engagement n'ont pas grand-chose à voir avec la conquête de la Lune. La National Carbon Company de l'Union Carbide Corporation annonce par exemple en 1957 avoir été en mesure de faire tourner une pile alcaline huit heures par jour et cinq jours par semaine pendant une année entière. À l'occasion d'une démonstration en Arizona, son équipe menée par le

⁸⁸ D'autres entreprises américaines se renseignent aussi auprès de la NRDC, notamment les constructeurs automobiles Chrysler et DeSoto, mais les négociations n'aboutissent pas.

⁸⁹ BACON, Francis T., *op. cit.*, 1969, p. 581.

⁹⁰ DEFRANCE, Corinne, KWASCHIK, Anne, *La guerre froide et l'internationalisation des sciences*, CNRS Éditions, 2016.

⁹¹ DESMOND, Kevin, *Innovators in Battery Technology. Profiles of 95 Influential Electrochemists*, McFarland & Company, Inc., Publishers, 2016, p. 6.

⁹² CROWE, Bernard J., *Fuel Cells. A Survey*, NASA SP-5115, 1975, p. 12.

docteur autrichien Karl V. Kordesch fait même fonctionner le radar « Silent Sentry » de l'US Signal Corporation et prédit la possibilité de coupler cette technologie avec l'énergie nucléaire ou encore de remplacer à terme « le bruit ronflant émis par le moteur à combustion », selon les mots de C. E. Larson, le vice-président de la société⁹³. Le gouvernement finance aussi, dès 1951⁹⁴, de nombreuses recherches⁹⁵ et développe certaines applications. C'est en premier lieu la Navy qui s'intéresse à la génération d'oxygène à destination des équipages de ses nouveaux sous-marins nucléaires⁹⁶. Cette même institution passe aussi un contrat avec l'Aerojet-General Corporation, s'étalant de 1951 à 1956, pour la production de batteries à haute densité énergétique⁹⁷. Par ailleurs, Francis T. Bacon rapporte à propos de l'intérêt affiché par Anthony Moos en 1956 pour ses brevets qu'à l'époque ce dernier

⁹³ LEAR, John, « Silent Lawn-Mowers? », American Newsletter, in *The New Scientist*, 19 septembre 1957, Vol. 2, n°44, p. 20.

⁹⁴ Pour cette même année, on note aussi la première recherche académique d'envergure menée par l'équipe du professeur E. Yeager à la Western Reserve University sur des piles fonctionnant à l'oxygène et à l'amalgame de sodium et sur la cinétique des électrodes à oxygène et à hydrogène.

⁹⁵ Entre 1951 et 1965, le gouvernement américain passe un nombre considérable de contrats auprès de : Aerojet-General Corporation, Aerospace Corporation, Alfred University, Allis Chalmers Manufacturing Co., Allison Division of General Motors Corporation, Central Research Division of American Cyanamid Co., American Oil Co., Argonne National Laboratory, Astropower Inc., Division of North America of Atomics International, Battelle Memorial Institute, Baylor University, Beechcraft Research and Developements Inc., California Research Corporation, Central Technical Institute, Curtiss-Wright Corporation, Defense Documentation Center, Delco-Remy Division of General Motors Corporation, Electrochimica Corporation of the Research and Development Laboratory, Electro-Optical Systems Inc., Engelhard Industries Inc., Esso Research and Engineering Co., Ford-Aeronautic, Garrett Corporation of AiResearch Mfg., General Atomics Division of General Dynamics, General Electric Co., Physical and Electro-Chemical Institute of Technology (Munich, Germany), Girdler Corporation, Polytechnic Institute of Brooklyn, Harry Diamond Laboratory, Hoffman Electronics, Illinois Institute of Technology, Institute for Defense Analysis, Ionics Inc., Iowa State University of Science and Technology, Laboratori di Chimica Fisica e Metallurgia del Politecnico di Milano (Milan, Italy), University of Milano (Milan, Italy), Jet Propulsion Laboratory of the California Institute of Technology, Kellogg M. W. Co., Leland Stanford Junior University, Pennsylvania State University, Missiles and Space Division of Lockheed Aircraft Corporation, Lummus Co., Magna Corporation, Marquardt Corporation, Electrical Engineering Department of the Massachusetts Institute of Technology, Melpar Inc., Special Projects Department of Monsanto Chemical Co., MSA Research Corporation of Mine Safety Appliance Co., New York University, Ohio State University, Patterson-Moos Research Division of Leesona Corporation, PEC Corporation, Department of Fuel Technology of the Pennsylvania State University, Research and Development Division Library of Pittsburgh Consolidation Coal Co., Plasmadyne Corporation, Polytechnic Institute of Brooklyn, Power Information Center of the University of Pennsylvania, Pratt & Whitney Aircraft, Department of Chemistry of Princeton University, Department of Chemical Engineering of Purdue University, Rensselaer Polytechnic Institute, Resin Research Laboratories Inc., Long Range Research Laboratory of Smith A. O. Corporation, Snell Foster D. Inc., Société d'études et de recherches et d'applications pour l'industrie (Brussels, Belgium), Research Laboratory of Speer Carbon Co., Stanford Research Institute, Sundstrand Turbo Division of Sundstrand Machine Tool Co., Surface Processes Research and Development Corporation, TAPCO Division of Thompson Ramo Wooldridge Inc., Texas Instruments Inc., Tracor Inc., Tyco Laboratories Inc., Parma Research Laboratory of Union Carbide Corporation, Department of Chemistry and Chemical Engineering of the University of California, University of Florida, Chemistry Department of the University of Illinois, University of Minnesota, Electro-Chemistry Laboratory of the University of Pennsylvania, University of Rome (Rome, Italy), Air Research and Development Command of the US Air Force (Rome Air Development Center), Research and Development Laboratory of the US Army Electronics, Research and Development Laboratories of the US Army Engineers, US Army Research Office, US Naval Research Laboratory, Washington State University, Department of Chemistry of the Western Researve Unviersity, Westinghouse Electric Corporation, White Sands Missile Range. Source : AUSTIN, Leonard G., *Fuel Cells: A Review of Government Sponsored Research, 1950-1964*, NASA SP-120, 1967, pp. 373-415.

⁹⁶ CLEVELAND, Cutler J., MORRIS, Christopher, *Handbook of Energy. Volume II: Chronologies, Top Ten Lists and Word Clouds*, Elsevier, 2014, p. 326.

⁹⁷ AUSTIN, Leonard G., *Ibid.*, 1967, p. 203.

« n'avait aucune idée qu'il pouvait y avoir une place pour les piles à combustible dans le programme spatial »⁹⁸.

L'une des compagnies les plus influentes dans le domaine à l'époque reste cependant la General Electric. En 1955, l'un de ses chimistes, Willard T. Grubb, revoit la conception générale des piles et met au point les premières membranes échangeuses de protons (Proton Exchange Membranes). Composées de polystyrène sulfonaté⁹⁹ et humidifiées avec de l'eau (100 % d'humidité à 25°C) pour maintenir une conductivité suffisante, celles-ci ont initialement une durée de vie limitée du fait du processus d'oxydation et ne permettent pas encore une alimentation en hydrocarbures, ce qui reste l'objet principal affiché. Trois ans plus tard, Leonard W. Niedrach élabore le dépôt d'électrodes en nickel platiné sur la membrane pour améliorer la réaction catalytique¹⁰⁰. Pour les deux scientifiques, ce type de pile représente une amélioration commerciale considérable étant données « sa construction assez simple et sa petite taille »¹⁰¹ par rapport aux autres modèles existants. Grâce à cette technologie, la General Electric est notamment en mesure de développer pour l'armée une batterie de trente livres capable de fournir 200 watts quatorze heures d'affilée avant recharge. Composée de trente cellules à membrane échangeuse de protons, l'unité peut être transportée par une seule personne et sert à faire fonctionner un radar portatif¹⁰². Les recherches générales menées par la firme sont diffusées largement, jusqu'à faire l'objet d'un film promotionnel présenté par Ronald Reagan¹⁰³. Dans celui-ci, le docteur Guy Suits, directeur du General Electric Research Laboratory, explique ainsi, en parlant de la pile à combustible comme d'un « nouveau type de convertisseur énergétique », ne pas encore être en possession d'un appareil « simple » et « efficace » qui « pourrait fonctionner grâce à un carburant conventionnel. C'est un espoir pour le futur mais ce développement, qui est effectué par les docteurs Grubb et Niedrach au sein de notre laboratoire, représente une étape importante de la production d'énergie [...] »¹⁰⁴.

⁹⁸ BACON, Francis T., *op. cit.*, 1969, p. 579.

⁹⁹ PERRY, M. L., FULLER, T. F., « A Historical Perspective of Fuel Cell Technology in the 20th Century », in *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 149, n°7, 2002, p. S60.

¹⁰⁰ ANDÚJAR, J. M., SEGURA, F., *op. cit.*, 2009, p. 2310.

¹⁰¹ GRUBB, Willard T., NIEDRACH, Leonard W., « Batteries with Solid Ion-Exchange Membrane Electrolytes: II. Low-Temperature Hydrogen-Oxygen Fuel Cells », in *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 107, n°2, 1960, pp. 131-135.

¹⁰² « Fuel Cell Power Pack », *The New Scientist*, Vol. 8, n°196, 18 août 1960, p. 461

¹⁰³ Ronald Reagan signe en 1954 un contrat avec la General Electric. Il présente notamment l'émission « General Electric Theater » de 1954 à 1962 et participe à des événements promotionnels dans tout le pays.

¹⁰⁴ GENERAL ELECTRIC, *Twin Frontiers: Energy and Space*, Archives of the Schenectady Museum, 1955.

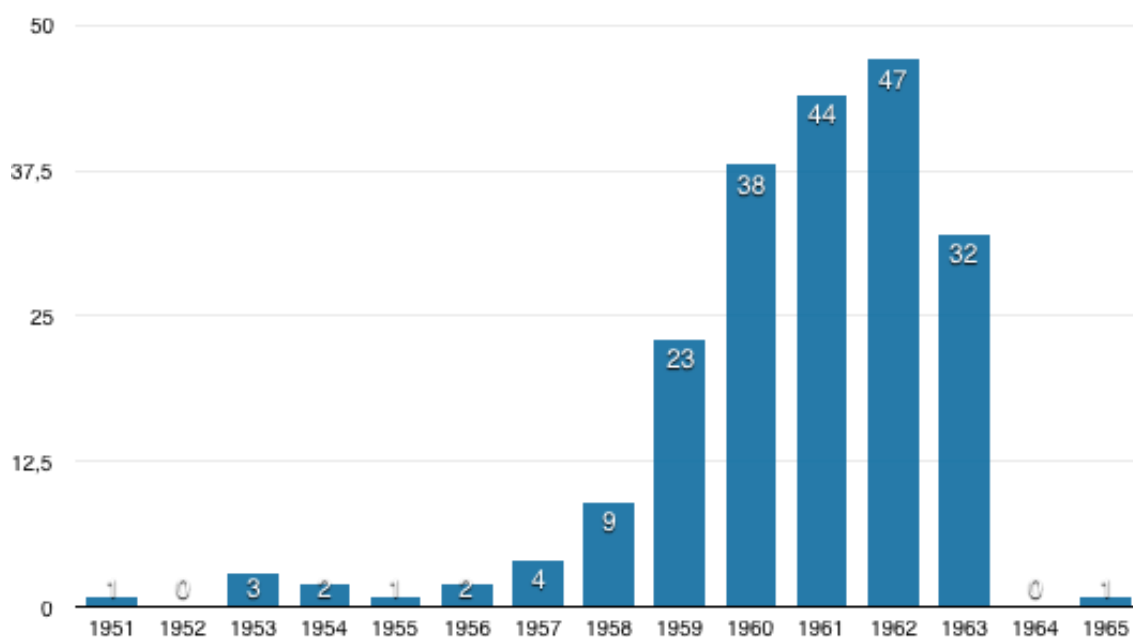


Fig. 3 – Nombre de contrats passés par le gouvernement américain avec des entreprises et des universités entre 1951 et 1965 (Source : Austin, 1967)

Le placement sur orbite de Spoutnik I par l'URSS le 4 octobre 1957 donne un coup de fouet à la politique spatiale américaine. Jusqu'à cette date en effet, la conquête de l'espace ne revêt pas une importance stratégique pour les États-Unis. Au cours de la campagne électorale en 1960, John F. Kennedy et les Démocrates ne manquent d'ailleurs pas de stigmatiser l'attitude du président Dwight D. Eisenhower qu'il juge trop timorée face aux récents succès obtenus par les Soviétiques¹⁰⁵. Or le retard substantiel affiché dans le domaine par les Américains résulte moins d'un désintérêt total de ces derniers pour la question que d'une concentration des efforts sur le programme de développement des ICBM (Intercontinental Ballistic Missiles) et des IRBM (Intermediate Range Ballistic Missiles)¹⁰⁶. En pleine Guerre froide, cette priorité établie dans le cadre général d'une politique scientifique elle-même décidée en 1955, a pour origine l'avance acquise dès la fin des années quarante par l'URSS en termes de technologie balistique : tandis que les États-Unis s'étaient attachés, du fait des positions géostratégiques qu'ils détenaient tout autour du globe, à réduire le poids des bombes atomiques en vue de leur introduction dans des vecteurs à courte portée mais précis, les Soviétiques avaient au contraire misé sur les recherches en matière de missiles intercontinentaux. D'autre part, Eisenhower souhaite maintenir un budget équilibré et préfère ne pas engager des fonds publics dans

¹⁰⁵ TROCHON, Jean-Marc, « Les États-Unis à la conquête de la Lune », in *Vingtième Siècle. Revue d'histoire*, n° 57, 1998, pp. 3-18.

¹⁰⁶ ROSHOLT, Robert L., *An Administrative History of NASA, 1958-1963*, NASA SP-4101, 1966, p. 4.

une politique d'exploration qui ne présente pas un intérêt militaire capital¹⁰⁷. La décision de lancer un satellite artificiel au cours de l'Année de géophysique internationale en 1957-58 s'inscrit quant à elle parfaitement dans cette logique politique spécifique : présentée dans une perspective de coopération scientifique, elle n'est en fait que la manifestation de la volonté du président de fixer un cadre légal au survol de territoires par de tels appareils de reconnaissance, que l'Air Force et la CIA (Central Intelligence Agency) s'attachent déjà à mettre au point au travers des projets Feedback et Corona¹⁰⁸.

Les échecs répétés de la fusée Vanguard et l'urgence nationale que constitue la mise en orbite de Spoutnik, sinon du point de vue de la sécurité de l'État tout du moins pour sa portée symbolique, forcent le gouvernement à réagir. Eisenhower confie rapidement à l'ABMA (Army Ballistic Missile Agency) le soin de mettre en orbite le premier satellite américain et signe le *National Aeronautics and Space Act* le 29 juillet 1958, responsable entre autres de la création de la NASA, qui se voit chargée d'établir l'orientation et la direction du programme spatial civil. Les satellites espions tiennent toutefois une place prépondérante dans les réflexions de la présidence, autant pour les avantages stratégiques qu'ils doivent apporter que pour des questions de prestige liées à l'atténuation des critiques au sein de son propre camp. Les États-Unis mettent bien en orbite des satellites de télécommunications et de météorologie mais, pendant ce temps, la politique des « premières » de l'URSS bat son plein. Les Soviétiques lancent notamment en novembre 1957 Spoutnik II, qui emporte la chienne Laïka à son bord, Luna II en 1958 qui atteint la Lune et Luna III en 1959 qui photographie sa face cachée. L'essor de l'exploration de l'espace chez les Américains, et notamment des vols habités, apparaît dans ce contexte de réaffirmation d'une puissance hégémonique qui s'exprime à présent par la maîtrise des technologies spatiales. Le National Security Council indique ainsi en 1959 « qu'aucune expérience ne peut remplacer l'exploration de l'espace par l'homme en ce qui concerne son impact psychologique sur les peuples du monde. »¹⁰⁹ Sous la pression du Congrès et de l'opinion publique, Eisenhower n'a pas d'autre choix que d'accepter en 1959 la mise en place du programme Mercury de capsule habitée élaboré par la NASA mais doute des « raisons scientifiques valides » qui justifieraient d'aller au-delà d'un tel projet¹¹⁰.

¹⁰⁷ MCDUGALL, Walter A., *The Heavens and the Earth: A Political History of the Space Age*, Basic Books, Inc., Publishers, 1985.

¹⁰⁸ PASCO, Xavier, *La politique spatiale des États-Unis, 1958-1995. Technologie, intérêt national et débat public*, Éditions L'Harmattan, 1997, p. 33.

¹⁰⁹ PASCO, Xavier, *Ibid.*, 1997, p. 51.

¹¹⁰ COMPTON, William D., *Where No Man Has Gone Before. A History of Apollo Lunar Exploration Missions*, NASA SP-4214, 1989, p. 4.

Bien que Kennedy ait exprimé sa crainte de voir les Soviétiques exercer un contrôle de l'espace qui se traduirait par une domination de la Terre, à l'image des siècles précédents où la nation qui contrôlait les mers maintenait une emprise sur les continents¹¹¹, il se montre réservé au début de son mandat au sujet du programme Mercury. Il faut tout le spectacle du vol de Youri Gagarine, premier homme dans l'espace en 1961, et sans doute la stimulation de la débâcle dans la Baie des Cochons, pour le décider à s'engager dans le programme Apollo. Avec la mise en œuvre des vols habités américains s'impose alors la nécessité de repenser les systèmes de fourniture d'énergie. Le lancement en 1958 d'Explorer I, le premier satellite artificiel national, démontre en effet les limites en termes de durée de vie et de poids des batteries de stockage classiques. Sur les vols suivants, ce problème est résolu par l'utilisation de cellules photovoltaïques convertissant l'énergie solaire en électricité. Mais l'obligation d'orienter celles-ci vers le Soleil constitue un désavantage dans la perspective de missions habitées s'étalant de sept à quatorze jours. Les batteries non-rechargeables et le solaire écartés, d'autres techniques et leurs possibles combinaisons sont envisagées, du nucléaire à la conversion chimique, dans la mesure où elles peuvent encore être améliorées au cours du développement du programme. Le processus de recherche se porte également sur un grand nombre de questions relatives à leur poids, leur taille ou encore leur sécurité. Dans ces circonstances, les piles à combustibles sont finalement recommandées auprès de la NASA et de la McDonnell Aircraft Corporation - en charge de la construction du vaisseau - en janvier 1962 par Robert Cohen du MSC (Manned Spacecraft Center) car elles paraissent offrir de multiples avantages¹¹². Fonctionnelles sans l'aide de panneaux photovoltaïques¹¹³, ce qui simplifie les préparatifs de lancement et les manœuvres véhiculaires extraterrestres, insoumises à la pression atmosphérique ou aux forces aérodynamiques et peu demandeuses en carburant en comparaison des moteurs thermiques, elles rejettent en plus de l'eau qui pourrait servir à l'humidification de la cabine de pilotage et à la consommation d'un potentiel équipage. Ernst M. Cohn, le directeur des Electrochemical Technology Projects affirme ainsi en 1965 que l'objectif est d'obtenir une source d'énergie servant à des besoins multiples, qui peuvent inclure « les communications, les contrôles et les commandes, le guidage, le radar, l'acquisition d'images, le traitement des données, leur stockage et leur transmission, les appareils vitaux à l'équipage, la fourniture d'énergie aux véhicules d'exploration à la surface de planètes et aux

¹¹¹ DUBOST, Thomas, « Exploration spatiale et imaginaire populaire américain, 1957-2009 », in *Bulletin de l'Institut Pierre Renouvin*, Vol. 1, n°31, 2010, p. 43.

¹¹² HACKER, Barton C., GRIMWOOD, James M., *On the Shoulders of Titans. A History of Project Gemini*, NASA SP-4203, 1977, p. 103.

¹¹³ David C. White du Massachusetts Institute of Technology indique ainsi lors du 2nd Manned Space Flight Meeting à Dallas en 1963 que « les études comparatives sur les systèmes complets, incluant les sources d'énergie primaire, la conversion énergétique, les systèmes d'évacuation de la chaleur et les contrôles auxiliaires, ont montré que le système de pile à combustible pour Gemini était supérieur au système de batterie solaire Nickel-Cadmium au-delà de 20 heures de fonctionnement. Le système pour Gemini est parfait pour des durées de mission allant de 20 à 1000 heures. » 2nd Manned Space Flight Meeting, Dallas, Texas, April 22-24, NASA Technical Reports, document 19630013321, 1963, p. 308.

expériences qui y sont menées. »¹¹⁴ Il exprime aussi les facteurs qui doivent avant tout être considérés dans le développement du programme « Piles à combustible » de la NASA : une fiabilité à toute épreuve étant données les difficultés posées par les réparations en plein vol et une densité énergétique élevée au vu des « mille à cinq mille dollars » que coûte à l'époque « le placement d'une livre de matériel dans l'espace ».

Les recherches sur les piles à combustible sont alors prises en main par l'État. Dans le sillage d'un objectif à caractère politique, on assiste à une mobilisation scientifique et technique sans précédent dans le domaine. La NASA met en place une campagne de financement intensive et passe plus de 200 contrats avec des entreprises industrielles et des universités pour améliorer de manière pratique la technologie ou en approfondir les connaissances théoriques¹¹⁵. Pour les seules années 1963 et 1964, l'Office of Advance Research and Technology dépense successivement 1 250 000 et 1 800 000 dollars en études diverses¹¹⁶. Le professeur John O'M. Bockris et ses collègues de l'Université de Pennsylvanie obtiennent par exemple une bourse pour approfondir la compréhension de la bioélectrochimie, du comportement dynamique des électrodes poreuses, des potentiels de charge nulle et des différences entre catalyses chimiques et électrochimiques. Monsanto se voit également chargée d'explorer l'idée de Bernard Gruber de concevoir une pile originale dans laquelle l'anode et la cathode sont placées de chaque côté d'une bande sèche imprégnée de solution électrolytique et reliée à deux collecteurs de courant. La société Allis Chalmers travaille quant à elle à la construction d'une pile hydrogène-oxygène à basse température, où l'électrolyte est disposé dans un récipient en amiante, et à de nouvelles méthodes d'extraction de l'eau et de la chaleur avec le moins de composants possibles¹¹⁷. Durant plusieurs années, des travaux sont ainsi menés dans tout le pays sur les réactions physico-chimiques fondamentales (cinétiques, électrochimiques, catalytiques, etc.), sur le développement de nouveaux électrodes ou électrolytes et de meilleurs systèmes d'évacuation de l'eau et de la chaleur. Mais avant le programme Apollo, ce sont les missions Gemini qui font office de banc d'essai pour les piles à combustibles¹¹⁸. Conçu et approuvé en 1961, Gemini est le deuxième projet d'envergure du programme spatial américain. Il a pour but de démontrer la faisabilité de techniques dont la capsule Mercury est incapable, en particulier les rendez-vous spatiaux. Si le premier plan de la NASA, au moment de la décision prise en mai 1961 par Kennedy d'envoyer un homme sur la Lune avant la fin de la décennie, consiste en effet en une fusée qui se poserait directement sur le satellite et qui en reviendrait, il est rapidement mis en évidence que la méthode

¹¹⁴ COHN, Ernst M., « Nasa's Fuel-Cell Program », document 19650039650, 1965, p. 1.

¹¹⁵ CROWE, Bernard J., *Fuel Cells. A Survey*, NASA SP-5115, 1973, p. 12.

¹¹⁶ COHN, Ernst M., « Nasa's Fuel-Cell Program », in YOUNG, George J., LINDEN, Henry R. (éd.), *Fuel Cell Systems*, American Chemical Society, 1969, p. 2.

¹¹⁷ COHN, Ernst M., *op. cit.*, 1965, p. 2.

¹¹⁸ GILRUTH, Robert R., « Man's Space Venture », N64-30331, document 19640020417, 1964, p. 39.

alternative des rendez-vous orbitaux permettrait de réaliser des économies considérables en termes de poids et de carburant. Gemini est aussi l'occasion de résoudre un bon nombre de mystères comme les effets des séjours prolongés dans l'espace sur le corps humain.

Parmi les entreprises qui obtiennent un contrat, la General Electric retient l'attention. Depuis 1959, elle effectue d'intenses recherches au sein d'un laboratoire dédié aux piles à combustibles, le Direct Energy Conversion Operation situé à West Lynn dans le Massachusetts. La façon dont l'eau générée par le processus électrochimique est gérée dans sa pile à membrane échangeuse de protons se démarque des systèmes à diffusion gazeuse connus qui requièrent des procédés autonomes complexes d'évacuation des fluides. L'Office of Manned Space Flight remarque néanmoins dans une étude qu'il réalise en 1962 auprès de la firme que ses appareils ont peu de chance d'être opérationnels dans les temps. Même si Robert Cohen s'en porte garant, la General Electric rencontre effectivement certaines difficultés liées à son manque de personnel et à l'articulation de sa membrane avec la structure de la pile¹¹⁹, ou encore à l'équilibre de l'eau dans la membrane. Une autre évaluation des progrès, réalisée en 1963 par trois ingénieurs des laboratoires Bell à la demande de George E. Mueller, administrateur du MSC, corrobore les doutes émis précédemment, à tel point que le remplacement des piles à combustible par des batteries classiques est recommandé. Bien que les soucis rencontrés soient surtout d'ordre technique, la General Electric revoit pour sa part l'organisation de son centre, avec l'arrivée à sa tête de Roy Mushrush et de Frank T. O'Brien. Le vol de Gemini V du 21 au 29 août 1965 marque finalement la première utilisation spatiale effective des piles à combustible de la société¹²⁰, comme source d'énergie primaire¹²¹. Disposées en une unité de 32 cellules produisant 1 kW, elles sont utilisées en tout au cours de sept missions¹²², non sans dysfonctionnements divers¹²³. Au début des années soixante, les recherches aux États-Unis ne se limitent pourtant pas au programme spatial, où, à côté de la General Electric, Pratt & Whitney réunit une équipe de près de mille personnes dans le but construire des piles à combustible de type Bacon pour la navette Apollo¹²⁴. Signe de cet intérêt, des *graduate students* de la prestigieuse Harvard Business School vont même jusqu'à publier à cette période un livre intitulé *Fuel Cells: Power for the Future*. En 1959, Harry K. Ihrig équipe un tracteur d'Allis Chalmers avec quatre batteries constituées de piles à électrolyte alcalin et fournissant

¹¹⁹ HACKER, Barton C., GRIMWOOD, James M., *op. cit.*, 1977, p. 104.

¹²⁰ SCHWARTZ, Harvey J., « Fuel Cells », Technical paper proposed for presentation at the Fifty-Eighth National Meeting of the American Institute of Chemical Engineers, Philadelphia, December 5-9, 1965, p. 2.

¹²¹ En 1965, leur coût est estimé à dix millions de dollars. Voir : COHN, Ernst M., *op. cit.*, 1965, p. 1.

¹²² WARSHAY, Marvin, PROKOPIUS, Paul R., « The Fuel Cell in Space: Yesterday, Today and Tomorrow », NASA Technical Memorandum 102366, 1989, p. 2.

¹²³ HACKER, Barton C., GRIMWOOD, James M., *op. cit.*, 1977, p. 256-257.

¹²⁴ TEISSIER, Pierre, *op. cit.*, 2017, p.

15 kW¹²⁵. Les applications, déclare la société qui fait en plus fonctionner une voiturette de golf, un chariot élévateur et un submersible au cours des années suivantes¹²⁶, sont virtuellement infinies : « les piles à combustible du futur pourront par exemple fournir de l'énergie aux usines et aux maisons, aux véhicules tels que les camions, les bus et les engins de chantier. »¹²⁷ À l'Union Carbide, Karl V. Kordesch adapte aussi cette technologie pour un véhicule électrique qu'il conduit à Cleveland et à Parma dans l'Ohio¹²⁸. R. A. Wynveen et T. G. Kirkland continuent de leur côté les études sur les oxydes solides pour le compte de la Westinghouse Electric Corporation tandis qu'à l'Institute of Gas Technology les travaux se concentrent sur les hautes températures et les carbonates fondus. Les enjeux militaires de la technique s'expriment quant à eux au travers de l'invention de piles à méthanol direct par l'Esso Research and Engineering Company, à partir de 1962, pour les systèmes de communication de l'US Army Electronics Laboratories¹²⁹.

L'histoire des piles à combustible, de leur prise en main par Francis T. Bacon au début des années trente jusqu'à leur développement aux États-Unis au milieu des années soixante, illustre bien la manière dont la recherche scientifique et technique se transforme au cours du XX^{ème} siècle. D'une part, et bien que son apparition soit antérieure à cette période, un type de chercheur se diffuse plus largement : l'entrepreneur scientifique. Distinct de la figure du savant isolé ayant déjà disparu au XIX^{ème} et de celle de l'universitaire souvent décrit comme désintéressé¹³⁰, celui-ci se caractérise par sa propension stratégique à nouer des liens entre science, économie et politique pour négocier sa position, légitimer son rôle et faire avancer ses objectifs professionnels. À l'instar de Thomas Edison¹³¹, de Louis Pasteur¹³² ou de Frédéric Joliot-Curie¹³³, Francis T. Bacon en est l'exemple même. Toujours en quête de mécènes prêts à investir dans sa machine, il frappe aux portes, s'active

¹²⁵ HENDRICKSON, Kenneth E., *The Encyclopedia of the Industrial Revolution in World History, Volume 3*, The Rowman & Littlefield Publishing Group, Inc., 2015, p. 356.

¹²⁶ KORDESCH, Karl V., *et al.*, « The Safe and Economic Revival of Alkaline Hydrogen/air Fuel Cells with Circulating Electrolytes, Recommended for Vehicles Using Battery Hybrid », in *ECS Transactions*, Vol. 11, n°32, 2008, p. 169.

¹²⁷ ALLIS CHALMERS, *Fuel Cell Tractor*, Machinery of the past, Tenth in a historical series of original Allis Chalmers promotional and sales films, 1958.

¹²⁸ BAGOTSKY, Vladimir S., *op. cit.*, 2012, p. 33.

¹²⁹ CHEN, Eric, *op. cit.*, 2003, p. 2/24.

¹³⁰ Si Robert K. Merton (1973) a pu faire du désintéressement l'une des normes constituant l'ethos de la science et censées guider les pratiques des universitaires, d'autres travaux postérieurs, notamment ceux de Pierre Bourdieu (1976, 2001) ont montré que ceux-ci évoluent au sein d'un espace de concurrence structuré par des enjeux spécifiques. De fait, cet espace scientifique est traversé par des luttes internes portées par des intérêts individuels.

¹³¹ MCGUIRE, Patrick, GRANOVETTER, Mark et SCHWARTZ, Michael, « Thomas Edison and the social construction of the early electricity industry in America », in SWEDBERG Richard (éd.), *Explorations in Economic Sociology*, Russell Sage Press, New York, 1993, pp. 213-248 ; GRANOVETTER, Mark, MCGUIRE, Patrick, « The making of an industry: electricity in the United States », in CALLON Michel (éd.), *The laws of the markets*, Oxford: Blackwell, 1998, pp. 147-173.

¹³² GALVEZ-BEHAR, Gabriel, « Louis Pasteur, entrepreneur. Pour une histoire économique des mondes savants », 2016, <halshs-01267638v4>, pp. 1-47.

¹³³ LATOUR, Bruno, « Joliot : L'Histoire et la Physique mêlées », in SERRES, Michel, *Éléments d'Histoire des sciences*, Paris, Bordas, 1989, pp. 493-513.

à traiter avec des directeurs d'entreprises et des institutions diverses, déploie des talents de persuasion et s'arrange pour faire correspondre les intérêts de ses interlocuteurs aux siens. Il monte également des équipes, recrute des collaborateurs issus de différentes disciplines, sollicite les conseils d'éminents collègues, communique sur ses travaux à différentes occasions dans la presse, dans des expositions ou des conférences pour rallier à sa cause d'autres individus. Il se montre encore entreprenant à l'égard de la science et des objets : il négocie la conception de sa technique, lui donne des propriétés particulières au fil des buts qu'il souhaite atteindre et des personnes qu'il côtoie, fait des concessions en fonction des problèmes qu'il rencontre, retire un électrolyseur ici, ajoute du Téflon là, etc. En somme, Francis T. Bacon *dessine et redessine les frontières de son travail* pour défendre ses ressources et parvenir à ses fins¹³⁴.

D'autre part, la production des connaissances scientifiques et techniques change de statut après la Seconde Guerre mondiale. Comme l'indique précisément Dominique Pestre, elle passe d'activité marginale à centrale, non seulement pour la défense de l'État mais aussi pour la société en général : « L'innovation permanente comme moteur de la sécurité nationale, et comme moyen privilégié de la conquête des marchés, devient la norme »¹³⁵. C'est en ces termes que Vannevar Bush exprime en 1945 ce que doit être la pensée stratégique américaine en matière de science lorsqu'il conseille Franklin D. Roosevelt dans son rapport fondateur *Science, The Endless Frontier* :

« Le progrès contre le mal en temps de guerre dépend des nouvelles connaissances scientifiques. Les nouveaux produits, les nouvelles industries et plus d'emplois nécessitent des ajouts continus à la connaissance des lois de la nature et l'application de cette connaissance à des fins pratiques. De même, notre défense nécessite de nouveaux savoirs pour que nous puissions développer et améliorer de nouvelles armes. »¹³⁶

L'une des conséquences de ce nouveau paradigme qui maintient la technique appliquée au cœur des préoccupations de la Guerre froide se retrouve dans les liens qui unissent désormais les milieux scientifiques, le secteur industriel, les forces armées et l'espace politique¹³⁷. La mobilisation de la science au service de la guerre, dont le projet Manhattan aux États-Unis et la machine de Turing au

¹³⁴ GIERYN, Thomas, « Boundary-Work and the Demarcation of Science from Non-Science: Strains and Interests in Professional Ideologies of Scientists », in *American Sociological Review*, Vol. 48, n°6, 1983, pp. 781-795.

¹³⁵ PESTRE, Dominique, « Les physiciens dans les sociétés occidentales de l'après-guerre. Une mutation des pratiques techniques et des comportements sociaux et culturels », in *Revue d'histoire moderne et contemporaine*, Vol. 39, 1992, p. 56.

¹³⁶ BUSH, Vannevar, *Science, The Endless Frontier, A Report to the President*, United States Government Printing Office, juillet 1945.

¹³⁷ PESTRE, Dominique, « Scientists in Time of War: World War II, the Cold War, and Science in the United States and France », in *French Politics, Culture & Society*, Vol. 24, n°1, 2006, p. 32.

Royaume-Uni constituent sans doute l'acmé, démontre le succès du triptyque armée-industrie-université et des innovations qui peuvent en résulter. Après 1945, la science est une affaire d'État portée par tout un ensemble de politiques opérationnelles qui s'incarnent dans des modes d'engagement divers. La consécration institutionnelle du complexe militaro-industriel américain, qui caractérise le renforcement des formes de coopération entre les deux domaines, trouve d'ailleurs son origine dans le mémorandum d'Eisenhower sur « la science et la technologie comme militaires » en avril 1946 et dans l'Acte sur la Sécurité nationale de 1947¹³⁸. Cette coordination de la production industrielle et de la recherche militaire n'est pas seulement marquée par le rapprochement des grandes firmes technologiques, telles que Lockheed, IBM, la United Aircraft, la General Electric, etc.¹³⁹, des intérêts gouvernementaux mais aussi par l'orientation des études au sein des universités et la création de laboratoires dédiés. En Angleterre aussi, les crédits accordés aux académiciens se multiplient, nous l'avons vu, dans le cadre de la mise en œuvre de politiques scientifiques successives soutenues par des institutions étatiques ou semi-étatiques telles que l'ERA ou la NRDC. Enfin, dans un système à cheval entre la République des sciences et le Royaume de la technologie¹⁴⁰, la commercialisation des inventions s'accroît et s'accélère. Sous la forme de brevets déposés, les entreprises cherchent de plus en plus à tirer profit d'une recherche appliquée fondée sur l'appropriation privée et organisée au sein de leurs propres locaux ou dans des organismes publics au sein desquels elles participent financièrement. Ces grands mouvements structurels en faveur de la science ont pour effet de la faire évoluer, tant du point de vue quantitatif que qualitatif. L'augmentation des moyens marque à la fois le développement de nouveaux champs d'étude, comme l'électronique ou la physique nucléaire, et la naissance de la Big Science. Une mutation s'opère dans la nature des pratiques de recherche elles-mêmes. La vie dans les laboratoires se réorganise en fonction de la composition des équipes, qui mêlent les disciplines, la théorie et l'expérimentation, et dont les effectifs passent de quelques scientifiques à plusieurs dizaines, voire centaines¹⁴¹. Les ingénieurs et les techniciens y prennent également une place plus importante avec la présence d'équipements sophistiqués et dans le contexte d'une spécialisation des tâches approfondie. Le mode de production des savoirs s'en trouve profondément influencé. Dans le cas des physiciens, cela se traduit par exemple par un abandon des ensembles conceptuels larges en faveur d'une concentration des efforts sur les approches

¹³⁸ THIEBAULT, Jean-Louis, « “Complexe militaro-industriel” : notion critique ou théorique ? », in *Cahiers Internationaux de Sociologie*, Vol. 75, 1983, p. 216.

¹³⁹ SOPPELSA, Jacques, « La stratégie américaine et le complexe militaro-industriel (1945-1983) », in *Revue française d'études américaines*, n°21/22, 1984, p. 365.

¹⁴⁰ POLANYI, Michael, *The Republic of Science. Its Political and Economic Theory*, Minerva, 1962, pp. 54-73.

¹⁴¹ GALISON, Peter, « The Many Faces of Big Science », in GALISON, Peter, HEVLY, Bruce (éd.), *Big Science: The Growth of Large-Scale Research*, Stanford University Press, 1992, p. 2.

pragmatiques permettant la création de « constructions immédiatement utiles à la maîtrise et à la manipulation des phénomènes. »¹⁴²

Si l'histoire des piles à combustible est traversée par tous ces phénomènes, il est cependant possible de repérer trois tendances distinctes. À l'entrepreneuriat isolé de Francis T. Bacon que l'on observe en premier lieu, succèdent des recherches favorisées par la politique technologique du Royaume-Uni au sortir de la Seconde Guerre mondiale. À partir de 1946, les études de l'Anglais n'ont en effet plus rien à voir avec celles qu'il réalisait dans les années trente. Le nombre de scientifiques au sein de son équipe augmente et leurs spécialités varient de la métallurgie à l'électrochimie en passant par l'ingénierie tandis que la réalisation de prototypes opérationnels potentiellement commercialisables prend le dessus sur l'approfondissement de la théorie fondamentale. Les incitations britanniques concernant les piles à combustible pâtiennent néanmoins d'un manque de débouchés, ce qui se traduit par un ralentissement progressif des travaux. Dans un dernier temps, aux États-Unis, les piles à combustible font l'objet d'investissements de la part des entreprises, qui produisent et achètent des brevets, avant que leur développement ne devienne un objectif national porté par le complexe militaro-industriel du programme spatial. Au début des années soixante, les recherches, dont les montants se chiffrent désormais en millions de dollars, s'accroissent. Elles se déroulent alors aussi bien dans les laboratoires de la General Electric, de Monsanto ou de Pratt & Whitney que dans les universités et les organismes gouvernementaux. L'évolution des piles à combustible sur la période évoquée est ainsi fortement dépendante des politiques scientifiques des deux États. Surtout, sous l'effet du jeu d'acteurs, ce qui se présentait au départ comme une expérience scientifique devient en quelques décennies un véritable objet technique.

¹⁴² PESTRE, Dominique, « Repenser les variantes du complexe militaire-industriel-universitaire », in DAHAN, Amy, PESTRE, Dominique, *Les sciences pour la guerre, 1940-1960*, Éditions de l'EHESS, 2004, p. 203.

DEUXIÈME CHAPITRE

Vers une politique nationale de la recherche en France

Il serait dommageable pour l'analyse de faire commencer l'histoire des piles à combustible en France par le moment où il en est fait mention pour la première fois, tant du côté de l'appareil d'État que des entreprises ou des études académiques. Ce serait omettre, en effet, les structures tacites, les ruptures et les discontinuités replacées dans le temps long qui offrent les conditions de possibilité de son existence. Elle doit notamment beaucoup, nous le verrons plus loin, à la mise en œuvre d'une véritable politique scientifique nationale à partir de la fin des années cinquante sous l'égide de la DGRST (Délégation générale à la recherche scientifique et technique). Or celle-ci n'apparaît pas *ex nihilo*. Comme l'écrit Vincent Duclert, elle suppose la réalisation d'éléments particuliers : « un discours collectif qui l'invoque et l'explicite, des acteurs politiques et scientifiques qui la prennent en charge, des institutions publiques qui l'incarnent et la rendent possible, des acquis et des résultats qui la représentent et la légitiment, enfin une réflexion sur sa construction et ses enjeux. »¹⁴³ Il convient donc de la restituer dans son contexte socio-historique et d'en cerner la dynamique. Dans un premier temps, nous nous intéresserons à la manière dont la recherche se réorganise progressivement en France après 1945, et aux tentatives de mise en place d'une véritable politique scientifique. Nous examinerons ensuite les discours performatifs portés dans le pays sur la science à l'étranger, en particulier aux États-Unis et au Royaume-Uni. Une dernière partie concernera enfin la création de la DGRST au début de la V^{ème} République.

2.1 La réorganisation de la science et de la technique après la Seconde Guerre mondiale : la difficile mise en œuvre de politiques de la recherche et l'avènement de la technoscience

La Seconde Guerre mondiale marque une période de rupture pour la recherche publique française. Si celle-ci s'était institutionnalisée au cours des années précédentes, notamment grâce à la fondation de la CNRS (Caisse nationale de la recherche scientifique) en 1935, du CNRSA (Centre national de la recherche scientifique appliquée) en 1938 et de la fusion de ces deux entités en 1939 en un CNRS (Centre national de la recherche scientifique)¹⁴⁴, elle est désorganisée après la défaite de 1940. Sous l'Occupation, les universitaires et leurs étudiants, dépossédés de leurs moyens matériels, sont tenus à l'écart des communications scientifiques internationales et interdits de publication dans les revues

¹⁴³ DUCLERT, Vincent, « La France et la politique de recherche au XXe siècle. L'enjeu historique de l'institutionnalisation », in CHATRIOT, Alain, DUCLERT, Vincent, *Le gouvernement de la recherche. Histoire d'un engagement politique de Pierre Mendès France à Charles de Gaulle (1953-1969)*, Éditions La Découverte, 2006, p. 19.

¹⁴⁴ GUTHLEBEN, Denis, *Histoire du CNRS de 1939 à nos jours. Une ambition nationale pour la science*, Armand Colin, 2013 (2009), p. 32.

spécialisées autres que nationales. Des laboratoires considérés comme stratégiques, comme celui qui abrite le cyclotron de Frédéric Joliot-Curie au Collège de France, sont également obligés d'accueillir des équipes allemandes. Certains scientifiques s'engagent dans la résistance et rejoignent le maquis. D'autres élaborent des plans de sauvetage, comme Henri Laugier et le biologiste Louis Rapkine, pour permettre aux savants de quitter le pays en direction de Londres ou du Bureau scientifique de New York créé par le général De Gaulle en 1941¹⁴⁵. D'autres encore choisissent de collaborer¹⁴⁶. Mais pour la majorité, il s'agit surtout de développer des logiques d'accommodement permettant de « maintenir une activité normale en dépit de l'anormalité de la situation. »¹⁴⁷ Pendant ce temps, Pierre Laval et le régime de Vichy procèdent au démantèlement méticuleux du CNRS en créant des organismes de recherche industrielle propres à chaque discipline de science appliquée. Un travail d'ailleurs poursuivi à la Libération, laissant ainsi au CNRS le soin de la recherche fondamentale. C'est dans ce contexte que sont établis l'IFP (Institut français du pétrole), l'INH (Institut national de l'hygiène), l'IRSID (Institut de recherche de la sidérurgie), le CNET (Centre national d'étude des télécommunications), l'ONERA (Office national d'études et de recherches aéronautiques) et l'INRA (Institut national de la recherche agronomique).

Alors qu'aux yeux de l'opinion publique la science sort grandie d'une guerre qu'elle a terminée grâce à sa maîtrise de l'atome et est portée par l'aura positive entourant ses savants résistants, son évolution en France se traduit par plusieurs dynamiques. Au niveau institutionnel, le CNRS, d'abord dirigé par Frédéric Joliot-Curie en 1944 puis par le généticien Georges Teissier à partir de 1946, se rapproche de l'université avec son rattachement au ministère de l'Éducation nationale et l'entrée au sein de son comité directeur de professeurs. Son budget s'accroît considérablement, de même que ses effectifs qui passent de mille à deux mille agents entre 1945 et 1950¹⁴⁸. Pour autant, son rôle dans la coordination de la recherche nationale s'amenuise au profit de ministères qui souhaitent se doter de moyens propres¹⁴⁹ et d'entreprises récemment nationalisées qui créent des services d'études internes, tels que la Direction des études et recherches de l'EDF (Électricité de France) ou le Cerchar (Centre d'études et recherches de Charbonnages de France). Un temps effacée subrepticement, la dichotomie

¹⁴⁵ DOSSO, Diane, « Les scientifiques français réfugiés en Amérique et la France Libre », in *Matériaux pour l'histoire de notre temps*, Vol. 60, n°1, 2000, pp. 34-40.

¹⁴⁶ Sur ce sujet, voir : CHEVASSUS-AU-LOUIS, Nicolas, *Savants sous l'Occupation. Enquête sur la vie scientifique française entre 1940 et 1944*, Éditions du Seuil, 2004.

¹⁴⁷ SINGER, Claude, « La science française à la dérive. Itinéraires de scientifiques collaborationnistes sous l'occupation allemande », in FUSSMAN, Gérard, *Croyance, raison et déraison*, Odile Jacob, 2006, p. 300. Claude Singer reprend ici l'analyse de Philippe Burrin développée dans *La France à l'heure allemande, 1940-1944* (Éditions du Seuil, 1995), selon laquelle l'Occupation a suscité des formes d'accommodement chez les Français fondées sur le sentiment de la contrainte, l'intérêt matériel, la complaisance personnelle et la connivence idéologique.

¹⁴⁸ PICARD, Jean-François, « La création du CNRS », in *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], n°1, 1999, mis en ligne le 06 décembre 2006.

¹⁴⁹ PROST, Antoine, « Les origines des politiques de la recherche en France (1939-1958) », in *Cahiers pour l'histoire du CNRS 1939-1989*, n°1, 1988 (reprint), p. 3.

entre recherche fondamentale et recherche appliquée est réactualisée. Malgré sa participation à l'effort de guerre, notamment avec la mobilisation de laboratoires à Bellevue, à Nancy et à Marseille pour les travaux de déminage, le CNRS retrouve une position consacrant la science pure. La technologie industrielle tient quant à elle une place de choix pour la défense et dans la perspective de reconstruction qui se dessine. Et la science appliquée représente un sujet dont il est nécessaire de s'emparer. C'est en substance ce qu'atteste la volonté du gouvernement d'engager le pays dans une logique de grands programmes qui visent à traiter de sujets jugés essentiels à la nation, comme l'énergie nucléaire. Or cette logique met en exergue le fonctionnement institutionnel qui prédomine dans l'après-guerre : « une conjonction entre une forme de recherche, une structure, des réseaux de soutien particulièrement bien implantés dans l'appareil d'État et une visée d'indépendance nationale coïncidant avec les vœux de la classe dirigeante. »¹⁵⁰ La défaite de 1940 entraîne aussi un renouvellement de la classe scientifique, en particulier de son élite dirigeante, qui est remplacée par une génération plus jeune née autour du début du siècle. Affectés par leur mobilisation au cours de la guerre et les relations qu'ils ont pu nouer avec le milieu industriel, puis plus tard par les échanges qui s'opèrent dans le cadre du plan Marshall, ces chercheurs n'ont plus rien à voir avec leurs aînés. Une mutation que l'émergence de nouveaux domaines d'études, la présence d'instruments jusqu'alors inédits dans les laboratoires, l'augmentation des crédits ou encore l'introduction de nouvelles approches théoriques et pratiques viennent parachever.

Le cas de la création du CEA (Commissariat à l'énergie atomique) en 1945¹⁵¹ mérite qu'on s'y attarde. Il vient en effet donner un éclairage exemplaire sur la manière dont le système scientifique français se reconstruit au sortir de la guerre, selon les modalités que nous venons de détailler. Contrairement à une idée reçue, ce projet ne procède pas d'un objectif militaire qui aurait été de fournir au pays la bombe atomique. Pour le général de Gaulle, cette question n'est d'ailleurs pas prioritaire et il n'y accorde que peu d'intérêt jusqu'en 1956. Frédéric Joliot Curie, l'autre grand orchestrateur du CEA (avec le ministre de la Reconstruction Raoul Dautry) et premier haut-commissaire, répudie pour sa part, comme généralement la communauté scientifique dans son ensemble, tout armement du nucléaire. La mise en œuvre du CEA apparaît donc dès le départ comme une volonté de contribuer au redressement économique et social par la compréhension scientifique et l'application technique de l'atome¹⁵². Cette création illustre néanmoins comment une mécanique de la concurrence se développe entre les institutions. Alors qu'il avait jusqu'à présent été un fervent

¹⁵⁰ JACQ, François, « Quel devenir pour les systèmes de recherche issus de la Seconde Guerre mondiale et de la guerre froide ? », in *Annales des Mines*, février 1998, p. 12.

¹⁵¹ COUTROT, Aline, « La création du Commissariat à l'énergie atomique », in *Revue française de science politique*, Vol. 31, n°2, 1981, pp. 343-371.

¹⁵² BELOT, Robert, *op. cit.*, 2015, pp. 137-159.

défenseur de la coordination scientifique, Frédéric Joliot Curie tient le CNRS à l'écart des démarches. Sous le contrôle de la présidence du Conseil et non pas d'un ministère, le CEA fonde ses propres laboratoires de physique et vide les facultés et grandes écoles, en particulier l'École normale supérieure, de leurs promotions scientifiques. Il entretient de plus des liens étroits avec le secteur industriel et tempore la situation délicate dans laquelle il met l'université, ce que confirme l'ancien chef du cabinet de Frédéric Joliot Curie Etienne Bauer : « Si le Commissariat n'a pas mal réussi ses relations avec l'industrie, il n'a pas mal réussi non plus ses relations avec l'université. Il avait de l'argent, ses contrats arrosaient certains labos tout en courtisant systématiquement l'université pour qu'elle ne se fâche pas. »¹⁵³

Autonome financièrement et pilotée par les grands corps de l'État, ses ressources dépassent celles du CNRS en 1948, les expériences en physique nucléaire devenant toujours plus coûteuses du fait des hautes énergies demandées – un milliard et demi de francs pour le premier contre neuf cent millions environ pour le second¹⁵⁴ –. La Big Science qui se déroule dans ses locaux s'exprime aussi par les effectifs toujours plus conséquents, venus d'horizons divers, qu'il emploie : personnel administratif, théoriciens, physiciens concentrés sur l'expérimentation et les applications, ingénieurs de toutes sortes, ouvriers, techniciens... Des appareils inédits par leur taille et leur puissance, tels que la première pile à eau lourde ZOE, dont la réalisation est lancée dès 1947, caractérisent enfin le dernier pan de cette nouvelle forme de recherche. En d'autres termes, dans la lignée d'une politique gouvernementale relative aux domaines estimés cruciaux pour le relèvement du pays, cette nouvelle science française se révèle « technoscience ». Inventé au sortir de la Seconde Guerre mondiale¹⁵⁵ et popularisé par Gilbert Hottois pour pallier la déficience d'une tradition philosophique séparée de la réalité et traitant principalement des sciences sous le signe du langage¹⁵⁶, ce terme permet de ne pas percevoir ces dernières comme indépendantes de leurs instruments et des objets qu'elles décrivent. Il leur restitue à l'inverse toute leur dimension humaine et opérationnelle¹⁵⁷. Dans ce contexte, les sciences qui se développent à partir du milieu du XX^{ème} siècle ne peuvent plus être définies par de simples interprétations symboliques ou théoriques dans lesquelles la technique et les hommes tiendraient une place mineure : leur essence est une activité construite par des processus sociaux et

¹⁵³ PICARD, Jean-François, PRADOURA, Elisabeth, « Entretien avec Etienne Bauer », in *Archives orales du CNRS*, le 2 mars 1987.

¹⁵⁴ PICARD, Jean-François, « L'organisation de la science en France depuis 1870 : un tour des recherches actuelles », in *French Historical Studies*, Vol. 17, n°1, 1991, p. 103.

¹⁵⁵ On renverra ici à la note critique de Dominique Raynaud publiée sur le site de la revue *Zilsel* sous le titre « Note historique sur le mot "technoscience" » le 4 avril 2015 (<http://zilsel.hypotheses.org/1875>).

¹⁵⁶ HOTTOIS, Gilbert, « La technoscience : de l'origine du mot à ses usages actuels », in *Recherche en soins infirmiers*, Vol. 3, n°86, 2006, pp. 24-32.

¹⁵⁷ GUCHET, Xavier, « Les technosciences : essai de définition », in *Philonsorbonne*, n°5, 2001, pp. 83-95.

des opérations concrètes. Cette pratique technoscientifique n'a plus pour objectif d'étudier passivement les phénomènes. Pragmatique et utilitariste, elle cherche plutôt à les apprivoiser et les manipuler. Les questions posées à la nature changent donc et les questionnements sur son fonctionnement – si possible reproductible artificiellement – remplacent la quête des causes cachées¹⁵⁸. Dans la logique des grands programmes tels que le CEA, cela se traduit à la fois par la réduction des systèmes étudiés à « un jeu de paramètres fondamentaux assurant une maîtrise opératoire »¹⁵⁹, par de nouvelles formes d'organisation et de division du travail, et par les nouvelles alliances sociales hétérogènes qui réunissent autour d'elles des académiciens, des militaires, des politiques et des industriels.

À la fin de la Seconde Guerre mondiale, la construction de la bombe atomique n'intéresse pas réellement l'armée, qui doit à la fois négocier sa position de neutralité entre les deux superpuissances et gérer le délicat processus de décolonisation récemment amorcé¹⁶⁰. La rencontre entre la recherche scientifique et l'espace militaire a donc lieu en dehors de ce cadre. Elle se concrétise d'abord par une volonté d'exploiter l'héritage scientifique laissé par le III^e Reich. En octobre 1944, une Commission des armes secrètes allemandes est même constituée. Les missiles V-2 suscitent en particulier des convoitises illustrées par les remarques faites en 1945 par le professeur Henri Moureu, ancien adjoint de Frédéric Joliot Curie au Collège de France et grand acteur de l'évacuation du stock français d'eau lourde vers l'Angleterre au cours de la guerre, sur « l'importance des problèmes scientifiques et techniques que pose l'étude des fusées, tant pour la Défense nationale que pour l'Astronautique. » Il préconise même la création d'un institut dédié au sujet pour que le pays « déjà très en retard quant aux réalisations dans ce domaine, ne soit pas définitivement distancé par d'autres nations plus audacieuses ou plus clairvoyantes. »¹⁶¹ Des institutions sont progressivement établies, telles que la DEFA (Direction des études et fabrications d'armement) et son LRBA (Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques). Le CEPA (Centre d'études des projectiles auto-propulsés), qui reçoit ses statuts définitifs en 1947, est quant à lui un exemple du type de répartition et de coordination du travail qui se dessine à cette période, avec des départements mixtes unissant ingénieurs militaires et scientifiques civils. L'armée se lance également dans une production aéronautique ambitieuse avec l'établissement de la SNECMA (Société nationale d'étude et de construction de moteurs d'aviation)

¹⁵⁸ BENSAUDE-VINCENT, Bernadette, *Les vertiges de la technoscience. Façonner le monde atome par atome*, Éditions La découverte, 2009, p. 117.

¹⁵⁹ PESTRE, Dominique, JACQ, François, « Une recomposition de la recherche académique et industrielle en France dans l'après-guerre, 1945-1970 : nouvelles pratiques, formes d'organisation et conceptions politiques », in *Sociologie du travail*, Vol. 38, n°3, 1996, p. 270.

¹⁶⁰ BELOT, Robert, *op. cit.*, 2015, pp. 139-140.

¹⁶¹ TEYSSIER, Arnaud, HAUTEFEUILLE, Roland, « Recherche scientifique et politique militaire dans la France d'après-guerre : ambitions et frustrations (1945-1958) », in *Revue historique des armées*, n°2, 1989, p. 8.

en 1945. Dans le but de construire les premiers moteurs à réaction français, le ministère de l'Air recrute de nombreux chercheurs et ingénieurs allemands et bâtit d'importantes structures d'essais¹⁶². Cette structuration de la recherche scientifique à caractère militaire ne dure qu'un temps : sous l'effet de la dispersion des forces, de la concurrence entre les armées et de la réduction des budgets engendrés par la guerre d'Indochine, elle se désagrège progressivement.

Jusqu'à la fin des années quarante, la recherche scientifique en France n'est ainsi pas soumise à une politique générale d'organisation. Une enquête interministérielle effectuée en 1949 à la demande de la présidence du Conseil, fait même état de dix-sept administrations qui gèrent la recherche tandis que plusieurs organismes travaillent parfois en même temps sur des thèmes similaires sans coordination. C'est notamment le cas des matières plastiques, étudiées entre autres par le CNRS, le CNAM et l'École polytechnique¹⁶³. Or les différentes propositions faites par les milieux académique et politique pour établir un Conseil supérieur de la recherche scientifique et technique en 1947, une commission de la recherche au Plan ou encore un comité de coordination placé sous la direction de la présidence du Conseil en 1948 affichent leurs limites et montrent que coexistent deux logiques d'action en opposition, en faveur soit d'un parlement, soit d'un gouvernement de la science¹⁶⁴. À partir des années cinquante, cette dernière solution semble prendre une forme plus concrète alors que de nombreux acteurs, en particulier au sein de la nouvelle génération de scientifiques qui tend à rejeter le système en place, se mobilisent pour l'élaboration d'une politique gouvernementale, au premier rang desquels Henri Laugier et Henri Longchambon (directeur du CNRSA en 1938). Les discours visant à imposer la notion de politique de la science comme énoncé collectif se multiplient auprès des institutions¹⁶⁵. Le mathématicien André Lichnerowicz suggère en 1950 la création d'un Commissariat général. En 1952, le Conseil économique prend le problème au sérieux. Des consultations sont réalisées auprès des responsables des grands organismes de recherche et de personnalités scientifiques : Pierre Guillaumat du CEA, Jacques Tréfouël de l'Institut Pasteur, Gaston Dupouy qui a pris la direction du CNRS deux ans plus tôt après le départ de Georges Teissier, Edmond Bauer de l'Université de Paris, l'ingénieur Albert Caquot, etc. Et si les scientifiques sont globalement réticents à accepter l'idée d'une politique de la recherche, le rapport fait au Conseil économique dont la charge est confiée à Camille Soula, professeur de médecine à Toulouse et membre du Comité national du

¹⁶² CARLIER, Claude, « La France face à trois révolutions technologiques : le moteur à réaction, le missile balistique et la bombe atomique », in *Guerres mondiales et conflits contemporains*, Vol. 2, n°238, 2010, pp. 68-69.

¹⁶³ PICARD, Jean-François, *La république des savants. La recherche française et le CNRS*, Flammarion, 1990, p. 145.

¹⁶⁴ DUCLERT, Vincent, *op. cit.*, 2006, p. 27.

¹⁶⁵ JACQ, François, *Pratiques scientifiques, formes d'organisation et représentations politique de la science dans la France de l'après-guerre. La « politique de la science » comme énoncé collectif (1944-1962)*, thèse de doctorat, Paris, Ecole des mines, 1996.

CNRS, préconise l'instauration d'un secrétariat d'État. Cette même année, un projet de loi est aussi déposé pour la fondation d'un Comité supérieur de coordination de la recherche scientifique et technique rattaché à la présidence du Conseil.

Le Commissariat général au Plan crée de son côté une commission de la recherche scientifique et technique avec Henri Laugier à sa tête¹⁶⁶. Démarré en 1952, le Deuxième plan de modernisation et d'équipement ne se concentre en effet plus uniquement, comme le plan Monnet qui l'a précédé¹⁶⁷, sur des secteurs jugés prioritaires et dont la science était exclue¹⁶⁸. La situation de la recherche est désormais l'une de ses préoccupations de développement. S'il est souligné que des efforts ont bien été entrepris, en particulier pour la recherche technique, il est surtout mis en avant que ceux-ci sont insuffisants et que la France a progressivement perdu, au cours des cinquante années précédentes, la place qu'elle occupait jadis dans le champ scientifique. Il s'agit donc de « rattraper ce retard, de combler des lacunes et, d'une façon générale, de donner à la science française les moyens intellectuels et matériels nécessaires pour lui permettre de faire face à ses responsabilités envers l'économie et la défense nationale. » Il est conseillé d'investir massivement en hommes, en équipement et en crédits (40 milliards pour la recherche civile), de réformer le recrutement et la formation des chercheurs (le troisième cycle d'études ou doctorat qui est créé en 1954), de même que de réorganiser les structures de coordination « nécessaires pour éviter chevauchements et doubles emplois nuisibles, pour mettre fin à certains gaspillages d'efforts intellectuels et de ressources matérielles, et pour assurer le meilleur rendement possible à l'effort financier de la nation. »¹⁶⁹ Si la commission se met à plancher sur tous ces sujets, par le biais de six sous-commissions, il n'en découle pas de véritable proposition concrète pour une politique de la recherche unifiée et des trois formules d'organisation proposées (création d'une autorité publique responsable comme un ministère, d'un commissariat général assisté d'une commission ou d'un comité d'études permanent auprès du Commissariat au Plan), c'est paradoxalement la dernière qui est retenue car elle n'empiète pas sur l'indépendance des organismes qu'elle est pourtant chargée de coordonner¹⁷⁰.

¹⁶⁶ GILPIN, Robert, *France in the Age of the Scientific State*, Princeton University Press, 1968, p. 189.

¹⁶⁷ RIOUX, Jean-Pierre, *La France de la Quatrième République, 1. L'ardeur de la nécessité (1944-1952)*, Éditions du Seuil, 2000, (1980), pp. 235-244.

¹⁶⁸ Adopté en 1947, le Premier plan de modernisation et d'équipement vise surtout à reconstruire l'économie nationale. Il établit six secteurs prioritaires : le charbon, l'électricité, la sidérurgie, le ciment, les machines agricoles et les transports intérieurs. Voir : Commissariat général du Plan de modernisation et d'équipement, « Rapport général sur le Premier plan de modernisation et d'équipement », novembre 1946-janvier 1947, p. 23.

¹⁶⁹ Commissariat général du Plan, « Deuxième plan de modernisation et d'équipement (1954-1957) », Loi n°56-342 du 27 mars 1956, pp. 79-80.

¹⁷⁰ PROST, Antoine, *op. cit.*, 1988 (reprint), p. 7.

Certaines de ces mesures finissent par trouver un écho favorable dans l'espace politique en la personne de Pierre Mendès France. Dans son discours du 3 juin 1953 devant l'Assemblée nationale, ce dernier dresse en substance le même constat que la commission de la recherche scientifique et technique du Plan : « La République a besoin de savants ; leurs découvertes, le rayonnement qui s'y attache et leurs applications contribuent à la grandeur d'un pays. Or les crédits de la recherche sont dérisoires. Il est attristant, mais significatif que la France n'ait plus reçu aucun prix Nobel pour la science depuis 1937. »¹⁷¹ Lorsqu'il accède au pouvoir en juin 1954, sa décision principale au niveau de la recherche concerne la militarisation de l'énergie atomique¹⁷² : au cours de l'été, il décide de lancer la construction de deux sous-marins nucléaires, d'un « programme atomique militaire » et des installations qui leur sont nécessaires¹⁷³. Mais dans la foulée, il établit aussi le fondement d'une politique publique générale concernant la science française en instaurant un secrétariat d'État à la recherche scientifique et au progrès technique et en y nommant Henri Longchambon. Bien qu'il soit désormais établi, jusqu'au sein de la présidence du Conseil, que l'aide à la recherche doit être une des tâches principales de l'État, l'action du cabinet de Longchambon - au sein duquel on retrouve André Lichnerowicz - est limitée par son absence de pouvoir de gestion sur les grands organismes - à part le CEA - et son rôle essentiellement consultatif. Un défaut rapidement corrigé au mois de septembre avec l'extension de ses prérogatives et la création du CSRSPT (Conseil supérieur de la recherche scientifique et du progrès technique)¹⁷⁴, composé de 120 membres, qui doit préparer les options du Troisième Plan (1957-1961) en matière de recherche¹⁷⁵. Évincé quelques mois plus tard sous la pression parlementaire qui s'accroît après l'adoption des accords de Paris¹⁷⁶, Pierre Mendès France ne peut pas beaucoup plus peser au niveau institutionnel et les instances qu'il a développées n'ont qu'un rôle mineur, après son départ, dans les gouvernements suivants. En revanche, son action se poursuit dans d'autres cadres et dans d'autres lieux.

Le projet qu'il concrétise d'organiser, par le biais de la revue *Les Cahiers de la République* qu'il vient de lancer, un colloque sur le thème de la recherche en témoigne. Sur une idée originale d'Étienne Bauer, ces premières « Assises nationales »¹⁷⁷ rassemblent ainsi du 1er au 3 novembre 1956 à Caen

¹⁷¹ DUCLERT, Vincent, « Pierre Mendès France et la recherche. L'avenir d'une politique », in *Matériaux pour l'histoire de notre temps*, Vol. 63, n°1, 2001, p. 120.

¹⁷² MONGIN, Dominique, « Aux origines du programme atomique militaire français », in *Matériaux pour l'histoire de notre temps*, Vol. 31, n°1, 1993, p. 17.

¹⁷³ DUCLERT, Vincent, « Pierre Mendès France et la recherche scientifique. Le sens d'une action gouvernementale », in CHATRIOT, Alain, DUCLERT, Vincent, *Le gouvernement de la recherche. Histoire d'un engagement politique de Pierre Mendès France à Charles de Gaulle (1953-1969)*, Éditions La Découverte, 2006, p. 50.

¹⁷⁴ Décret n° 54-918 du 14 septembre 1954, paru au Journal Officiel le 9 février 1955.

¹⁷⁵ CHATRIOT, Alain, *Pierre Mendès France. Pour une République moderne*, Armand Colin, 2015.

¹⁷⁶ LACOUTURE, Jean, *Pierre Mendès France*, Éditions du Seuil, 2002 (1981), p. 524.

¹⁷⁷ *Cahiers de la République*, Bulletin quotidien d'informations, « Colloque sur l'Enseignement et la Recherche scientifique (Caen, 1-3 novembre 1956) », n°3, 4 novembre 1956.

quelque 250 personnes touchant au monde scientifique et technique (chercheurs, académiciens, industriels, journalistes, administrateurs, parlementaires, etc.). Au bout de trois jours de débats et de travaux en commissions et sous-commissions, cette « forme inédite d'expérience politique »¹⁷⁸ débouche sur l'adoption de douze points clés concernant la formation, l'enseignement, la réforme du statut du personnel du CNRS, la construction d'infrastructures, la création d'un Fonds national de la Recherche, la mise en œuvre d'un plan décennal et la revalorisation de certaines carrières scientifiques. Évidemment, cela ne se fait pas sans accroc comme le rappelle Jean-Louis Crémieux-Brilhac, ancien conseiller de Pierre Mendès France à Matignon et co-organisateur du colloque, car « plusieurs visions de l'avenir de la recherche et de l'enseignement cohabitaient. D'une part, s'exprimait le jacobinisme de Laugier, qui voulait une structure politique forte de la recherche, tout comme Mendès. Et d'autre part, le néolibéralisme - le mot aurait fait horreur, si on l'avait prononcé - de Monod et des jeunes scientifiques, fascinés par les États-Unis, qui voulaient faire éclater les cadres "facultaires", et instaurer l'autonomie des départements. »¹⁷⁹ Cependant, une vraie dynamique se met en route autour d'un petit noyau composé notamment de Jacques Soustelle, Henri Longchambon, Marcel Prettre, Charles Sadron, Maurice Ponte, Pierre Piganiol, André Lichnerowicz ou encore de Jacques Monod. Cela se traduit par la création de l'AEERS (Association d'étude pour l'expansion de la recherche scientifique)¹⁸⁰ qui comptera jusqu'à près d'un millier de membres et dont découleront de nouvelles manifestations à Grenoble en octobre 1957 autour des relations entre l'Université et l'industrie, puis plus tard à Dakar-Abidjan en décembre 1959 sur le progrès scientifique et à Sèvres en 1961 sur la mise à jour des connaissances¹⁸¹. Pierre Mendès France revient aussi s'exprimer devant le Parlement pour inviter le gouvernement à mettre en œuvre les douze points un mois après qu'une commission d'étude des conditions de formation et de recrutement des chercheurs est créée. Si des étapes sont donc franchies à la veille de l'avènement de la V^{ème} République, on est tout de même loin d'une restructuration complète du système de la recherche et sa définition reste encore ouverte.

2.2 Les États-Unis et le complexe du retard

La question du retard de la France sur les États-Unis, et plus généralement sur l'étranger, tient une place intéressante à l'époque dans la logique des discours sur la science et la technique en France et,

¹⁷⁸ DUCLERT, Vincent, « Le colloque de Caen, second temps de l'engagement mendésiste », in CHATRIOT, Alain, DUCLERT, Vincent, *Le gouvernement de la recherche. Histoire d'un engagement politique de Pierre Mendès France à Charles de Gaulle (1953-1969)*, Éditions La Découverte, 2006, p. 91.

¹⁷⁹ CREMIEUX-BRILHAC, Jean-Louis, « La politique de la recherche sous la IV^{ème} République », Conférence avec Jean-Louis Crémieux-Brilhac au séminaire du professeur Antoine Prost, Centre Malher, Paris I, le 26 juin 1986.

¹⁸⁰ CREMIEUX-BRILHAC, Jean-Louis, « Le mouvement pour l'expansion de la recherche scientifique, 1954-1968 », in *Cahiers pour l'histoire de la recherche*, CNRS Éditions, 1995 (reprint), pp. 1-16.

¹⁸¹ RIZZO, Jean-Louis, « Pierre Mendès France et la recherche scientifique et technique », in *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], n°6, 2002, mis en ligne le 05 juillet 2007.

nous le verrons dans les chapitres suivants, dans les décisions de lancer le développement des recherches sur les piles à combustible. Une analyse approfondie de quelques textes permet d'en cerner les enjeux. En 1954, la manière dont les États-Unis gèrent leur recherche scientifique et technique est un modèle que l'OECE (Organisation européenne de coopération économique) souhaite exporter dans toute l'Europe. Il faut noter que la recherche est une préoccupation déjà inscrite au fondement des relations européennes d'après-guerre. L'article 55 du traité instituant la CECA (Communauté européenne du charbon et de l'acier) en 1951 stipule notamment que la Haute Autorité doit « encourager la recherche technique et économique »¹⁸². Dans une étude comparative intitulée « L'organisation de la recherche appliquée en Europe, aux États-Unis, et au Canada », l'OECE critique à la fois la structuration de la science européenne et les pratiques de ses « savants » tandis qu'elle vante les mérites de la recherche industrielle américaine. Un lexique négatif et un vocabulaire élogieux sont ainsi employés d'un côté et de l'autre tout au long du chapitre sur le « climat de la recherche en Amérique et en Europe » pour caractériser les deux situations. L'universitaire européen est qualifié « d'artiste ». Il n'est pas « doublé d'un business-man », n'a pas « l'esprit d'équipe » et son « désintéressement » a des allures de « snobisme », ce qui ne lui permet pas de « gagner la confiance des industriels » qui le tiennent « à l'écart ».

L'Europe est quant à elle « désavantagée par ses traditions trop vieilles, son morcellement politique et économique et par les destructions matérielles et les pertes de vie humaine » des deux guerres mondiales, avec pour conséquence la désuétude de « ses vieilles institutions sociales » et de ses « anciennes installations industrielles ». À l'inverse, les États-Unis « donnent une impression de jeunesse et de vigueur exubérantes. » Il y règne « une absence de formalisme qui favorise la coopération entre l'État, l'industrie et l'université » et la recherche académique y est dépeinte comme « dans une large mesure, industrielle et soumise aux contrôles des milieux d'affaires ». Contrairement au savant européen, l'homme de science américain est « respecté » et bénéficie d'un « statut privilégié » car outre-Atlantique « le directeur de la recherche est de plus en plus souvent un des vice-présidents de la Société qui l'emploie » et dans les entreprises on a compris que « la gestion de la recherche devait s'inspirer des méthodes commerciales ». De fait, « la commercialisation des résultats » y constitue « une activité normale et légitime ». Les recommandations de l'institution sont claires : il faut réexaminer les méthodes des pays européens « à la lumière des observations de nos collègues étrangers » et inciter à prendre conscience de la nécessité de créer des politiques nationales

¹⁸² FOCSANEANU, Lazar, « Le Droit international de la recherche scientifique et technique », in *Annuaire français de droit international*, Vol. 12, n°1, 1966, p. 379.

de la recherche¹⁸³. Cet intérêt de l'OECE favorise donc en même temps la diffusion de l'idée d'un décalage culturel et matériel en matière de recherche scientifique entre l'Europe et l'Amérique et la légitimation d'un discours sur la politique de la science au niveau européen.

En France, la question du retard est par exemple présente, nous l'avons vu plus haut, dans le Deuxième plan de modernisation et d'équipement. Elle l'est aussi dans les propos que tient Pierre Mendès France dans son discours du 3 juin 1953, sous un angle moins direct. S'il ne prononce pas le mot, il situe toutefois implicitement le pays dans un *espace international de concurrence* au sein duquel il n'occupe plus une position dominante, puisqu'il n'a plus reçu de prix Nobel en sciences depuis plus de quinze ans. Un constat qu'il répète dans son texte de 1957, « pour une politique nationale de la recherche » : « Voici vingt et un ans que nous n'avons pas recueilli un prix Nobel scientifique. Je l'ai dit un jour à la tribune de l'Assemblée et on l'a souvent répété depuis. »¹⁸⁴ Plus loin, il continue, explicitement cette fois, en établissant un parallèle entre la France et l'Angleterre : « dans un domaine comme celui de la médecine, par exemple, [...] le gouvernement britannique a consacré annuellement à la recherche, depuis 1912, dix fois plus de crédits que nous. » Cette comparaison se fonde aussi sur des statistiques :

« Notre handicap à l'égard des pays étrangers s'aggrave, car les hommes nous font défaut. [...] Notre effectif global d'ingénieurs et de chercheurs en fonction est de 62 000 ; il est de 743 000 aux Etats-Unis et 550 000 en URSS. Peut-être les critères de comparaison sont-ils hasardeux. Le rapprochement des chiffres n'en est pas moins accablant. Et la comparaison nous serait encore plus désavantageuse si l'on se référait au nombre de diplômes de science pure et de science appliquée décernés chaque année par million d'habitants. Il s'en délivre de 2 à 3 fois plus en URSS, aux Etats-Unis, en Angleterre, au Canada, aux Pays-Bas que chez nous, moitié plus en Suisse, un tiers de plus en Italie. »¹⁸⁵

De même, le « retard » et « la compétition internationale » sont au fondement de la partie du Troisième plan traitant du « progrès scientifique et technique ». On voit ainsi une rhétorique du

¹⁸³ Organisation européenne de coopération économique, « L'organisation de la recherche appliquée en Europe, aux États-Unis, et au Canada, Vol. 1, Étude comparative, Rapport des missions d'assistance technique n°81-82-83, Paris, 1954, pp. 71-73, in BOUCHARD, Julie, Comment le retard vient aux Français, *Analyse d'un discours sur la recherche, l'innovation et la compétitivité, 1940-1970*, Presses Universitaires du Septentrion, 2008, pp. 297-299.

¹⁸⁴ MENDES FRANCE, Pierre, « Pour une politique nationale de la recherche », extrait des Cahiers de la République, n°5, janvier-février 1957, pp. 28-35, in CHATRIOT, Alain, DUCLERT, Vincent, *Le gouvernement de la recherche. Histoire d'un engagement politique de Pierre Mendès France à Charles de Gaulle (1953-1969)*, Éditions La Découverte, 2006, p. 371.

¹⁸⁵ MENDES FRANCE, Pierre, *Ibid.*, janvier-février 1957, pp. 28-35, in CHATRIOT, Alain, DUCLERT, Vincent, *Le gouvernement de la recherche. Histoire d'un engagement politique de Pierre Mendès France à Charles de Gaulle (1953-1969)*, Éditions La Découverte, 2006, p. 373.

rattrapage et de l'accroissement de la productivité économique portée par la recherche se développer tout autour de ces thèmes dès le premier paragraphe :

« Le monde est engagé aujourd'hui dans une nouvelle révolution industrielle dont le développement de l'électronique, l'automatisme de la production, l'utilisation de sources nouvelles d'énergie ne sont que les manifestations les plus spectaculaires. Les hommes voient ainsi s'ouvrir devant eux de nouvelles possibilités de progrès économique et social. La France, handicapée qu'elle est dans son développement économique par la relative stagnation de sa population active et par la faiblesse de ses ressources en matières premières énergétiques et industrielles, peut trouver dans l'utilisation de ces techniques nouvelles le moyen d'accroître sa productivité nationale. C'est une chance qui s'offre à elle. Elle ne doit pas la manquer, non seulement pour répondre au désir des Français de profiter du progrès scientifique et technique, mais parce que dans la compétition internationale tout retard pris risque rapidement de se révéler impossible à rattraper. »¹⁸⁶

Dans le rapport préalable sur « la recherche scientifique et le progrès technique » élaboré par le CSRSPT en juin 1957, l'analyse est en tout point similaire mais plus détaillée. Il ne s'agit pas du seul document émis par le Conseil supérieur. D'autres sont publiés en juin 1955, janvier 1956 et juillet 1958. Cependant, celui de juin 1957 est le plus abouti et le plus conséquent par sa taille. Adressé au commissaire général au Plan Etienne Hirsch, qui en avait passé commande le 28 mars 1956, il est issu d'une enquête auprès d'une centaine de personnes et de quatre-vingt institutions et est nourri par les propositions du Colloque de Caen¹⁸⁷. Globalement, le rapport souligne la nécessité d'engager deux réformes immédiates. La première idée, pour pallier le manque de scientifiques, est de s'attaquer à la professionnalisation de la recherche et à l'amélioration du rendement en diplômés. La seconde vise à réaménager les structures de la recherche, en particulier par le biais de nouveaux modes de financement. Enfin, la réforme de la recherche médicale mérite d'être mentionnée car elle occupe dix-sept pages, c'est-à-dire autant que les chapitres traitant des sciences humaines et de la recherche dans le domaine agricole réunis. Dès l'introduction, il est mentionné que le pays « s'est laissé distancer par l'Étranger dans de nombreux champs d'activité »¹⁸⁸ durant l'entre-deux guerres, ce qui a pour conséquence que le « retard est plus accentué » qu'ailleurs et qu'afin « d'accroître et d'améliorer les moyens matériels et humains dont doit disposer la France pour se maintenir au niveau qu'exigent son

¹⁸⁶ Commissariat général du Plan, « Troisième plan de modernisation et d'équipement (1958-1961) », Décret n°59-443 du 19 mars 1959, p. 23.

¹⁸⁷ PROST, Antoine, *op. cit.*, 1988 (reprint), pp. 11-12.

¹⁸⁸ Conseil supérieur de la Recherche scientifique et du Progrès technique, « La recherche scientifique et le progrès technique », Rapport au Président du Conseil des Ministres et au Commissaire Général au Plan en vue de la préparation du 3e plan de modernisation et d'équipement, juin 1957, p. 7.

passé, son prestige et ses responsabilités, il est essentiel de ne point négliger les fondements mêmes sur lesquels construire ces moyens : la science et ses applications dans toutes les branches d'activité. » Des mesures d'urgence sont également conseillées dans ce texte, rédigé sous la haute autorité d'Henri Longchambon :

« Le péril qui menace l'avenir scientifique du pays est tel qu'une véritable "mobilisation nationale" de tous les scientifiques doit être décrétée pour le sauver par l'enseignement et par la formation des hommes. C'est ce qu'entreprennent actuellement les États-Unis d'Amérique et la Grande-Bretagne à l'appel des plus hautes autorités politiques de ces pays. La France se doit, elle aussi, de mettre tout en œuvre et de faire appel à toutes ses possibilités humaines et matérielles pour soutenir le mouvement de redressement qu'elle a déjà amorcé. »¹⁸⁹

La comparaison avec l'étranger, et en particulier avec le modèle anglo-saxon qu'on retrouve au Royaume-Uni et aux États-Unis, ne s'arrête pas là puisque dans le chapitre consacré à la création d'un Fonds national de la recherche, il est décrit :

« En Angleterre, dès 1928, a été créé un "Department of Scientific and Industrial Research", organisme d'État relevant du Conseil de la Couronne, chargé d'accorder des suppléments de subventions à la recherche. Il est aidé dans cette tâche par un "Conseil de la Recherche Agronomique" et un "Conseil de la Recherche Médicale". Enfin un "Advisory Council of Scientific Policy" doit proposer au Gouvernement les lignes générales de la politique à suivre. En 1955, les ressources employées à ces fins ont été de 12 milliards environ. Aux U.S.A, malgré l'immense développement des organismes existants de recherche et les traditions libérales de ce pays, le Président Eisenhower a créé, en 1954, la "National Science Foundation" [...]. En 1955-1956 le budget de cet organisme a été de 10 milliards de francs environ, entièrement consacrés au développement de la recherche fondamentale considérée comme insuffisante aux États-Unis. »¹⁹⁰

La National Science Foundation, qui trouve son origine dans le fameux *Science, The Endless Frontier* de Vannevar Bush, inspire tout particulièrement ce projet. Trois paragraphes de ses statuts sont

¹⁸⁹ Conseil supérieur de la Recherche scientifique et du Progrès technique, *Ibid.*, juin 1957, p. 46.

¹⁹⁰ Conseil supérieur de la Recherche scientifique et du Progrès technique, *Ibid.*, juin 1957, p. 90.

reproduits dans le rapport¹⁹¹. Les comparaisons sont en fait multipliées partout pour démontrer que les points qui doivent être améliorés dans le système français l'ont déjà été autre part. Dans la partie concernant la formation des techniciens, il est noté que « la Grande-Bretagne a fait de grands progrès [...] et fournit un exemple à suivre »¹⁹² tandis que la « faiblesse » des crédits de la recherche, qui représentent environ « 80 milliards de francs, dont 50 à 60 sur fonds publics » détonne « en comparaison avec d'autres pays » : « les USA : 1 500 milliards environ, dont la moitié sur fonds privés, en augmentation rapide chaque année ; « l'Angleterre : 160 milliards environ avec une majorité de crédits d'État ; l'Allemagne occidentale : 120 milliards, en augmentation très rapide d'année en année »¹⁹³. L'efficacité de la législation sur la propriété intellectuelle « décline », quant à elle, « au moins de manière relative par rapport à d'autres [nations] » :

« Contrairement à ce qui se passe dans la plupart des autres pays industriels, le brevet français est délivré d'office au demandeur contre simple paiement des droits, sans examen obligatoire du caractère de la nouveauté. [...] En des pays étrangers où la délivrance du brevet est soumise à examen, le nombre de ceux qui sont délivrés à des Français est beaucoup plus faible. Les États-Unis d'Amérique sont un des pays les plus difficiles de ce point de vue, tout en offrant le marché d'exploitation le plus profitable. Le nombre de brevets accordés à des inventeurs français y diminue d'année en année : 746 en 1952, 503 en 1954, 397 en 1955, alors que l'Allemagne et l'Angleterre arrivent, respectivement, à 818 et 1077 en 1955. »¹⁹⁴

La liaison entre la recherche fondamentale et la recherche appliquée est également pointée du doigt pour ne pas être assez étroite, « surtout si on [la] compare à [celle relevée] en d'autres pays : Allemagne, Angleterre, États-Unis »¹⁹⁵. Même lorsque l'on en vient spécifiquement aux différentes disciplines, ce sont encore les États-Unis qui servent de référence. Au niveau la recherche médicale par exemple, il est mentionné que cette science ne progresse que par le croisement des études fondamentales et de l'observation clinique, et que « l'image même de cette collaboration nécessaire [...] est donnée par l'équipe formée par les Américains Kendall et Hench » pour leurs travaux sur le traitement des rhumatismes, ce qui a eu pour conséquence que « le prix Nobel a été attribué à ces

¹⁹¹ KROPFINGER, Gwanaël, *Henri Longchambon (1896-1969)*, mémoire de Maîtrise dirigé par François Caron, présenté à l'Université de Paris IV- Sorbonne en juin 1997, p. 98.

¹⁹² Conseil supérieur de la Recherche scientifique et du Progrès technique, *Ibid.*, juin 1957, p. 41.

¹⁹³ Conseil supérieur de la Recherche scientifique et du Progrès technique, *Ibid.*, juin 1957, p. 80.

¹⁹⁴ Conseil supérieur de la Recherche scientifique et du Progrès technique, *Ibid.*, juin 1957, p. 71.

¹⁹⁵ Conseil supérieur de la Recherche scientifique et du Progrès technique, *Ibid.*, juin 1957, p. 68.

deux chercheurs »¹⁹⁶. D'autre part, l'exemple de la découverte de la pénicilline par le microbiologiste anglais Alexander Fleming et son développement permet d'asseoir la légitimité des pratiques anglo-saxonnes et de dénoncer le retard produit par leur rejet en France, écartée « de plus en plus des grandes découvertes médicales. »¹⁹⁷ Ainsi, sur les 189 pages que comporte le rapport, les États-Unis sont cités quatorze fois, l'Angleterre douze fois et l'Allemagne six fois. L'URSS, pour sa part, n'est citée qu'une seule fois. En moyenne, une comparaison avec l'étranger est donc établie toutes les six pages environ.

L'ensemble de ces éléments appelle plusieurs observations. Il faut tout d'abord noter que les énoncés sur le retard et les éléments de comparaison avec les pays étrangers qui s'y rapportent ne sont pas présents de la même manière tout au long des années cinquante, puis au début des années soixante. Si une régularité s'observe bien, il est à voir que de tous les rapports fournis jusqu'en 1993, date qui marque la fin de la planification nationale en France, le rapport publié en 1954 par la Commission de la recherche scientifique et technique pour le Deuxième plan est l'un de ceux dans lesquels le mot « retard » est le moins employé : seulement quatre fois. Ce qui correspond au Deuxième plan lui-même, puisque celui-ci contient deux fois le mot « retard » et met l'accent sur les efforts « urgents » qui doivent être entrepris. Comme le montre Julie Bouchard¹⁹⁸, la disposition spatiale du terme dans le texte est aussi à prendre en compte. Dans le Deuxième plan, les deux énoncés se trouvent localisés sur une seule page et y occupent une place centrale : le premier se situe en début de page et le second en plein milieu, à chaque fois en début de phrase. Le premier termine la courte introduction sur la « Recherche scientifique et technique » pendant que le second ouvre le propos de la deuxième partie relative aux « Crédits nécessaires d'investissement et de fonctionnement ».

L'usage du terme et sa mise en visibilité dans les textes s'accélérent dans la seconde moitié des années cinquante. Dans le deuxième rapport de 1957, et en plus des comparaisons avec l'étranger que nous venons de mentionner, le mot « retard » y est cité onze fois. Dans celui sorti en 1961, il est présent vingt-trois fois et dans celui de 1966 trente-sept fois. Cette augmentation des préoccupations au sujet de la distance scientifique, technique, ou encore industrielle qui séparerait la France des autres pays développés, et en particulier des États-Unis, est un ressort de justification récurrent pour les politiques de recherche à partir de cette période et tout au long des années soixante. Il n'est pas non plus nouveau. Dans *De la démocratie en Amérique*, Alexis de Tocqueville fait déjà état du réalisme scientifique et technique d'un pays où « la partie purement pratique des sciences est admirablement

¹⁹⁶ Conseil supérieur de la Recherche scientifique et du Progrès technique, *Ibid.*, juin 1957, p. 130.

¹⁹⁷ Conseil supérieur de la Recherche scientifique et du Progrès technique, *Ibid.*, juin 1957, p. 131.

¹⁹⁸ BOUCHARD, Julie, Comment le retard vient aux Français, *Analyse d'un discours sur la recherche, l'innovation et la compétitivité, 1940-1970*, Presses Universitaires du Septentrion, 2008, pp. 130-132.

cultivée, et l'on s'y occupe avec soin de la portion théorique immédiatement nécessaire à l'application ; les Américains font voir de ce côté un esprit toujours net, libre, original et fécond ; mais il n'y a presque personne, aux États-Unis, qui se livre à la portion essentiellement théorique et abstraite des connaissances humaines. »¹⁹⁹ Pour Pierre Papon, ces références constantes qui sont effectuées avec le modèle américain à partir de la fin des années cinquante et au début des années soixante peuvent être analysées comme issues d'un contexte politique particulier dans lequel l'indépendance obtenue dans les domaines scientifiques est directement assimilable à une volonté stratégique de restauration de l'indépendance nationale. D'autre part, les discours sur la fuite des cerveaux, l'accroissement des investissements américains sur le Vieux Continent et bien sûr les crédits importants accordés à la recherche outre-Atlantique contribuent au renforcement de l'idée d'un écart entre la France et les États-Unis²⁰⁰.

Les discours sur le retard que la France aurait accumulé dans les domaines de la recherche scientifique et qui pénaliserait son économie ne correspondent pourtant pas forcément à une réalité évidente. Entre 1954 et 1957, l'économie française renoue avec la prospérité. Cette période faste est marquée par une augmentation du PNB et du revenu national de 41 % et des exportations de 44 %. La production industrielle s'accroît également de 47 %. L'essor est considérable dans certains secteurs en particulier : la chimie détient par exemple une croissance annuelle de 15 % entre 1952 et 1958. Des entreprises telles que Rhône-Poulenc, Saint-Gobain, Pechiney ou encore Air Liquide profitent d'une recherche florissante et déposent de nombreux brevets. La demande intérieure stimule la carbochimie, la pétrochimie, la chimie des plastiques et la production de textiles synthétiques. La métallurgie et la sidérurgie voient quant à elles leurs chiffres d'affaires s'envoler pour atteindre respectivement 1 500 milliards et 570 milliards de francs en 1956. L'aéronautique, en pleine reconstruction au sortir de la guerre, multiplie par six ses productions militaires pendant que l'industrie automobile double ses fabrications entre 1952 et 1958 pour atteindre plus d'un million de véhicules²⁰¹. Le domaine de la recherche scientifique et technique publique voit aussi son budget augmenter. Sous l'impulsion de Gaston Dupouy et de Henri Laugier, le CNRS obtient en 1953 la mise en œuvre d'un plan quinquennal financé à hauteur de 10 milliards de francs. Dans les années cinquante, le Centre devient « bâtisseur »²⁰² et, à partir d'une idée du physicien Louis Néel, il lance la construction d'instituts en

¹⁹⁹ DE TOCQUEVILLE, Alexis, *De la démocratie en Amérique II*, Les classiques des sciences sociales, 2002 (1840), p. 45.

²⁰⁰ PAPON, Pierre, « The State and Technological Competition in France or Colbertism in the 20th Century », in *Research Policy*, Vol. 4, n°3, 1975, p. 217.

²⁰¹ RIOUX, Jean-Pierre, *La France de la IVe République, 2. L'expansion et l'impuissance, 1952-1958*, Éditions du Seuil, 2000 (1983), pp. 168-180.

²⁰² PICARD, Jean-François, *op. cit.*, 1990, p. 159.

province destinés à faire collaborer universitaires et chercheurs du CNRS. C'est ainsi qu'est notamment créé à partir de 1955 l'Institut de chimie des substances naturelles à Gif-sur-Yvette²⁰³, dirigé par Maurice-Marie Janot et Edgar Lederer.

Surtout, la comparaison avec les États-Unis souffre de la faiblesse - toutes proportions gardées - de la politique scientifique américaine elle-même menée au cours des années cinquante. Alors que le maccarthysme bat son plein et que de nombreux politiques perçoivent le monde de la recherche comme un milieu sympathique au communisme, les crédits accordés à la NSF sont peu élevés dans un premier temps : de l'ordre de 15 millions de dollars en 1950. La recherche militaire est mieux pourvue puisqu'elle est dotée de plus d'un milliard. Les autres programmes de la recherche civile se voient quant à eux octroyer près de 600 millions²⁰⁴. Mais, généralement, une baisse d'intérêt pour la science se fait ressentir au milieu de la décennie. La crise du lancement de Spoutnik I en 1957 en est d'autant plus retentissante dans le pays pour cette raison²⁰⁵. Dans ces circonstances, il faut comprendre les discours sur le retard en France dans leur dimension *performative*. En effet, ceux-ci n'ont pas uniquement vocation à dresser un constat ou un état des lieux de la situation de la recherche. Les acteurs qui les produisent visent aussi à les utiliser comme ressources pour faire évoluer leur situation. Ainsi, « le lien semble indissociable entre le discours sur le retard et le discours sur l'action, entre la stigmatisation d'une réalité affublée du "retard" et le souci de transformation de cette réalité. »²⁰⁶ Cette volonté des acteurs de la recherche prend notamment forme grâce à l'appréhension du retard au travers de la quantification. De nouvelles pratiques, issues pour partie de la pénétration et de l'intégration du management américain qui surviennent dans le cadre des missions de productivité lancées par Jean Monnet²⁰⁷, viennent étayer les comparaisons avec l'étranger. Elles s'incarnent dans de nouveaux instruments et indicateurs qui permettent de poser un regard mathématique sur les différences entre la France et les autres pays. Avec le rapport du CSRSPT publié en juin 1957, c'est en effet la première fois depuis la guerre qu'un appareil statistique est développé pour cerner le milieu de la recherche scientifique et technique²⁰⁸. Pour reprendre l'expression de Robert K. Merton, ce sont donc là des dispositifs à la fois matériels et discursifs qui servent à faire

²⁰³ POTIER, Pierre, « La création de l'institut de chimie des substances naturelles à Gif-sur-Yvette par M. M. Janot », in *Revue d'histoire de la pharmacie*, Vol. 84, n°312, 1996, pp. 459-463.

²⁰⁴ HARTER, Hélène, « NSF, la recherche *made in USA* », in *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], n°23, 2008, mis en ligne le 3 janvier 2011.

²⁰⁵ NEAL, Homer A., SMITH, Tobin L. et MCCORMICK, Jennifer B., *Beyond Sputnik, U.S. Science Policy in the Twenty-First Century*, The University of Michigan Press, 2011 (2008), p. 21.

²⁰⁶ BOUCHARD, Julie, *Ibid.*, 2008, pp. 137-138.

²⁰⁷ KUISEL, Richard F., « L'*american way of life* et les missions françaises de productivité », in *Vingtième siècle, revue d'histoire*, Vol. 17, n°1, 1988, pp. 26-29.

²⁰⁸ JACQ, François, « Aux sources de la politique de la science : mythe ou réalités ? (1945-1970) », in *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], n°6, 2002, mis en ligne le 5 juillet 2007.

trionpher ce que Heidegger appelle une « interprétation publique de la réalité »²⁰⁹ : les acteurs de la recherche scientifique française élaborent le complexe du retard pour appuyer leurs revendications.

2.3 Du gouvernement des sciences aux sciences du gouvernement

Le retour au pouvoir de Charles de Gaulle, à l'occasion de la crise algérienne, marque la concrétisation de certains desseins en matière de politique de la recherche. Le « plus illustre des Français », selon les mots prononcés par René Coty²¹⁰, n'a jamais été insensible à la science et à la technique. Dans son appel du 18 juin 1940, n'invite-t-il pas déjà « les ingénieurs et les ouvriers spécialistes des industries d'armement » à le rejoindre ? N'autorise-t-il pas la création du Bureau scientifique de la Délégation de la France libre aux États-Unis le 11 décembre 1941, souhaitant par ailleurs que chaque candidature lui soit soumise²¹¹, puis du CEA en 1945 ? « La France n'est réellement elle-même qu'au premier rang », s'exclame-t-il dans ses mémoires²¹². Or, au vu des postes les plus prestigieux de son gouvernement qui sont attribués en 1958 non pas à des hommes politiques mais à des techniciens, on ne peut que noter l'importance stratégique qu'accorde Charles de Gaulle à la science et à la technique dans sa quête de restauration de la puissance du pays. Jusqu'alors en charge de la recherche atomique au CEA, le polytechnicien Pierre Guillaumat prend par exemple la tête du ministère des Armées²¹³. Mais sur les conseils de Geneviève de Gaulle-Anthonioz, nièce du général évoluant parmi de nombreux chercheurs réputés, c'est bien André Malraux, ministre délégué à la présidence du Conseil chargé de l'Information, qui décide de relancer au cours de l'été 1958 les débats autour de la politique scientifique ayant eu lieu dans les années précédentes²¹⁴. Pour ce faire, il peut compter sur André Lichnerowicz et son rapport daté de 1954 conseillant la mise en place d'un « Conseil scientifique chargé d'aviser auprès du Premier ministre sur l'ensemble de la recherche

²⁰⁹ MERTON, Robert K., *The sociology of Science*, Chicago University Press, 1973, p. 110.

²¹⁰ RUDELLE, Odile, « De Gaulle et la République », in BERSTEIN, Serge, RUDELLE, Odile, *Le modèle républicain*, Presses universitaires de France, 1992, pp. 383-406.

²¹¹ DOSSO, Diane, « La France libre et la politique de recherche - New York, 1941-1944 », in CHATRIOT, Alain, DUCLERT, Vincent, *Le gouvernement de la recherche. Histoire d'un engagement politique de Pierre Mendès France à Charles de Gaulle (1953-1969)*, Éditions La Découverte, 2006, p. 121

²¹² DE GAULLE, Charles, *Mémoires de guerre, L'appel, 1940-1942*, Plon, 1954, p. 1.

²¹³ BERSTEIN, Serge, *La France de l'expansion, 1. La République gaullienne (1958-1969)*, Éditions du Seuil, 1989, pp. 13-14.

²¹⁴ À ce sujet, Pierre Piganiol témoigne : « Malraux avait été désigné pour piloter l'opération, mais celle-ci n'était pas vraiment au centre de ses intérêts. Il était l'exemple même des hommes qui réduisent la culture aux arts et à la littérature. Sa vision de la condition humaine était impressionnante, mais les aspects scientifiques échappaient à son intelligence. Il avait heureusement dans son cabinet Geneviève de Gaulle. C'était une personnalité extraordinaire à tous points de vue. Compagne de déportation de Mme Zamansky, professeur de maths à la faculté de Jussieu, elle est intervenue avec un tact et une intelligence peu commune dans la création du Comité interministériel avec l'aide de Lichnerowicz, Zamansky, Étienne Bauer, et Pierre Lelong qui avait été chargé de suivre les affaires scientifiques et celles touchant à l'enseignement à l'Élysée. » (Pierre Piganiol, propos recueillis par D. Poupardin et B. Desbrosses, Archorales INRA-Cassettes Dat n°275-1 et 2, p. 92.)

scientifique et technique » et sur l'établissement d'un groupe de travail issu de l'AEERS présidé par Alfred Sauvy, alors directeur de l'INED (Institut national d'études démographiques). Au moment où la Ve République prend forme, un projet ayant pour objectif l'institution d'un « Commissaire général » est rapidement élaboré et couché sur papier par Jean-Louis Crémieux-Brilhac mais le directeur de cabinet de de Gaulle, Georges Pompidou, s'y oppose au titre qu'il empiète sur les prérogatives d'un trop grand nombre de ministères. « Ce dispositif est hors de question, s'explique-t-il. Pas un ministre n'acceptera que ses crédits soient soumis au contrôle d'un Haut-commissaire. »²¹⁵

Ministre d'État chargé de la recherche scientifique, Louis Jacquinot reprend le dossier en main. Le groupe de travail est à nouveau consulté mais deux tendances divergentes s'y font face. D'un côté, Claude Sadron souhaite que l'autorité en charge de la recherche s'appuie sur une sorte de parlement de la science, comme c'était le cas avec le CSRSPT présidé par Henri Longchambon. De l'autre, André Lichnerowicz et Henri Laugier craignent que d'une telle organisation ne découle rien de concret. La solution trouvée par Louis Jacquinot, conseillé en particulier par le mathématicien Pierre Lelong, est plus modeste. Il s'agit d'ailleurs d'une structure d'apparence si peu contraignante « que le Général s'en serait étonné, demandant qui serait le décideur en matière de recherche scientifique. »²¹⁶ Les décrets du 28 et 29 novembre 1958 établissent ainsi le CIRST (Comité interministériel de la recherche scientifique et technique), directement placé sous la tutelle du Premier ministre et qui rassemble tous les ministres en rapport avec la recherche scientifique et technique, et le CCRST (Comité consultatif de la recherche scientifique et technique), composé de douze « sages » renouvelés par moitié chaque année. Enfin, à la place du Commissariat pensé précédemment apparaît une DGRST (Délégation générale à la recherche scientifique et technique) dont les fonctions et les moyens semblent quelque peu restreints. « La Ve République a choisi ses savants »²¹⁷ s'exclame-t-on de fait dans le mensuel *Science & Vie* en février 1959 alors qu'au même moment Charles de Gaulle prononce à la Cité universitaire de Toulouse un discours dans lequel il fait l'éloge de la recherche française²¹⁸.

Les douze sages ne sont peut-être pas les plus éminents scientifiques (aucun ne détient de prix Nobel) mais ils sont jeunes (ils ont tous entre 34 et 56 ans) et disposent de compétences transversales, connaissant pour la plupart aussi bien le monde de la recherche publique que l'industrie privée. Au sein du CCRST, on retrouve donc - en plus d'André Lichnerowicz et Charles Sadron dont nous avons déjà parlé - le chimiste Félix Trombe, spécialiste de l'énergie solaire, le polytechnicien et responsable

²¹⁵ CREMIEUX-BRILHAC, Jean-Louis, *op. cit.*, 1995 (reprint), p. 12.

²¹⁶ PROST, Antoine, *op. cit.*, 1988 (reprint), p. 14.

²¹⁷ « La Ve République a choisi ses savants », in *Science & Vie*, n° 497, février 1959, pp. 88-89.

²¹⁸ Discours de Charles de Gaulle à la Cité universitaire de Toulouse, le 14 février 1959.

de la construction du site nucléaire de Marcoule Pierre Taranger, le directeur scientifique des Charbonnages de France Maurice Letort, le co-directeur de l'Institut du Radium de la Fondation Curie Raymond Latarjet, l'enseignant-chercheur en mathématiques à la Faculté des Sciences de Paris Paul Germain, René Dumont de l'Institut national agronomique, le démographe du Collège de France Louis Chevalier, le spécialiste de la leucémie Jean Bernard, l'enseignant-chercheur en électrotechnique à la Faculté des sciences de Paris Pierre Aigrain²¹⁹ et le directeur de la Compagnie générale de la télégraphie sans fil Maurice Ponte.

Du côté de la DGRST, c'est Pierre Piganiol qui est choisi pour occuper en premier le poste de Délégué général. Normalien, agrégé ès sciences physiques en 1937 et ancien résistant²²⁰, Pierre Piganiol est surtout conseiller scientifique à la direction générale de Saint-Gobain lorsqu'il est appelé. S'il doit sa nouvelle position, dit-il, à une boutade lancée dans un restaurant parisien auprès d'une table composée notamment d'André Lichnerowicz et d'anciens du Colloque de Caen²²¹, il est appuyé d'emblée par le général de Gaulle et le Premier ministre Michel Debré. De plus, « son relatif éloignement des sphères de la recherche publique pouvait également favoriser sa tâche, du moins dans les premiers temps. N'étant le porte-parole d'aucun groupe de pression, il lui était capable d'agir et de surprendre. »²²² En effet, Pierre Piganiol agit vite pour consolider les nouvelles institutions créées et légitimer la mise en œuvre d'une véritable politique de la recherche centralisée. A la DGRST, il embauche les anciens experts du CSRSPT, notamment Louis Zieglé et René Marzocchi. De ce fait, il dispose d'une administration expérimentée dans le domaine des problèmes posés par l'organisation de la recherche. Il s'impose également au sein du CIRST et du CCRST qui ont pourtant pour ambition initiale de le cantonner à un rôle secondaire²²³. Fin 1958 s'organise donc une structure tripartite : le CCRST conseille, le CIRST décide et la DGRST exécute. Une des premières tâches du Comité consultatif est de donner un point de vue sur les structures de la recherche fondamentale et le

²¹⁹ Pierre Aigrain joue un rôle important dans la politique de la science en France de la fin des années cinquante à la fin des années soixante-dix : après avoir créé le Laboratoire de physique des solides de l'ENS en 1950, il est notamment directeur scientifique des Recherches et Moyens d'essais du ministère des Armées de 1961 à 1965, directeur des Enseignements supérieurs de 1965 à 1967, délégué général de la DGRST de 1968 à 1973 et secrétaire d'État à la Recherche de 1978 à 1981. Source : BARUCH, Pierre, BANTIGNY, Ludivine, « Pierre Aigrain et le Laboratoire de physique des solides de l'École normale supérieure Genèse et développements des semi-conducteurs : 1948-1965 », in *Bulletin de la Société Française de Physique*, 136, 2002, p. 3.

²²⁰ À ce sujet, on pourra noter que l'obtention de postes dans la haute fonction publique liée à la politique scientifique se fonde souvent sur des réseaux d'interconnaissance - ou de reconnaissance - construits sur des trajectoires scolaires (le passage par l'École normale supérieure de Paris, Polytechnique ou l'École des Mines) et sur l'appartenance à la Résistance.

²²¹ PIGANIOL, Pierre, « L'exemple de la DGRST », in *Cahiers de la Fondation Charles de Gaulle*, n°12, 2003, pp. 117-118.

²²² DUCLERT, Vincent, « L'invention d'une haute institution gouvernementale. La Délégation générale à la recherche scientifique et technique », in CHATRIOT, Alain, DUCLERT, Vincent, *Le gouvernement de la recherche. Histoire d'un engagement politique de Pierre Mendès France à Charles de Gaulle (1953-1969)*, Éditions La Découverte, 2006, p. 136.

²²³ DUCLERT, Vincent, *Ibid.*, 2006, p. 137-138.

recrutement des chercheurs puis de proposer les solutions générales synthétiques que la situation impose. De son rapport sortent quatre recommandations : la création, auprès du Premier ministre, d'un Fonds de développement de la recherche scientifique et technique à l'échelle nationale ; l'organisation d'un office gérant les centres de recherche d'importance nationale, la réorganisation des liens entre le CNRS et l'université et la définition d'un statut nouveau pour le personnel scientifique²²⁴.

Le rôle que doit jouer le CNRS dans l'organisation de la nouvelle politique de recherche semble problématique : quelle place lui réserver ? Si les recherches impulsées au plus haut degré de l'État sont d'ordre fondamental, n'y aurait-il pas double emploi avec la mission du Centre ? Au départ, le chantier principal de Pierre Piganiol, du point de vue administratif, reste néanmoins la création d'un Fonds de la recherche²²⁵ qui permettrait d'engager des actions dans des domaines jugés pertinents par les instances citées précédemment. Dans une note datée du 13 avril 1959, il est en effet donné que si le financement de la recherche scientifique et technique par l'État les quatre dernières années a progressé de façon importante²²⁶, il existe toujours une inquiétude de voir la France devenir « un pays sous-développé au cours des prochaines décades, ou tout du moins [distancée] par des pays équivalents (Grande-Bretagne, Allemagne fédérale). »²²⁷ Or l'augmentation des crédits n'est pas tout ; le problème de leur emploi est au moins aussi important. Une « meilleure répartition et une utilisation plus efficace » sont requises, allant de pair avec le mécanisme d'harmonisation déjà enclenché au niveau politique. Il est donc conseillé d'une part de coordonner les initiatives prises par ceux qui administrent les activités de recherche et d'autre part d'intervenir spécifiquement dans leur orientation par le biais d'*actions concertées* « pour combler des lacunes ou remédier à des insuffisances. » Et le cadre qui leur est fixé atteste d'une certaine idée de la science. Il est en effet

²²⁴ Comité consultatif de la recherche scientifique et technique, « Rapport sur les structures de la recherche fondamentale et le recrutement des chercheurs », 8 avril 1959.

²²⁵ Au sujet de la place du CNRS dans l'organisation nouvelle de la recherche, il est expliqué dans une « note sur un Fonds de développement de la recherche scientifique et technique » datée du 13 avril 1959 qu'avec « l'idée de confier une gestion, on donne au fonds une mission qui l'apparente aux grands organismes de recherche tels que le CNRS. Ici apparaît un nouveau problème. [La mise en œuvre du fonds] appartient à un domaine d'intervention resté en grande partie vacant par l'impossibilité pratique d'exécuter les textes (CNRS) et qu'il serait assez facile de confier à un nouvel organe central. En ce qui concerne la gestion des instituts et des services nationaux, il n'y a pas de vide, la mission est remplie, plus ou moins bien, et si l'on veut la confier à un nouvel organe il faudra auparavant la retirer à un autre. Ce faisant, on n'éviterait pas les malentendus provenant d'actions parallèles menées par deux organismes différents sans que l'on puisse trouver des critères toujours satisfaisants permettant de différencier les actions. Ce qui choquerait le plus un observateur considérant le problème de la recherche avec des yeux neufs, c'est qu'en réalité les fonctions que l'on voudrait attribuer au fonds de développement de la recherche scientifique et technique ont déjà été confiées au Centre national de la recherche scientifique et qu'il y aurait un double emploi générateur de confusion ».

²²⁶ Les crédits publics accordés à la recherche passent de 59 milliards en 1955 (45 milliards pour le secteur public et 14 pour le secteur militaire) à 140 milliards de francs (89 milliards pour le secteur civil et 51 pour le secteur militaire) en 1958.

²²⁷ « Note sur un Fonds de développement de la recherche scientifique et technique », 13 avril 1959, p. 1.

mentionné que l'assistance apportée à la recherche industrielle et privée, « seule capable de rembourser un prêt », ne peut suffire, le CCRST ayant affirmé que « l'avenir était avant tout conditionné par la recherche fondamentale et par la recherche appliquée de base. »²²⁸

Ces réflexions sont appuyées par Michel Debré. Issu d'une famille d'intellectuels²²⁹ et respectueux de la science qu'il considère comme garante de la grandeur de la France, ce dernier a de plus fait partie du CSRST en 1955. Une déclaration gouvernementale qu'il prononce montre que chez lui aussi le retard sur l'étranger est au fondement de son action : « La part de la France dans l'effort mondial de recherche n'est pas ce qu'elle pourrait être. L'apport des savants français dans le renouvellement de nos connaissances est relativement moindre qu'au cours des siècles précédents [...] En matière de science appliquée, notre retard est considérable. [...] notre soumission aux inventions étrangères est inadmissible. »²³⁰ À la suite de deux conversations qu'il a avec son père et le prix Nobel de médecine André Cournand au début de l'année 1959, Michel Debré charge chacun des Douze - avec l'accord de Pierre Piganiol - de créer une commission d'études pour décider des principales orientations de la politique scientifique, tout en retenant trois critères : « corriger le déséquilibre existant avec les pays étrangers, donner une impulsion immédiate à des actions nouvelles et à des chercheurs de valeur, définir les domaines où la recherche, notamment la recherche appliquée, appelle une coordination. »²³¹ La référence à l'étranger comme motivation pour la création de recherches spécifiques se retrouve alors un peu partout dans les textes. Dans une « communication sur l'orientation et le financement de la recherche scientifique », il est par exemple décrit qu'il faut « établir un bilan des recherches nationales et des recherches effectuées ailleurs dans le monde. » Ainsi, « le comité consultatif serait en mesure de proposer les nouveaux thèmes de recherche qui paraissent s'imposer à la Nation, de même que l'accroissement des recherches dans certains secteurs. »²³²

Malgré l'hostilité des différents ministères et de Louis Jacquinot qui craignent de voir leurs portefeuilles s'affaiblir, un avant-projet de loi sur un Fonds de développement de la recherche scientifique et technique, « destiné à développer la recherche scientifique et technique par

²²⁸ Délégation générale à la recherche scientifique et technique, « Note sur le financement de la recherche scientifique », 16 avril 1959, pp. 2-4.

²²⁹ Son père, Robert Debré, est considéré comme l'un des fondateurs de la pédiatrie moderne, et fait partie des membres du CSRST dirigé par Henri Longchambon en 1955. Ses deux oncles, Jacques et Germain Debré, sont respectivement ingénieur et architecte. Germain Debré participe notamment à la construction de l'Institut du Radium pour Irène et Frédéric Joliot-Curie.

²³⁰ DEBRE, Michel, *Gouverner, Mémoires, Tome III, 1958-1962*, Albin Michel, 1988, p. 137.

²³¹ DEBRE, Michel, *Ibid.*, 1988, p. 138.

²³² Ministère d'État, « Communication sur l'orientation et le financement de la recherche scientifique », 1959, p. 2.

l'augmentation des moyens d'organismes publics ou privés poursuivant des buts de recherche fondamentale ou appliquée »²³³, est écrit au début du mois de juin. Le 9 juin, une réunion préparatoire à celle du Comité interministériel du 24 juin revient sur tous ces points²³⁴. Pierre Piganiol y traite en particulier des principaux thèmes de recherche qui doivent être financés immédiatement. Examinés et validés au préalable par le CCRST, ils doivent associer deux critères. Les thèmes doivent être « d'intérêt national » d'une part ; ils nécessitent une « action concertée » d'autre part.²³⁵ Ceux-ci regroupent : « la physique » (la recherche spatiale, l'interconversion d'énergies), « l'homme en rapport avec son milieu » (nutrition, ressources des océans, étude des sols), « l'homme dans sa vie propre » (génétique, cancer, neurophysiologie) et les « théories économiques et planification ». Il est également noté que ces thèmes ne sont que des « têtes de chapitre » qui doivent être approfondis par des « comités "ad hoc" »²³⁶. De fait sont aussi exclues des disciplines importantes, qui auraient par exemple besoin de voir leurs crédits augmenter, mais ne réunissant pas les deux critères, telles que le « calcul mathématique effectif », la « chimie des macromolécules » ou encore la chimie « des matières plastiques ». Dès le 15 juin, la DGRST affiche la liste des « actions concertées d'intérêt national » qui doivent être prises en charge. Celle-ci « rassemble des problèmes d'intérêt indiscutable qui peuvent être abordés en utilisant dans son ensemble l'appareil de recherches national, après développement éventuel de certains laboratoires. »²³⁷

On passe ainsi d'un gouvernement général des sciences à une sélection minutieuse par le gouvernement de disciplines scientifiques à développer. D'une politique *pour* la science à une politique *par* la science, c'est-à-dire visant à « exploiter les résultats de la recherche scientifique et technique en fonction d'objectifs autres que la science elle-même »²³⁸. Neuf actions sont retenues en premier lieu : la documentation, la théorie économique et planification, l'interconversion des formes d'énergie, les recherches spatiales, la nutrition, l'exploitation des océans, la génétique, le cancer et la

²³³ Ministère d'État, « Avant-projet de Loi portant création d'un Fonds de développement de la recherche scientifique et technique », soumis à la réunion des représentants des ministres le 16 juin 1959.

²³⁴ Assistent à cette réunion : messieurs Vinel (directeur du cabinet du ministre de la Recherche scientifique et technique), Barre (Directeur du Cabinet du ministre de l'Industrie et du Commerce), Bauer (Cabinet du ministre de l'Éducation nationale), Ferru (directeur de l'INRA), Guntzberger (Cabinet du ministre des Armées), Lelong (Cabinet du président de la République), Lewandowski (Cabinet du ministre de l'Agriculture), Mathis (Cabinet du Ministre d'État), Rocca (Cabinet du Premier ministre), Schwob (inspecteur général du ministère de l'Industrie et du Commerce) et Piganiol, Zieglé, Poignant et Grasset (DGRST).

²³⁵ Comme il est rappelé dans une note manuscrite relative à la « préparation du décret sur le Fonds national de la recherche », l'intérêt des actions concertées est aussi de garantir la « continuité de certaines recherches. On ne s'arrête pas avec le départ du chercheur ou avec sa thèse ». D'autre part, il est mentionné qu'une action concertée « n'est pas nécessairement une vaine tentative pour concurrencer les USA ».

²³⁶ Ministère d'État, « Procès verbal de la réunion tenue au sujet de la recherche scientifique et technique », 9 juin 1959, pp. 2-3.

²³⁷ Délégation générale à la recherche scientifique et technique, « Les actions concertées, leur financement », 15 juin 1959, p. 1.

²³⁸ SOREL, Jean-Jacques, « Le retard technologique de l'Europe », in *Esprit, Nouvelle série*, Vol. 11, n°365, 1967, p. 757.

neurophysiologie. En outre, quatre « actions limitées destinées à combler d'urgence des lacunes graves » sont proposées : les recherches en vue de la valorisation des plantes médicinales d'outremer, les études préliminaires aux machines à traduire, la pédologie et la pluie provoquée. L'analyse du texte renseigne sur les justifications visant l'engagement dans ces domaines. Dans le cas de l'interconversion des formes d'énergie, il est dit :

« Il est à peu près évident, aux yeux des physiciens modernes, que les principales transformations techniques prochaines du monde seront, avant tout, dues à la découverte de nouvelles méthodes d'interconversion des diverses formes d'énergie (notamment thermique, électrique et lumineuse), ou à de nouveaux modes de leur mise en œuvre ; il est possible de gagner quelques années, voire quelques décades, en coordonnant et en orientant les efforts dans ce très vaste domaine, où les scientifiques œuvrent actuellement en ordre dispersé. Il y a lieu, en particulier, de coordonner et de développer les études de science fondamentale, de science appliquée et de technologie industrielle, dans les domaines de : la thermodynamique, notamment dans des très basses températures, la chimie, notamment l'électrochimie (phénomènes d'oxydation réversible produisant du courant), la photochimie, l'état solide. »²³⁹

Le mode de gestion opératoire de l'action est aussi précisé. Il nécessite « la création d'un comité national qui déterminera un programme d'ensemble » et la « mise en route immédiate d'un certain nombre de recherches insuffisamment développées en France, mais pour la conduite desquelles existent dès maintenant les hommes, mais rarement les moyens ». Les dépenses prévues sont chiffrées : 40 millions chaque année pour « l'électrostatique », 200 millions pour les « basses températures », 100 millions pour « l'état solide » et enfin 200 millions pour les « piles réversibles ». Au total, « un effort immédiat de 500 millions est à faire, qui sera probablement porté à 1 500 après études. » Finalement, la création du Fonds de développement de la recherche est inscrite dans la loi par décret le 9 décembre. Celui-ci annonce qu'il est « destiné à développer, coordonner et animer des actions concertées ou urgentes dans le domaine de la recherche fondamentale ou appliquée » tandis que « les organismes bénéficiaires de son aide devront rendre compte au Premier ministre. »²⁴⁰ Quelques jours plus tard, les comités d'études chargés d'évaluer et de présenter les différentes actions concertées sont institués. Ceux-ci ont quelque peu évolué. Ils s'organisent désormais autour des thèmes « Analyse démographique, économique et sociale », « Application de la génétique »,

²³⁹ Délégation générale à la recherche scientifique et technique, « Les actions concertées, leur financement », 15 juin 1959, p. 4.

²⁴⁰ Décret n°59-1397 du 9 décembre 1959 portant création d'un fonds de développement de la recherche scientifique et technique, Journal Officiel, 15 décembre 1959, p. 11931.

« Biologie moléculaire », « Cancer et leucémie », « Conversion des énergies », « Documentation », « Exploitation des océans », « Neurophysiologie et psychopharmacologie », « Nutrition animale et humaine » et « Science économique et problèmes de développement ». En particulier, le comité « Conversion des énergies » est composé²⁴¹ de Pierre Aigrain, professeur d'électrochimie générale à la faculté des sciences de Paris, Maurice Bonnemay, professeur d'électrochimie au CNAM (Conservatoire national des arts et métiers), Georges Destriau, professeur à la faculté des sciences de Paris, Charles Guillaud, directeur de recherches au CNRS, Jean Germain, professeur de chimie minérale générale et organique à la faculté des sciences de Lille, Maurice Letort, professeur honoraire à la faculté des sciences de Nancy, Philippe Olmer, professeur à la faculté des sciences de Paris, Marcel Prettre, professeur à la faculté des sciences de Lyon, Gaston Remenieras, chef du service des études hydrauliques à la direction des études et recherches d'EDF, Félix Trombe, directeur de recherches au CNRS, Louis Weil, professeur à la faculté des sciences de Grenoble, et Jacques Yvon, directeur du département des études de piles au CEA²⁴². Si l'on peut observer toute la complexité du jeu d'acteurs dans la mise en œuvre du nouveau cadre institutionnel national de la recherche, il semble que l'élément marquant de ce processus a trait à la volonté politique de structuration thématique des sciences et des techniques. La création du comité « Conversion des énergies » prépare ainsi le terrain du développement des études sur les piles à combustible. Ce dernier sujet ne va pourtant pas arriver par hasard sur la table du comité : il découle de l'entrecroisement d'un ensemble de dynamiques qu'il est nécessaire d'explicitier.

²⁴¹ Les autres comités sont composés de la manière suivante. Pour le comité « Cancer et leucémie » : François Baclesse, Jean Bernard, Marcel Bessis, Jacques Delarue, Pierre Denoix, Jules Driessens, René Fauvert, Pierre Grabar, Antoine Lacassagne, Raymond Latarjet, Charles Oberling, Bernard Pullman. Pour le comité « Documentation » : Georges Boutry, Paul Braffort, Julien Cain, Emile Delaveney, Jean-Claude Gardin, Jean de Laclemeidière, Robert L'Hermite, Paul Poindron, Frédéric Roger, le révérend père Russo, Jean Wyart. Pour le comité « Exploitation des océans » : Jean Bourcart, Paul Budkert, Jacques Cousteau, Pierre Drach, Marc-Marie Eyries, Louis Fage, Maurice Fontaine, Jean Furnestin, André Gougenheim, Henri Lacombe, Théodore Monod, Jean-Marie Peres, Ferdinand Sarraz-Bournet. Pour le comité « Analyse démographique, économique et sociale » : Louis Chevalier, Jean Fourastié, Georges Friedman, Robert Gessain, Pierre Gourou, Ernest Labrousse, Maurice Le Lannou, Claude Lévi-Strauss, Alfred Sauvy, Jean Stoetzel. Pour le comité « Application de la génétique » : André Bilquez, André Blondeau, Pierre Bouravel, Jean Bustarret, Pierre Charles, Maurice Lamy, Maxime Lamotte, Philippe Lhéritier, Jacques Poly, Jean Rizet, Ernest Tourneur, Georges Valdeyron. Pour le comité « Biologie moléculaire » : Pierre Auger, Marcel Bessis, Dickrian Dervichian, Pierre Desnuelle, Boris Ephrussi, Raymond Latarjet, André Lwoff, Georges Mathe, Jacques Monod, Charles Sadron, René Wurmser. Pour le comité « Neurophysiologie et psychopharmacologie » : Henri Baruk, Jean Cheymol, Raymond Coirault, Jean Delay, Paul Delams Marsalet, Pierre Deniker, Alfred Fessard, Henri Gastaut, Bernard Halpern, Georges Morin, Louis Revol, Jean Scherrer. Pour le comité « Nutrition animale et humaine » : Paul Boulanger, René Buttiaux, Jacques Delage, Louis Estrangin, André François, André Guilbot, Raymond Jacques, Jean Keilling, Edgar Lederer, Edmond de Lignières, Germain Mocquot, Maurice Rossin, Emile Terroine, Jean Trémolières. Pour le comité « Science économique et problèmes de développement » : Georges Balandier, Gaston Berger, Denis Bergmann, Charles Bettlheim, Fernand Braudel, Maurice Bye, René Dumont, Jacques Dumontier, Jean Fourastié, Joseph Klatzmann, Joseph Lajucie, Edmond Malinvaud, Tibor Mende, Jules Milhau, André Piatier, Jean Sutter.

²⁴² Journal Officiel, « Institution de comités d'études », 15 décembre 1959, p. 11931.

TROISIÈME CHAPITRE

Les conditions socio-historiques d'un engouement technologique

Pour Patrick Flichy, trois temps successifs caractérisent les débuts d'une innovation : la « préhistoire » au cours de laquelle se déroulent différentes histoires parallèles, la phase de l'objectivisation qui marque la convergence de ces dernières et la phase de l'objet-frontière qui voit leurs acteurs « s'affronter, négocier entre eux pour trouver un accord »²⁴³. En suivant cette analyse, on peut dire que plusieurs phénomènes structurels sont à l'origine de l'engouement qui se crée autour des piles à combustible en France à la fin des années cinquante. À côté du parcours propre à la technique et de la mise en place de la DGRST, nous en retenons trois principaux : l'importance croissante prise par la recherche scientifique à caractère militaire du fait des circonstances politiques internationales dans lesquelles le pays se trouve engagé ; le développement de nouveaux courants de recherche qui a lieu à cette époque dans les milieux académiques ; la conversion des énergies qui s'impose peu à peu comme une thématique prioritaire. Si la corrélation ne semble pas forcément sauter aux yeux, la mise en place d'une structure institutionnelle gérant la recherche telle que la DGRST va donner l'occasion à des groupes d'acteurs de se mobiliser autour de ces éléments, de les utiliser pour recommander les voies à suivre dans leurs domaines de compétences et finalement de susciter l'intérêt autour des piles à combustible. Il s'agit donc ici de restituer cette préhistoire de la technique, de comprendre à la fois la réaction de la Défense vis-à-vis de la politique scientifique de pays comme les États-Unis et l'URSS à l'aube de la V^{ème} République, la position particulière détenue par de nouvelles disciplines, telles que l'électrochimie, dans l'espace académique et pourquoi la conversion des énergies commence à attirer l'attention de l'État.

3.1 Le développement de l'électrochimie française

Le développement de nouveaux courants de recherche à l'université et au CNRS est le premier élément offrant les conditions d'une possible apparition des piles à combustible comme nouvel objet d'attention. L'électrochimie par exemple, que l'on peut définir simplement par l'étude des relations entre des phénomènes chimiques et des courants électriques ainsi que des transformations qui en résultent, voit sa position évoluer fortement. Bien qu'elle prenne une importance croissante depuis le XIX^{ème} siècle et les travaux fondateurs de savants tels qu'Alessandro Volta ou Michael Faraday²⁴⁴,

²⁴³ FLICHY, Patrick, « La question de la technique dans les recherches sur la communication », in *Sociologie de la communication*, Vol. 1, n°1, 1997, p. 263.

²⁴⁴ BIANCO, Pierre, *De la pile de Volta à la conquête de l'espace. Deux siècles d'électrochimie (1799-1999)*, Publications de l'Université de Provence, 1998.

en particulier dans l'industrie²⁴⁵, l'électrochimie en tant que discipline universitaire autonome n'obtient ses lettres de noblesse en France qu'au détour de la Seconde Guerre mondiale. C'est à la figure « mandarinale » de René Audubert qu'en revient le mérite. Auteur d'une thèse sur les « actions de la lumière sur les suspensions »²⁴⁶ et rédacteur en chef du *Journal de Chimie-physique* à partir de 1925, ce dernier tente de fonder une chaire d'électrochimie à l'Université de Paris dès les années trente avec le soutien de Francis Perrin, Georges Urbain et Paul Langevin, sans succès²⁴⁷. En 1938-1939, il réussit à donner une série de vingt conférences sur le sujet au CNAM, où il est chef de travaux. Paradoxalement, et alors qu'il est actif du côté de la Résistance – en fabricant des bombes incendiaires à l'Institut de chimie de Paris avec Georges Champetier pour retarder l'avancée des Allemands²⁴⁸, en participant à l'évasion de Paul Langevin de la prison de la Santé²⁴⁹ ou encore en cachant des scientifiques comme le biophysicien René Wurmser²⁵⁰ – le Comité d'organisation des industries chimiques de Vichy transforme en 1942-1943 ses conférences en un cours annuel destiné à la formation de ses cadres subalternes au CNAM²⁵¹. Désormais directeur de deux laboratoires à l'École pratique des hautes études et à l'Institut de chimie de Paris, il prend sous son aile le jeune Maurice Bonnemay qui vient tout juste d'obtenir sa licence ès sciences. Après l'avoir fait embaucher comme assistant temporaire en 1940 pour travailler sur la photochimie²⁵², René Audubert devient son directeur de thèse. Soutenue en 1943, celle-ci porte précisément sur les « recherches photochimiques sur l'acide azothydrique et ses sels »²⁵³.

À la Libération, René Audubert crée un Laboratoire d'électrochimie grâce au soutien apporté par le CNRS. Peu de laboratoires spécialisés peuvent alors se targuer d'être comparables au sien en termes de taille, si ce n'est l'Institut d'électrochimie et d'électrometallurgie de Grenoble dirigé par Jean-Lucien Andrieux. Il faut dire qu'à cette période le champ, que René Audubert n'hésite pas à qualifier

²⁴⁵ TREMILLON, Bernard, « L'évolution de l'électrochimie. De la pile de Volta aux nanotechnologies », in *L'actualité chimique*, n°327-328, 2009, pp. 13-16.

²⁴⁶ AUDUBERT, René, *Actions de la lumière sur les suspensions*, thèse présentée à la Faculté des sciences de l'Université de Paris, pour obtenir le grade de docteur ès sciences physiques, 1922.

²⁴⁷ PINAULT, Michel, *Frédéric Joliot-Curie*, Éditions Odile Jacob, 2000, p. 583.

²⁴⁸ KOUNELIS, Catherine, « Georges Champetier (1905-1980) », in LESTEL, Laurence (dir.), *Itinéraires de chimistes. 1857-2007, 150 ans de chimie en France avec les présidents de la SFC*, EDP Sciences, 2007, p. 68.

²⁴⁹ PROVOST, Sylvie, « Le train pour l'évasion de Paul Langevin (2 au 5 mai 1944) », in *Rails et histoire*, 2015 (2000).

²⁵⁰ RAMMUNI, Girolamo, « « La réorganisation du Centre national de la recherche scientifique », 7 septembre 1944 », in *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], n°3, 2000, mis en ligne le 20 juin 2007.

²⁵¹ État Français, décret n°566 du 16 mars 1943 créant un Cours d'Électrochimie au Conservatoire national des Arts et Métiers.

²⁵² La thématique est approfondie par René Audubert tout au long des années trente. En 1933, il participe notamment à la Réunion internationale de chimie-physique en intervenant sur l'action de la lumière sur le potentiel métal-solution. En 1931, il donne aussi une conférence au CNAM sur la sensibilité des piles à l'action de la lumière. Par ailleurs, il publie plusieurs livres sur le sujet, dont *La photochimie* en 1937.

²⁵³ BONNEMAY, Maurice, *Recherches photochimiques sur l'acide azothydrique et ses sels*, thèse présentée à la Faculté des sciences de l'Université de Paris, 1943.

de « cousin pauvre »²⁵⁴ des disciplines légitimes, n'est composé que d'une trentaine de chercheurs et d'enseignants-chercheurs et l'on reconnaît sans mal que « l'électrochimie n'a jamais bénéficié en France du développement que justifient ses applications et ses possibilités »²⁵⁵. Maurice Bonnemay suit le maître qui lui avait précédemment permis de devenir chargé de cours à l'Université de Paris et devient le directeur adjoint de l'organisme. Ensemble, ils vont s'atteler à l'étude des « phénomènes d'interface liquide/solide à l'intérieur des batteries électrochimiques » avec pour objectif de « confirmer l'équation d'Audubert liant la densité de courant à la surtension d'une électrode »²⁵⁶. Progressivement, René Audubert installe l'électrochimie dans l'espace universitaire. Il publie notamment toute une série d'ouvrages entre 1940 et 1950 pour attester de ses travaux et en établir la légitimité : *Électrochimie : les principes* en 1942 (avec Marguerite Quintin), *Propriétés électrochimiques des systèmes dispersés : colloïdes et suspensions* en 1944, *L'électrochimie des colloïdes* en 1946 et *L'électrochimie* en 1950.

Dans un même temps, il renforce aussi la position de la discipline au CNRS, au sein du Laboratoire d'électrolyse qu'il a fondé avant la guerre à Meudon-Bellevue et où il place Maurice Bonnemay à la sous-direction, en orientant les recherches qui s'y déroulent à la fois vers la connaissance de mécanismes fondamentaux (cinétique, oxydoréduction, réversibilité, connaissance des électrolytes, processus catalytiques, etc.) et vers leur application avec dépôt de brevets à la clé en électrophorèse, en électrometallurgie et en électrodéposition. Ce qui pousse d'ailleurs le CNRS à monter un Centre d'électrophorèse²⁵⁷ en 1946 « pour mettre à la disposition des Laboratoires qui désireront y recourir, un appareillage d'électrophorèse où pourront être effectués les mesures de mobilités et des séparations d'ions »²⁵⁸. Cette approche théorique et pratique permet en tout cas aux deux scientifiques d'obtenir un certain succès auprès du secteur industriel dans les années cinquante, au moment même où l'électrochimie atteint enfin une reconnaissance académique conséquente avec la création de deux chaires à la Sorbonne en 1953 et au CNAM en 1956. René Audubert, qui en obtient la charge, continue à diffuser ses études. En plus d'un livre qu'il consacre à l'astronome et homme politique François Arago, il publie *L'électrolyse* en 1953, *Les ions en solutions* en deux volumes en 1955 et *Les Principes de l'électrophorèse* en 1957. Cette même année cependant, il décède rapidement des

²⁵⁴ PROVOST, Sylvie, « Audubert, René (1892-1957). Chargé de cours (1946-1956) puis Professeur d'Électrochimie (1956-1957) », in *Histoire biographique de l'enseignement*, Vol. 19, n°1, 1994, p. 136.

²⁵⁵ Archives du CNAM, « Projet d'organisation d'un Centre général d'Électrochimie », vers 1942, p. 1.

²⁵⁶ TEISSIER, Pierre, « Bonnemay Maurice (1914-1992). Chaire d'électrochimie du Cnam », in *Cahiers d'histoire du Cnam*, Vol. 4, 2015, p. 43.

²⁵⁷ Le comité de direction du Centre comprend en 1946 : messieurs Audubert, Wurmser (professeur à la Sorbonne), Sadron (professeur à la Faculté des sciences de Strasbourg), Roche (professeur à la Faculté de médecine et de pharmacie de Marseille), et Marguerite Quintin (assistante à la Faculté des sciences de Paris. En 1949, monsieur Loiseleur, chef de service à l'Institut Pasteur, rejoindra le groupe.

²⁵⁸ CNRS, Arrêté du 10 octobre 1946, copie 1410.

suites d'une maladie douloureuse. Maurice Bonnemay, qui vient de sortir un *Que sais-je ?* sur les colloïdes, se pose alors comme son successeur et principal héritier. Dès le mois d'octobre, il prend la tête du Laboratoire d'électrolyse, puis du Centre d'électrophorèse. En 1958, il acquiert également la chaire d'électrochimie au CNAM²⁵⁹. Ce mode de fonctionnement, selon lequel l'élève prend la place du maître, n'a rien d'inhabituel. Il est caractéristique des « familles scientifiques » qui habitent les disciplines chimiques à cette époque. Comme l'explique Pierre Teissier, l'héritité doctorale et la cooptation y sont en effet largement répandues²⁶⁰.

L'école d'Audubert n'est pas la seule à émerger et à connaître une forte expansion. Les études sur la catalyse, c'est-à-dire le contrôle, l'orientation et l'accélération des réactions chimiques, prennent une place considérable à cette même période et permettent à plusieurs groupes d'universitaires de se distinguer. Soucieux de faire valoir la catalyse non plus comme simple moyen technique mais comme véritable objet scientifique, Marcel Prettre forge par exemple toute une tradition de recherches en province. Docteur ès sciences physiques en 1931 après avoir rédigé une thèse sur l'oxydation et l'inflammation des mélanges gazeux combustibles à Paris sous la direction de Paul Laffite²⁶¹, celui-ci est nommé maître de conférences à la Faculté des sciences de Lyon en 1937²⁶². Dans son Laboratoire de chimie industrielle créé pendant la guerre et dont il deviendra le directeur quelques années plus tard, il va en venir à s'intéresser au sujet, en particulier à la catalyse Fischer-Tropsch grâce à laquelle il obtient une renommée internationale. Son nouveau statut, confirmé par la réception du prix Jecker, lui permet d'organiser avec le CNRS un « Colloque international sur l'adsorption et la cinétique hétérogène » du 12 au 17 septembre 1949, auquel il convie les plus grands spécialistes (Emmet, Taylor, Rideal). Y participent également des représentants du Laboratoire central des services chimiques de l'État et de l'IFP ou encore de la Faculté des sciences de Lille.

À cette occasion, Marcel Prettre noue des relations étroites avec le milieu industriel pétrochimique et pharmaceutique français. La demande en catalyseurs stables et performants sur de longues durées qui en émane est alors en partie conditionnée par une concurrence étrangère féroce²⁶³. Mais le titulaire

²⁵⁹ Lettre du directeur du CNAM Louis Ragey au ministre de l'Éducation nationale, de la Jeunesse et des Sports, le 5 mai 1958.

²⁶⁰ TEISSIER, Pierre, *L'émergence de la chimie du solide en France (1950-2000). De la formation d'une communauté à sa dispersion*, thèse soutenue à l'Université de Paris X-Nanterre le 12 décembre 2007, p. 14.

²⁶¹ PRETTRE, Marcel, *Recherches expérimentales sur l'oxydation et l'inflammation des mélanges gazeux combustibles*, thèse présentée à la Faculté des sciences de Paris, 1931.

²⁶² Il est à noter qu'en 1928, il mène également des recherches à la Sorbonne sur la mesure de la chaleur de combustion dans l'oxygène des nitrocelluloses pour le compte du Comité scientifique des poudres qui s'intéresse alors, en lien avec le Service des Poudres, aux matières explosives. Voir : MEDARD, Louis, TACHOIRE, Henri, *Histoire de la thermochimie. Prélude à la thermodynamique chimique*, Presses universitaires de Provence, 1994.

²⁶³ GUTHLEBEN, Denis, *op. cit.*, 2013 (2009), p. 227.

de la chaire de chimie industrielle rend compte de la situation précaire dans laquelle il se trouve : « nous ne disposons d'aucun des appareils volumineux pour l'étude en continu d'une synthèse avec une charge de catalyseur de 1kg ou même de quelques centaines de grammes »²⁶⁴. Le succès remporté par le colloque - et peut-être la pression exercée par l'industrie - porte en tout cas ses fruits puisque le CNRS décide de la création de l'IRC (Institut de recherches sur la catalyse) à Villeurbanne en 1955. Marcel Prettre en devient évidemment le directeur et y fait venir, en plus de son équipe lyonnaise, les chercheurs travaillant pour Paul Laffite. L'institut, qui voit le jour après quatre années de travaux, est finalement divisé en trois départements, chimie, chimie physique et physique, respectivement dirigés par les professeurs Trambouze, Teichner et Imelik.

Centre unique au monde, l'IRC ne doit pas faire oublier que d'autres spécialistes de la catalyse existent en France dans les années cinquante. Avec René Navarre à sa tête, l'IFP est par exemple un autre établissement où se déroulent des études conséquentes. Dans le cadre de son investissement dans l'industrie pétrochimique, l'Institut se tourne en effet progressivement vers la catalyse grâce à sa collaboration avec le professeur de l'Université de Louvain Joseph Jungers. Comme l'explique bien Baptiste Voillequin, ce dernier forme à partir de la fin des années quarante « une génération entière de scientifiques belges de la catalyse (Bernard Delmon par exemple) ainsi que les cadres scientifiques de l'IFP (Coussebant, Balaceanu, Sajus, Lepage, Martino) »²⁶⁵, et oriente l'Institut vers l'amélioration des connaissances de la chimie des réactions – et en particulier de la cinétique –, reléguées jusqu'alors à un plan secondaire au profit de la mise en œuvre des procédés du génie chimique. Cette dynamique originale contribue bientôt à légitimer à la fois une position institutionnelle et une position scientifique solides et à faire connaître l'IFP en dehors des frontières nationales. Jean-Claude Balaceanu²⁶⁶ est notamment invité à intervenir au premier « International Congress on Catalysis » à Philadelphie en 1956. Il y présente par ailleurs la candidature de la France pour le deuxième congrès, qui se tient à Paris du 4 au 9 juillet 1960. Nommé délégué général, René Navarre organisera l'évènement tandis que Marcel Prettre en sera le président. À côté de ces deux organismes dominants, la Faculté des sciences de Lille abrite des approches alternatives impulsées

²⁶⁴ BLONDEL-MEGRELIS, Marika, « La catalyse côté français », in *La catalyse en France : une aventure*, 2007, publié par la SFC à l'occasion du 13ème Congrès International sur la catalyse, Paris, Juillet 2004, p. 18.

²⁶⁵ VOILLEQUIN, Baptiste, *Contribution à l'histoire de la catalyse en France (1944-2004) : dynamiques disciplinaires et régimes de production de savoir*, thèse de doctorat soutenue à Paris X, 2008, p. 163.

²⁶⁶ Né en 1923, Jean-Claude Balaceanu obtient une licence en sciences physiques puis se forme à l'INSIC (École nationale supérieure des industries chimiques) de Nancy et à l'École nationale supérieure du pétrole et des moteurs. Entré au laboratoire de cinétique chimique de Joseph Jungers, il en ressort en 1951 avec un doctorat en sciences chimiques. À l'IFP, il sera successivement ingénieur de recherche en 1950, chef de laboratoire en 1952, chef du département de cinétique de 1955 à 1959 et chef du département de combustion appliquée en 1958, directeur scientifique chargé des recherches avancées de 1959 à 1964, directeur en 1954, directeur général adjoint en 1970 et directeur général de 1973 à 1988. Source : TRAVERS, Christine, « Jean-Claude Balaceanu (1923-2004) », in LESTEL, Laurence (dir.), *op. cit.*, EDP Sciences, 2007, p. 23.

par Jean-Eugène Germain²⁶⁷. Normalien et agrégé en 1947, ce dernier part effectuer une thèse sur la catalyse hétérogène à la Northwestern University sous la direction de Vladimir Nicolaïevitch Ipatieff. À son retour, il soutient une autre thèse, sur la cycloisomérisation catalytique du limonène cette fois-ci, et monte un laboratoire à l'ENS. Avec Claude Dugas et Pierre Aigrain qu'il côtoie, il tente notamment à cette période de rapprocher les phénomènes catalytiques de la physique du solide. Mais c'est bien à Lille, où il est élu professeur de la chaire de chimie générale et organique en 1954, qu'il déploie ses talents d'entrepreneur scientifique. Les liens qu'il tisse avec les Houillères et les Usines chimiques de Mazingarbe lui permettent de fonder le Centre de carbochimie et d'augmenter ses effectifs pour entamer des travaux ambitieux sur la catalyse des hydrocarbures (déshydrogénation, hydrogénolyse), la carbochimie (cracking du méthane, oxydation de la houille) et la chimie physique (catalyseurs semi-conducteurs)²⁶⁸.

3.2 L'objectif de la conversion des énergies

Parallèlement au développement de l'électrochimie, la conversion des énergies s'impose comme un nouveau champ de recherches essentiel. Pour comprendre ce phénomène, il faut s'en référer aux tendances qui prédominent en matière d'énergie depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale. L'accroissement progressif de la population, l'amélioration du niveau de vie et l'industrialisation massive provoquent une augmentation de la demande générale en énergie. Aux États-Unis par exemple, ce contexte se traduit par une augmentation de la production d'électricité de 340 % entre 1940 et 1949 tandis que les autres formes d'énergie²⁶⁹ croissent de 60 %²⁷⁰. Le charbon y est même remplacé comme source primaire par le pétrole et le gaz naturel²⁷¹. Néanmoins, sa production reste relativement stable et sert surtout au fonctionnement de l'industrie électrique²⁷². La France, de son côté, connaît une période de reconstruction marquée par l'intervention de l'État. Après les années de pénurie connues par le pays sous l'Occupation, le Plan Monnet met tout de suite en exergue le rôle

²⁶⁷ VOILLEQUIN, Baptiste, *Ibid.*, 2008, pp. 146-158.

²⁶⁸ SAWERYSYN, Jean-Pierre, *et al.*, « Jean-Eugène Germain (1922-2002). Période lilloise (1954-1966) », in BOIVIN, Jean-Claude, *et al.*, *Histoire de la chimie à la Faculté des sciences et à l'Université des sciences et technologies de Lille de 1950 à 1986*, Association de solidarité des anciens, Université de Lille 1, 2012, p. 15.

²⁶⁹ On assiste tout de même à une uniformisation de ces formes d'énergie. Comme le note Adam Rome, les investissements dans l'énergie solaire sont par exemple entravés par la politique de certaines entreprises productrices d'électricité, telles que General Electric, qui ne souhaitent pas voir d'autres sources polluer la diffusion de leur marché. Voir : ROME, Adam, *The Bulldozer in the Countryside: Suburban Sprawl and the Rise of American Environmentalism*, Cambridge University Press, 2001, pp. 45-85.

²⁷⁰ KASPI, André, *Les Américains, 2. Les États-Unis de 1945 à nos jours*, Éditions du Seuil, 1986, p. 368.

²⁷¹ VIETOR, Richard H. K., *Energy Policy in America since 1945. A study of business-government relations*, Cambridge University Press, 1984.

²⁷² TOMAIN, Joseph P., « The Dominant Model of United States Energy Policy », in *Faculty Articles and Other Publications*, University of Cincinnati College of Law Scholarship and Publications, Paper 130, 1990, p. 365.

que doit jouer l'énergie dans ce nouveau départ. Celle-ci constitue d'ailleurs le premier point de la partie consacrée à « l'accroissement des ressources-clefs » :

« L'insuffisante utilisation de l'énergie en France [...] est à la fois la cause et la conséquence des retards de notre économie. [...] Notre pays devait se procurer par importation environ le tiers de cette quantité insuffisante d'énergie consommée. Cette sujétion constitue pour l'économie française un handicap sérieux, tant par suite des frais de transport que de la difficulté à certaines époques critiques, d'obtenir les quantités de charbon ou de carburant requises. Il apparaît donc nécessaire que, dans la mesure où il n'en résultera aucune surcharge de prix pour le reste de l'économie, un effort de production nationale maximum soit accompli en ce qui concerne le charbon et l'énergie hydraulique, en même temps que seront poussés les travaux de prospection pétrolière en France et dans nos territoires d'outre-mer. »²⁷³

La dépendance aux importations est ainsi à la source des préoccupations politiques à la Libération en matière d'énergie. Il ne s'agit pourtant pas d'un fait nouveau. La Première Guerre mondiale avait déjà démontré la faiblesse du système énergétique français : sans le charbon en provenance de Belgique, du Nord et du Pas-de-Calais, il fallait compter sur les approvisionnements britanniques et américains pour tenir au front. À cela s'ajoutent en 1945 les destructions matérielles provoquées par les bombardements, le manque d'entretien des usines ou encore le retard pris dans le déploiement du réseau électrique qui engendrent une situation de crise énergétique. D'autant plus que la consommation électrique industrielle et commerciale double entre 1945 et 1950, passant de 15,1 milliards de kWh à 29 milliards²⁷⁴. Les coupures de courant, résultant de la combinaison du peu de puissance des centrales thermiques et hydrauliques désuètes et des événements climatiques qui surviennent²⁷⁵, caractérisent le quotidien des usagers et des entreprises. Pour remédier à toutes ces difficultés, l'État prend un certain nombre de mesures. Avec la loi du 8 avril 1946, le gouvernement du général de Gaulle met en place la nationalisation du secteur et la majeure partie des sociétés assurant jusqu'alors la production et la distribution d'électricité fusionnent pour devenir l'Électricité de France. Le Conseil du Plan prévoit également de faire passer la production de charbon de 50

²⁷³ Commissariat général du Plan de modernisation et d'équipement, « Rapport général sur le Premier plan de modernisation et d'équipement », novembre 1946-janvier 1947, p. 24.

²⁷⁴ MORSEL, Henri, « Chapitre III - Le temps de la demande », in MORSEL, Henri (dir.), *Histoire de l'électricité en France, Tome troisième, 1946-1987*, Fayard, 1996, p. 188.

²⁷⁵ L'hiver 1946-1947 est très rude, ce qui a pour conséquence une surconsommation d'électricité. Quelques mois plus tard, l'été sec de 1947 et le manque d'eau qui l'accompagne ne permettent pas aux centrales hydrauliques de tourner à plein régime.

millions de tonnes en 1946 à 65 millions en 1950 et la production d'énergie hydraulique de 13 milliards de kWh à 24 milliards. Avec l'aide du Plan Marshall entre avril 1948 et mai 1952, des programmes de modernisation de l'équipement sont démarrés. Des centrales thermiques et hydroélectriques restées en chantier ou en partie détruites pendant la guerre sont réparées pendant que d'autres sont construites²⁷⁶. En plus de ces techniques, l'orientation vers les énergies dites « nouvelles » est envisagée. S'il ne se prononce pas en faveur de leur utilisation immédiate compte tenu des délais qu'il impose, le Plan Monnet les mentionne tout de même pour encourager les recherches à leur sujet :

« La Commission ne s'est pas prononcée en faveur de la mise en exploitation de nouvelles sources d'énergie ; elle a estimé en effet, sans parler de l'énergie atomique, dont on ignore encore les possibilités d'utilisation industrielle, que les études sur l'énergie des marées, de la houle et des vents n'étaient pas assez avancées pour permettre des réalisations importantes dans un délai de cinq ans. Il n'en reste pas moins indispensable, pour ouvrir des voies nouvelles et accroître nos ressources en énergie, de poursuivre vigoureusement les études sans hésiter à entreprendre immédiatement, toutes les fois qu'une large expérimentation est nécessaire, la construction des usines-laboratoires et des installations pilotes. »²⁷⁷

Pour Michel Banal, deux raisons principales expliquent cet intérêt pour les énergies nouvelles au sortir de la guerre : le constat que les ressources énergétiques françaises n'ont jamais paru autant précaires qu'entre 1940 et 1945 et l'établissement d'une entreprise électrique nationale telle que l'EDF, dotée de moyens financiers et techniques bien plus importants que les firmes qui l'ont précédée²⁷⁸, à même d'entreprendre des recherches sur ces procédés novateurs. Dans la première moitié du XX^{ème} siècle pourtant, des mesures nationales avaient déjà été mises en œuvre pour réduire les importations de « houille noire »²⁷⁹. L'énergie marémotrice, par exemple, fait l'objet d'études depuis 1918 au sein du « Groupement de propagande La houille bleue ». Celles-ci deviennent encore plus sérieuses en 1941 avec la création de la SEUM (Société d'études pour l'utilisation des marées)

²⁷⁶ VARASCHIN, Denis, « Légendes d'un siècle : cent ans de politique hydroélectrique française », in *Annales des Mines*, août 1998, pp. 27-33.

²⁷⁷ Commissariat général du Plan de modernisation et d'équipement, « Rapport général sur le Premier plan de modernisation et d'équipement », novembre 1946-janvier 1947, p. 144.

²⁷⁸ BANAL, Michel, « Chapitre II - L'équipement électrique de la France à la Libération », in MORSEL, Henri (dir.), *Histoire de l'électricité en France, Tome troisième, 1946-1987*, Fayard, 1996, pp. 142-143.

²⁷⁹ Cette problématique se trouve également à l'origine des premières expériences françaises sur la captation de l'énergie solaire au milieu du XIX^{ème} siècle. Voir : JARRIGE, François, « "Mettre le soleil en bouteille" : les appareils de Mouchot et l'imaginaire solaire au début de la Troisième République », in *Romantisme*, Vol. 4, n°150, 2010, pp. 85-96.

par le directeur de l'Électricité sous le gouvernement de Vichy Robert Gibrat²⁸⁰. Mais ce n'est qu'en 1953 que la DER (Direction des études et recherches) de l'EDF monte les premiers sites expérimentaux de groupes-bulbes au niveau des chutes d'Argentat sur la Dordogne et de Cambayrac sur la Truyère, puis à Saint-Malo en 1955. À cette même période sont aussi démarrés le programme de l'usine marémotrice de la Rance²⁸¹ et le projet des îles Chausey²⁸². L'éolien n'est pas en reste puisque les premiers anémomètres intégrateurs servent à mesurer la répartition de l'énergie du vent sur le territoire sont mis au point à partir de 1948. Des essais d'aérogénérateurs à trois pâles de grande puissance sont effectués en suivant, notamment à Nogent-le-Roi et à Saint-Rémi-des-Landes²⁸³. D'autres études ont lieu sur des prototypes d'éoliennes dites à « roue de bicyclette » à Saint-Nizier, « Darrieus » en bordure du canal de Donzère-Mondragon et « Andreau » en Algérie.

Ce ne sont pas les seules directions dans lesquelles les recherches de l'EDF s'orientent. Il faut en effet encore parler des tentatives d'exploitation de l'énergie thermique des mers à Abidjan entre 1954 et 1956, impulsées par André Nizery, chef de service à la DER, ainsi que des expériences sur la pluie provoquée. Ces dernières, rappelons-le, forment l'une des quatre « actions limitées destinées à combler d'urgence des lacunes graves » retenues par la DGRST et le CCRST en 1959. Elles sont également entreprises aux États-Unis²⁸⁴. En faisant pleuvoir artificiellement, l'enjeu est d'accroître la production de centrales hydroélectriques et de potentiellement diminuer les périodes de sécheresse qui entraînent des baisses de rendement électrique comme au cours de l'été 1947. Le principe de l'opération repose sur l'insémination de nuages par de grandes quantités de noyaux glaçogènes d'iodure d'argent grâce à des appareils fixés au sol²⁸⁵. De cette manière, la formation de grêlons est empêchée et des orages se déverse de l'eau sous forme liquide uniquement. De 1954 à 1965, des tests sont réalisés sur plusieurs sites (Tignes, Truyère, etc.). Si les recherches sont interrompues par l'EDF à partir de cette date, elles permettent cependant de faire des avancées considérables dans la compréhension de la physique des nuages et des basses couches atmosphériques²⁸⁶. Le cas des turbines à gaz est encore significatif de la variété des solutions alternatives envisagées : le succès des turbo-réacteurs d'avions au cours de la guerre permet à l'EDF d'imaginer un système énergétique de

²⁸⁰ GIBRAT, Robert, « L'énergie des marées », in *L'Astronomie*, Vol. 69, 1955, p. 449.

²⁸¹ BANAL, Michel, « Histoire de l'énergie marémotrice en France », in *La Houille blanche*, n°3, 1997, p. 15.

²⁸² BONNEFILLE, René, « Les réalisations d'Électricité de France concernant l'énergie marémotrice », in *La Houille blanche*, n°2, 1976, pp. 87-143.

²⁸³ BONNEFILLE, René, « Les réalisations d'Électricité de France concernant l'énergie éolienne », in *La Houille blanche*, n°1, 1975, pp. 45-66.

²⁸⁴ SERRA, Louis, « La pluie provoquée. Techniques opératoires et contrôle des résultats », in *Cahiers de l'ORSTOM*, vol. XV, n°3, 1978, p. 304.

²⁸⁵ L'insémination des nuages par avion ou fusée est aussi envisagée.

²⁸⁶ Les recherches continuent néanmoins dans d'autres institutions. Ainsi, l'Association d'études des moyens de lutte contre les fléaux atmosphériques et la société « Les Papeteries de Gascogne » organisent des essais au moins jusqu'en 1967. Voir : SALLENAVE, H., « Essai de pluie provoquée », in *Revue forestière française*, n°3, 1968, pp. 170-184.

secours à démarrage rapide. Trois premiers essais sont ainsi effectués à partir de 1948, à Saint-Denis et Reims notamment²⁸⁷.

Il serait cependant vain de faire découler ces recherches et réalisations d'une sorte de volonté écologique. Elles sont plutôt à rapprocher d'une représentation de la nature dans laquelle leur « gratuité à l'utilisation » et leur « caractère illimité » permettraient éventuellement d'accroître l'indépendance du pays²⁸⁸. C'est bien dans le cadre d'une ontologie naturaliste²⁸⁹ que se place le développement des énergies nouvelles issues des « forces naturelles »²⁹⁰, où les rapports entretenus avec celles-ci sont avant tout fondés, selon ce principe, sur l'*usage* qui peut en être fait. À ce moment-là, la construction historique de l'écologie politique se situe au sein d'autres espaces sociaux ; on ne trouve d'ailleurs pas trace de problématiques énergétiques lors du premier *Colloque international du CNRS sur l'écologie*, organisé à Paris en février 1950 par Marcel Prenant et Georges Petit²⁹¹. En réalité, les recherches sur les énergies nouvelles sont surtout en relation avec un objectif de satisfaction de la consommation énergétique qui ne cesse de croître. Cette période est souvent désignée comme un « âge d'or » de la politique énergétique française²⁹² : l'interconnexion du réseau est en bonne voie et les campagnes s'électrifient progressivement.

Toutefois, si expériences d'intérêt national sur l'énergie il y a, elles se concentrent surtout sur le nucléaire autour des piles de Saclay, Châtillon et Grenoble. Le Deuxième et le Troisième Plan ne font ainsi même pas mention des énergies nouvelles, à l'exception d'une courte phrase au sujet du site de la Rance²⁹³. En attendant, la production charbonnière diminue nettement entre 1950 et 1960, passant de 74 % à 54 % de la consommation totale d'énergie, tandis que l'équipement hydroélectrique et thermique s'étoffe avec l'installation de nouveaux barrages sur le Rhin, le Rhône, la Durance et dans

²⁸⁷ BARJOT, Dominique, « Reconstruire la France après la Seconde Guerre mondiale : les débuts d'Électricité de France (1946-1953) », in *Entreprises et histoire*, Vol. 1, n°70, 2013, pp. 54-75.

²⁸⁸ MARREC, Anaël, « Politiques des forces naturelles et imaginaires de l'énergie pendant l'entre-deux-guerres, *Pour mémoire. Revue des ministères de l'Environnement, de l'Énergie et de la mer, du Logement et de l'Habitat durable*, n°18, 2016, pp. 83-103.

²⁸⁹ L'ontologie naturaliste, anthropocentrique, est celle qui établit le concept de nature et les modes de traitement qui lui sont réservés. Elle marque une distinction entre les intériorités et pose la ressemblance des physicalités. De cette manière, par un travail de repérage et de répartition des sujets et des objets, elle admet la diversité des cultures humaines en isolant le social, compris dans un régime séparé, indépendant et autonome, de la nature et des non-humains qu'elle exclue dans un même ensemble. Voir : DESCOLA, Philippe, *Par-delà la nature et la culture*, Gallimard, 2005.

²⁹⁰ Ce terme est employé à partir de l'entre-deux-guerres pour désigner les énergies marémotrices, éoliennes, solaires, etc.

²⁹¹ ACOT, Pascal, « Le colloque international du CNRS sur l'écologie (Paris, 20-25 février 1950) », in DEBRU, Claude, *et al. (éd.), Les sciences biologiques et médicales en France, 1920-1950*, 1994, pp. 233-240.

²⁹² PUISEUX, Louis, « Les bifurcations de la politique énergétique française depuis la guerre », in *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, 37e année, n°4, 1982, p. 610.

²⁹³ Commissariat général du Plan de modernisation et d'équipement, « Deuxième plan de modernisation et d'équipement (1954-1957) », Loi n°56-342 du 27 mars 1956, p. 55 : « Enfin, le programme prévoit l'engagement de l'usine marémotrice de la Rance, dont les enseignements seront très précieux pour l'étude et la construction éventuelle d'ouvrages plus vastes. »

les Alpes et avec la construction de centrales dans le Nord, en Lorraine et en Basse-Seine. Malgré la crise de Suez²⁹⁴, la part du pétrole augmente également de 16 à 25 %, confortés par de grands projets élaborés après la découverte de gisements au Sahara. Or, au même moment, un début d'une prise de conscience du caractère limité des ressources énergétiques classiques apparaît. Dans son discours d'ouverture du colloque de l'UNESCO sur l'énergie solaire et éolienne à New Delhi en 1954, le sous-secrétaire d'État indien aux ressources naturelles et à la recherche scientifique Shri Keshava Deva Malaviya déclare notamment :

« Se procurer de l'énergie à bon marché, tel est aujourd'hui l'objet de tous les désirs. Le charbon, le pétrole et l'énergie hydro-électrique ont transformé le monde de fond en comble. Mais comme chacun le sait, les réserves de pétrole et de charbon sont loin d'être illimitées et l'on estime qu'elles seront totalement équipées dans un très petit nombre de siècles, à supposer même que le rythme de leur exploitation ne s'accélère pas. Et si nous réussissons à tirer parti de toute l'énergie radio-active que l'uranium, le thorium ou d'autres corps analogues peuvent nous fournir, à un prix de revient colossal et après des opérations très complexes, peut-être ne réussissons-nous qu'à repousser l'échéance de quelques siècles. À mesure que nous pénétrons plus avant dans la connaissance des mystères de la nature une cruelle vérité s'impose peu à peu à notre esprit : dans quelques siècles, après avoir épuisé la totalité des gisements de charbon, de pétrole et même de minerais radio-actifs, nous n'aurons plus rien dont nous puissions tirer de l'énergie. Alors la vie disparaîtra de la planète à moins qu'une autre source d'énergie, plus féconde et plus aisément accessible, ne soit découverte. »²⁹⁵

La problématique de la conversion des énergies surgit dans ce contexte. Dans les *Annales*, l'historien de l'économie Carlo Maria Cipolla prévient d'ailleurs qu'elle sera bientôt l'objet d'une « seconde Révolution Industrielle » :

« La première partie de la révolution industrielle s'est déroulée dans le cadre de l'utilisation de sources d'énergie - le charbon, le pétrole, la houille blanche - qui existent en quantités limitées. Les opinions divergent à propos des prévisions exactes sur ces ressources. Aucun doute, cependant : ces ressources ne dureront pas indéfiniment. Par

²⁹⁴ BELTRAN, Alain, « La politique énergétique de la France au XXe siècle : une construction historique », in *Annales des Mines*, août 1998, pp. 6-10.

²⁹⁵ DEVA MALAVIYA, Shri Keshava, « Discours d'ouverture », in *Énergie solaire et éolienne, Actes du colloque de New Delhi*, UNESCO, 1956, p. 21.

conséquent, l'homme doit chercher, vaille que vaille, de nouveaux *convertisseurs* plus compliqués et qui lui permettent de saisir d'autres sources d'énergie plus "difficiles" à capter - l'énergie solaire, l'énergie atomique, c'est-à-dire, des sources d'énergie renouvelables, ou pratiquement inépuisables. »²⁹⁶

Ainsi, si les recherches sur l'énergie nucléaire sont en bonne voie depuis la fin de la guerre et la création du CEA, la France se dote du LES (Laboratoire de recherches sur l'utilisation de l'énergie solaire) en 1950, dirigé par Félix Trombe²⁹⁷. Le premier Institut de l'énergie solaire à l'Université d'Alger est également créé en 1959. Face à Louis Roland Neil dans l'émission *Page des sciences* diffusée à la RTF (Radiodiffusion télévision française) en 1961, Maurice Ponte exprime encore le même sentiment que Carlo Maria Cipolla, en soulignant l'intérêt que représente, non seulement pour l'État français mais aussi pour le monde entier, la conversion des énergies :

« Sur le plan pratique, si je prends tout l'ensemble des systèmes de la recherche scientifique française, nous avons pu mettre en route un nouveau dispositif de crédits qui permet d'affecter un certain nombre de moyens à des sujets que nous avons considéré d'un intérêt primordial pour la nation. [...] Les sujets que nous avons choisis ont trait à des recherches d'intérêt vital. Non seulement pour notre pays mais pour l'humanité elle-même. [...] Nous avons donné pas mal de crédits à ce fameux problème de la conversion des énergies. C'est un terme extrêmement vague qui veut dire que l'humanité actuellement court toujours après une nouvelle source d'énergie. Bien sûr, il y a le pétrole qui a été développé, il y a beaucoup d'autres choses. Mais nous avons voulu donner beaucoup de crédits, par exemple pour regarder ce que va devenir le fameux problème de la conversion de l'énergie solaire, directement en énergie électrique. L'énergie solaire est une énergie bon marché, il faut l'utiliser. Les moyens pour la transformer ne sont pas bon marché encore mais j'espère que nous y arriverons. Il y a beaucoup de choses, d'autres transformations directes de certaines réactions chimiques en énergie électrique également. Vous voyez qu'on arrive toujours à tomber sur l'énergie électrique parce que c'est une énergie transportable. Enfin, je vous fais grâce de tout ce qu'on peut imaginer. En somme, ces crédits ont été donnés pour qu'on puisse exploiter toutes les ressources énergétiques possibles sur la surface du globe, en prévision du grand nombre d'individus

²⁹⁶ CIPOLLA, Carlo Maria, « Sources d'énergie et histoire de l'humanité », in *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*, Vol. 16, n°3, 1961, p. 533.

²⁹⁷ TEISSIER, Pierre, « Le solaire passif à l'ombre de la politique énergétique française. 1945-1986, in *Annales historiques de l'électricité*, Vol. 1, n°11, 2013, p. 14.

qui vont être sur le globe d'ici un certain nombre d'années, qui n'est pas tellement long puisque l'humanité va très vite. »²⁹⁸

A la même époque, dans le « Rapport fait au nom de la Commission des Finances, du Contrôle budgétaire et des Comptes économiques de la Nation sur le projet de loi de programme relative à des actions complémentaires coordonnées de recherche scientifique et technique », les sénateurs André Armengaud et Yvon Coudé du Foresto s'interrogent par ailleurs sur la trop petite place donnée par l'exécutif à la conversion des énergies. Preuve en est de l'importance acquise en plus hauts lieux par la thématique :

« [...] nous n'avons pu manquer d'être frappés en lisant les débats à l'Assemblée nationale de voir l'importance primordiale accordée par le Ministre dans son exposé [à la recherche spatiale] alors qu'il nous apparaît que d'autres voies scientifiques offrent pour l'humanité un intérêt aussi immédiat. Nous voulons parler, par exemple, de l'étude du cancer, de la conversion des énergies et de la nutrition sous toutes ses formes. »²⁹⁹

3.3 Les enjeux de la recherche scientifique à caractère militaire

Dernier point à considérer : la place nouvelle accordée à la recherche scientifique au sein de la Défense. Dès son retour en 1958, Charles de Gaulle souhaite prendre ses distances vis-à-vis des deux superpuissances que sont l'URSS et les États-Unis, en particulier sur le plan politique. L'indépendance nationale constitue ainsi la troisième voie d'affirmation de l'identité française que le général ambitionne au milieu d'un monde devenu bipolaire en pleine Guerre froide. Sa défiance vis-à-vis de l'OTAN est un exemple de l'évolution de sa pensée stratégique en matière de diplomatie franco-américaine. Dans ses *Mémoires d'Espoir*, il revient sur cet événement :

« Mon dessein consiste donc à dégager la France, non pas de l'alliance atlantique que j'entends maintenir à titre d'ultime précaution, mais de l'intégration réalisée par l'O.T.A.N. sous commandement américain ; à nouer avec chacun des Etats du bloc de l'Est et d'abord, avec la Russie, des relations visant à la détente puis à l'entente et à la

²⁹⁸ INA, « Maurice Ponte : la recherche scientifique en 1961 », RTF, Page des sciences, le 12 janvier 1961.

²⁹⁹ ARMENGAUD, André, COUDE DU FORESTO, Yvon, « Rapport fait au nom de la Commission des Finances, du Contrôle budgétaire et des Comptes économiques de la Nation sur le projet de loi de programme relative à des actions complémentaires coordonnées de recherche scientifique et technique, adopté par l'Assemblée nationale », Annexe au procès-verbal de la séance du 17 mai 1961, Sénat, n°215, p. 26.

coopération [...] enfin à nous doter d'une puissance nucléaire telle que nul ne puisse nous attaquer sans risquer d'effroyables blessures. »³⁰⁰

On le voit, l'indépendance envisagée par Charles de Gaulle au milieu de la confrontation Est-Ouest est intimement liée à la réorganisation de la défense du pays placée sous le signe de la dissuasion induite par les transformations scientifiques et techniques ayant cours depuis la Seconde Guerre mondiale. La création de la DMA (Délégation ministérielle pour l'armement) et de la DRME (Direction des recherches et moyens d'essais) en 1961 peut se lire dans ce contexte comme un des résultats objectifs de cette volonté d'action³⁰¹. Après tout, le général de Gaulle déclare bien que « l'essentiel, pour jouer un rôle international, c'est d'exister par soi-même, en soi-même, chez soi. Il n'y a pas de réalité internationale qui ne soit d'abord une réalité nationale. Il faut qu'un pays qui veut jouer son rôle dans le monde prenne les voies qui le lui permettent. »³⁰²

Néanmoins, des structures sous-jacentes parcourent déjà la logique de l'armement à l'échelle de la France depuis le début des années cinquante. S'il est nécessaire d'en faire l'inventaire, c'est que celles-ci permettent justement de mieux cerner le développement de l'espace d'interaction entre militaires, industriels et académiciens au sein duquel l'armée française va en venir à s'intéresser aux piles à combustible. Dans les nouveaux domaines qui attirent l'attention des autorités étatiques en lien avec la défense nationale à partir de cette époque - alors que le pays est successivement engagé militairement, rappelons-le, en Indochine et en Algérie - et mis à part la bombe atomique qui constitue un cas à part, on retrouve ainsi : a) l'électronique ; b) ce que l'on nomme communément les « engins spéciaux » (les missiles) ; c) plus généralement la recherche scientifique dans son ensemble³⁰³. Précisons d'emblée que la question de l'électronique, comme l'indique Dominique Pestre, correspond plus à un « cadre technique englobant » qu'à autre chose : c'est en son sein que les systèmes d'armes sont désormais abordés. L'invention du transistor en 1947 ou de l'ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer) en 1946 par exemple enclenchent en effet la phase préparatoire d'une révolution internationale dans les affaires militaires, c'est-à-dire d'un

³⁰⁰ DE GAULLE, Charles, *Mémoires d'Espoir, Tome I, Le Renouveau, 1958-1962*, Éditions Plon, 1970, p. 214.

³⁰¹ Ce que confirme Anne Rasmussen : « Lors de sa mise en place, en avril 1961, la DMA est d'emblée considérée par ses dirigeants comme une "structure transitoire". Elle n'est qu'une première étape "dans un processus de transformation plus important" en vue de la réalisation d'une "doctrine" dont l'objectif réside dans la "prise d'autorité sur l'atome militaire". » Voir : RASMUSSEN, Anne, « Les corps d'ingénieurs militaires et les débuts de la Délégation ministérielle pour l'armement (1961-1968) » in VAÏSSE, Maurice (dir.), *Armement et Ve République, Fin des années 1950-fin des années 1960*, CNRS éditions, 2002, p. 14.

³⁰² DE GAULLE, Charles, « Allocution prononcée à l'Assemblée fédérale du Mali », 13 décembre 1959.

³⁰³ PESTRE, Dominique, « La création de la DMA et de la DRME en 1961 : projet politique stratégique ou construction conjoncturelle ? », in CHATRIOT, Alain, DUCLERT, Vincent, *Le gouvernement de la recherche. Histoire d'un engagement politique de Pierre Mendès France à Charles de Gaulle (1953-1969)*, Éditions La Découverte, 2006, p. 165.

« changement de paradigme dans la nature et la conduite des opérations »³⁰⁴ tel qu'il se laissera voir dans les conflits des décennies suivantes³⁰⁵. Le rayon d'application des moyens de calcul s'étend alors aussi bien aux missiles pour le guidage des tirs ou aux radars de détection qu'à l'aérodynamique des avions à réaction et ceux-ci remplacent peu à peu l'électromécanique³⁰⁶.

Contrairement à ce qui se passe aux États-Unis et en Angleterre³⁰⁷, l'armée française ne délègue pourtant pas l'établissement de calculateurs électroniques aux académiciens, c'est-à-dire à l'université ou au CNRS. Ce qui a pour conséquence qu'aucun ordinateur ne sera construit par la recherche publique avant le début des années soixante. En réalité, elle se tourne plus volontiers vers l'industrie avec qui elle entretient des relations plus fortes. La création de la SEA (Société d'électronique et d'automatisme) en 1948, à laquelle le STAé (Service technique de l'aéronautique) s'adresse pour le traitement analogique et le traitement digital de l'information, peut d'ailleurs être directement imputée à cette dynamique. De la même manière, la DEFA joue un rôle de premier plan dans le développement du département « calculateurs électroniques » de la CSF (Compagnie générale de télégraphie sans fil) en 1950 pour le renouvellement du matériel de conduite de tir de DCA (Défense contre les aéronefs). Dans certains cas, comme au sein de la Marine, il existe aussi une tradition de production interne des équipements qui entrave l'ouverture à la recherche civile. De fait, cette dernière préfère réaliser ses propres calculateurs pendant un temps, avant de se tourner finalement elle aussi vers des entreprises telles que Thomson ou Sadir-Carpentier.

Une autre raison explique la mise à l'écart des universitaires : le retard qu'ils ont accumulé sous l'Occupation, en étant tenus trop longtemps en dehors de la Big Science, n'a pas encore été rattrapé. De plus, suite au repli sur la science « pure » observé dans le milieu, en particulier sous l'influence du groupe Bourbaki, même les plus éminents mathématiciens ne disposent pas de la maîtrise nécessaire pour s'orienter vers des applications concrètes. Les échecs successifs de l'ONERA concernant un ordinateur de télémessure d'essais de missiles entre 1951 et 1959, qui mènent finalement à l'achat d'un IBM 704, apportent un éclairage exemplaire à ce sujet. Si l'armée ne fait ainsi que peu appel à des équipes universitaires, elle va en revanche progressivement éveiller l'intérêt

³⁰⁴ HUNDLEY, Richard O., *Past Revolutions, Future Transformations. What can the history of revolutions in military affairs tell us about transforming the U.S. military?*, National Defense Research Institute, Rand, 1999, p. 9.

³⁰⁵ On pense notamment à la crise des missiles de Cuba en 1962 et à la Guerre du Vietnam entre 1955 et 1975 où les radars, les communications et les équipements de bord aéronautiques sont utilisés. Ils démontrent la transformation de la nature des conflits militaires par rapport à la Seconde Guerre mondiale.

³⁰⁶ BERGOUNIOUX, Michel, « Le Service technique des télécommunications de l'air », in BERGOUNIOUX, Michel (éd.), *L'électronique*, CHEAr/DHAr, 2003, p. 15.

³⁰⁷ L'US Air Force confie par exemple le développement de son système SAGE (Semi-Automatic Ground Environment) au MIT.

pour le champ disciplinaire parmi ces dernières, notamment en motivant le développement de l'IMAG (Institut de mathématiques appliquées de Grenoble). À partir de 1950, celui-ci investit dans une calculatrice analogique qui lui permet d'obtenir des contrats avec la SEA et le CNET ou encore de devenir un centre de formation pour les ingénieurs de l'Air. Des partenariats similaires entre le STAé et des laboratoires civils tels que le Centre de calcul analogique du CNRS, le Centre de recherche de Sup'Aéro et l'Université de Toulouse favorisent d'autre part l'introduction de l'informatique à l'université³⁰⁸.

Ainsi, un triptyque militaires-académiciens-industriels commence à se constituer en France. Mais l'électronique n'est pas le seul domaine dans lequel il intervient. La recherche militaire dans son ensemble devient un sujet que le gouvernement ne peut pas délaisser au lendemain d'une guerre que la science a remportée. Et celle-ci va faire l'objet de politiques volontaristes. L'impulsion première est cependant donnée par un acteur civil, Frédéric Joliot-Curie, qui propose de réunir scientifiques et militaires au sein d'un CCSDN (Comité de coordination scientifique de la Défense nationale). Si les Armées accueillent généralement l'idée avec enthousiasme, les corps de l'Air, de la Marine et de la Terre n'arrivent pas à s'entendre concrètement sur les budgets et les moyens à consacrer à la tâche. Le 24 mai 1948 est finalement créé un CASDN (Comité d'action scientifique de la Défense nationale) plus autonome³⁰⁹. Placé sous la direction de la présidence du Conseil, son but est de « coordonner, d'orienter et, éventuellement, de provoquer les recherches scientifiques intéressant la défense nationale »³¹⁰. Plus précisément, cet organe confié dès le départ au général Paul Bergeron, polytechnicien et ingénieur de l'École supérieure d'électricité, doit centraliser « les renseignements concernant l'activité de l'ensemble des organismes de recherches, tant civils que militaires, dont les travaux peuvent intéresser l'une quelconque des branches de la défense nationale » et suivre « l'évolution des techniques de la recherche à l'étranger dans ce domaine ». L'action du CASDN se donne en fait à voir de nombreuses façons à partir de cette époque³¹¹.

³⁰⁸ MOUNIER-KHUN, Pierre, « Calculateurs électroniques et nouveaux systèmes d'armes : interactions Armées/Recherche/Industrie (1946-1959) », in VAÏSSE, Maurice (dir.), *La IVe République et les problèmes d'armement*, Centre d'études d'histoire de la Défense - ADDIM, 1998, pp. 376-405.

³⁰⁹ VARNOTEAUX, Philippe, « Au cœur de la modernisation des armées, il y a 50 ans le CASDN », in *Armées d'aujourd'hui*, n°231, 1998, pp. 72-74.

³¹⁰ Journal officiel, Décret n°48-361 du 24 mai 1948 portant création du Comité d'action scientifique de la Défense nationale, p. 5042.

³¹¹ La mission du CASDN et les moyens à sa disposition pour son bon déroulement sont résumés le 9 novembre 1960 dans une lettre envoyée par le général Guérin au colonel ingénieur Lofstrom, chef d'Études et fabrications d'Armement de l'État-Major Général des Forces armées de Finlande : « Le Comité d'action scientifique de Défense nationale a été créé par décret du 24 mai 1948 en vue "de coordonner, orienter et, éventuellement provoquer les recherches scientifiques intéressant la défense nationale". L'ordonnance du 7 janvier 1959 portant organisation générale de la défense a confirmé cette mission, et l'a étendue au domaine de la recherche technique. Organe permanent d'information du chef du gouvernement, il centralise les renseignements relatifs à l'évolution de la recherche scientifique intéressant la défense tant en France qu'à l'étranger. Il étudie et propose les éléments d'une politique d'action scientifique de défense, et définit

Après sa rencontre avec Félix Trombe à l'occasion d'une mission spéléologique au gouffre de la Henne-Morte en Haute Garonne en 1946-1947 effectuée avec le soutien de l'armée³¹², Paul Bergeron lance par exemple le financement des fours solaires de Mont-Louis-Odeillo avec pour objectif de tester la résistance des matériaux militaires au moyen de chocs thermiques³¹³. L'exploration de la Henne-Morte n'est pas la seule expédition scientifique à laquelle participe le CASDN ; elles sont en fait nombreuses : à l'Aconcagua en 1956-1957, au Groënland de 1956 à 1958, aux îles Kerguelen entre 1954 et 1960, ou encore dans les Alpes pour des expériences sismologiques entre 1954 et 1959. L'Académie des sciences annonce également dans ses comptes rendus qu'en novembre 1954, « le Secrétaire d'État à l'Air décidait, sur l'intervention du Comité d'Action scientifique de la Défense Nationale, de mettre à la disposition du Bureau des Longitudes un avion, un équipage militaire et un observateur du Bureau Scientifique de l'Armée de l'Air, afin d'étudier l'éclipse en Indochine, à 8 000 m d'altitude. »³¹⁴ C'est aussi vers cet organisme que se tourne René Pleven en septembre 1952 lorsque ce dernier souhaite connaître les possibilités d'entamer un programme d'étude sur les questions atomiques militaires³¹⁵. Comme annoncé dans ses statuts, le CASDN prend donc part à tout un ensemble de travaux susceptibles d'améliorer « la politique d'action scientifique de la défense nationale » : radars (systèmes radars et antiradars, étude des ondes et de la détection acoustique avec

les besoins et les moyens d'y pourvoir. [...] Une condition essentielle de bon fonctionnement est la liaison étroite avec les organismes de recherche et les chercheurs. Elle est assurée en premier lieu par la qualité des membres du Comité. Elle l'est aussi par le fait que le Président du CASDN est, es qualité ou à titre nominatif, membre d'un certain nombre d'organismes à caractère scientifique ou technique (Comité des recherches spatiales – Conseil d'administration et Conseil scientifique de l'Office national d'études et de recherches aéronautiques – Comité français des unions scientifiques internationales – Sociétés savantes). Enfin les membres du secrétariat permanent sont en liaison fréquente avec les chercheurs et l'Université. [...] Le CASDN ne dispose pas de moyens de recherche. Il est donc amené à faire appel à des laboratoires militaires et civils. Dans ce domaine son action peut revêtir deux formes : a/- établissement de contrats de recherche, b/- création de centres spécialisés en collaboration avec des organismes officiels – notamment le Centre national de la recherche scientifique. En outre pour faire face à certains besoins pressants, le CASDN s'efforce de participer à la formation de chercheurs par la création et l'animation de Centres d'études dispensant un enseignement sous forme de cours et de séminaires. Le financement des recherches est assuré grâce à un "fonds d'orientation" alimenté par prélèvement sur les crédits d'études des trois Armées. Source : lettre du général Guérin au colonel ingénieur Lofstrom, « Note sur le Comité d'action scientifique de Défense nationale », le 9 novembre 1960, pp. 1-2. Ajoutons à cela que le secrétariat permanent du CASDN est dirigé par un officier du grade de colonel et qu'il est composé d'officiers ou ingénieurs militaires chargés de préparer les travaux du Comité et d'assurer la permanence des liaisons avec les États-Majors. Des sections spécialisées permettent de répartir les tâches : organisation, problèmes humains, chimie biologique, physiologie, mathématiques appliquées et linguistiques, rayonnements électromagnétiques et électronique, physique du globe et espace, chimie, engins spéciaux. En outre, un CIRO (Centre interarmées de recherche opérationnelle a la double mission de former des chercheurs et analystes opérationnels militaires et d'effectuer des recherches à caractère interarmées.

³¹² BENSAUDE-VINCENT, Bernadette, GOMES, José, « Entretien avec Paul Caro », in *Sciences : histoire orale*, le 20 juin 2002.

³¹³ TEISSIER, Pierre, « Fours et maisons solaires de Mont-Louis-Odeillo. Interstices, intersciences et internationalismes de la recherche contemporaine. », in BOISTEL, Guy et LE GARS, Stéphane (dir.), *Dans le champ solaire. Cartographie d'un objet scientifique*, Hermann, 2015, pp. 181- 219.

³¹⁴ Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences, Tome n°241, juillet-décembre 1955, séance du 4 juillet 1955, p. 22.

³¹⁵ MONGIN, Dominique, « Le rôle des militaires dans le choix de l'arme atomique avant 1958 », in FORCADE, Olivier, DUHAMEL, Eric, VIAL, Philippe (dir.), *Militaires en République, 1870-1962. Les officiers, le pouvoir et la vie publique en France*, Publications de la Sorbonne, 1999, p. 92.

le CNET et l'ONERA), transmissions (brouillage et antibrouillage avec le CNET, télécommunications, contrats passés avec le professeur Laporte de l'Institut du radium), électronique (quartz piézo-électriques, électronique nucléaire, horloge atomique, propagation des ondes, appareils de mesure, guerre électronique, composants, notamment avec le professeur Maurice Allais), infrarouge (études relatives à la transparence de l'atmosphère et aux applications infrarouge en partenariat avec le laboratoire de physique du professeur Vignal à l'École polytechnique), énergie atomique (décontamination radioactive, études des irradiations, surveillance des explosions et de la radioactivité de l'atmosphère, etc.), fours solaires, engins spéciaux...

Ces études sont mises en œuvre en même temps qu'une surveillance étroite du développement des techniques à l'étranger, et surtout en Grande-Bretagne, aux États-Unis, en URSS et au Canada, ce qui place l'évolution de la recherche militaire française dans un espace d'interaction international. Cette tendance se remarque spécifiquement dans le cas des engins spéciaux. Si nous avons déjà rapidement traité des débuts de l'histoire des missiles en France dans le chapitre précédent pour dire que l'engouement suscité par l'étude des techniques allemandes dans l'immédiat après-guerre, marqué par l'établissement du CEPA, de la DEFA et du LRBA, n'avait pas perduré, il faut noter que l'intérêt pour la thématique refait surface vers 1955 au sein du CTPFA (Comité technique des programmes des forces armées). À l'étude des engins tactiques à courte et longue portée et des engins balistiques est même consacré un budget significatif. Or il s'agit bien là d'une décision qu'on pourrait associer à un complexe du retard sur l'étranger :

« [...] les propositions et choix sont tous calés sur ce qui se fait aux États-Unis et en Grande-Bretagne [...] On suit donc ce qui se fait hors de France - le choix balistique constituant le meilleur exemple de cette attitude. C'est en effet parce que "tous les grands pays s'orientent dans cette direction" que le Comité des programmes dégage un milliard de francs en 1957 pour des études préparatoires pour un programme d'engins balistiques [...] on décide de "copier" les évolutions qui se font jour ailleurs et d'engager des travaux [...]. »³¹⁶

Bien qu'elles prennent un peu plus tard une autre dimension avec la décision de Charles de Gaulle de doter la France d'un arsenal nucléaire, les recherches n'ont pourtant pas uniquement vocation à être rentables sur le plan strictement militaire. Elles sont aussi poursuivies à des fins de connaissance – mais détenant tout de même un intérêt stratégique dans l'espace des relations internationales – en

³¹⁶ PESTRE, Dominique, « Les missiles balistiques et la création de la DMA », in *Les origines de la Délégation générale pour l'armement*, Comité pour l'histoire de l'armement, 2002, p. 18.

partenariat avec des scientifiques civils en dehors de la DEFA et de la DTIA (Direction technique et industrielle de l'aéronautique). Alors que les campagnes de tir des fusées sondes Véronique avaient été arrêtées en 1954 du fait du peu d'intérêt qu'y accordaient les états-majors, celles-ci sont par exemple relancées au CIEES (Centre interarmées d'engins spéciaux) par le général Jean Maurice Guérin, qui vient de prendre la place de Paul Bergeron à la tête du CASDN, pour étudier la haute atmosphère en vue de l'Année géophysique internationale. S'il avait d'abord été envisagé pour des essais de missiles air-sol, sa mission s'étend rapidement aux programmes balistiques et spatiaux³¹⁷. La fusée Véronique NA ne pouvant porter une charge de 50 kg qu'à 135 km d'altitude, Maurice Guérin demande au LRBA d'en concevoir une nouvelle version avec l'aide du Laboratoire de physique de l'atmosphère du professeur Etienne Vassy, du Laboratoire de physique de l'École normale supérieure du professeur Jacques Balmont, du CERMA (Centre d'étude et de recherche en médecine aéronautique) et du CNET de Pierre Blassel. La Véronique AGI, qui permet d'atteindre les 200 km, est de fait utilisée quinze fois dont dix avec succès entre 1955 et 1961, pour des expériences diverses incluant l'étude la ionosphère et des rayons cosmiques³¹⁸, la diffusion de nuage de sodium à haute altitude, l'explosion télécommandée de charges de TNT et l'envoi d'animaux éjectés puis récupérés.³¹⁹

Ces derniers éléments permettent d'ajouter la conquête spatiale aux domaines de recherche que nous venons de citer. Bien qu'elle revête au début un caractère moins directement assimilable à la question de l'armement, elle prend peu à peu une importance stratégique pour la Défense et pour la France, surtout après le lancement de Spoutnik. Car cet exploit démontre que si les Soviétiques sont capables de mettre un satellite sur orbite, ils maîtrisent assez bien la technique des fusées balistiques pour leur permettre d'envoyer une bombe nucléaire. Le général de Gaulle se rend très tôt compte du problème que cela pose et prend immédiatement des mesures à son arrivée au pouvoir, puisque « les couples fusée/bombe atomique et fusée/satellite artificiel renforcent indéniablement la puissance et donc l'indépendance nationale. »³²⁰ Comme il l'explique d'ailleurs à Nikita Khrouchtchev quelques temps

³¹⁷ MEDARD, Frédéric, « Le Sahara, enjeu scientifique et technologique », in JAUFRET, Jean-Charles, VAÏSSE, Maurice (dir.), *Militaires et guérilla dans la guerre d'Algérie*, Actes du colloque de Montpellier des 5 et 6 mai 2000 organisé par le Centre d'études d'histoire de la Défense et l'UMR n°5609, Société, Idéologies, Défense, du CNRS, p. 238.

³¹⁸ MOULIN, Hervé, « Les recherches spatiales au temps des comités. Environnement international et contexte national à la fin des années 60 », in *L'Essor des Recherches Spatiales en France: Première rencontre de l'I. F. H. E.*, « Des Premières Expériences Scientifiques aux Premiers Satellites », Conference held October 24-25, 2000, in Paris. Edited by Brigitte Schürmann. European Space Agency, ESA SP-472, 2001, p. 16.

³¹⁹ MAREC, Jean-Pierre, *Un demi-siècle d'aéronautique en France. Centres et moyens d'essais, Tome I*, Les cahiers COMAERO, 2013, p. 180.

³²⁰ VARNOTEAU, Philippe, « La naissance de la politique spatiale française », in *Vingtième Siècle. Revue d'histoire*, Vol. 1, n°77, 2003, p. 65.

plus tard, « nous sommes au siècle des fusées et des avions et l'humanité n'a pas à s'en priver. »³²¹ Un secrétariat aux affaires spatiales est donc créé dès le mois de juin 1958, de même qu'un « Comité des recherches spatiales » en janvier 1959 faisant suite à une réunion du CCRST³²². Composé notamment de Pierre Auger, du général Guérin, de l'ambassadeur Roger Seydoux du ministère des Affaires étrangères, de Maurice Bayen de la direction de l'Enseignement supérieur, de Jean Coulomb du CNRS, d'André Danjon de l'Observatoire de Paris, de Maurice Roy de l'ONERA et d'un représentant du ministère d'État chargé de la Recherche scientifique, celui-ci prendra deux ans plus tard la suite du CASDN dans la gestion des fusées-sondes. La SEREB (Société pour l'étude et la réalisation d'engins balistiques) est quant à elle instituée en septembre pour doter le pays de son propre vecteur. Parallèlement, cette politique doit aussi permettre « de solidifier et d'inscrire dans les programmes spatiaux les deux courants de l'effort spatial : celui des savants et celui des militaires. »³²³ La dispersion entre les acteurs est en effet courante dans le domaine jusqu'à cette période. S'affrontent en particulier le SPIM (Service de prévision ionosphérique) de la Marine dirigé par Yves Rocard et le Laboratoire national de radioélectricité du père Lejay³²⁴. D'autres problèmes existent : le secret militaire qui pèse sur les échanges, la coopération incertaine entre les différents corps d'armée ou encore l'insuffisance des moyens de la recherche civile. De plus, la constitution d'un programme spatial français cohérent manque d'un projet concret qui la justifierait. La création du CNES (Centre national d'études spatiales) en 1961, placée sous le signe d'une « rhétorique de la grandeur », répond finalement à ces préoccupations³²⁵. Ainsi la réforme de la conquête de l'espace et de la recherche scientifique militaire dans son ensemble doivent-elles participer à la « politique de la grandeur »³²⁶ de la France menée par le général de Gaulle. Car comme le rappelle Pierre Piganiol :

« Si elles semblent conçues indépendamment l'une de l'autre, elles traduisent une même préoccupation du Général de Gaulle : assurer une solide présence française dans tout domaine scientifique ou technique d'une importance particulière pour l'avenir de notre potentiel économique et militaire. Ce souci s'est manifesté dès le retour du Général sur le

³²¹ VANORTEAUX, Philippe, *Ibid.*, 2003, p. 64.

³²² VARNOTEAUX, Philippe, « La part du CNRS dans les débuts de la conquête de l'espace (1945-1965) », in *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], n°6, 2002, mis en ligne le 05 juillet 2007.

³²³ PENEZ, Jérôme, « L'essor de la politique spatiale française (1959-1964) », in *Vingtième siècle, revue d'histoire*, Vol. 50, n°1, 1996, p. 134.

³²⁴ BLAMONT, Jacques, « Origines et principes de la politique spatiale de la France », in *Rayonnement du CNRS*, n°48, 2008, p. 26.

³²⁵ LAMY, Jérôme, « Grandeur scientifique et politiques de l'espace : la création et le transfert du CNES (1958-1974) », in *Revue d'histoire moderne et contemporaine*, Vol. 1, n°58, 2011, p. 161.

³²⁶ VAÏSSE, Maurice, *La grandeur : politique étrangère du général de Gaulle*, Fayard, 1998.

sol de France : le déroulement des opérations avait encore renforcé sa conscience du rôle considérable des techniques dans les conflits modernes. »³²⁷

Un dernier aspect de ce changement d'orientation dans les relations établies entre scientifiques et militaires se perçoit enfin dans l'accélération du versement de polytechniciens dans les laboratoires publics. Jusqu'en 1958, l'accès à la recherche des élèves de l'X est assez limité. Seul le décret Suquet du 24 août 1939 prévoit que les grands corps de l'État peuvent offrir quelques postes à certains membres de leurs effectifs. Les intéressés sont alors autorisés à se livrer à des travaux de recherche pure, au CNRS par exemple, au lieu de se consacrer aux tâches qui leur sont normalement destinées, tout en gardant le bénéfice du titre et de la rémunération du corps dont ils sont issus. Mais le nombre de postes accordés n'est défini que dans quelques établissements tels que les Mines et les Ponts et Chaussées et rien ne les oblige d'ailleurs à les pourvoir quand ils connaissent des besoins impérieux dans d'autres domaines. En 1947, un second décret vient dispenser de remboursement des frais d'études les élèves admis comme attachés de recherche au CNRS, sous réserve du traditionnel engagement décennal. Mais il reste peu appliqué : la possibilité d'orientation vers le Centre est assez mal connue des élèves et les tractations administratives sont longues et fastidieuses. Bientôt pourtant, la situation évolue. En 1957, le ministère des Armées prend des mesures pour que plusieurs places soient réservées à la recherche au sein de chaque promotion, en vue d'une orientation vers des activités soit fondamentales, soit appliquées, et qui dans ce cas intéressent particulièrement les corps (ONERA pour les ingénieurs de l'air, Cerchar pour les ingénieurs des Mines, laboratoires propres aux écoles, etc.). Un cadre légal plus approfondi vient compléter cette décision, avec le décret du 4 juillet 1959 qui étend la dispense de remboursement prévue pour le CNRS à toute une série de grandes institutions de recherche publique : CEA, CNET, LCIE (Laboratoire central des industries électriques), Centre de recherche du Gaz de France, DER de l'EDF, IFP, INRA, etc. Comme il est expliqué dans une note publiée dans la *Jaune et la Rouge* par la direction des études de l'X, « on peut désormais dire que le Gouvernement considère les fonctions de recherche dans les grands établissements publics comme un service national au même titre que les postes des grands Corps de l'État »³²⁸. Les effets sont immédiats : au sein de la promotion 1957, pas moins de quarante polytechniciens « ayant fait preuve d'aptitudes particulières dans une des disciplines scientifiques [enseignées par l'École] »³²⁹ s'orientent vers la recherche.

³²⁷ PIGANIOL, Pierre, « L'essor des recherches spatiales en France. Quelques souvenirs », in *L'Essor des Recherches Spatiales en France : Première rencontre de l'I. F. H. E.*, « Des Premières Expériences Scientifiques aux Premiers Satellites », Conference held October 24-25, 2000, in Paris. Edited by Brigitte Schürmann. European Space Agency, ESA SP-472, 2001, p. 21.

³²⁸ *La Jaune et la Rouge*, n°131, 1er octobre 1959, p. 49.

³²⁹ Journal officiel, 8 juillet 1959, p. 6796, décret 59-808 du 4 juillet 1959 relatif à la dispense de remboursement des frais de scolarité en faveur d'anciens élèves de l'École polytechnique.

DEUXIÈME PARTIE
Acteurs, pratiques et savoirs en action

QUATRIÈME CHAPITRE

Les moyens d'essais comme régime de production des savoirs (1958-1962)

À l'avènement de la cinquième République, certaines conditions sont donc réunies : a) les piles à combustible font l'objet d'attentions internationales ; b) un intérêt récent est porté à la conversion des énergies ; c) la recherche scientifique prend de l'importance au sein de la Défense ; d) la DGRST et le comité « Conversion des énergies » viennent d'être créés ; e) un complexe du retard sur les États-Unis s'est développé ; f) l'électrochimie se constitue autour de nouveaux objets et de nouveaux acteurs. Après avoir restitué ces paramètres dans les chapitres précédents, nous nous pencherons donc ici sur la phase de l'objet-valise, c'est-à-dire le moment où ceux-ci s'activent et convergent vers un même point. Nous analyserons ensuite les tractations ayant lieu au sein des réunions organisées par le CASDN et le Comité « Conversion des énergies » pour comprendre de quelle manière la technique va se transformer en un objet-frontière, permettant par là même l'impulsion d'études à son égard. De plus, ces études s'inscrivent dans un régime de production des savoirs particulier, où des nouveaux rapports entre science et technique sont créés pour l'appréhension, la maîtrise et la mise en application des phénomènes, qu'il convient également de détailler. Pour ce faire, nous examinerons à la fois les dynamiques d'interaction entre militaires, universitaires et industriels qui régissent la structuration de cette forme de recherche techno-scientifique et ses effets concrets sur la vie des laboratoires concernés par le développement des piles à combustible.

4.1 La construction d'un réseau d'acteurs autour des piles à combustible en France

C'est d'abord le CASDN qui réalise les premières études de fond sur les piles à combustible en 1958³³⁰. Le procédé est bien sûr connu de longue date en France. Sans remonter jusqu'au XIX^{ème} siècle, où la « pile à gaz » de Grove est déjà l'objet de discussions³³¹, on peut citer certaines publications du début du XX^{ème} siècle qui en traitent. Il s'agit par exemple d'un thème à connaître

³³⁰ DGRST, « Les actions concertées », rapport d'activité, 1961, p. 22 : « Nous ne saurions omettre ici que l'étude des piles à combustible fut initiée en France sous l'impulsion du Comité d'action scientifique de la Défense nationale ».

³³¹ Notons par exemple la mention faite de la « pile à gaz » de Grove par le Comte du Moncel dans son *Exposé des applications de l'électricité* publié en 1872, par Gaston Planté dans ses *Recherches sur l'électricité* publiées en 1883, par Henri Poincaré dans ses cours de thermodynamique professés aux étudiants de la Faculté des sciences de Paris lors du premier semestre de l'année scolaire 1888-1889. Des journaux en font également état, tels que *La science populaire* en 1881 et *Le Génie civil* en 1889. Sources : DU MONCEL, Th., *Exposé des applications de l'électricité, Tome premier*, Eugène Lacroix, 1872, p. 397 ; PLANTE, Gaston, *Recherches sur l'électricité*, Gauthier-Villars, 1883, p. 4 ; POINCARÉ, Henri, BLONDIN, J., *Cours de physique mathématique. Thermodynamique*, Gauthier-Villars, 1908, p. 368 ; *La science populaire*, deuxième année, n°91, le 10 novembre 1881, p. 1445 ; *Le Génie civil : revue générale des industries françaises et étrangères*, neuvième année, Tome XV, n°21, le 21 septembre 1889, p. 479.

pour les candidats aux Écoles nationales d'arts et métiers en 1901³³². Georges Urbain détaille de son côté le principe des « piles réversibles » dans ses cours donnés à la Sorbonne dans les années vingt³³³. L'ingénieur civil Berthier publie aussi dès 1929 – soit trois ans avant que Francis T. Bacon ne prenne connaissance de la technique – un livre intitulé *L'énergie électrique de demain* avec lequel il espère « orienter les travaux des chercheurs » vers la transformation directe de l'énergie chimique en énergie électrique, et plus particulièrement vers « la pile à charbon, la pile à gaz et la pile à hydrocarbures »³³⁴. En 1931, la Fondation Loutreuil accorde même 3000 francs au directeur du Laboratoire d'électrochimie de l'École pratique des hautes études Claude Marie pour ses recherches sur la « pile à gaz ammoniac-oxygène »³³⁵ et en 1937 la pile de Grove est exposée au Palais de la découverte scientifique de l'exposition internationale de Paris³³⁶. En 1939, les études « relatives à la production directe du courant électrique par combustion des gaz » entreprises outre-Atlantique retiennent encore l'attention. Il est rapporté dans la revue *Le Génie civil* que le mémoire présenté à l'American Society of Civil Engineers par deux ingénieurs de la Detroit Edison Company, M. C. F. Hirschfeld et M. R. M. Vanduzer, sur « ce qu'ils appellent une pile à gaz ou à combustible » atteste qu'il serait possible d'obtenir « un courant électrique continu, utilisable industriellement, et atteindre ainsi un rendement calorifique supérieur à 40 %, alors qu'on ne dépasse pas 35 % avec le moteur Diesel et 30 % quand on passe par l'intermédiaire de la vapeur d'eau »³³⁷. L'affaire de la « pile à gaz de Grove » est par ailleurs discutée à l'Académie des sciences³³⁸ cette même année.

Mais dans la seconde moitié des années cinquante, la technique n'est plus la même : elle s'est grandement perfectionnée grâce à Francis T. Bacon. C'est pour cette raison que l'EDF en fait mention en 1956. Dans un document du Service des études et recherches hydrauliques visant à donner une vue d'ensemble sur les divers procédés de stockage de l'énergie, Gaston Remenieras traite de l'accumulation d'énergie à partir de l'électrolyse de l'eau, sous forme d'oxygène et d'hydrogène. Or dit-il, ces produits de la réaction peuvent être utilisés « dans une pile à gaz sous pression qui fournirait du courant continu en reconstituant de l'eau » :

³³² SERRES, L., *Cours de physique à l'usage des candidats aux Écoles nationales d'arts et métiers*, Ch. Béranger, 1901, p. 237.

³³³ URBAIN, Georges, *L'énergétique des réactions chimiques. Leçons professées à la Sorbonne*, Librairie Octave Doin, 1925, p. 166.

³³⁴ *La Croix*, 27 février 1929, n°14107, p. 4.

³³⁵ *Le Génie civil : revue générale des industries françaises et étrangères*, 1er février 1932, Tome C, n°1, p. 23.

³³⁶ *Le Génie civil : revue générale des industries françaises et étrangères*, 9 octobre 1937, 57ème année, Tome CXI, n°15, n°2878, p. 305.

³³⁷ *Le Génie civil : revue générale des industries françaises et étrangères*, 28 janvier 1939, 59ème année, n°2946, Tome CXIV, n°4, p. 27.

³³⁸ Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, Tome 209, juillet-décembre 1939, p. 988.

« On sait, depuis longtemps, qu'un voltmètre constitue une pile secondaire, c'est-à-dire que si l'on entoure l'une de ses électrodes d'une atmosphère d'oxygène et l'autre d'une atmosphère d'hydrogène, il apparaît entre celles-ci une force électromotrice dont la valeur théorique, calculée par les lois de la thermodynamique, est voisine de 1,17 Volts. De nombreuses recherches ont été poursuivies pour mettre au point des piles à gaz industrielles basées sur ce principe. Ces dernières années F. T. BACON a mis au point, au cours de recherches subventionnées par l'Electrical Research Association et le Ministry of Fuel and Power de Grande Bretagne, une pile à H et O sous pression qui a donné au laboratoire des résultats prometteurs. »³³⁹

Gaston Remenieras ajoute que cette « pile à gaz », peut être « conjuguée avec un électrolyseur sous pression » et qu'elle aurait un rendement en énergie « assez peu inférieur à celui d'un accumulateur au plomb ». S'il la voit « particulièrement adaptée à la traction des véhicules », il reconnaît cependant que « l'appareil ne semble pas encore au point » et que « l'on ne possède aucune information sur son prix de revient »³⁴⁰. Si l'EDF envisage avant tout la technique dans une perspective de restitution de l'énergie stockée, il n'est pas impossible que le CASDN, pour sa part, en prenne connaissance dans le cadre de ses travaux relatifs à la conquête spatiale. Au vu de la situation outre-Atlantique, où les recherches sont menées avec d'autres objectifs³⁴¹, c'est cependant peu probable. Plus simplement, militaires et politiques français promeuvent de manière générale à cette période l'appropriation des avancées scientifiques et techniques qui auraient la capacité de faire basculer le rapport de force en faveur du pays dans un espace de concurrence internationale. Le « soft power »³⁴² américain en matière de science, c'est-à-dire la capacité d'influence culturelle et symbolique des États-Unis sur le reste du monde, et l'accroissement du complexe du retard en France doivent aussi être à la source de cette prise de décision³⁴³.

Comme l'explique d'ailleurs Yves Bréelle, qui est embauché à l'IFP en 1960 pour travailler à la Direction des recherches avancées, « tout ce qui se faisait là-bas devait être copié »³⁴⁴. Pierre Aigrain

³³⁹ EDF, Service des études et recherches hydrauliques, « Vue d'ensemble sur les divers procédés de stockage de l'énergie », mai 1956, pp. 29-30.

³⁴⁰ EDF, Service des études et recherches hydrauliques, « Vue d'ensemble sur les divers procédés de stockage de l'énergie », mai 1956, p. 31.

³⁴¹ Voir : Chapitre premier. Les recherches sur les piles à combustible aux États-Unis n'ont pas pour but la conquête spatiale à la fin des années cinquante.

³⁴² NYE, Joseph N., « Soft Power », in *Foreign Policy*, n°80, 1990, pp. 153-171.

³⁴³ Comme le révèlent William E. Odom et Robert Dujarric, cette situation n'a pas évolué. Les États-Unis exercent toujours une influence prépondérante en termes de recherche scientifique, de technologie et d'enseignement supérieur. Voir : ODOM, William E., DUJARRIC, Robert, *America's Inadvertent Empire*, Yale University Press, 2004, pp. 161-187.

³⁴⁴ Entretien avec Yves Bréelle, Caumont, octobre 2016.

reconnaît lui aussi plus tard que « le fait que les États-Unis jouissent d'une position privilégiée, qu'une partie considérable de l'activité de recherche scientifique et technique soit réalisée aux États-Unis a eu pour conséquence que tout ce qui se passait aux États-Unis était considéré comme un phénomène mondial »³⁴⁵. C'est donc très certainement dans cette optique que le CASDN, qui de par ses statuts officiels joue un rôle dans la surveillance et le contrôle du développement de dispositifs nouveaux à l'étranger, s'intéresse aux piles à combustible : dans son projet de « partie scientifique » inclus dans son plan général de recherche du renseignement et daté du 10 janvier 1959, il recommande déjà à la Défense d'examiner particulièrement à « la transformation directe de l'énergie chimique en électricité ».³⁴⁶ Notons aussi que les piles à combustible profitent d'un regain d'intérêt dans la presse française spécialisée à cette époque. En octobre 1956, la revue *Atomes* fait par exemple état de ces générateurs susceptibles « de concurrencer l'énergie atomique » :

« Bien que cette nouvelle technique ne soit pas basée sur l'emploi d'un combustible nouveau, elle permet cependant d'utiliser avec un rendement considérablement accru les sources classiques d'énergie : charbon, huiles minérales et gaz naturels dont l'épuisement progressif pose de si graves problèmes à l'humanité. »³⁴⁷

Simultanément à Meudon-Bellevue, Maurice Bonnemay remplace René Audubert. Les activités du Laboratoire d'électrolyse tournent alors autour de l'étude « des propriétés électrochimiques des métaux et activité électronique » (propriétés catalytiques des surfaces métalliques en liaison avec les propriétés électrochimiques, adsorption et courbes de polarisation, adsorption des noirs de platine en phase liquide et gazeuse), du « mécanisme de décharge des ions » (dans le cas du cadmium), du « mécanisme d'établissement des potentiels d'électrodes » (les échanges ioniques entre une électrode et une solution d'un sel du métal dont elle est constituée), de la « porosité des revêtements » (le comportement électrochimique des électrodes recouvertes de couches de vernis isolants), du « mécanisme de fonctionnement des bains de chromage » et du « rôle des ultrasons sur les phénomènes électrochimiques »³⁴⁸. En deux ans, les recherches se transforment : Maurice Bonnemay les redirige. À côté de l'étude du « mécanisme de l'électrolyse à l'aide des éléments marqués », « des potentiels d'électrodes recouvertes de matières isolantes », de la « structure d'électrodes » ou de « l'effet des températures des mélanges d'électrolytes » est évoquée une rubrique « recherches diverses » dans la liste du rapport d'activité de l'établissement dont il est le directeur. Le commentaire

³⁴⁵ Entretien de Pierre Aigrain sur Europe 1, le 1^{er} juin 1973.

³⁴⁶ CASDN, « Plan de recherche du renseignement. Question scientifique », 10 janvier 1959, p. 4.

³⁴⁷ *Atomes*, n°126, octobre 1956, p. 314.

³⁴⁸ CNRS, « Rapport sur l'activité générale du CNRS », octobre 1956-octobre 1957, p. 44.

l'accompagnant indique ainsi que des travaux inclassables ont porté sur « les propriétés électrochimiques des semi-conducteurs, la polarographie oscillographique et les piles à gaz »³⁴⁹. S'il avait précédemment été fait mention au CNRS d'expérimentations partiellement corrélées au cours des années précédentes, notamment de la part des professeurs Sator³⁵⁰ et Wolfers de la Faculté des sciences d'Alger sur « les piles à solvants organiques », de M. Bernanose de la Faculté des sciences de Nancy sur « les piles à électrolytes fluorescents »³⁵¹ en 1949 et même de Maurice Bonnemay et du professeur Muxart sur « des piles de température, des piles en milieu de sel fondu, des piles en milieu aqueux et de la pile Ag/Agel (dans le chlorure d'argent fondu et dans les solutions aqueuses de NaCl »³⁵² en 1956, c'est la première fois que les piles à combustible font véritablement leur apparition en tant que telles au CNRS. Or, Maurice Bonnemay n'est pas un simple chercheur. C'est un entrepreneur attiré par « la tradition d'ingénierie et d'innovation des "hommes de métier" du CNAM »³⁵³. Les perspectives amenées par la « vague de publicité »³⁵⁴ autour de la technique venue des États-Unis représentent pour lui une occasion unique de combiner des recherches à la fois fondamentales et appliquées, de récolter des fonds et de légitimer un peu plus une discipline électrochimique encore jeune.

D'autres organismes tournés vers les applications commerciales du procédé commencent également à se positionner. À l'IFP, Odile Bloch rédige notamment un rapport sur les possibilités économiques que celui-ci pourrait offrir. Mais, plus généralement, l'institut procède à la sélection des filières les plus prometteuses³⁵⁵. Le Gaz de France, de son côté, agit de la même manière et porte son choix sur les piles à carbonates fondus qui sont, à cette date, les « plus originales ». De plus, explique-t-il, elles ont l'avantage de ne « pas encore être étudiées par les centres de recherche américains »³⁵⁶. Finalement, le CASDN³⁵⁷ prend l'initiative d'organiser une réunion « de pure information » sur le

³⁴⁹ CNRS, « Rapport sur l'activité générale du CNRS », octobre 1958-octobre 1959, p. 66.

³⁵⁰ Ministère de l'Éducation nationale, « Bulletin du CNRS », série A, numéro 2, 1949, p. 53

³⁵¹ Ministère de l'Éducation nationale, « Bulletin du CNRS », série A, numéro 1, 1949, p. 59

³⁵² CNRS, Laboratoire d'électrolyse, « Rapport Bellevue », 1956, p. 2.

³⁵³ TEISSIER, Pierre, *op. cit.*, 2015, p. 46.

³⁵⁴ SCHAFFER, Gerrit Jan, *Fuel Cells for the future. A contribution to technology forecasting from a technology dynamics perspective*, thèse de doctorat, Université de Twente, 1998, p. 143.

³⁵⁵ IFP, « Historique du programme de développement de piles à combustible hydrogène-air-potasse mené par l'Institut français du pétrole », S. 03/CM, 10 mars 1979, p. 1.

³⁵⁶ Gaz de France, « Historique du programme de recherche sur les piles à combustible à carbonates fondus mené par le Gaz de France », 9 mai 1979, p. 1.

³⁵⁷ En 1960, le CASDN est composé de : Jean Guérin, général de Corps d'Armée, Pierre Besson, ingénieur général des Ponts et Chaussées, Léon Binet, membre de l'Académie des sciences, président de l'Académie de médecine et doyen de la Faculté de médecine de Paris, Louis le Prince de Broglie, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, prix Nobel de physique, Georges Champetier, professeur à la Faculté des sciences de l'Université de Paris, directeur des études à l'École de physique et de chimie industrielles, Jean Coulomb, directeur général du CNRS, André-Louis Danjon, membre de l'Académie des sciences, directeur de l'Observatoire de Paris, Pierre Masse, commissaire général au plan de modernisation et d'équipement, Joseph Peres, membre de l'académie des sciences, doyen de la Faculté des sciences de l'Université de Paris, Francis Perrin, membre de l'Académie des sciences, professeur au Collège de France, Haut-

thème des « piles à gaz » le 24 juin 1959. La date n'est pas choisie au hasard : c'est le moment même où la DGRST met en place le système des actions concertées³⁵⁸. Quelques jours auparavant, « l'interconversion des formes d'énergie » avait été retenue comme un des thèmes principaux et le général Guérin faisait état de son intérêt pour les piles à combustible à l'ensemble des armées³⁵⁹. Quoiqu'il en soit, le CASDN représente le lieu où se joue la dernière phase, dite de l'objet-frontière, grâce à laquelle les recherches sur les piles à combustible vont se concrétiser en France. Ce qui structure ainsi les débuts de la connaissance du problème, c'est d'abord un processus d'organisation sociale par lequel des choix sont opérés et des faits interprétés. Le Comité décide de convier à la réunion, qui a lieu à la salle des conférences de l'EMGDN (État-Major général de la Défense nationale) à Paris, plusieurs représentants d'institutions et d'entreprises potentiellement concernées par la thématique, dont l'IFP (Jean-Claude Balaceanu), le CNRS (Maurice Bonnemay), l'EDF (Gaston Remenieras), le CNET et l'ONERA³⁶⁰.

Lors de l'évènement, c'est encore une fois le complexe du retard sur l'étranger qui reste l'argument majeur. À ce sujet, Michel Callon souligne que Maurice Bonnemay - qui est chargé d'exposer le thème - « consacre la majeure partie de son intervention à une description exhaustive des réalisations américaines, anglaises, allemandes, ou soviétiques » et qu'à l'écouter, « les auditeurs devaient ressentir comme scandaleuse l'absence de la France dans cette aventure »³⁶¹. Dans une lettre envoyée le mois suivant aux directeurs de plusieurs organismes (CNRS, EDF, CERCHAR, IFP, CNET,

commissaire à l'énergie atomique, Henri Pieron, professeur honoraire au Collège de France, directeur honoraire de l'Institut de psychologie de l'Université de Paris, directeur de l'Institut national d'études du travail et d'orientation professionnelle, Georges Poivilliers, membre de l'Académie des sciences, directeur de l'École centrale des arts et manufactures, Pierre Renouvin, membre de l'Académie des sciences morales et politiques, doyen honoraire, professeur à la Faculté des lettres et sciences humaines de l'Université de Paris, président de la Fondation nationale des sciences politiques, Yves Rocard, professeur à la Faculté des sciences de l'Université de Paris, directeur du Laboratoire de physique de l'École normale supérieure, Maurice Roy, membre de l'Académie des sciences, professeur à l'École polytechnique, directeur de l'Office national d'études et de recherches aéronautiques, Pierre Tardi, membre de l'académie des sciences, professeur à l'École polytechnique. Source : Général Guérin, « Note sur le Comité d'action scientifique de la Défense nationale », le 9 novembre 1960, annexe I.

³⁵⁸ Dans une lettre au Secrétaire d'État auprès du Premier ministre et datée du 27 mai 1959, le général Guérin exprime son souhait de collaboration avec la DGRST : « [Le CASDN] est partisan de la création d'un Fonds de développement de la recherche scientifique et technique assez largement alimenté et souhaite être associé, d'une façon ou d'une autre, à la politique de gestion de ce fonds. Sur ce dernier point et dans un but de simplification il s'estime qualifié, notamment en vertu de l'article I2 de l'ordonnance du 7 janvier sur l'organisation de la défense, et souhaite être accrédité pour représenter au sein des instances de gestion du fonds l'ensemble des organismes de recherche intéressant la défense, notamment les directions techniques des Forces armées. »

³⁵⁹ Lettre du général Guérin datée du 16 juin 1959 à destination de la Division Renseignement, de l'ARMET, de la Section scientifique de la Marine, du Bureau scientifique de l'Armée de l'Air, des Services de santé des Armées, de la DEFA, de la DCCAN et de la Direction des Poudres, Établissement d'un plan de recherche relatif au renseignement scientifique, projet de liste.

³⁶⁰ CALLON, Michel, *Production des technologies nouvelles et appropriation du long terme. Le cas de deux actions concertées : conversion des énergies et électrotechnique nouvelle, Le véhicule électrique*, point nodal 1, Cordes, 1978, p. 71.

³⁶¹ CALLON, Michel, *Ibid.*, 1978, p. 71.

ONERA, SEFT, Direction centrale des constructions et armes navales et Services techniques des télécommunications de l'Air), le général Guérin s'appuie une nouvelle fois sur cette thématique pour inviter à l'instauration d'un « groupe de travail »³⁶² sur la technique :

« Cette réunion, de pure information, a permis de constater les progrès réalisés à l'étranger dans les recherches concernant la transformation directe d'énergie chimique en énergie électrique par l'intermédiaire des "Piles à gaz". Ce problème étant très peu étudié en France, il a été convenu de réunir un groupe de travail destiné d'une part à faire le point de l'intérêt présenté par les différentes solutions possibles, d'autre part, à proposer éventuellement les mesures nécessaires pour l'organisation des recherches. »³⁶³

Dès lors, il propose à Pierre Aigrain et Marcel Prettre de rejoindre l'équipe³⁶⁴ et d'organiser la première séance du groupe de travail le 17 septembre suivant sous la présidence du général de brigade Brison, son adjoint au CASDN. À cette date, sont donc présents Marcel Prettre, Maurice Bonnemay, Maurice Letort, Gaston Remenieras, le directeur scientifique « Énergie et propulsion » de l'ONERA Jean Surugue, le chef du Laboratoire d'analyse Chimie Spectrographie du CNET M. Ducret, Jean-Claude Balaceanu, le délégué général adjoint de la Direction des études et techniques nouvelles du Gaz de France M. Renaudie, l'adjoint au chef du Centre d'essais et recherches du LANDY (Gaz de France) M. Gaudry, l'ingénieur en chef Roche de la Direction des Poudres, l'ingénieur en chef Yerle de la DCCAN (Direction centrale des constructions et armes navales), l'ingénieur en chef Bertrais de la STTA (Services techniques des télécommunications de l'Air), l'ingénieur en chef Levitt de la SEFT (Section d'étude et fabrication des télécommunications), et enfin pour la Défense le chef de Bataillon Duffet, le capitaine Bommier et les colonels Lochard et Colin³⁶⁵. Après avoir ouvert la séance, le général Brison demande si des observations sont à faire depuis la réunion du 24 juin.

³⁶² La création de groupes de travail sur certaines questions scientifiques avait été suggérée par le général Guérin à l'ensemble des représentants des Armées (État-Major général de la Défense nationale, ARMET, Marine, DFA, DTI, etc.) lors d'une réunion organisée par le CASDN le 16 juin 1959 sur le thème du renseignement scientifique. Il avait alors souligné « l'intérêt que présenterait la constitution d'un certain nombre de "brain trusts", sorte de groupes de travail spécialisés correspondant à autant de rubriques distinctes, qui assisteraient la Section de Renseignement scientifique dans l'établissement des synthèses nécessaires au commandement. De tels groupes définiraient, en outre, plus précisément ce qu'il faut rechercher. »

³⁶³ Lettre du général Guérin aux directeurs du CNRS, de l'EDF, du CERCHAR, de l'IFP, du CNET, de l'ONERA, de la SEFT, de la DCCAN (Direction centrale des constructions et armes navales) et des Services techniques des télécommunications de l'Air, 8 juillet 1959.

³⁶⁴ Lettre du général Guérin à Pierre Aigrain et Marcel Prettre, le 8 juillet 1959 : « Le 24 juin 1959 s'est tenue à Paris, sous les auspices du Comité d'action scientifique de la Défense nationale, une réunion qui se proposait de faire le point de la question de la transformation directe d'énergie chimique en énergie électrique par l'intermédiaire des "piles à gaz". [...] Il a été décidé qu'un groupe de travail serait constitué avec les personnalités présentes. Ces dernières ont demandé que votre concours soit sollicité dès que possible. »

³⁶⁵ Invité, Pierre Aigrain est excusé.

Messieurs Yerle et Levitt font immédiatement remarquer que « des puissances de quelques watts d'une part et de quelques dizaines de kW d'autre part présenteraient très rapidement un intérêt militaire certain. »³⁶⁶ Devant l'intérêt affiché de la Défense, le général Brison demande à Maurice Bonnemay et Marcel Prettre s'il est déjà possible d'arrêter un programme. Le directeur du Laboratoire d'électrolyse fait le point sur la situation :

« [...] si l'on sait réaliser actuellement des piles à combustible soit du type Carbox et surtout Hydrox, soit du type Redox, nos connaissances sur les processus fondamentaux de la catalyse hétérogène en phase gazeuse sont encore très limitées. Il s'en suit qu'il nous est très difficile d'augmenter les rendements de façon sensible sauf si l'on opère à des températures et pressions toujours plus élevées, ce qui pose des problèmes technologiques de plus en plus difficiles à résoudre. »³⁶⁷

À partir de ce postulat, Maurice Bonnemay va prendre en main l'orientation des recherches qu'il dirige vers la catalyse : avant tout dit-il, « il est donc essentiel de mieux connaître les phénomènes en eux-mêmes afin de pouvoir accélérer les réactions d'oxydation et de réduction dans les divers types de piles par des moyens adéquats. »³⁶⁸ Pour lui, en agissant de cette manière, il sera ensuite possible de faire un choix parmi les matériaux susceptibles d'être utilisés et d'en déterminer la structure idéale permettant une meilleure activité catalytique et une plus grande inaltérabilité vis-à-vis des produits. Jean Surugue confirme d'ailleurs que l'ONERA pourra fabriquer des éléments de piles si on lui définit les matériaux à utiliser et les éléments à réaliser. Marcel Prettre est du même avis que son collègue du CNRS : si « les phénomènes de catalyse sont d'une importance déterminante dans les processus physico-chimiques dont les piles à combustible sont le siège », leur réalisation « exige que soient approfondies les connaissances en ce domaine. »³⁶⁹ Personne ne remet en doute ces propos qui constituent un « discours fort », au sens d'Erving Goffman³⁷⁰. D'une part, le fonctionnement général de la technique leur donne raison : si l'intérêt des piles à combustible réside selon Jean Hladik³⁷¹ dans leur possibilité d'échapper « à la limitation que les lois de la nature imposent au rendement lors de la

³⁶⁶ CASDN, « Compte-rendu de la séance tenue par le Groupe de travail Piles à gaz le jeudi 17 septembre 1959 à 15 heures à la salle des conférences de l'État-Major général de la Défense nationale », p. 2.

³⁶⁷ CASDN, « Compte-rendu de la séance tenue par le Groupe de travail Piles à gaz le jeudi 17 septembre 1959 à 15 heures à la salle des conférences de l'État-Major général de la Défense nationale », p. 3.

³⁶⁸ CASDN, « Compte-rendu de la séance tenue par le Groupe de travail Piles à gaz le jeudi 17 septembre 1959 à 15 heures à la salle des conférences de l'État-Major général de la Défense nationale », p. 3.

³⁶⁹ CASDN, « Compte-rendu de la séance tenue par le Groupe de travail Piles à gaz le jeudi 17 septembre 1959 à 15 heures à la salle des conférences de l'État-Major général de la Défense nationale », p. 4.

³⁷⁰ GOFFMAN, Erving, *Asiles. Études sur la condition sociale des malades mentaux*, Éditions de Minuit, 1968.

³⁷¹ Jean Hladik, qui évolue dans l'entourage de Geneviève Morand, soutiendra en 1966 à la Faculté des sciences de Paris une thèse intitulée « Études chronoampérométriques dans l'eutectique chlorure de lithium-chlorure de potassium fondu et solide ».

conversion de l'énergie chimique en énergie mécanique par l'intermédiaire des moteurs thermiques »³⁷² - en d'autres termes au cycle de Carnot -, des phénomènes de polarisation (d'activation, de résistance et de concentration) viennent entraîner des pertes d'énergie. C'est donc ce point précis qu'il s'agit de traiter en priorité.

Or, un des principaux moyens pour y parvenir³⁷³ est d'intervenir sur l'amélioration des vitesses des réactions électrochimiques mises en jeu, qui sont l'oxydation du combustible à l'anode et la réduction de l'oxygène à la cathode. Dans ces circonstances, les électrodes, qui jouent aussi le rôle de catalyseurs en plus de conducteurs d'électrons, deviennent le cœur du problème. D'autre part, peu de personnes peuvent se targuer d'en savoir autant que les deux universitaires sur les piles à combustible, et en particulier que Maurice Bonnemay dont le laboratoire a établi dès 1947 les bases théoriques d'un programme centré sur « l'électrochimie vue du côté de l'électrode »³⁷⁴. Maurice Letort et Gaston Remenieras expliquent que jusqu'à présent le Cerchar et l'EDF se sont contentés « de suivre la question des piles à combustible par les publications qui en traitent. » A l'IFP, Jean-Claude Balaceanu n'est que légèrement plus avancé : il a établi une bibliographie et effectué quelques recherches sur une pile « Redox (ferreux-ferrique) brûlant de l'hydrogène »³⁷⁵ avec pour objectif d'en venir à utiliser du méthanol. Il considère que les électrodes constituent « un problème majeur » mais que « l'IFP n'a pas la possibilité de le traiter » et doit donc travailler avec des électrodes qui lui sont fournis. Maurice Bonnemay et Marcel Prettre sont ainsi vus comme les deux seuls spécialistes de la structure des piles, détenant la légitimité et l'autorité scientifiques sur le sujet. C'est à partir de l'avis de ces deux « leaders d'opinion »³⁷⁶ que les autres se positionnent. Il ressort cependant de la discussion que « l'étude générale de la catalyse et l'expérimentation de toutes les électrodes possibles seraient trop vastes pour être menées à bien dans des délais respectables » et qu'il est donc préférable de se concentrer les recherches sur certains types uniquement.

De plus, le groupe de travail fait état de l'accélération des réalisations étrangères : tandis qu'en Allemagne la pile du professeur Justi à pression atmosphérique et hydrogène semble « proche de la réalisation industrielle », une pile hollandaise à l'oxyde de carbone aurait déjà fonctionné pendant six mois, ce qui impliquerait que « les problèmes de tenue des joints et autres points délicats sur le plan

³⁷² HLADIK, Jean, *Les piles électriques*, Collection « Que sais-je ? », Presses universitaires de France, 1965, p. 66.

³⁷³ Un autre moyen étant par exemple, dans certains types de piles à combustible, d'intervenir au niveau de la polarisation de résistance, en réduisant la résistance de l'électrolyte ou en augmentant sa conductivité ionique.

³⁷⁴ CNRS, comité de direction du Laboratoire d'électrolyse, « procès-verbal de la réunion du 12 mars 1975 », p. 2.

³⁷⁵ CASDN, « Compte-rendu de la séance tenue par le Groupe de travail Piles à gaz le jeudi 17 septembre 1959 à 15 heures à la salle des conférences de l'État-Major général de la Défense nationale », p. 5.

³⁷⁶ KATZ, Elihu, LAZARFELD, Paul, *Personal Influence. The Part played by People in the Flow of Mass Communications*, Transaction Publishers, 2009 (1955), p. 32.

technologique auraient reçu une solution satisfaisante. » Aux États-Unis, l'Esso Research aurait aussi identifié les produits d'oxydation neutralisant l'électrolyte au sein d'une « pile oxygène-hydrogène ou oxygène-hydrocarbures légers » à 200°C et 60 kg de pression en milieu alcalin. Dans ce contexte, les travaux à entreprendre sont dirigés vers « l'approche expérimentale » d'une pile Redox et la « réalisation pratique » d'une pile à hydrogène, « formule qui semble être la plus éprouvée et avoir conduit les chercheurs étrangers à des résultats indiscutables. »³⁷⁷ C'est bien une approche *systémique* des piles à combustible qui est ici décidée : c'est en construisant des prototypes complets que l'on va tenter de résoudre le problème des électrodes et de la catalyse, pas en les isolant. Cette logique purement techno-scientifique, favorisant de nouvelles méthodes d'expérimentation et le renforcement de la collaboration entre théoriciens et techniciens, renvoie à des courants de recherche en pleine expansion aux États-Unis depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale, par exemple en science des matériaux. Lillian Hoddeson a notamment montré ce que l'invention du transistor point-contact doit à la réorganisation du département de physique des laboratoires Bell, avec l'entrée en son sein d'une équipe de recherche pluridisciplinaire et la réorientation des études vers le sous-champ de l'état solide de la matière³⁷⁸.

Au CASDN, cette collaboration entre pairs, preuve du caractère essentiellement distribué de l'activité de connaissance scientifique contemporaine³⁷⁹, prend forme : les tâches sont réparties entre les membres du groupe. Maurice Bonnemay prend la direction des études « sous leurs aspects théorique et expérimental », épaulé par Jean-Claude Balaceanu. À Marcel Prettre, il confie les questions d'ordre fondamental portant sur la catalyse et les vitesses de réaction et à l'ONERA celles d'ordre technologique touchant la fabrication d'électrodes, de diaphragmes, etc. Le concours du Gaz de France³⁸⁰ et de l'ONIA (Office national industriel de l'azote)³⁸¹ pourra en outre être sollicité par l'intermédiaire de la Direction des Poudres. Bien sûr, cette mise à contribution de l'Institut de recherche sur la catalyse et du Laboratoire d'Électrolyse, « dont l'intérêt pour la Défense nationale n'a pas échappé aux directions techniques », ne se conçoit pas « sans une aide financière du CASDN »³⁸².

³⁷⁷ CASDN, « Compte-rendu de la séance tenue par le Groupe de travail Piles à gaz le jeudi 17 septembre 1959 à 15 heures à la salle des conférences de l'État-Major général de la Défense nationale », p. 5.

³⁷⁸ HODDESON, Lillian, « The Discovery of the Point-Contact Transistor », in *Historical Studies in the Physical Sciences*, Vol. 12, n°1, 1981, pp. 41-76.

³⁷⁹ THARGARD, Paul, « Collaborative Knowledge », in *Noûs*, n°31, 1997, pp. 241-262.

³⁸⁰ Dans une lettre datée du 30 octobre 1959 à destination de Marcel Prettre, de Pierre Aigrain, de Maurice Bonnemay et du directeur de l'IFP, le général Guérin indique que « la Direction des Études et Techniques nouvelles du Gaz de France se déclare prête à collaborer sur le plan pratique aux travaux scientifiques du Groupe. Cette prise de position est intéressante et permettrait notamment d'élargir dès à présent le champ des recherches à entreprendre. »

³⁸¹ Dans une lettre datée du 3 octobre 1959, le général Guérin prévient le directeur de l'ONIA : « [...] il est à prévoir que votre concours sera demandé pour la fourniture de certaines quantités de gaz combustibles de composition déterminée. »

³⁸² Lettre du général Guérin au directeur général du CNRS, 3 octobre 1959.

De son côté, la DGRST, qui débute à peine son action, est moins avancée. Le Premier ministre souhaitant présenter la loi-programme sur la recherche lors de la session parlementaire du 26 avril 1960, les premières réunions des différents comités d'études ont toutes lieu entre le 8 et le 15 janvier 1960³⁸³, au 103 rue de l'Université à Paris, siège de la Délégation. Le CCRST, qui vient d'élire Maurice Ponte et Jean Germain comme président et vice-président³⁸⁴, donne pour sa part aux comités jusqu'au 15 mars pour exposer sérieusement leurs motifs³⁸⁵. Le comité « Conversion des énergies » se rassemble donc pour la première fois le 8 janvier. Pierre Piganiol ouvre la séance. « Le désir du Gouvernement, dit-il, est de connaître les moyens qui peuvent permettre de hâter la découverte, dans des domaines d'un intérêt national certain, en facilitant la recherche, tant publique que privée, individuelle que collective »³⁸⁶. Pour chaque thème, il s'agit tout d'abord de dresser un inventaire des moyens humains et matériels actuels, de faire le compte des résultats acquis en France et à l'étranger et d'établir quels sont les problèmes à résoudre. À partir de là seront classés les besoins d'action par ordre d'urgence, les nouvelles structures à créer et les appuis financiers qui devront être fournis aux laboratoires déjà existants. Pierre Piganiol recommande de « travailler très vite » et de « préparer avec soin l'argumentation qui permettra de plaider l'importance nationale » des actions, afin « d'accrocher le thème Conversion des énergies à la première tranche de programme du Gouvernement, quitte à remplir par la suite le cadre initial ».

Après que le délégué général s'est retiré de l'assemblée, le nouveau président du comité, Jacques Yvon, lance un tour de table pour faire ressortir les idées principales. Il est convenu que des rapports préliminaires sur l'état des recherches doivent être préparés par les différents spécialistes dans les domaines retenus. Pierre Aigrain, Charles Guillaud et Philippe Olmer héritent des « phénomènes thermo-électriques », Louis Weil de la « mécanique et chaleur », Gaston Remenieras de « l'accumulation d'énergie » et Maurice Bonnemay, Jean Germain et Maurice Letort des « piles à combustible ». Il est également prévu de demander au professeur Perot, de la faculté des sciences d'Alger, de venir présenter ses travaux sur l'énergie solaire lors d'une prochaine séance. Lors de la séance suivante, Jacques Yvon détaille la manière dont le comité doit fonctionner. Il s'agit de ne « pas perdre de temps en discussions mineures », de ne « pas faire de promesses prématurées » et de penser aux autres spécialistes qui ne siègent pas en faisant appel à eux pour des consultations visant à renforcer l'information disponible. D'autre part, il établit le mode d'action qui va régir les décisions

³⁸³ René Marzocchi, « Note sur les dates de première réunion des Comités d'études », DGRST, 24 décembre 1960.

³⁸⁴ CCRST, « Réunion du 22 décembre 1959 », procès-verbal, p. 1.

³⁸⁵ CCRST, « Réunion du 3 février 1960 », procès-verbal, p. 1.

³⁸⁶ DGRST, « Comité d'études : Conversion des énergies. Réunion du 8 janvier 1960 », procès-verbal, p. 2.

futures : les prévisions de programme doivent porter sur cinq années ; une somme globale de « dix millions de nouveaux francs » est avancée ; il est préférable d'aider « des organismes déjà existants, plutôt que d'en créer » ; l'action du comité « doit s'accompagner d'une publicité judicieusement suscitée et contrôlée »³⁸⁷. Le 29 janvier 1960, le rapport sur les piles à combustible est présenté par Maurice Bonnemay. Des progrès considérables ont été obtenus depuis cinq à dix ans, commente-t-il, mais aucune pile ne semble apparemment avoir atteint le stade du développement industriel :

« Si certaines réalisations sont en service à des fins exceptionnelles (militaires surtout), elles sont certainement peu nombreuses et fort coûteuses. Leur étude est très complexe et met en jeu un grand nombre de phénomènes touchant à la catalyse et à la cinétique des réactions. Ce qui implique des recherches fondamentales et des recherches technologiques fortement intriquées, rendant très difficile l'élaboration d'un programme de recherches, d'autant qu'en France les premières études ne datent que de quelques mois. »³⁸⁸

Dans ce contexte, il réitère les recommandations faites quelques mois plus tôt au sein du groupe de travail du CASDN : il préconise à la fois de construire directement une pile expérimentale de type Bacon et de mener des recherches fondamentales. Charles Guillaud acquiesce, reconnaissant l'intérêt de « se faire la main » sur un modèle qui existe déjà mais il estime « qu'afin d'économiser du temps et de l'énergie créatrice », il vaudrait mieux acheter les brevets. Pierre Aigrain intervient aussi et propose d'entrer en relation directe avec Francis T. Bacon pour collaborer avec lui. Une démarche qui serait facilitée par le fait que son laboratoire vient de signer un accord avec la firme Patterson Moos sur l'utilisation de semi-conducteurs dans les piles à combustible. Maurice Letort prend quant à lui de la hauteur pour signaler qu'il serait plus intéressant de travailler sur les « piles de puissance » que sur les « piles légères » pour engins. De plus, ajoute-t-il, « le problème des piles est suivi de très près par de nombreux organismes (Cerchar, Institut français du pétrole, ONERA, ONIA, etc.) » mais « l'importance des moyens de recherche à mettre en œuvre a, jusqu'ici, empêché toute étude ». Il pense qu'une action concertée entreprise par le gouvernement sur recommandation du comité déclencherait la mise en route « des recherches qui sont en puissance » dans ces différentes institutions. Si l'on note l'importance accordée aux piles à combustible dès les débuts du comité, il s'agit toutefois d'un thème de recherches parmi d'autres.

³⁸⁷ DGRST, « Comité d'études : Conversion des énergies. Réunion du 15 janvier 1960 », procès-verbal, p. 2.

³⁸⁸ DGRST, « Comité d'études : Conversion des énergies. Réunion du 29 janvier 1960 », procès-verbal, pp. 2-3.

Pierre Aigrain propose même une classification des techniques et leur répartition entre les différents membres. Parmi celles-ci, le stockage de l'énergie retient en particulier l'attention. Gaston Remenieras commente les études qu'il a réalisées à l'EDF depuis 1956 : accumulateurs hydrauliques par pompage, accumulateurs de chaleur, accumulateurs électriques, etc. Une des voies les plus prometteuses lui semble être l'accumulation d'air comprimé dans des poches souterraines. Une technique qui pourrait être favorisée par la création de cavités issues d'explosions nucléaires souterraines que « l'hostilité mondiale aux explosions aériennes » rendront « de plus en plus nombreuses »³⁸⁹. Le rapport sur les phénomènes thermo-électriques se concentre de son côté sur les techniques thermo-électriques, thermo-ioniques et photoélectriques avec une estimation de financement chiffrée à cinq millions de nouveaux francs. Encore une fois, la comparaison avec d'autres pays est au centre des débats. Il est ainsi dit que « les Américains ont établi deux rapports exhaustifs et circonstanciés de toutes les recherches relatives à ces thèmes » et que « la Russie est en tête de ces recherches, suivie de très près par l'Amérique ; malgré ses faibles moyens, la France est en troisième position »³⁹⁰. La même rhétorique se retrouve du côté de la thématique « mécanique et chaleur », où Louis Weil assure que « la France est exceptionnellement en retard dans le domaine thermique ». Il insiste sur la nécessité d'étudier des matériaux nouveaux, permettant de monter en température et de perfectionner les échangeurs de chaleur. Les autres membres du comité ne peuvent qu'approuver : ces deux domaines serviront à développer les autres conversions d'énergie.

Pendant ce temps, le CASDN continue d'organiser sa recherche. Une nouvelle réunion sur les « piles à gaz » a d'abord lieu le 11 février 1960. Au cours de celle-ci, il est décidé de confier la réalisation de six premiers prototypes de type Hydrox à la société Physimeca de Saclay, avec une livraison initialement prévue entre fin juin et début juillet. Assemblées à partir de corps de cellules usinés à Toulouse par l'ONIA et d'électrodes de nickel et de carbone produits par le CNRS, la SAFT (Société des accumulateurs fixes et de traction) et la CIPEL (Compagnie industrielle des piles électriques), ces piles ont vocation à servir de modèles exploratoires pour tous les organismes du groupe d'études. On retrouve bien là l'idée que Maurice Bonnemay avait exposée au comité « Conversion des énergies » : il s'agit avant tout de « se faire la main » sur des prototypes existants. Pour cette raison, tous les membres du groupe participent financièrement (à hauteur de 15 000 francs nouveaux) pour se faire remettre un jeu d'appareillage. Le 5 juillet 1960, un autre rassemblement se tient au sein des locaux du Laboratoire d'électrolyse du CNRS, en présence du capitaine de vaisseau Deméocq (président du groupe d'études), du directeur général honoraire du groupe des laboratoires de Bellevue Henri Gondet, de son sous-directeur Lucien Demon, de Maurice Bonnemay, de Odile Bloch, de Jean

³⁸⁹ DGRST, « Comité d'études : Conversion des énergies. Réunion du 29 janvier 1960 », procès-verbal, p. 2.

³⁹⁰ DGRST, « Comité d'études : Conversion des énergies. Réunion du 15 janvier 1960 », procès-verbal, p. 3.

Laroche et de M. Lalanne de l'ONIA, de Daniel Souriau du Gaz de France, de M. Renard du CERCHAR et du directeur des recherches de la CGE Gérard Lehmann. C'est d'ailleurs ce dernier qui ouvre la séance en communiquant sur la conférence sur la conversion des énergies tenue du 17 au 19 mai à Atlantic City sous l'égide de l'US Signal Corps. Le domaine des piles à combustible, indique-t-il, est celui « où la somme des connaissances acquises semblait être la plus importante mais où les publications étaient les plus rares »³⁹¹. Il signale toutefois la réalisation d'une pile Hydrox à membrane échangeuse d'ions de la General Electric pesant 15 kg, pouvant être « portée comme un havresac »³⁹², fonctionnant 14 heures sans recharge et d'une puissance de 200 watts, et d'autres types de piles utilisant des combustibles tels que le méthanol, l'éthanol ou le formol, « d'une utilisation beaucoup plus commode que les hydrocarbures eux-mêmes »³⁹³. Le flou semble ainsi perdurer du côté des membres du groupe d'études sur le choix de la filière à approfondir en priorité. D'autant plus que les prototypes de type Hydrox commandés à la société Physimeca n'ont pas pu être fournis dans les délais prévus à cause de problèmes de gestion : leur livraison est retardée au mois d'octobre.

À cette date justement, le général Guérin commence à rendre compte à Michel Debré, qui lui avait demandé quelques mois plus tôt de lui faire part de « son avis personnel sur les incidences militaires de la conjoncture scientifique tant internationale que nationale »³⁹⁴. Le 13 octobre 1960, il remet au cabinet du Premier Ministre un rapport dans lequel il affirme la constitution de groupes de travail autour de disciplines spécifiques, et notamment a) la chimie et les matériaux et b) la mécanique et l'énergie³⁹⁵. Et celles-ci sont en partie destinées, lui dit-il, à « confronter les points de vue des représentants des services scientifiques et techniques et de ceux des Professions »³⁹⁶ sur les « sources d'énergie » et « l'utilisation du pouvoir énergétique »³⁹⁷. L'organisation des activités est saluée par Michel Debré dans une lettre adressée au président du Conseil national du patronat français Georges Villiers. Sur les « piles à gaz », il s'exprime en ces termes :

« L'intérêt porté par la Défense nationale à ces sources d'énergie a conduit le CASDN à promouvoir un courant de recherche ordonné dans les milieux industriels. Ceux-ci, qui

³⁹¹ CASDN, « projet du procès-verbal de la réunion tenue le mardi 5 juillet 1960 à 15h30 par le groupe d'études des piles à gaz à la salle des conférences du Groupe des laboratoires du CNRS », le 18 juillet 1960, p. 2.

³⁹² CASDN, « projet du procès-verbal de la réunion tenue le mardi 5 juillet 1960 à 15h30 par le groupe d'études des piles à gaz à la salle des conférences du Groupe des laboratoires du CNRS », le 18 juillet 1960, p. 2.

³⁹³ CASDN, « projet du procès-verbal de la réunion tenue le mardi 5 juillet 1960 à 15h30 par le groupe d'études des piles à gaz à la salle des conférences du Groupe des laboratoires du CNRS », le 18 juillet 1960, p. 2.

³⁹⁴ Premier Ministre, « Instruction personnelle et secrète au Général Guérin, président du Comité d'action scientifique de la Défense nationale », le 28 mai 1960, p. 1.

³⁹⁵ Les autres groupes comprennent : c) Électronique ; d) Disciplines fondamentales ; e) Économie ; f) Sciences humaines ; g) Médecine.

³⁹⁶ Lettre du général Guérin au Premier Ministre, le 7 juillet 1960, p. 1.

³⁹⁷ Lettre du général Guérin au Premier Ministre, le 13 octobre 1960, p. 6.

hésitaient à aborder un problème énorme, ont vivement apprécié qu'une répartition des tâches soit recherchée avec eux, aboutissant à la définition de compartiments de recherche limités, accessibles, et généralement non concurrentiels. »³⁹⁸

Plusieurs éléments sont à retenir du début des recherches. Premièrement, le type d'études à mener est encore défini de manière sommaire : il a bien été décidé d'entamer, dans un cadre systémique, des recherches destinées à permettre l'acquisition d'une base de connaissances pratiques et à accroître la compréhension des phénomènes qui se jouent au sein des piles à combustible. Mais tout un ensemble de questions restent en suspens : faut-il étudier les hautes températures ou les basses températures ? Et à quoi la technique va-t-elle bien servir ? Est-elle plus utile pour alimenter en énergie des engins tels que les automobiles ou pour fournir de l'électricité à vaste échelle ? Et surtout, sont-ce des solutions viables économiquement parlant ? D'autre part, comme l'a expliqué Maurice Bonnemay, il reste de nombreuses zones d'ombre scientifiques dues à la complexité du procédé à élucider. Pour l'heure, tous les acteurs semblent donc seulement tomber d'accord sur le fait qu'il faut engager le pays dans cette voie. Comment ne le seraient-ils pas ? Elle s'inscrit parfaitement dans la ligne directrice fixée par la DGRST et le CASDN en agrégeant des intérêts à la fois politiques, industriels, économiques et scientifiques. Deuxièmement – et au contraire du type d'études – le type d'action à entreprendre est clairement établi. Si plusieurs institutions et entreprises ont commencé à tâter le terrain chacune de leur côté, c'est bien à l'État que revient la charge de regrouper les forces en présence et d'impulser des actions sur le sujet.

Ce mode d'intervention, déjà observé dans une certaine mesure au Royaume-Uni et aux États-Unis, va être ici caractérisé par la formation d'un *réseau social* évoluant autour de la technique. Dans notre cas d'étude, le réseau est composé par les relations existantes entre les organismes préoccupés par les piles à combustible – les laboratoires publics et privés – et entre les individus qui y sont rattachés, la DGRST et le CASDN assurant en son centre leur dynamique et la circulation des ressources financières. À ce niveau d'analyse, il est possible d'en ajouter un autre. En effet, les réunions régulières du CASDN et du comité « Conversion des énergies » représentent le socle sur lequel va se constituer un sous-ensemble de relations : un *collectif de pensée* scientifique³⁹⁹ émerge. Il ne s'agit d'ailleurs pas d'un fait social isolé à l'époque. Tous les comités de la DGRST, qu'ils traitent de l'exploitation des océans, de l'application de la génétique ou encore de la biologie moléculaire peuvent par exemple être considérés comme autant de collectifs de pensée, orientant ces sujets dans les voies théoriques et méthodologiques qu'ils estiment les plus adaptées, selon un *style de pensée*

³⁹⁸ Lettre du Premier Ministre au président du Conseil national du patronat, 1960, p. 5.

³⁹⁹ FLECK, Ludwik, *op. cit.*, 2008, p. 72.

qui leur est propre. La traduction de ce phénomène est directement perceptible pour les piles à combustible ; c'est tout le sens de la décision d'engager les études sous un angle systémique.

4.2 Dynamiques d'interaction entre militaires, universitaires et industriels

En 1961, la DGRST est officiellement instituée⁴⁰⁰. André Maréchal, professeur à la Faculté des sciences de Paris, y remplace Pierre Piganiol en tant que délégué général⁴⁰¹. En même temps, une loi-programme visant à doter l'organisme de crédits à la mesure de ses ambitions est votée⁴⁰². Celle-ci alloue 320 millions de francs nouveaux⁴⁰³ au Fonds de développement pour une durée de cinq années (de 1961 à 1965), avec pour premier objectif de « faire converger sur des problèmes particuliers les efforts d'hommes ou d'équipes disséminés entre des établissements distincts »⁴⁰⁴. Dans ce cadre, la conversion des énergies⁴⁰⁵ reçoit plus de 30 millions pour trois sujets d'étude : a) les méthodes et l'élaboration des matériaux intervenant dans les processus de conversion d'énergie (phénomènes thermoélectriques, photovoltaïques, thermoioniques, matériaux semi-conducteurs, hautes températures), b) l'énergie solaire et son utilisation à des fins industrielles ou dans le cadre d'une politique d'amélioration de l'habitat et c) les piles à combustible. Le comité, qui doit « explorer des voies ouvertes récemment par les progrès de la science fondamentale et rechercher les possibilités d'en tirer parti, en particulier pour équiper les régions déshéritées »⁴⁰⁶, peut débiter son action⁴⁰⁷.

⁴⁰⁰ Journal officiel, décret n°61-362 du 8 avril 1961 modifiant et complétant les dispositions du décret n°58-1144 du 28 novembre 1958 concernant la recherche scientifique et technique, 13 avril 1961, p. 3588.

⁴⁰¹ Le reste du bureau est composé de : Lucien Lanier (secrétaire général), sous-préfet hors classe, Léopold Escande (conseiller scientifique), directeur de l'École nationale supérieure d'électrotechnique, d'électronique et d'hydraulique de Toulouse, Raymond Poignant (conseiller juridique), maître des requêtes au Conseil d'Etat, Gérard Ducher (conseiller financier), conseiller référendaire à la Cour des comptes, Georges Dumesnil (relations avec le ministère des Affaires étrangères et les organisations internationales), agrégé de l'Université en sciences physiques, Louis Gros (relations avec le ministère des Affaires étrangères et les organisations internationales), administrateur civil, Jacques Baratte (conseiller technique), président de l'Académie d'agriculture, René Marzocchi (conseiller technique), sous-directeur d'études à l'École pratique des hautes études, Georges Rösch (conseiller technique), docteur en médecine.

⁴⁰² À noter que la DGRST se dote en même temps de son propre organe de presse : *Le progrès scientifique*.

⁴⁰³ Répartis comme suit : 130 millions pour la recherche spatiale, 190 millions pour les autres actions concertées et urgentes.

⁴⁰⁴ SY, Michel, Avis présenté au nom de la Commission des affaires culturelles, familiales et sociales sur le projet de loi-programme (n°825) relative à des actions complémentaires coordonnées de recherche scientifique et technique, annexe au procès-verbal de la première séance suivant le 16 décembre 1960, p. 2.

⁴⁰⁵ Entre 1961 et 1965, les actions concertées sont au nombre de 21. En 1961, on retrouve la Conversion des énergies, l'Exploitation des océans, la Biologie moléculaire, l'action Cancer et leucémie, l'action Fonctions et maladies du cerveau, l'Application de la génétique, la Nutrition animale et humaine, l'analyse démographique et sociale, les Sciences économiques et problèmes de développement. En 1962 est ajoutée l'Électronique puis en 1963 les Calculatrices, les Grandes accélérateurs, l'Automatisation, la Chimie macromoléculaire, la Mécanique, l'Habitat et Génie civil, les Sciences de la terre, l'Eau, la Technologie agricole et les Problèmes de planification. En 1964, sont encore ajoutées les actions concertées Instruments de mesure et Recherche atmosphérique.

⁴⁰⁶ SY, Michel, *Ibid.*, annexe au procès-verbal de la première séance suivant le 16 décembre 1960, p. 6.

⁴⁰⁷ À noter aussi que de nouveaux membres sont élus au CCRST en décembre 1960. Le comité est désormais composé de la manière suivante : Pierre Lelong (président), Charles Thibault (vice-président), Pierre Aigrain, René Fauvert, Robert Gessain, André Giraud, Robert Goetz, Raymond Latarjet, Maurice Letort, André Lichnerowicz, Maurice Ponte, Boris

Mais la mise en place effective de la DGRST ne signifie pas la fin du renouvellement des structures de la recherche scientifique au sein de l'État. La Défense poursuit notamment sa mutation dans le domaine, que Gaston Palewski n'hésite pas à qualifier plus tard de véritable « dictature du monde moderne »⁴⁰⁸. Le 5 avril 1961 est en effet créée la DMA afin d'unifier les différents départements scientifiques et techniques des armées. Placée sous la direction du général Gaston-Jean Lavaud et du colonel René Lévêque⁴⁰⁹, elle a notamment la charge des études et des réalisations de prototypes en matière d'armement⁴¹⁰. Et parmi les organes qu'elle regroupe⁴¹¹, la DRME vient répondre spécifiquement à la question de l'établissement, de l'organisation et de la coordination des programmes de recherche⁴¹². Ayant pour but de « faire l'inventaire des recherches scientifiques et techniques intéressant les armées, de déceler et d'intensifier les travaux, dits de pointe, susceptibles d'orienter à long terme la politique d'armement de la nation »⁴¹³, elle doit en outre engager la DMA à collaborer avec des organismes publics et des entreprises privés, notamment dans le domaine de la recherche fondamentale. Pour faciliter cette approche originale au sein de la Défense, ce sont deux universitaires habitués au processus de dialogue entre acteurs hétérogènes, deux « hommes-frontière », qui sont placés à sa tête : le physicien Lucien Malavard à la direction générale et Pierre Aigrain à la direction scientifique. Le reste de l'équipe comprend les ingénieurs Edouard Billon (recherche technique), Maurice Natta (sous-direction des moyens d'essais) et Hugues de L'Estoile (Bureau prospective et orientations). Dès le départ, Lucien Malavard met en place un système de recrutement hybride visant à favoriser les contacts avec l'extérieur. « L'armée va travailler davantage avec l'Université et l'Industrie »⁴¹⁴, explique-t-il. À la direction des recherches techniques et à la

Vodar. Voir : Journal officiel, décret du 6 décembre 1960 modifiant la composition du Comité consultatif de la recherche scientifique et technique, 9 décembre 1960, p. 11044,

⁴⁰⁸ Alors ministre d'État chargé de la Recherche scientifique et des Questions atomiques et spatiales, Gaston Palewski prononce en effet les mots suivants devant l'Assemblée nationale le 10 janvier 1963 : « S'il y a une dictature dans le monde moderne, c'est bien celle de la révolution des techniques dont la recherche scientifique est le cerveau. C'est elle qui dicte ses exigences aux administrateurs, aux entrepreneurs, aux gouvernants. C'est elle qui dit à l'éducation nationale que ce dont il s'agit surtout maintenant, c'est de former des techniciens, des chercheurs, des ingénieurs toujours plus nombreux. C'est elle qui dit aux armées que les armements classiques doivent maintenant céder leur primauté aux spatial et à l'atomique, aux armements scientifiques. »

⁴⁰⁹ Journal officiel, décret du 5 avril 1961 portant nomination d'un délégué ministériel pour l'armement, 6 avril 1961, p. 3348.

⁴¹⁰ Journal officiel, décret n°61-316 du 5 avril 1961 relatif aux programmes d'armement et d'infrastructure des armées, 6 avril 1961, p. 3342.

⁴¹¹ En plus de la DRME, la DMA a la charge de la Direction des poudres, la Direction des études et fabrications d'armement, la Direction technique et industrielle de l'aéronautique et la Direction centre des constructions et armes navales.

⁴¹² Journal officiel, décret n°61-394 du 21 avril 1961 fixant l'organisation générale et les attributions de la direction des recherches et moyens d'essais, 22 avril 1961, p. 3816.

⁴¹³ MENAHEM, Georges, « La direction de l'effort scientifique français par l'armée », in *Réseaux*, Vol. 4, n°17, 1986, p. 52.

⁴¹⁴ *Entreprise*, n°330, 30 décembre 1961.

direction des recherches scientifiques, il enrôle ainsi un tiers d'ingénieurs et de médecins militaires, un tiers d'ingénieurs et de scientifiques civils et un tiers d'officiers⁴¹⁵.

L'intégration de la recherche scientifique au sein des armées s'accélère de façon générale à cette période. Le temps où le député Charles Viatte s'indignait de l'absence de synergie entre les services de la Défense et l'espace académique⁴¹⁶ est révolu. Selon le CASDN, cette forme d'action se résume globalement en trois points : information mutuelle, orientation et recommandation. D'une part, et pour dépasser le stade de la simple documentation technique et scientifique, les armées entreprennent de pratiquer une interprétation attentive et critique des résultats publiés aussi bien en France qu'à l'étranger en partenariat avec les institutions civiles. D'autre part, l'expression des besoins de la Défense conduit à *assigner* à la recherche des objectifs précis. Ce qui passe par l'enrôlement de scientifiques dans des équipes militaires, comme c'est le cas à cette période pour les recherches spatiales qui se poursuivent sur les fusées Véronique, par la création de laboratoires hybrides tels que le Laboratoire de l'horloge atomique ou le Centre d'études pour la traduction automatique et par l'établissement de conventions pour l'étude d'un sujet défini, avec le CNRS par exemple. Enfin, des recommandations sont effectuées au gouvernement par le biais des ministres responsables et du CCRST pour une politique scientifique d'ensemble conciliant à la fois les intérêts de la Défense et les intérêts civils du pays.

Plus concrètement, la DMA commence à multiplier les liaisons en vue de développer l'interpénétration des recherches militaires et civiles. Et les progrès techniques engendrés ne doivent pas nécessairement être confisqués. Au contraire, ceux-ci doivent profiter « à l'ensemble de l'économie nationale, en particulier dans le domaine des télécommunications, de l'automatisation, de la physique des matériaux, de la mécanique, de l'optique, et de la chimie. »⁴¹⁷ La DMA encourage aussi à la préparation de brevets publics et de diplômes scientifiques par les officiers et techniciens de l'armée. À l'École polytechnique, le CASDN⁴¹⁸ prend par exemple l'initiative d'organiser dès 1960 des séminaires de chimie théorique structurale et de physique théorique pour les étudiants désirant se

⁴¹⁵ WEBER, Jean-Marc, *Un demi-siècle d'aéronautique en France. Études et recherches, Tome I*, Centre des hautes études de l'armement, 2008, p. 19.

⁴¹⁶ Dans la séance du 8 mars 1957 à l'Assemblée nationale, Charles Viatte déclare notamment : « [...] j'ai appris que les services du ministère de la Défense nationale ne disposaient même pas d'un recensement de tous les laboratoires de France ! Je ne vois vraiment pas comment on peut conduire la préparation d'opérations militaires - ce qui est le rôle de la Défense nationale - si l'on ne sait pas où se trouvent les laboratoires et les scientifiques auxquels on devra faire appel le cas échéant. » Voir : Assemblée nationale, séance du 8 mars 1957, p. 1405.

⁴¹⁷ *Entreprise*, n°330, 30 décembre 1961.

⁴¹⁸ Le CASDN comprend à cette époque messieurs Guérin, de Broglie, Binet, Peres, Perrin, Tardi, Champetier, Roy, Pierron, Roccard, Coulomb, Dupouy, Darmois, Poivilliers et Besson.

consacrer à la recherche. Au même moment, le général Guérin se lance dans une campagne de propagande dans les pages de la *Jaune et la Rouge* pour inciter les X à rejoindre les laboratoires :

« Ce que je veux dire [...] c'est que nous avons besoin de vous. La défense à notre époque, elle se bâtit jour après jour dans les laboratoires de l'industrie plus encore que dans ceux des Arsenaux. Il faut, certes, réaliser des armes, mais comme elles se périment et qu'on ne sait jamais quand elles serviront, c'est un perpétuel recommencement. Les assises profondes de la défense, elles sont dans la science et dans son complément indispensable le potentiel industriel. La science d'abord comme meneur de jeu et dans le domaine de la chimie plus qu'en tout autre il me semble que notre École ait un grand rôle à jouer. »⁴¹⁹

Il récidive quelques mois plus tard, toujours dans la même optique :

« [...] jamais les techniques et la science, mère des techniques, n'ont-elles été plus intimement associées à la stratégie. Et par conséquent jamais la Défense nationale n'a-t-elle eu davantage besoin d'officiers polytechniciens dans ses cadres. [...] Nous accorderons volontiers que l'époque où se recrutait à l'X la presque totalité des armes dites savantes est révolue. En un sens toutes les armes sont maintenant savantes mais tous leurs officiers n'ont pas besoin d'être « savants » et encore moins polytechniciens. Ceci dit il est une juste proportion vers laquelle il faudrait tendre et où les X auraient la place qui leur revient. L'intérêt supérieur du pays, la vocation de l'École, la logique même des choix de carrière à sa sortie se rencontrent sur ce point. Nos jeunes camarades doivent comprendre qu'aucune activité ne convient davantage à leurs aptitudes que la carrière militaire parce qu'aucune n'embrasse davantage de techniques et de sciences. »⁴²⁰

Ces incitations répétées, concomitantes aux mesures prises peu avant en faveur du versement des diplômés de l'École dans le secteur public, vont en partie fonctionner. Comme le note très justement Georges Menahem, le nombre de polytechniciens représentés dans les instances dirigeantes de la science explose entre 1958 et 1972. Déjà, fin 1957, on compte 34 X à la direction du CEA et 95 dans ses services administratifs et de recherche, 9 à la direction de l'ONERA, 7 à la recherche scientifique au ministère de l'Éducation nationale et 7 X sur 7 membres au CASDN. Ils sont aussi présents dans les entreprises industrielles dédiées à l'armement. On en retrouve 25 à Sud-Aviation, 18 chez Dassault, 20 à la CSF, 28 à Thomson-Houston et 37 à la CGE. En 1972, l'augmentation est sans

⁴¹⁹ *La Jaune et la Rouge*, n°136, 1er mars 1960, p. 43.

⁴²⁰ *La Jaune et la Rouge*, n°139, juin 1960, pp. 80-82.

équivoque : ils sont notamment 4 au cabinet du ministre du Développement industriel et scientifique, 7 à la DGRST, 6 sur 12 membres au CCRST, 33 à la DRME, 43 au CNES dont 5 à sa direction, 26 à l'ONERA, 274 au CEA et 24 au CNRS.⁴²¹ De fait, les polytechniciens interviennent de manière implicite ou explicite tout au long de l'histoire du développement des piles à combustible.

L'ensemble de ces phénomènes et les dynamiques d'interaction entre acteurs qui en découlent permettent le renforcement du réseau social structurant la production des connaissances scientifiques au sujet des piles à combustible. L'organisation des activités propres à ce réseau s'accélère même selon deux caractéristiques. Premier point à souligner : ce qui préside au raisonnement, c'est l'application d'une méthode scientifique commune conçue comme catalyseur de la découverte⁴²². Pour fonctionner parfaitement, cette heuristique doit de plus articuler recherche et réalisation, théorie et application. Au départ, la DGRST se trouve en effet préoccupée par les difficultés manifestées par la transposition des résultats de laboratoires en matérialisations industrielles : « Faute de moyens permettant une prospection à une échelle de fabrication suffisante, nombre de recherches intéressantes demeurent au stade du laboratoire et font seulement l'objet de publications scientifiques en attendant qu'elles attirent éventuellement l'attention des milieux industriels ou nous reviennent parfois de l'étranger sous forme de brevets », souligne la DGRST⁴²³. Une situation dont s'inquiètent d'ailleurs le CCRST⁴²⁴ et Pierre Guillaumat, qui n'hésite pas à interpeller André Maréchal sur ce point⁴²⁵. Pour résoudre ce problème, la passation de contrats de recherche de la part de la DGRST, du CASDN et de la DRME, liant intimement le fondamental et l'appliqué, devient la norme permettant à la fois d'orienter l'activité scientifique des laboratoires publics et d'encourager l'industrie en limitant l'importance des investissements propres à consacrer et des risques que cela

⁴²¹ MENAHEM, Georges, *Ibid.*, 1986, pp. 57-58.

⁴²² Dans les pages du *Progrès scientifique*, Pierre Piganiol détaille ce principe : « Le vocable recherche scientifique recouvre à la fois un type d'activité et une méthode particulière. Il désigne toute activité qui tend à accroître nos connaissances et, par suite, notre compréhension des phénomènes et nos possibilités d'action. Quant à la méthode qui préside à cette activité, elle est scientifique au sens plein du terme, et constitue à la fois un moule pour le classement des idées et des faits observés, un cadre pour les relations logiques que l'on cherche à établir entre ces faits et, très souvent sinon presque toujours, un guide dans la conduite des expériences. Cette méthode scientifique n'est certes pas l'essence même de l'acte de la découverte, cependant, un fait est remarqué depuis quelques décennies : la seule application de la méthode scientifique suffit bien souvent pour découvrir. En somme, tout se passe comme si l'on disposait maintenant de véritables techniques de découverte applicable dans un grand nombre de cas. ». Source : *Le progrès scientifique*, « Interview de monsieur Pierre Piganiol concernant ses fonctions de Délégué général à la Recherche scientifique et technique », 15 mars 1961.

⁴²³ DGRST, Commission d'études des problèmes de développement dans l'industrie chimique, « Note sur les centres pilotes de recherche appliquée », 19 octobre 1962.

⁴²⁴ DGRST, « compte-rendu de la réunion de la Commission d'études des problèmes de développement dans l'industrie chimique, tenue le 8 octobre 1962 à la Délégation générale à la recherche scientifique et technique », p. 2 : « M. Letort rappelle que le Comité consultatif a nettement constaté une lacune en matière de développement et un défaut d'articulation entre la recherche et la réalisation. »

⁴²⁵ Lettre d'André Maréchal, 29 mars 1962. À la suite de cette discussion, une réunion des responsables des activités de recherche dans les principaux ministères et des directeurs des grands organismes de recherche est organisée. Les « liaisons entre la recherche fondamentale et la recherche appliquée » constituent un des points capitaux de la réunion.

comporte. Cette forme d'organisation est aussi significative à d'autres égards. La volonté d'obtention de résultats concrets et rapides, immédiatement tournés vers le développement de prototypes industriels, montre à quel point la notion de durée évolue à cette période au niveau de l'État : l'activité scientifique doit accélérer ses productions dans un cadre général marqué par la transformation de la rationalité par rapport au temps⁴²⁶.

Second point : grâce à ce système, une répartition et une synchronisation des efforts sont opérées. Après les premières réunions sur la thématique en 1959 et 1960, le CASDN continue notamment d'organiser périodiquement les réunions du « groupe d'étude des piles à combustible », composé des représentants de l'Institut de recherches sur la catalyse, du Laboratoire d'électrolyse du CNRS, du Gaz de France, du Cerchar, de l'ONIA et de l'IFP. En son sein, ses membres se communiquent les résultats qu'ils obtiennent, discutent des problèmes qui se posent et « mettent au point ensemble le programme des recherches à entreprendre ».⁴²⁷ Le CASDN commence dans ce contexte à passer des conventions avec plusieurs entreprises et laboratoires publics sur ce qu'il nomme encore parfois les « piles à gaz »⁴²⁸. En plus des missions qu'il confie à Marcel Prettre et Maurice Bonnemay, en particulier pour des travaux touchant aux propriétés électrochimiques des catalyseurs et à la dépoliarisation des électrodes⁴²⁹, il prend en particulier contact avec le Centre de recherches de la CGE (Compagnie générale d'électricité), qui a entamé ses premières études en 1960. De son côté, la DRME, qui souhaite permettre aux Armées de faire un « bond en avant »⁴³⁰ pour recoller à la tête des réalisations mondiales⁴³¹, se met à soutenir l'ONIA pour le développement d'une pile à hydrogène à

⁴²⁶ ROSA, Hartmut, *Accélération. Une critique sociale du temps*, La découverte, 2010, pp. 241-255.

⁴²⁷ CNRS, rapport d'activité, octobre 1960-octobre 1961, p. 82.

⁴²⁸ *La Jaune et la Rouge*, n°139, juin 1960, p. 82.

⁴²⁹ CNRS, « rapport d'activité », octobre 1960-octobre 1961, p. 82 : « cette étude [sur la dépoliarisation des électrodes et leur application aux piles à combustible] a été entreprise dans le cadre d'un accord avec le Comité d'action scientifique de la Défense nationale ; elle doit conduire à la connaissance des moyens propres à diminuer la polarisation des piles et par suite leur conférer un rendement pratique industriel. »

⁴³⁰ Général Lavaud, « Orientation nouvelle de la recherche de défense », DMA, février 1963, p. 1.

⁴³¹ Entre 1961 et 1965, la DRME va en fait passer un nombre considérable de contrats avec des laboratoires publics et privés pour des recherches variées : physique atomique (séparation des isotopes, propriétés nucléaires, détection de la radioactivité), optique (optique instrumentale), thermodynamique (thermodynamique et mécanique quantique), chimie avancée (chimie macromoléculaire, propulsion chimique, conversion d'énergie chimio-électrique, méthodes d'analyse), lasers (physique du laser, lasers de puissance, lasers source lumineuse, lasers asservis), plasmas et électronique quantique, physique électronique (perspectives d'utilisation des phénomènes physiques, électronique générale), physique du solide (physique du solide fondamentale, matériaux nouveaux, supraconducteurs), magnétisme, télécommunications (cethedec, géopropagation, propagation de la lumière), électronique avancée (masers, horloges atomiques, détecteurs infrarouges, couches minces), énergie et moteurs (piles à combustible et couples électrochimiques divers, machines électriques et électroniques à courant fort, machines thermiques, conversion d'énergie), équipements et mesures (systèmes d'acquisition et d'exploitation de l'information, calculateurs, composants et sous-ensembles, dispositifs d'étalonnage et moyens d'essais d'équipement, modèles probatoires), télécommunications et géophysique (études générales, détection et télécommunications en ondes radioélectriques, détection et télécommunications en ondes optiques, détection et télécommunications en ondes non électromagnétiques, équipements de recherche géophysique, activité TGP à l'ONERA), matériaux, structures et fabrications (études générales sur les matériaux, études de certains matériaux pour emplois particuliers, études de structures hypersoniques), couplage homme-machine (généralités, présentation des

moyenne température et sous pression ainsi que la Compagnie française Thomson-Houston dans la construction d'une pile à membrane échangeuse d'ions.

Il faut dire que de nombreux acteurs se sont progressivement positionnés sur le sujet depuis 1959. En plus de ceux que nous venons de citer, il faut ajouter le groupe Carbone Lorraine, Gaz de France, la CIPEL (Compagnie industrielle des piles électriques), Ugine-Carbone, Alsthom, Pechiney, Saint-Gobain, l'EDF et la CSF (Compagnie générale de télégraphie sans fil)⁴³². Anthony M. Moos, de la Leeson Corporation⁴³³, reconnaît d'ailleurs lors du « Symposium on Fuel Cells » qui se tient devant l'American Chemical Society à Chicago en septembre 1961 que « ces deux dernières années, les recherches sur les piles à combustible ont poussé comme des champignons tout autour du globe »⁴³⁴. Dans le cas français, il constate plus particulièrement que « le gouvernement a commencé deux ans plus tôt un programme complet sur les piles à combustible », et que « d'excellents travaux sont effectués à l'IFP, à l'EDF et dans un certain nombre d'entreprises privées telles que Saint-Gobain. Pechiney, la CSF et la CGE réalisent aussi des études pionnières dans le domaine. »⁴³⁵

Le sort réservé aux piles à combustible dépasse largement d'ailleurs, à cette période, les simples cercles scientifiques. À l'Assemblée, on tente de légitimer une telle entreprise. Dans une discussion concernant les crédits des services du Premier ministre, Pierre Guillaumat évoque ces générateurs « visant à transformer directement l'énergie chimique en énergie électrique » qui ont le don de s'affranchir « des limitations d'une pile électrique classique. »⁴³⁶ Le député Michel Sy reconnaît quant à lui qu'aucune « des piles [à combustible] n'a encore atteint le stade industriel, mais des travaux sont actuellement entrepris dans différents pays et il est nécessaire qu'ils le soient également en France. En outre, même si ces recherches n'aboutissent pas à une réalisation sur le plan économique, elles peuvent apporter d'importants développements dans d'autres secteurs. »⁴³⁷ La presse française se fait aussi l'écho des découvertes récentes en la matière et prédit un grand avenir à la technique. Le magazine *Tout savoir* consacre par exemple en février 1960 un long article aux

données et vigilance, nuisance, vibration et postes de conduite, cybernétique), sélection, enseignement et formation, recherche opérationnelle (activités du CIRO).

⁴³² Pour Pierre Piganiol, le fait que les entreprises ne se soient pas intéressées plus tôt aux piles à combustible doit être imputé à un défaut de communication entre commerçants et chercheurs au sein des laboratoires privés lors de l'établissement de programmes de recherche. Ainsi explique-t-il à l'occasion d'une réunion mensuelle de l'X organisation à l'École polytechnique au début de l'année 1963 que « le problème des piles à combustible a longtemps été laissé de côté, plus par habitude, semble-t-il, qu'en raison de difficultés insurmontables. » Source : *La jaune et la rouge*, n°170, 1963, p. 20.

⁴³³ Voir : Chapitre 1, « Un stade de développement similaire à l'aéroplane de Blériot ».

⁴³⁴ MOOS, Anthony M., « Advances in Fuel Cell Technology », *Symposium on Fuel Cells presented before the Division of Petroleum Chemistry*, American Chemical Society, Chicago Meeting, September 3-8, 1961, p. B-6.

⁴³⁵ MOOS, Anthony M., *Ibid.*, 1961, p. B-6.

⁴³⁶ Assemblée nationale, Première séance du 30 octobre 1961, p. 3578.

⁴³⁷ Assemblée nationale, séance du 23 novembre 1961, p. 5025.

applications de la pile à combustible, qui « de toutes les inventions récentes, [...] est celle qui est le plus susceptible de changer notre vie de tous les jours » :

« L'automobile électrique, légère et silencieuse, ne polluant pas l'air des grandes villes, est pour demain. [...] Et après-demain ? Après-demain on envisage l'avion électrique utilisant l'hydrogène produit par la décomposition de l'hydrure de lithium, puis le satellite électrique utilisant de l'hydrure de lithium comme source d'hydrogène et de l'oxyde de calcium comme source d'oxygène. La pile à combustible deviendra vite aussi commune que le moteur à explosion, le moteur à réaction et les fusées. »⁴³⁸

Parallèlement, il s'agit au sein du comité « Conversion des énergies »⁴³⁹ de ne pas reproduire les mêmes études en faveur desquelles la Défense s'est déjà engagée. C'est notamment ce qu'il indique lorsqu'il écrit que son souhait est d'éviter « que des équipes travaillant sur des sujets voisins puissent s'ignorer totalement. »⁴⁴⁰ Pour autant, les méthodes et les moyens ne vont pas grandement différer. Le style de pensée de ses membres est similaire à celui ayant cours à la Défense, ce qui est facilité par la présence de scientifiques inclus dans le « groupe d'étude des piles à combustible » du CASDN, tels que Marcel Prettre et Gaston Remenieras⁴⁴¹. La conversion des énergies englobant par définition une multitude de domaines, le comité limite tout d'abord sa tâche aux aspects physiques et chimiques de quelques problèmes. En termes de recherche appliquée plus particulièrement, il concentre ses efforts sur les modes de conversion les moins pratiqués mais qui ont un « avenir industriel »⁴⁴². Ainsi, dix-huit conventions sont passées sous la direction de Jacques Yvon au cours de l'année avec des laboratoires publics et privés, en vue de renforcer des activités déjà existantes, pour un total de 10,6 millions de francs nouveaux. Dans le cas des piles à combustible, il s'agit surtout d'ouvrir une véritable enquête afin d'explorer le champ des possibles. C'est pour cette même raison que l'on voit se constituer de premières missions à l'étranger pour prendre le pouls de la tendance internationale,

⁴³⁸ *Tout savoir*, n°81, février 1960, pp. 43-45.

⁴³⁹ La composition du comité change en 1961. En plus de Jacques Yvon, Philippe Olmer, Jean-Claude Balaceanu, Maurice Bonnemay, Jean Germain, Charles Guillaud, Maurice Letort, Marcel Prettre, Gaston Remenieras, Felix Trombe et Louis Weil, on y trouve désormais l'ingénieur chargé du département « Physique, Chimie, Métallurgie » du CNET Emmanuel Franke, le professeur à la Faculté des sciences d'Alger Marcel Perrot, le directeur des Etudes et techniques nouvelles du Gaz de France Robert Delsol et le professeur à la Faculté des sciences de Paris Joseph Mattler. Source : DGRST, « Les actions concertées », rapport d'activité, 1961, pp. 122-123. À noter qu'en 1964, Emmanuel Franke démissionne et est remplacé par Jean Le Mezec, une autre figure du CNET.

⁴⁴⁰ DGRST, « Action concertée Conversion des énergies », Fichier des études, 1963, p. 5.

⁴⁴¹ On note aussi l'appropriation par la DGRST d'une certaine forme de culture propre à la Défense en matière d'échanges avec l'extérieur. Elle s'inspire notamment des contrats que le CASDN passe avec les laboratoires publics et entreprises. Source : DGRST, « Projet inspiré des contrats du Comité d'action scientifique de la Défense nationale », non daté (vers 1961).

⁴⁴² DGRST, Informations générales sur les activités des comités scientifiques en 1961, Comité « Conversion des énergies, mai 1962, p. 1.

comme celle organisée par le Gaz de France en URSS entre le 12 et le 23 juillet 1961⁴⁴³, et que la Défense nationale envoie Maurice Bonnemay à un congrès de l'OTAN à Naples du 7 au 17 mars pour « participer à une rencontre d'experts »⁴⁴⁴. D'autant plus que tous les organismes, laboratoires et entreprises ne s'intéressent pas à la technique pour les mêmes raisons. Celle-ci ne revêt pas une forme unique : la pile à combustible est bien un « objet-frontière »⁴⁴⁵ dont la structure est « suffisamment souple pour s'adapter aux besoins et contraintes spécifiques »⁴⁴⁶ de tous.

Une commission « Piles à combustible » composée de Maurice Bonnemay (président de la Commission), de Jean-Claude Balaceanu, de Robert Delsol, de Jean Germain, de Maurice Letort et de Marcel Prettre est donc spécialement créée pour répondre à ces attentes et des travaux sont engagés dans plusieurs directions à la fois, sur les piles à basses températures, qui fonctionnent grâce à un électrolyte liquide à l'ambiante, et sur les piles à hautes températures, qui utilisent par exemple des sels fondus. Si leurs objectifs et leur ontologie ne sont pas encore fixés concrètement, les possibilités laissent libre cours à la pensée : « les premières pourront donner naissance à des engins faciles à manipuler et aisément transportables ; les autres permettront [...] de brûler des combustibles économiques. Elles conviendront sans doute pour des installations fixes de puissance plus élevée. »⁴⁴⁷ On imagine ainsi la mise au point de petits générateurs électriques à oxygène pour des applications très spécifiques dans les deux à trois ans. La pile au méthanol (ou ammoniacque-air) est aussi envisagée pour la traction discontinue. « Inutile alors de souligner ses promesses dans la circulation parisienne.... »⁴⁴⁸, prévient-on.

Il est vrai que les enjeux relatifs à la qualité de l'air sont au cœur des débats dans l'espace politique cette année-là. Yves Montand résume bien la situation dans *Le joli mai* de Chris Marker et Pierre Lhomme (1963) lorsqu'il déclare que Paris compte « plus de voitures que de rues ». Et alors que l'APPA (Association pour la prévention de la pollution atmosphérique) avait déjà été fondée en 1958, la loi de « lutte contre la pollution atmosphérique et les odeurs » est votée le 2 août 1961. Les piles à combustible de la zone basse température ont, ajoute-t-on, un rendement de deux à trois fois supérieur

⁴⁴³ Maurice Bonnemay fait partie de cette mission et reçoit à ce titre une permission du directeur du CNAM Louis Ragey. Sur cet ordre de mission est notamment écrit que « M. Maurice Bonnemay, professeur au Conservatoire national des Arts et Métiers, est désigné comme membre de la mission organisée par le Gaz de France. Cette mission se rendra en URSS entre le 12 et le 23 juillet 1961 pour étudier sur place l'état d'avancement des recherches concernant les piles à combustible ». Archives du CNAM, ordre de mission de Maurice Bonnemay signé par Louis Ragey, 1961.

⁴⁴⁴ Lettre de Maurice Bonnemay au directeur du CNAM Louis Raney, le 28 février 1961, p. 1.

⁴⁴⁵ STAR, S. L., GRIESEMER, J., « Institutional ecology, 'translations' and boundary objects: amateurs and professionals on Berkeley's museum of vertebrate zoology », in *Social Studies of Science*, n°19, 1989, pp. 387-420.

⁴⁴⁶ TROMPETTE, Pascale, VINCK, Dominique, « Retour sur la notion d'objet-frontière », in *Revue d'anthropologie des connaissances*, Vol. 3, no°1, 2009, p. 8.

⁴⁴⁷ DGRST, Informations générales sur les activités des comités scientifiques en 1961, Comité « Conversion des énergies, mai 1962, p. 2.

⁴⁴⁸ DGRST, « Les actions concertées », rapport d'activité, 1961, p. 26.

à celui des machines thermiques, peuvent tolérer des combustibles plus coûteux et éventuellement rivaliser économiquement avec elles avec un peu de travail. Mais, pour lors, leurs prix sont présentés de la manière suivante :

Combustible	Comburant	Prix (sur base 1)
Hydrocarbure	Air	1
Méthanol	Air	4
Méthanol	Oxygène	10
Hydrogène	Air	20
Hydrogène	Oxygène	25

Fig. 4 – Tableau du prix comparatif des mélanges combustible + comburant pour un potentiel en énergie donné (Source : DGRST, 1961)

Si, comme on le voit, le couple hydrogène-oxygène est perçu comme le moins rentable, son potentiel en régime inversé et sa réalisation relativement simple – par rapport aux autres types – justifient de ne pas l’écarter des études. Dans le cas des hautes températures, la même approche prudente est à l’œuvre : bien que les carbonates alcalins fondus attirent la majeure partie de l’attention des membres du comité, les mélanges électrolytiques les plus originaux ne sont pas encore laissés de côté. Le stockage de l’énergie est enfin la dernière application envisagée⁴⁴⁹. Dans un rapport d’activité de la DGRST sur le début de ses actions concertées, il est par exemple mentionné que « le stockage de l’énergie à l’aide de dispositifs fondés sur l’électrolyse est en pratique depuis longtemps : il est réalisé par les accumulateurs classiques. Les piles à combustible peuvent apporter des solutions nouvelles, soit du point de vue de la sécurité de fonctionnement, soit du point de vue de l’ampleur des énergies stockées. »⁴⁵⁰ Au départ, ce sont donc des travaux hétérogènes qui sont financés. Mais c’est bien le problème des électrodes déjà évoqué par Maurice Bonnemay lors des premières réunions au CASDN qui constitue le verrou principal à lever au niveau fondamental :

Piles à combustible à basses températures	Piles à combustible à hautes températures
Étude sur les propriétés catalytiques de solides utilisés comme électrodes de piles à combustible. Étude cinétique des réactions.	Processus d’électrodes de piles à combustible.

⁴⁴⁹ Ailleurs, on a encore d’autres idées sur l’utilisation de la technique, comme la coupler au solaire. Dans *La Pensée*, le prix Nobel de chimie Nikolai Semionov prévoit que « les produits liquides ou gazeux obtenus [par photo-chimie pourraient être] recueillis séparément dans [une] centrale électrique [et] recombinaés dans une pile électrique du genre pile à combustible ». Source : SEMIONOV, Nikolai, « La science et l’avenir humain », in *La Pensée : revue du rationalisme moderne*, n°98, 1961, p. 5.

⁴⁵⁰ DGRST, « Les actions concertées », rapport d’activité, 1961, p. 24.

Activation de l'oxydation électrochimique dans les piles à combustible.	Pile à gaz à haute température.
Étude sur la cinétique de fonctionnement des électrodes de piles à combustible. Electrochimie.	Étude et mise au point d'éléments concernant la réalisation de piles à combustible à haute température.
Piles du type Redox.	Application des réfractaires à la réalisation de piles à combustible.
Étude du fonctionnement des piles à combustible à basse température (électrodes, électrolyte).	
Préparation d'électrodes et de séparateurs pour piles à combustible.	

Fig. 5 – Les différentes études financées par le comité « Conversion des énergies » en 1961 (Source : DGRST, 1961)

En 1962, la situation est identique⁴⁵¹. Sur les quatre contrats accordés (démarrés ou renouvelés) par la DGRST au niveau fondamental, tous concernent directement l'activité des électrodes. Marcel Prettre est chargé de l'élaboration de solides actifs, d'une étude morphologique et de mesures d'activité (539 300 francs, dix-huit mois) tandis que son collègue de la Faculté des sciences de Lille Jean Germain hérite de recherches sur les processus d'électrodes (391 000 francs, trois ans). À l'IFP, Jean-Claude Balaceanu obtient lui aussi un financement de 3 ans mais plus conséquent (1 420 000 francs) pour des études sur l'activation de l'oxydation électrochimique. Enfin, Xavier Ameil (X 43) – qui joue par ailleurs un rôle de premier plan dans l'affaire Farewell en 1981⁴⁵² – planche pour la CSF sur les électrodes et séparateurs (300 000 francs, douze mois). Dans un même temps, des

⁴⁵¹ La composition du comité « Conversion des énergies » change en 1962. À cette date, il est composé de : Jacques Yvon (président), Philippe Olmer (vice-président), Jean-Claude Balaceanu, Maurice Bonnemay, Robert Delsol, Jean Germain, Charles Guillaud, Maurice Letort, Joseph Mattler, Marcel Perrot (professeur à la Faculté des sciences de Marseille), Marcel Prettre, Gaston Remenieras, Fernand Tesson (professeur à l'École centrale des arts et manufactures), Félix Trombe et Louis Weil. Source : DGRST, « Les actions concertées », rapport d'activité, 1962, p. 20.

⁴⁵² Considérée comme l'une des plus grandes affaires d'espionnage du XX^{ème} siècle, l'affaire Farewell révèle le fonctionnement du système de renseignement soviétique au sein des pays occidentaux au début des années quatre-vingt. L'agent du KGB Vladimir Vetrov se met en effet à collaborer avec la DST (Direction de la surveillance du territoire) au printemps 1980, et en particulier avec le directeur des ventes de Thomson CSF en URSS Jacques Prévost. Il reçoit à ce titre le nom de code anglais « Farewell », choisi volontairement pour attribuer l'opération aux services secrets anglo-saxons en cas d'échec. Jacques Prévost le met en relation avec Xavier Ameil, alors ingénieur chez Thomson CSF en poste à Moscou, et avec l'attaché militaire Patrick Ferrant. Vladimir Vetrov leur transmet une grande quantité de documents et d'informations, notamment sur les méthodes d'espionnage industriel et scientifique de l'URSS. En conséquence, la France fait expulser 47 ressortissants soviétiques en 1983. Cette affaire permet également aux États-Unis de renforcer la protection de ses technologies civiles et militaires et d'arrêter le programme de collecte soviétique alors en vigueur. L'ancien conseiller politique de Ronald Reagan Gus W. Weiss, qui joue un rôle important au moment de l'affaire Farewell, traite de l'évènement en ces termes : « Quand les historiens se pencheront sur les raisons ayant provoqué la fin de la Guerre froide, peut-être que Farewell aura droit à une note de bas de page. Ce sera mérité. » Source : WEISS, Gus W., « The Farewell Dossier », in *Studies in Intelligence*, Vol. 39, n°5, 1996, p. 126.

prototypes sont toujours en cours de réalisation dans plusieurs laboratoires. Pour sa pile expérimentale, Maurice Bonnemay reçoit 1 288 000 francs pour une durée de trois ans. Au Laboratoire de physique de la Faculté des sciences de Paris, Geneviève Darmois - qui prendra plus tard le nom de Geneviève Morand - obtient 180 000 francs (douze mois) pour sa pile du type Redox. Pour sa part, la CGE passe deux contrats sur des piles à hautes températures (450 000 francs, douze mois) et à basses températures (900 000 francs, douze mois). Ce dernier type de pile est aussi financé par la DGRST auprès du Gaz de France (1 300 000 francs, trois ans)⁴⁵³.

Mais c'est la composition du comité qui renseigne surtout sur l'attribution de ces financements. Comme on le voit, la majeure partie des contrats (six contrats sur neuf) sont passés directement auprès de ses membres. D'ailleurs, si l'on prend l'ensemble des études financées, et qui incluent en plus de celles sur les piles à combustible celles sur les propriétés des thermo-éléments, les compresseurs électromagnétiques, les piles thermoélectriques, la conversion thermophotovoltaïque, les matériaux de base pour la conversion d'énergie, les chalumeaux à plasma, l'énergie solaire ou encore les problèmes de conversion des énergies adaptés à l'optique, pour un total de 10 620 932 francs, on s'aperçoit que ce sont les piles à combustible qui obtiennent le plus de contrats avec 6 768 300 francs, soit près de 64 % du total. La présence d'une majorité de chercheurs ou de représentants d'institutions travaillant sur les piles à combustible (neuf membres sur quinze) favorise une telle configuration. Enfin, on peut mentionner que le comité étant principalement composé d'universitaires (douze membres sur quinze), ce sont en grande partie des études fondamentales - et ce même si elles prennent le nom « d'expérimentales » - qui obtiennent des financements (six sur neuf). Ici, ce sont donc les mêmes chercheurs qui orientent l'action publique sur la qualité des savoirs à produire et qui produisent ces dits savoirs.

4.3 La vie des laboratoires : analyses croisées

La DGRST et la Défense – par l'intermédiaire de la DRME et du CASDN – vont donc concentrer les savoirs et les actions autour des piles à combustible en France. L'organisation du travail scientifique qu'elles vont mettre en œuvre, par le biais des conventions et des contrats passés, va avoir une influence non seulement sur les recherches sur la technique en elle-même mais aussi sur la vie des laboratoires publics et privés financés. En effet, ceux-ci vont peu à peu se transformer en des

⁴⁵³ DGRST, « Rapport annuel du Fonds de développement de la recherche scientifique et technique », Tableau I.5, Conventions du programme 1961 du Comité « Conversion des énergies », mars 1962, pp. 4-5.

structures proches de ce que le physicien Charles Sadron nomme des « usines de recherches »⁴⁵⁴ : des complexes dotés de moyens matériels et humains importants, organisés et hiérarchisés selon un modèle industriel, visant à une productivité scientifique accrue⁴⁵⁵. Un des marqueurs les plus significatifs à ce sujet se perçoit dans le développement de leurs effectifs. Quelques données statistiques permettent d’y voir plus clair. Dans son Centre de recherches de base situé à Marcoussis, la CGE emploie par exemple jusqu’à cinquante personnes en 1964 pour travailler spécifiquement sur ses piles hautes et basses températures⁴⁵⁶.

S’il s’agit de l’équipe dédiée « la plus importante de France, et peut-être d’Europe » selon les propres mots de l’entreprise⁴⁵⁷, la tendance est similaire dans d’autres établissements : tandis que l’IFP fait au même moment travailler vingt personnes au sein de sa Direction des recherches avancées et l’association entre le groupe Carbone Lorraine, la CIPEL et Ugine-Carbone 3,1 ingénieurs et 6,4 agents techniques en moyenne, Maurice Bonnemay fait une demande de quatorze collaborateurs techniques (huit postes d’ingénieurs et six postes de techniciens) dans le cadre du renouvellement d’une RCP (recherche concertée sur programme)⁴⁵⁸. En octobre 1961, celui-ci prévient déjà que « les recherches entreprises au cours de l’année sur les piles à combustible ont entraîné une augmentation sensible de l’effectif du laboratoire qui [...] comprend 50 personnes. »⁴⁵⁹ Or, sur ce total, vingt personnes étudient les piles à combustible⁴⁶⁰. Dans un texte consacré à la vie du Laboratoire d’électrolyse du CNRS, Michel Callon note également qu’au sein de ses effectifs, qui passent de 41 à 73 personnes entre 1960 et 1964, le rapport entre le nombre de chercheurs et le nombre de techniciens diminue de 1 à 0,5 et que ce recrutement traduit « la volonté stratégique de consolider des objets de recherche déjà constitués », affirme la place des électrodes et « renforce les choix initiaux opérés par [Bonnemay] »⁴⁶¹.

Plus généralement, la DGRST recense à cette période près de quarante chercheurs et cinquante-six techniciens, payés sur les crédits du Fonds de développement, qui se consacrent exclusivement à la

⁴⁵⁴ PROST, Antoine, « Les réformes du CNRS (1959-1966) », in *Cahiers pour l’histoire du CNRS. 1939-1989*, n°9, 1990, p. 9.

⁴⁵⁵ JACQ, François, « Le laboratoire au cœur de la reconstruction des sciences en France, 1945-1965. Formes d’organisation et conceptions de la science », in *Les cahiers du Centre de Recherches historiques* [En ligne], n°36, 2005, mis en ligne le 1^{er} juin 2011.

⁴⁵⁶ Direction des affaires économiques et du matériel naval, sous-direction du matériel naval, bureau technique, « Compte rendu de visite », 11 mars 1964, p. 2.

⁴⁵⁷ Centre de recherches de la CGE, « Considérations sur les débouchés possibles des véhicules terrestres à propulsion électrique », juin 1964, p. 1.

⁴⁵⁸ Maurice Bonnemay, « rapport d’activité de l’année 1964 », RCP n°66 Piles à combustible, p. 53.

⁴⁵⁹ CNRS, « Rapport d’activité », octobre 1960-octobre 1961, p. 81.

⁴⁶⁰ CNRS, « rapport d’activité », octobre 1961-octobre 1962, p. 198.

⁴⁶¹ CALLON, Michel, « L’agonie d’un laboratoire », in CALLON, Michel (dir.), *La science et ses réseaux. Genèse et circulation des faits scientifiques*, Éditions La découverte, 1989, p. 187.

conversion des énergies et à l'électrotechnique nouvelle⁴⁶². Cette tendance ne se retrouve pas uniquement dans cette branche. On trouve environ 30 chercheurs pour 90 techniciens au sein de l'action concertée « électronique ». Comprendre les phénomènes physico-chimiques et les maîtriser en les reliant directement à la construction de prototypes, mettre les savoirs sur les piles à combustible *en action* pour en acquérir d'autres, c'est le nouvel enjeu qui se répand peu à peu dans les laboratoires. D'où la nécessité de disposer de plus de techniciens et d'ingénieurs que de chercheurs, aptes à conduire des travaux déterminés, naviguant entre études fondamentales et recherche appliquée. Cependant, alors même que les frontières entre science et technique commencent à se brouiller, l'absence de main-d'œuvre spécialisée en électrochimie est criante. Ce problème s'observe particulièrement au CNRS qui, rappelons-le, ne crée son département de SPI (Sciences physiques pour l'ingénieur) qu'en 1975⁴⁶³. Lorsqu'il s'engage dans les recherches sur les piles à combustible à la fin des années cinquante, Maurice Bonnemay ne dispose pas du personnel nécessaire pour les mener à bien. Pour diriger son équipe, il recrute donc un jeune ingénieur issu d'une autre discipline, Guy Bronoël. Diplômé du CNAM et ingénieur militaire dans les services techniques de l'Air, il termine à l'époque une thèse de docteur-ingénieur en chimie du solide :

« J'avais un certain nombre de collègues qui avaient fait la licence en même temps que moi et qui commençaient des thèses dans les services du laboratoire d'électrochimie qui était tenu par le professeur Audubert. Audubert est mort et a été remplacé par le professeur Bonnemay. Je continuais donc à voir des gens qui eux étaient vraiment dans l'électrochimie et ils m'ont fait savoir qu'il y avait un problème de recrutement car c'était l'époque, en 1959-60, où le gouvernement de de Gaulle a décidé de mettre beaucoup d'argent dans la recherche et notamment dans la conversion des énergies. Donc il y avait tout un secteur, aussi bien sur les photopiles que sur les piles à combustible, tous les modes de conversion de l'énergie en fait, qui devait se développer avec des moyens financiers importants. Seulement le problème, c'est qu'il n'y avait personne pour s'en occuper. Il n'y avait pas de cadres. Personne. Et donc, en particulier les jeunes qui faisaient des licences, ils n'avaient jamais dirigé une équipe. Moi j'avais déjà une petite équipe de cinq-six personnes dans les services techniques de l'Aéronautique. Je m'étais occupé de pas mal de techniques, touchant aussi bien à la physique du solide qu'un tout petit peu à l'électrochimie et c'est Bonnemay qui m'a dit, en 1961, juste au moment où

⁴⁶² DGRST, « Chercheurs et techniciens actuellement payés sur les crédits du Fonds de développement », 29 avril 1964. Il s'agit du deuxième effectif le plus important, après l'électronique.

⁴⁶³ RAMUNNI, Girolamo, « La création d'un département d'ingénierie au CNRS », in *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], n°13, 2005, mis en ligne le 03 novembre 2007.

je terminais ma thèse : “bah, tiens, est-ce que ça vous intéresserait d’entrer au CNRS pour prendre en main un service sur les piles à combustible ?” Alors moi, les piles à combustible, ça ne me disait pas grand-chose. J’avais vaguement regardé ça. Et j’ai dit : “pourquoi pas ?” D’autant plus que ça semblait relativement intéressant. »⁴⁶⁴

L’entrée de Guy Bronoël au Laboratoire d’électrolyse en 1961 coïncide avec l’obtention du premier contrat obtenu par Maurice Bonnemay pour ses travaux. Ceux-ci ont alors pour objectif principal l’étude du mode de fonctionnement des piles à combustible réglées à basse température. Le programme porte sur la catalyse des processus réactionnels déterminant les vitesses de dépolarisation, mais surtout sur la cinétique de fonctionnement des électrodes. Il s’agit aussi bien de développer la connaissance des réactions globales et des processus intermédiaires (évolution de l’électrolyte dans les régions anodique et cathodique en fonction des concentrations initiales, des dépolarisants et de la structure des électrodes) que de déterminer les caractéristiques cinétiques de ces derniers et des facteurs les influençant (effets de la température, de la pression et de la structure des électrodes). De fait, les résultats attendus doivent « logiquement conduire à la connaissance des moyens propres à diminuer la polarisation des piles et par la suite à leur conférer un rendement industriel. »⁴⁶⁵ En réalité, Maurice Bonnemay ne fait pas que plancher sur les électrodes. De par son statut acquis au sein du groupe d’études du CASDN et du comité Conversion des énergies de la DGRST, il gère peu ou prou l’ensemble des recherches sur les piles à combustible en France. Comme l’indique Guy Bronoël, le CNRS détient ainsi – du moins au tout début – un rôle centralisateur sur la technique :

« Je me suis aperçu en entrant au CNRS, en 1961 donc, qu’il ne s’agissait pas de recherches à proprement parler. Il s’agissait de mettre en place des dispositifs, des moyens d’essais pour tester des piles à combustible qui allaient être fabriquées par un certain nombre d’organismes, dont l’Institut français du pétrole, l’ONIA, etc., qui voulaient déjà fabriquer des piles à combustible. Et en fait le rôle du CNRS, c’était de centraliser tout ça et de les essayer. Alors moi ça m’avait un petit peu choqué : ce n’était pas le rôle du CNRS en tant qu’organisme de recherches fondamentales de faire des essais. Ce n’était pas ça la recherche pour moi. Et donc on a commencé à mettre en place des moyens d’essais qui étaient relativement importants et lourds, puisqu’à l’époque les piles à combustible dont on parlait et qui marchaient relativement bien c’étaient les piles qui avaient été fabriquées par les Anglais. Elles fonctionnaient avec des solutions ultra-

⁴⁶⁴ Entretien avec Guy Bronoël, Meudon, octobre 2016.

⁴⁶⁵ DGRST, « Action concertée Conversion des énergies », Fichier des études, 1963, p. 78.

concentrées de potasse dans les 200 à 300 degrés sous pression. Donc c'étaient des trucs lourds à manipuler »⁴⁶⁶

La mise en place de *moyens d'essais*, pour reprendre l'expression de Guy Bronoël, est caractéristique de la transformation que subit la recherche sur les piles à combustible à cette période. Comme le fait remarquer Maurice Bonnemay en 1962, le régime de production des savoirs se déplace : « l'activité du laboratoire a changé de caractère. Alors que dans le passé, elle était principalement orientée vers la mise en œuvre de méthodes, elle s'est en grande partie exercée cette année dans le sens de l'exploitation de méthodes. Il semble que cette nouvelle orientation doive s'accroître dans l'année qui vient. »⁴⁶⁷ On retrouve ici l'idée d'une rationalité devenue techno-industrielle et d'une forme de « phénoménotechnique » particulière : si c'est bien en construisant que l'on va tenter de s'instruire, il ne s'agit plus seulement de couler les phénomènes « dans le moule des instruments »⁴⁶⁸. C'est désormais en les incluant directement dans des essais de piles, dans des prototypes finis et complets que l'on va chercher à approfondir leur maîtrise et leur connaissance. Lorsque Maurice Bonnemay commente les résultats de son équipe, il est explicite à ce sujet : « on a étudié par une méthode globale les performances des électrodes poreuses à comburant (oxygène) et carburant (hydrogène, hydrazine). Ces recherches ont été faites dans des piles expérimentales fonctionnant dans des conditions proches de celles requises à l'échelle industrielle. »⁴⁶⁹ Peu de temps après, il affine son propos :

« Dans le domaine des piles à combustibles les résultats ont considérablement avancé et [...] un prototype de pile expérimentale est sur le point d'entrer en fonctionnement. Il est à noter à ce sujet que, dans le cadre de la coordination des efforts français sur les piles à combustibles, le rôle du laboratoire d'Électrolyse du CNRS n'est pas de réaliser des piles à combustibles ; néanmoins on a pensé qu'il était nécessaire de construire ce prototype de manière à concrétiser les efforts qui ont été poursuivis depuis plusieurs années dans notre laboratoire. D'autre part, par sa conception, cette pile expérimentale sera un outil extrêmement maniable et efficace pour étudier les problèmes de la combustion électrochimique et, en particulier, celui de l'utilisation des hydrocarbures dans les piles à combustibles. »⁴⁷⁰

⁴⁶⁶ Entretien avec Guy Bronoël, Meudon, octobre 2016.

⁴⁶⁷ CNRS, « rapport d'activité », octobre 1961-octobre 1962, p. 198.

⁴⁶⁸ BACHELARD, Gaston, *Le nouvel esprit scientifique*, Les classiques des sciences sociales, 1968 (1938), p. 15.

⁴⁶⁹ CNRS, « rapport d'activité », octobre 1962-octobre 1963, p. 236.

⁴⁷⁰ CNRS, « rapport d'activité », octobre 1963-octobre 1964, p. 279.

Ce développement spécifique semble lié à l'assimilation de la posture prise par Francis T. Bacon à la fin des années trente. À partir de la fin des années cinquante, les références sont constantes à son sujet dans les propos des acteurs du réseau français évoluant autour des piles à combustible, bien plus qu'à tout autre scientifique. Le renversement de valeur que l'Anglais avait opéré par rapport aux filières chimiques classiques et les succès qu'il avait obtenus par des voies non conventionnelles ont progressivement répandu l'idée que les progrès au sujet des piles à combustible ne peuvent plus s'effectuer que par le biais d'un talent technique associé au savoir-faire de l'ingénieur. En accentuant la portée applicative des recherches, ce phénomène a également pour effet l'abandon des grands ensembles théoriques au profit de solutions techniques fonctionnelles. C'est en substance ce que note le directeur du Laboratoire d'électrochimie et de chimie physique de la Faculté des sciences de Strasbourg Jean Besson en 1964 à propos des propriétés physico-chimiques et électrochimiques des oxydes métalliques : si des recherches « ont déjà été développées dans de nombreux laboratoires, privés surtout, en vue de l'utilisation de certains oxydes dans les cellules galvaniques et dans les piles à combustible en particulier, il semble que, visant essentiellement des applications techniques, elles n'ont jamais été poursuivies dans le cadre d'un plan d'ensemble. »⁴⁷¹ L'écart entre les expériences menées et l'absence de liens avec les théories physico-chimiques générales sont aussi soulignés dans les *Annales des Mines* par le directeur scientifique de la CGE Gérard Lehmann lorsqu'il écrit que « de très beaux travaux restent à faire pour relier les théories quantiques des transformations moléculaires à l'ensemble des observations expérimentales de l'électrochimie. »⁴⁷²

Le programme de recherche de l'IFP est caractéristique à l'égard de ce nouveau style de pensée. Dès juillet 1961, l'équipe de Jean-Claude Balaceanu planche sur la mise au point de piles alimentées par des hydrocarbures ou des composés chimiques bon marché, disponibles en tonnage important, en vue de la production d'énergie. Porté par l'engouement américain, le directeur de l'Institut, le polytechnicien et ingénieur des Mines André Giraud, avait en effet vu peu de temps auparavant en la technique une « chose formidable et qui allait déboucher »⁴⁷³ et décidé de créer tout un département de recherches sur les piles à combustible. Or, les études analytiques qui doivent mettre en évidence les différents produits intermédiaires et la nature des diverses réactions successives et les études cinétiques qui ont à la fois pour but de définir le fonctionnement des piles en fonction du temps, de préciser l'influence des variables opératoires (concentration ou pression partielle en combustible et en comburant, température, concentration en électrolyte) et de déterminer les causes de la désactivation progressive des catalyseurs passent avant toute chose par la réalisation de piles : des

⁴⁷¹ Maurice Bonnemay, « Projet de programme d'action concertée sur les piles à combustible », 1964, p. 14.

⁴⁷² LEHMANN, Gérard, « Piles à combustible et thermodynamiques », in *Annales des Mines*, Tome XI, 1964, p. 695.

⁴⁷³ Entretien avec Yves Bréelle, Caumont, octobre 2016.

électrodes actives chimiquement sont préparées pour rechercher d'autres catalyseurs que le platine, d'une part ; des électrolytes aqueux ou à sels fondus sont choisis d'autre part.

Enfin, des appareillages sont mis au point pour opérer sous pression pour les électrolytes aqueux ou à pression ordinaire à température plus élevée pour les bains de sels métalliques fondus. C'est donc en produisant des piles à méthanol et à hydrazine que l'on va chercher à déterminer tout un ensemble d'éléments sur le plan théorique : les lois qui président à la cinétique des réactions électrochimiques et les facteurs d'action qui en découlent, les corrélations entre la réactivité électrochimique des molécules et leur structure, les relations entre les réactions électrochimiques et la catalyse hétérogène, les liens entre les conditions de préparation physico-chimique des électrodes et leur activité⁴⁷⁴. Mais Jean-Claude Balaceanu se retrouve confronté au même problème que Maurice Bonnemay : s'il dispose d'électrochimistes de métier comme Odile Bloch, il ne possède pas les ingénieurs spécialisés nécessaires pour mener à bien un travail technique et pratique. De la même manière que le Laboratoire d'électrolyse, l'Institut va donc aussi faire appel à des effectifs issus d'autres domaines. Yves Bréelle fait partie de ceux-là :

« Je ne suis pas du tout électrochimiste. J'ai atterri là un peu par hasard. Moi en fait j'ai fait l'ENSEM, l'École nationale supérieure d'électricité et de mécanique de Nancy. J'ai choisi comme version la mécanique, en troisième année. Ensuite j'ai fait une année de spécialisation à l'École des moteurs. J'ai fait mon service militaire dans la Marine puis je suis parti un an en Indochine. Et quand je suis rentré, je suis revenu à l'IFP. Là, j'ai travaillé dans ce qu'on appelait à l'époque l'application et je me suis occupé des moteurs Diesel. Pendant dix ans. Les cinq dernières années... Bon, j'avais pris un brevet de moteur rotatif qui avait intéressé Renault. On avait construit un prototype avec eux mais en fait il n'a pas fonctionné. Ça a été abandonné mais mon cœur c'est ça, c'est la mécanique. [...] A l'IFP, ils ont créé une section piles à combustible, un département, et celui-ci était dirigé au début par Odile Bloch qui avait fait l'École de chimie de Paris, je crois. C'était une électrochimiste. Et elle a commencé à développer des électrodes, pour voir un peu comment ça fonctionnait tout ça. Le but de l'IFP au départ, c'était surtout les hydrocarbures. Parce qu'à l'époque on était plein d'illusions. Bloch a travaillé là-dessus ; elle a tout essayé. L'hydrogène, le méthanol, l'hydrazine. Mais très vite on s'est rendu compte que les hydrocarbures, ce n'était pas assez réactif et que ça ne mènerait à rien. [...] Donc on s'est dit : on abandonne les hydrocarbures et on essaie le méthanol. On a

⁴⁷⁴ DGRST, « Action concertée Conversion des énergies », Fichier des études, 1963, pp. 97-98.

essayé de faire des piles à méthanol. Mais l'intensité qu'on tirait était pratiquement nulle. Donc Odile Bloch faisait de petites électrodes qui avaient à peu près un centimètre de diamètre. On les essayait, pour voir comment on pouvait les enduire. On a réussi à avoir des résultats un peu significatifs après un ou deux ans de travail. On a décidé qu'il fallait concrétiser tout ce qu'on faisait. Nos dirigeants voulaient des résultats avant même qu'on ait travaillé. Donc on a créé parallèlement à l'équipe qui cherche sur les électrodes, les électrochimistes, une structure pour la conception d'une pile à combustible. Je parle de la conception mécanique. Comment on fait l'électrolyte, etc. Et on m'a demandé si je voulais bien m'occuper des piles à combustible. Je n'ai pas refusé. »⁴⁷⁵

Alstom, qui entreprend de son côté des recherches communes avec la Compagnie française Thomson-Houston, Pechiney et Saint-Gobain sur les piles Redox, se retrouve dans une situation similaire. Lorsque Bogdan Broniewski⁴⁷⁶ prend la tête de la direction des recherches à Massy, il embauche donc un jeune ingénieur passé par l'École de physique et de chimie de Paris : Bernard Warszawski. Décrit comme « non seulement un scientifique mais aussi un ingénieur et un technologue hors pair »⁴⁷⁷, ce dernier souffre néanmoins d'agoraphobie. Bogdan Broniewski met donc en place tout un système pour permettre à ce dernier de travailler depuis chez lui, en lui fournissant un chauffeur et une camionnette assurant deux fois par jour la liaison entre son domicile et le laboratoire, une secrétaire et une ligne téléphonique. En contrepartie, Bernard Warszawski implante une activité de recherche et développement « sans équivalent dans le domaine de l'électrochimie »⁴⁷⁸ :

« Il a mis en œuvre dans les laboratoires de Massy un ensemble d'activités dont certaines relevaient plus de la fabrication que de la recherche. Le visiteur, en pénétrant dans les ateliers, pouvait apercevoir une enfilade de grandes presses où s'affairaient des ouvriers occupés à produire les composantes de piles. Ailleurs, une succession de cuves remplies de réactifs recevaient les électrodes, qui cheminaient d'un poste de travail à un autre. Une machine impressionnante assemblait les éléments séparés pour constituer des sous-

⁴⁷⁵ Entretien avec Yves Bréelle, Caumont, octobre 2016.

⁴⁷⁶ Bogdan Broniewski – parfois aussi noté « Bohdan Broniewski » naît en 1922 en Pologne au sein d'une famille d'ingénieurs et de propriétaires terriens. Fuyant l'invasion du pays par l'Allemagne nazie en 1939, les Broniewski s'installent en France. Détenteur d'un diplôme d'ingénieur obtenu à Lyon, du Prix de la Société française des électriciens et de la médaille Ampère, Bogdan Broniewski est embauché en 1955 à l'Institut Battelle, situé à Genève, en tant que directeur du département d'électronique et d'électrotechnique. En 1962, il prend un poste de directeur des recherches à Alstom et la responsabilité du centre de recherches de Massy. En 1977, il s'engage chez Occidental Petroleum et part s'installer aux États-Unis.

⁴⁷⁷ BRONIEWSKI, Bogdan, *Une vie dans le siècle. Tome 2. L'aventure américaine*, Éditions Le Manuscrit, 2014, p. 86.

⁴⁷⁸ BRONIEWSKI, Bogdan, *Ibid.*, 2014, p. 88.

ensembles, puis des ensembles. Des bancs d'essais semi-automatiques s'alignaient, où de nombreux ingénieurs et techniciens contrôlaient les performances et enregistraient les résultats. Une grande salle était dédiée aux recherches sur les catalyseurs où des centaines de mini-cellules subissaient nuit et jour les essais de durée. [...] Il s'agissait là d'une opération très complexe impliquant la participation de nombreux sous-traitants, par exemple pour l'exécution des outillages de précision, la collaboration avec l'industrie chimique pour les matériaux et composants plastiques, les rapports étroits avec les fabricants de catalyseurs, etc. Il y a un nom qui caractérise toute cette activité : c'est la mise en œuvre de méthodes industrielles dans le domaine des recherches et développements. En adoptant une telle approche, Bernard a été un innovateur. Au lieu de suivre les méthodes traditionnelles des laboratoires de recherche en électrochimie, où chaque phase - recherche, développement, industrialisation - se succèdent avec tous les aléas et délais que cela entraîne, Bernard s'est d'emblée orienté vers la création d'un produit industriel, fiable, pouvant être reproduit en de multiples exemplaires. »⁴⁷⁹

L'originalité des recherches de Bernard Warszawski réside aussi dans le type de pile à combustible sélectionné. En effet, le choix des piles Redox permet de court-circuiter le problème posé par l'amélioration du processus catalytique étant donné que dans ce système le combustible et l'oxydant sont indirectement utilisés au travers de réactions chimiques intermédiaires. Dans ces conditions, deux phases sont essentiellement mises en jeu, les électrodes et la solution Redox. Il apparaît alors à la Direction des recherches qu'à partir de ces données il devient d'une part possible de concevoir « directement la pile en tant que batterie comprenant un grand nombre d'éléments et non comme pile élémentaire », et d'autre part d'atteindre « des densités de puissance élevées en donnant au compartiment électrolytique une épaisseur capillaire dans laquelle la solution serait mise en mouvement parallèlement au plan moyen de l'électrode ». En outre, « grâce à la convection forcée capillaire de la solution électrolytique, ces très fortes densités de puissance pouvaient être atteintes même avec des solutions peu concentrées en électrolyte et en réaction Redox. »⁴⁸⁰

Un autre aspect observable de cette nouvelle méthode de recherche entremêlant théorie et application est que celle-ci passe par le développement de *collaborations d'expérimentation*. Grâce à son rôle au sein du comité Conversion des énergies, Maurice Bonnemay répartit les tâches entre ses collègues par le biais des contrats et conventions de la DGRST. À l'Institut de recherche sur la catalyse de la Faculté des sciences de Lyon, Marcel Prettre se voit chargé d'améliorer les connaissances des

⁴⁷⁹ BRONIEWSKI, Bernard, *Ibid.*, 2014, pp. 88-89.

⁴⁸⁰ Direction des recherches d'Alsthom, « Historique de nos recherches sur les piles », le 24 décembre 1968, p. 1.

matériaux utilisés comme électrodes et des réactions se produisant dans les piles à combustible. Le programme est divisé en trois parties : élaboration d'échantillons de nickel possédant une morphologie aussi différente que possible ; étude systématique de cette morphologie et des modifications qu'elle subit lors de la mise en forme d'électrodes ; étude des mécanismes des réactions se produisant aux électrodes et en particulier des interactions hydrogène-nickel par les méthodes électrochimiques et celles de la catalyse de contact⁴⁸¹. Au sein du département de physique dirigé par Boris Imelik, Marcel Prettre en profite pour lancer Jean Bézandun sur une thèse concernant « les propriétés de catalyseurs au nickel dans leur emploi comme électrode à hydrogène dans une pile à combustible »⁴⁸². Il place également un autre de ses disciples, Paul Eyraud, sur le thème des adsorbats⁴⁸³. Et à la fin de l'année 1962, les études effectuées ont déjà porté leurs fruits.

Dans le rapport d'activité du CNRS pour la période, il est ainsi mentionné que « la plupart des difficultés technologiques rencontrées dans la fabrication des électrodes ont été surmontées. De nombreuses électrodes ont été étudiées et une pile à hydrogène a été mise au point. Des recherches sont en cours sur la possibilité d'emploi comme électrolyte de phases adsorbées sur des solides divisés. »⁴⁸⁴ Au Laboratoire de chimie générale de la Faculté des sciences de Lille, Jean Germain hérite de l'étude de l'activation catalytique des combustibles et des comburants à partir de catalyseurs conducteurs d'activité reconnue (métaux et semi-conducteurs) et mixtes (conducteurs + semi-conducteurs ou isolants) tels que le platine, le nickel avec ou sans support, les oxydes de zinc, le vanadium, le chrome et le manganèse. Outre la formulation de lois théoriques à caractère fondamental, ces recherches doivent permettre l'élaboration de méthodes de contrôle des électrodes « plus simples, plus économiques et plus instructives que l'essai direct dans une pile. »⁴⁸⁵ Cette remarque est intéressante dans la mesure où elle montre à quel point les moyens d'essais pour les phases expérimentales à visée théorique représentent véritablement un paradigme dominant. La tentative d'élaboration de solutions alternatives de la part de Jean Germain s'inscrit dans un cadre atypique au sein de cette tendance générale.

Le déploiement des collaborations d'expérimentation se poursuit également en dehors du CNRS. Dans son Laboratoire de thermodynamique chimique et d'électrochimie à l'INSA (Institut national des sciences appliquées), le professeur Maurice Rolin étudie en particulier les conditions selon

⁴⁸¹ DGRST, « Action concertée Conversion des énergies », Fichier des études, 1963, p. 93.

⁴⁸² BEZAUDUN, Jean, *Contribution à l'étude des propriétés de catalyseurs au nickel dans leur emploi comme électrode à hydrogène dans une pile à combustible*, Thèse soutenue à l'Université de Lyon, 1964.

⁴⁸³ EYRAUD, Paul, *Contribution à l'étude dynamique des adsorbats*, Thèse soutenue à l'Université de Lyon, 1963.

⁴⁸⁴ CNRS, « rapport d'activité », octobre 1961-octobre 1962, p. 335.

⁴⁸⁵ DGRST, « Action concertée Conversion des énergies », Fichier des études, 1963, p. 95.

lesquelles le CO (monoxyde de carbone) peut constituer le combustible d'une pile à haute température en sels fondus, en vue d'une production d'énergie économiquement rentable : « Toute la gamme d'halogénures, chlorures et fluorures, fusibles entre 850 et 1000°C, et dont quelques-uns sont aussi solvants d'oxydes, offre certaines possibilités et on voudrait en étudier les avantages et les inconvénients »⁴⁸⁶, explique-t-il. Il part ainsi d'une pile équipée d'une solution électrolytique à base d'oxyde et de cryolithe fondue, d'un combustible en graphite et d'un comburant composé d'un tube fermé et poreux de SnO₂ (dioxyde d'étain) fritté, pour arriver progressivement à la construction d'une pile constituée d'électrodes à CO et à air. Un contrat sur les électrodes et les séparateurs est également passé par la DGRST avec le Centre de recherches physicochimiques de la CSF en avril 1962. Sous la supervision de Claude Dugas, les ingénieurs Georges Feuillade et Xavier Ameil effectuent des essais de matériaux pour des électrodes poreuses à destination de piles à combustible en solutions aqueuses et en sels fondus, en insistant spécifiquement sur les relations entre les facteurs géométriques et les facteurs physico-chimiques.

L'objectif est double : ces travaux doivent à la fois permettre l'accès des piles à combustible au domaine industriel et, à plus brève échéance, fournir des précisions dans un grand nombre de domaines : mécanismes physico-chimiques dans les milieux hétérogènes polyphases, électrochimie des sels fondus, technique du frittage, technique des dépôts métalliques sur céramiques, protection contre la corrosion de l'argent et du nickel⁴⁸⁷. D'autres organismes obtiennent des financements pour des recherches plus directes sur des prototypes expérimentaux. Au Laboratoire d'électrochimie du Centre de recherches de la CGE, Paul Biro et Jean-Michel Auclair se lancent dès 1961 dans la conception de deux types de piles : une pile à électrolyte liquide (solution de base, acides, sels dans l'eau) et une pile à membrane échangeuse de protons. Là encore, la transgression de la structure bipartite traditionnelle théorie/application se laisse percevoir. En effet, si ces études doivent permettre de « fixer les valeurs optimales des paramètres pour les différents oxydants et combustibles envisagés », elles ont pour but secondaire à « caractère plus fondamental »⁴⁸⁸ l'amélioration de la compréhension du mécanisme catalytique aux électrodes. Une année plus tard, Jean-Michel Auclair et M. Danner obtiennent dans une optique similaire un autre contrat auprès de la DGRST pour la réalisation de piles à hautes températures utilisables dans un « but industriel et économique », susceptibles de consommer des gaz industriels et de « produire de l'énergie électrique avec un rendement supérieur à celui des centrales thermiques. »⁴⁸⁹

⁴⁸⁶ DGRST, « Action concertée Conversion des énergies », Fichier des études, 1963, p. 99.

⁴⁸⁷ DGRST, « Action concertée Conversion des énergies », Fichier des études, 1963, p. 102.

⁴⁸⁸ DGRST, « Action concertée Conversion des énergies », Fichier des études, 1963, p. 80.

⁴⁸⁹ DGRST, « Action concertée Conversion des énergies », Fichier des études, 1963, p. 88.

Le même mode de travail est à l'œuvre à la Direction des études et techniques nouvelles du Gaz de France. Daniel Souriau monte des piles à électrolyte de sels en fusion ignée à une température comprise entre 300 et 800°C, et notamment une pile « semi-industrielle » d'une centaine de kilowatts en vue de la « construction de centrales de courant électrique continu servant d'unité de tête devant une centrale thermique classique. »⁴⁹⁰ Une telle entreprise doit mener à la fois à la réduction des investissements (augmentation de l'intensité spécifique aux électrodes), à l'augmentation du rendement (diminution des diverses polarisations) et à l'utilisation de combustibles bon marché tels que le gaz naturel peu modifié. Mais, en même temps, ce processus expérimental est pensé pour conduire à l'étude élémentaire de la cinétique des réactions, des organes des piles, des électrodes (diminution de la polarisation de diffusion à travers l'électrode, pertes ohmiques, résistance à la corrosion et au fluage à haute température) et des matériaux constitutifs des auxiliaires de la pile (réfractaires pour enveloppes étanches au gaz, isolants, métaux conducteurs électriques et résistants à la corrosion et au fluage). Le phénomène atteint enfin d'autres laboratoires publics. Au Laboratoire de physique-chimie de l'ONIA, Jean Laroche met au point des piles à basses et hautes températures utilisant de l'azote ou ses dérivés, en particulier de l'ammoniac (NH₃)⁴⁹¹. L'idée ayant cours est bien que c'est en construisant le système entier que l'on arrivera à déterminer les conditions optimales de fonctionnement prolongé, de rendement et de pression. Dans certains cas, comme au Laboratoire de physique de Geneviève Morand rattaché à la Faculté des sciences de Paris, cette dynamique est facilitée par le rapprochement avec l'industrie, et notamment la CIPEL. L'étude des systèmes du type Redox en milieu de sels fondus à température moyenne (150 à 500°C), qui vise à la construction de piles portables à usages mobiles pour la traction de véhicules « pouvant apporter une solution au problème des émanations de moteurs dans les villes »⁴⁹², se fait grâce à un montage expérimental équipé de cellules constituées par l'entreprise⁴⁹³.

⁴⁹⁰ DGRST, « Action concertée Conversion des énergies », Fichier des études, 1963, p. 82.

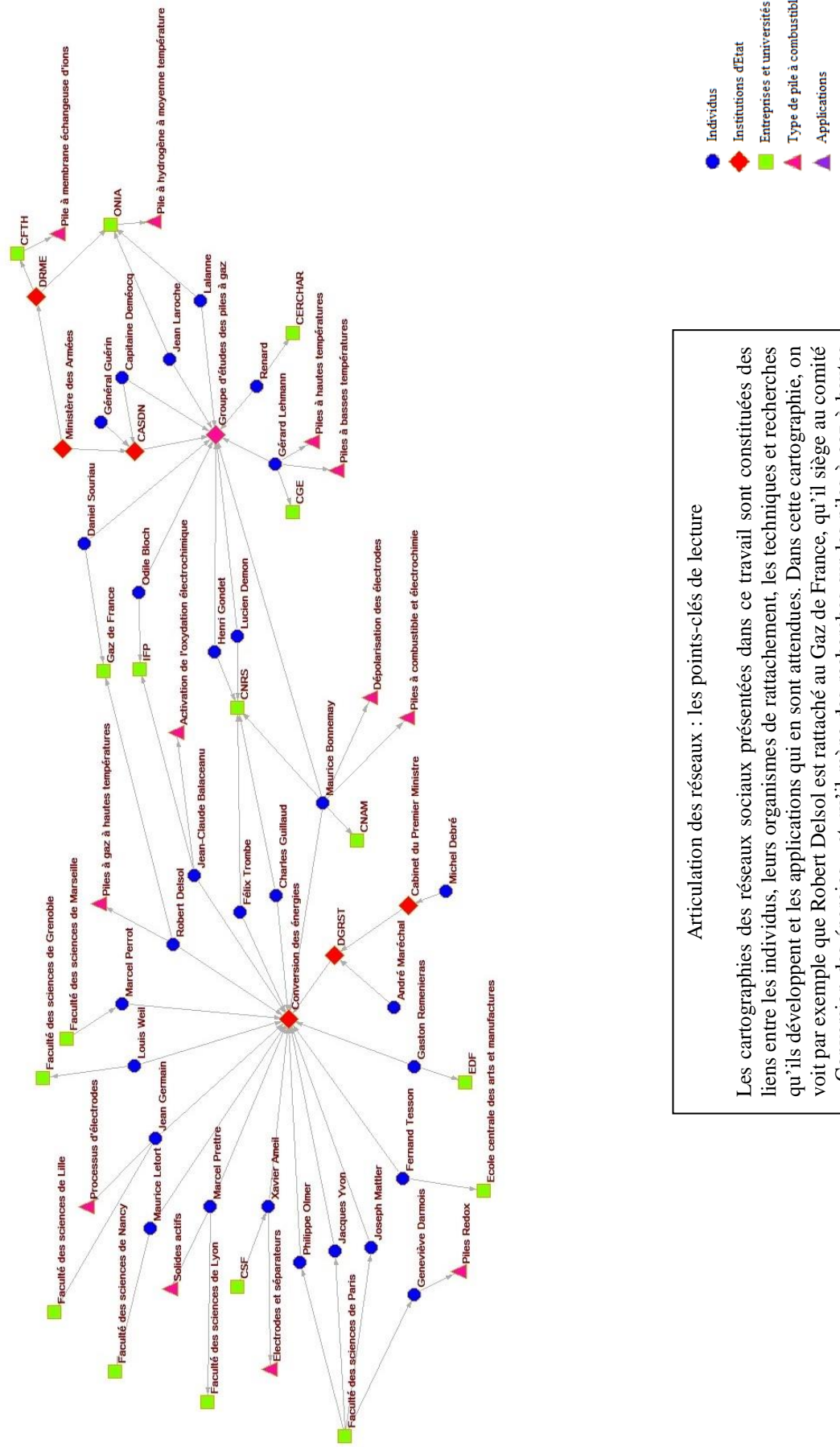
⁴⁹¹ DGRST, « Demandes ayant reçu une approbation de principe », Annexe au procès-verbal de la réunion du 4 mai 1962.

⁴⁹² DGRST, « Action concertée Conversion des énergies », Fichier des études, 1963, p. 86.

⁴⁹³ À noter que le comité « Conversion des énergies » étudie des propositions d'autres chercheurs et ne les retient pas forcément, tels qu'une pile à membrane du professeur Adany, Source : DGRST, « Recommandations du comité », Annexe au procès-verbal de la réunion du 29 mars 1963.

Forme finale / Forme initiale de l'énergie	Électrique	Lumineuse	Mécanique	Thermique	Chimique
Électrique	Convertisseurs Redresseurs Transformateurs Oscillateurs	Effets : Photovoltaïques Photogalvaniques Rap : MM. Olmer, Guillaud, Aigrain	Machines électriques Éoliennes Marémotrices Courants marins Rap : M. Remenieras	Effets : Thermoélectriques Thermoioniques Rap : MM. Olmer, Guillaud, Aigrain	Piles à combustible Piles ordinaires Accumulateurs Rap : M. Bonnemay
Lumineuse	Électroluminescence Décharge dans les gaz	Luminescence	Triboluminescence	Incandescence	Chimioluminescence
Mécanique	Machines électriques	?	Machines simples Stockage de l'énergie Stockage : M. Remenieras	Machines thermiques Rap : M. Weil	« Muscle artificiel » « Propergols », etc.
Thermique	Pompes à chaleur statique (effet Peltier) Chauffage électrique par arc Chauffage diélectrique HF, Plasmas Pompes à chaleur : Rap : MM. Guillaud, Olmer, Aigrain	Collection de l'énergie solaire (miroirs, collecteurs sélectifs, etc.)	Pompes à chaleur Réfrigération Rap : M. Weil	Réfrigérateurs à absorption Échangeurs	Combustion
Chimique	Électrochimie	Photosynthèses Radiochimie	Greffage chimique, laminage, etc.	?	?

Fig. 6 – Reproduction du tableau fourni au Comité « Conversion des énergies » par Pierre Aigrain lors de la séance du 8 janvier 1960 (Source : DGRST, 1960)



Articulation des réseaux : les points-clés de lecture

Les cartographies des réseaux sociaux présentées dans ce travail sont constituées des liens entre les individus, leurs organismes de rattachement, les techniques et recherches qu'ils développent et les applications qui en sont attendues. Dans cette cartographie, on voit par exemple que Robert Delsol est rattaché au Gaz de France, qu'il siège au comité « Conversion des énergies » et qu'il mène des recherches sur les piles à gaz à hautes températures, dont les applications n'ont pas encore été précisément définies.

Fig. 7 – Le réseau social autour des piles à combustible en France en 1962

CINQUIÈME CHAPITRE

La transformation du cadre des recherches (1963-1965)

Après deux années au cours desquelles les études sur les piles à combustible se mettent progressivement en place dans les laboratoires publics et dans les entreprises privées sous l'œil attentif du comité « Conversion des énergies » et de la DRME, une transformation de leur cadre va s'accomplir. Alors que l'on commence à réfléchir au devenir de l'action concertée au sein de la DGRST, qui tente plus largement d'analyser la portée de sa propre action politique et scientifique⁴⁹⁴, c'est bien dans le développement des piles à combustible que l'on place le plus d'attentes. Ainsi, dans une note datée du 18 octobre 1963, il apparaît que le comité attend des résultats « positifs » concernant la technique en 1965, au contraire des autres domaines qui sont qualifiés de plus « incertains »⁴⁹⁵. Cette position explique que la répartition des crédits de l'action concertée soit aussi favorable aux piles à combustible entre 1961 et 1965 : alors que 43 millions de francs sont dépensés au total, 18,4 millions le sont uniquement pour ces dernières, soit presque autant que pour l'ensemble des autres objets d'étude⁴⁹⁶. Elles sont aussi un des sujets majeurs envisagés pour la continuation de l'action concertée en 1966⁴⁹⁷. Les objectifs de recherche vont donc se préciser et se concrétiser, en tendant

⁴⁹⁴ Dans une note personnelle datée de mars 1964, le biologiste et membre du CCRST Charles Thibault établit que « réfléchir sur le devenir des actions concertées, c'est se placer à un carrefour qui oblige en fait à réfléchir au rôle de la Délégation, du Comité consultatif et des organismes de recherche. [...] Les actions concertées sont-elles un succès ? Sur le plan psychologique immédiat, le succès est certain ; dans les secteurs fondamentaux, elles ont permis des rencontres actives qu'empêchaient la méfiance, les préjugés, l'esprit de caste, les structures cristallisées, une certaine conception du doctorat, etc. : ces actions concertées y sont parvenues par deux moyens : un peu d'argent et l'existence de la Délégation, terrain neutre qui a joué, dès le départ, d'une autorité morale sérieuse qui représente un atout solide. Sur le plan psychologique plus lointain, l'effet reste faible. Les mêmes défauts inhérents aux hommes et aux institutions qui n'avaient pas permis ces contacts auparavant, demeurent et beaucoup qui en ont conscience demandent, supplient que le terrain neutre soit conservé. (Remarquons que le terrain n'est pas si neutre que cela puisque par divers moyens il exerce une influence sur l'argent d'une façon générale, ce qui doit rendre très prudent sur l'usage de l'autorité dont dispose la Délégation : elle doit être courageuse et ferme.) Sur le plan scientifique, il est prématuré, en matière de recherches fondamentales, de vouloir tirer des conclusions. [...] Dans beaucoup de cas, on peut dire que les actions concertées auront contribué à donner un fil conducteur à des travaux qui se seraient faits de toute façon mais avec des moyens plus réduits isolément. »

⁴⁹⁵ En 1963, LA DGRST émet un premier avis sur l'action concertée « Conversion des énergies » : « motivation scientifique et économique ; but poursuivi : recherche de résultats nouveaux et débouché vers des montages expérimentaux considérés comme stade préliminaire aux applications industrielles ; caractères particuliers : liaison université-industrie ; résultats espérés en 1965 : résultats positifs en pile à combustible, incertains dans les autres secteurs ; solution possible : prolongation de l'action concertée en concentrant les efforts sur les voies les plus prometteuses, ou même en abandonnant certains thèmes. » Source : DGRST, « Problème de l'avenir des actions concertées », le 18 octobre 1963, p. 4.

⁴⁹⁶ Problèmes d'électronique (thermoéléments, diodes, matériaux) : 8,6 millions ; photopiles : 2,6 millions ; optique (luminescence, infrarouge, laser) : énergie solaire : 2,1 millions ; matériaux réfractaires : 1,4 millions ; électrotechnique : 6,8 millions.

⁴⁹⁷ En 1963, la DGRST indique en effet que « le programme "Conversion des énergies" ne devrait pas être totalement arrêté en 1966. Son caractère mixte (recherches publiques et privées, recherches de base et recherches appliquées) et par suite interministériel, rend difficile son transfert total à un organisme existant. Certes des éléments pourraient à l'avenir être traités en dehors d'une action concertée - et par suite confiés à des établissements de recherche. Mais dans quelques secteurs où l'application industrielle est en vue et où les relations étroites doivent être maintenues entre laboratoires publics et privés, il paraît souhaitable de maintenir une action concertée pour les recherches de base. [...] C'est pourquoi il est proposé en l'état actuel des études préparatoires du V^{ème} Plan, de ne retenir dans un éventuel programme d'actions

généralement vers la formation de prototypes proches de la réalisation industrielle, tandis que le style de pensée en liaison va être redessiné par le collectif qui le met en œuvre. Dans ce chapitre, nous verrons de quelle manière le cadre des recherches va se transformer par une analyse du rôle du Laboratoire d'électrolyse dans le réseau social et de la place nouvelle accordée aux piles à combustible dans leurs cadres de fonctionnement et d'usage. Enfin, nous relaterons un événement marquant dans l'histoire de la technique en France : l'exposition « Piles à combustible » qui se tient au Palais de la découverte à Paris du 15 décembre 1965 au 15 janvier 1966.

5.1 Le Laboratoire d'électrolyse du CNRS au centre des recherches fondamentales

En 1963, les recherches sur les piles à combustible, dont les « promesses » industrielles s'accroissent selon les propres mots de Gaston Palewski⁴⁹⁸, sont ainsi en cours un peu partout en France. Et par le biais de son implication dans le réseau social constitué et de son influence sur le collectif de pensée qui l'abrite, Maurice Bonnemay continue d'accroître son emprise sur le champ des recherches fondamentales. Il en devient le « leader »⁴⁹⁹ national, le principal expert français reconnu à l'étranger et place son laboratoire parmi les meilleurs au monde⁵⁰⁰. En plus des événements nationaux qu'il organise pour échanger sur la thématique avec ses pairs, tels qu'un colloque de la DGRST en décembre 1962, une conférence intitulée « Nouvelles réalisations dans le domaine des piles à combustibles et des générateurs électrochimiques » auprès de la SIA (Société des ingénieurs de l'automobile) le 20 octobre 1962⁵⁰¹ puis un « Colloque international du Centre national de la recherche scientifique sur les piles à combustible » en décembre 1964 à Bellevue, des articles de

concertées 1966-1970 que les points suivants (en millions de francs) : piles à combustible : 20,0 ; MHD : 25,0 ; supraconducteurs : 10,0 ; matériaux réfractaires : 2,0. » Source : DGRST, « Fonds de développement de la recherche scientifique et technique, rapport d'activité 1963 », Tome III, rapport administratif, Deuxième partie : les actions concertées et leur avenir, p. 39.

⁴⁹⁸ Discours de Gaston Palewski à l'Assemblée nationale du 30 octobre 1963 concernant le budget de la recherche scientifique et spatiale. Source : *Le progrès scientifique*, n°63, décembre 1963, p. 2.

⁴⁹⁹ Dans un communiqué de presse daté du 17 décembre 1965, et à l'occasion de l'exposition sur les piles à combustible ayant lieu au Palais de la découverte, la DGRST elle-même le désigne sous ce titre : « Un certain nombre de laboratoires universitaires ont également participé à cet effort, et le laboratoire d'électrolyse du CNRS, qui joue le rôle de leader dans ce domaine, a tenu également à concrétiser son travail de recherche fondamentale par des réalisations. Source : DGRST, « Les piles à combustible », communiqué de presse, 17 décembre 1965, p. 4.

⁵⁰⁰ TEISSIER, Pierre, *op. cit.*, 2015, p. 50.

⁵⁰¹ *Ingénieurs de l'automobile (Journal de la SIA)*, 36ème année, Tome XXXV, n°11, novembre 1962, p. 579.

référence qu'il publie, repris en particulier par l'Académie des sciences⁵⁰², des brevets qu'il dépose⁵⁰³, des étudiants qu'il prend en thèse⁵⁰⁴ et des cours qu'il donne⁵⁰⁵, il participe à toute une série de réunions scientifiques internationales : un congrès de l'IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) en juillet 1963, un autre du CITCE (Comité international de thermodynamique et de cinétique électrochimique) à Moscou en août et un dernier de l'Electrochemical Society à New York en septembre⁵⁰⁶. Il effectue également un voyage d'études aux États-Unis pour visiter « les principaux laboratoires spécialisés dans l'étude de la conversion électrochimique de l'énergie »⁵⁰⁷ et renforce ses contacts avec ses collègues américains⁵⁰⁸, pour qui, note-t-il, « l'optimisme est général quant à l'issue favorable des travaux »⁵⁰⁹.

⁵⁰² BONNEMAY, Maurice, BRONOËL, Guy, LEVART, Eugène, « Conception et étude électrochimique d'un modèle élémentaire d'électrode poreuse à triple contact », in *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*, note présentée par Georges Champetier, novembre 1963, p. 3394 ; BONNEMAY, Maurice, BRONOËL L, Guy, LEVART, Eugène, PILLA, Arthur A., POIRIER D'ANGE D'ORSAY, Emmanuel, « Comportement d'un système électrochimique à champ non uniforme en régime transitoire », in *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*, mai 1964, p. 4256 ; BONNEMAY, Maurice, BRONOËL, Guy, LEVART, Eugène, PILLA, Arthur A., POIRIER D'ANGE D'ORSAY, Emmanuel, « Application de l'impulsion galvano-statique à la détermination des paramètres électrochimiques d'une électrode à gaz » in *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*, mai 1964, p. 6139. En fait, il semble que l'Académie des sciences concentre à cette période une bonne partie des publications touchant aux piles à combustible. En plus des travaux effectués par le Laboratoire d'électrolyse, on trouve par exemple ceux d'Odile Bloch, de Geneviève Morand ou encore de Maurice Rolin : KERN, Gilbert, BLOCH, Odile, « Sur une électrode de référence utilisable dans les hydroxydes fondus », in *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*, mai 1964, p. 5431 ; ROLIN, Maurice, LEHMANN, Gérard, « Pile à combustible utilisant l'oxyde de carbone », in *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*, mai 1964, p. 3851 ; HLADIK, Jean, CABY, Frédéric, MORAND, Geneviève, « Influence du pO= sur le potentiel d'oxydation de diverses électrodes dans l'eutectique LiClKCl », in *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*, mai 1964, p. 3296.

⁵⁰³ Entre 1960 et 1965, Maurice Bonnemay dépose au moins 5 brevets relatifs aux piles à combustible pour le compte du CNRS : BONNEMAY, Maurice, GARCIA, Henri, « Improvements in fuel cells », GB994083 (A) 1965-06-02 ; BONNEMAY, Maurice, BRONOËL, Guy, « Perfectionnements apportés aux générateurs électrochimiques à combustible », FR1407212 (A) 1965-07-30 ; BONNEMAY, Maurice, BRONOËL, Guy, « Perfectionnements apportés aux électrodes réductrices et à leurs procédés de fabrication », FR1383149 (A) 1964-12-24 ; BONNEMAY, Maurice, ROYON, Jean, « Perfectionnements apportés aux piles à gaz », FR1357835 (A) 1964-04-10, BONNEMAY, Maurice, BRONOËL, Guy, « Perfectionnements apportés aux générateurs électrochimiques à combustibles gazeux », FR1433558 (A) 1966-04-01.

⁵⁰⁴ Il prend notamment le jeune Dezaël en thèse au CNAM sur « l'étude de l'électrode positive d'une pile à combustible fonctionnant en milieu acide ». Elle sera soutenue en mai 1965.

⁵⁰⁵ Maurice Bonnemay donne plusieurs cours sur les piles à combustible et les générateurs électrochimiques à ses élèves du CNAM à partir de 1961. Source : Archives du CNAM, livres sur les contenus des cours donnés au CNAM, section Electrochimie, 1961-1962, 1962-1963, 1963-1964, 1964-1965.

⁵⁰⁶ Maurice Bonnemay n'est évidemment pas le seul à participer à de tels événements. Le directeur scientifique de la CGE Gérard Lehmann donne par exemple plusieurs conférences en 1963 : devant la Société française des thermiciens et la Société des ingénieurs civils en février et devant l'Assemblée générale du CITCE en août.

⁵⁰⁷ CNRS, « rapport d'activité », octobre 1962-octobre 1963, pp. 236-237.

⁵⁰⁸ Les travaux français sur les piles à combustible sont suivis de très près aux États-Unis. En 1963, l'US Naval Research Laboratory s'intéresse notamment aux études de l'IFP. Source : US Naval Research Laboratory, *Direct Energy Conversion. Literature Abstracts*, December 1963, p. 109.

⁵⁰⁹ CNRS, Laboratoire d'électrolyse, « Rapport de synthèse des recherches effectuées au cours de l'année 1963. Convention DGRST n°61 FR 075 », « VI – Annexe – Compte rendu du voyage d'études sur les piles à combustibles aux USA effectué par Mr M. Bonnemay », p. 73-18.

Même le commandant Jacques-Yves Cousteau, alors attelé à son projet sous-marin Précontinent⁵¹⁰, vient lui rendre visite dans ses locaux pour parler de l'évolution des piles à combustible⁵¹¹, tout comme le professeur Justi⁵¹². Au cours de cette période, son équipe et lui-même mettent surtout au point une nouvelle méthode pour l'étude fondamentale des électrodes poreuses à triple contact dans le but d'élucider les phénomènes interfaciaux caractéristiques qui s'y déroulent et d'évaluer leurs performances maximales pour un catalyseur donné. Les recherches sur ce type d'électrode sont alors en plein essor au niveau international, notamment sous l'influence des théories de R. DeLevie, W. Tobias et J. Newman⁵¹³, puisqu'il permet de lier les gaz avec l'électrolyte par le biais de ménisques contenus dans ses pores. Ce qui ne se fait pas sans difficultés : mentionnons par exemple une vitesse de réaction lente pour des pores de faible diamètre dans des électrodes dotées de plusieurs millimètres d'épaisseur. La compensation de la vitesse de réaction pour l'obtention de densités de puissance acceptables grâce à l'utilisation de milieux fortement concentrés dans l'électrolyte apporte là encore son lot de problèmes. Dans le cas de l'utilisation d'un électrolyte acide, la corrosion entraînée réduit le choix des catalyseurs possibles au platine et au palladium, « deux métaux dont le coût, outre la rareté trop grande pour une large consommation, empêche toute diffusion commerciale de la pile »⁵¹⁴. Dans celui de l'électrolyte alcalin, l'injection d'éléments carbonés dans le combustible donne de l'acide carbonique comme produit de la réaction et enclenche une carbonatation de l'électrolyte basique qui finit par se transformer en une solution de carbonate acide.

L'enjeu est ainsi de taille. Or Maurice Bonnemay, Eugène Levart et Guy Bronoël estiment pour leur part que les électrodes poreuses possèdent une structure complexe et que l'analyse du triple contact « ne peut s'effectuer, tant sur le plan théorique qu'expérimental, qu'en ayant recours à un modèle simplificateur »⁵¹⁵ facilitant les investigations mais reproduisant néanmoins toutes les activités élémentaires. La sélection d'une telle voie d'étude, qui s'effectue en parallèle des moyens d'essais et qui renvoie à une conception académique conventionnelle de la recherche en électrochimie, est importante car elle sera à la source de controverses sur les piles à combustible qui s'établiront à la fin des années soixante entre partisans d'études sur modèles simplifiés et partisans d'études sur modèles

⁵¹⁰ À noter que cette rencontre est aussi facilitée par le fait que Jacques-Yves Cousteau est membre de l'action concertée de la DGRST « Exploitation des océans ».

⁵¹¹ Entretien avec Guy Bronoël, Meudon, octobre 2016.

⁵¹² CNRS, « Rapport d'activité », octobre 1964-octobre 1965, p. 255. Le laboratoire reçoit en outre la visite des professeurs Gorbatchev et Frumkin de l'Académie de l'URSS, du professeur Christov de Bulgarie et du professeur Llopis de Madrid.

⁵¹³ EIKERLING, Michael, KULIKOVSKY, Andrei, « Polymer Electrolyte Fuel Cells. Physical Principles of Materials and Operation », CRC Press, 2015, p. 164.

⁵¹⁴ AUTRUFFE, Hubert, « Évolution des recherches sur les piles à combustible », in *Revue générale des chemins de fer*, 91^{ème} année, janvier 1972, p. 39.

⁵¹⁵ BONNEMAY, Maurice, BRONOËL, Guy, LEVART, Eugène, « Étude fondamentale des électrodes de puissance pour piles à combustible », in *Revue générale de l'électricité*, Tome 74, janvier 1965, p. 157.

systémiques. Mais il faut rappeler qu'à ce stade des recherches sur les piles à combustible en France, la connaissance du fonctionnement des électrodes est encore sommaire. Bernard Warzsawski et Bogdan Broniewski n'hésiteront d'ailleurs pas à admettre en 1968 ne pas être « en mesure de donner une explication satisfaisante » du bon fonctionnement de leurs propres électrodes ⁵¹⁶. Des questions essentielles telles que la structuration, la répartition et la localisation de la zone réactionnelle, ou encore la signification des mesures de chute ohmique, sont encore en suspens. Le laboratoire d'électrolyse du CNRS se lance donc dans la confection d'électrodes modèles monotubulaires représentant un pore d'une électrode à triple contact, permettant de fait de déconstruire complètement le processus :

« Si l'on considère une propriété macroscopique particulière d'un corps poreux, il est généralement possible d'en rendre compte, avec une approximation suffisante, en faisant correspondre à sa structure désordonnée, une structure poreuse ordonnée. Cette dernière, dans le cas le plus simple, sera constituée par un réseau de pores cylindriques de section et d'orientation identiques. Le diamètre d'un canal constitutif de ce réseau sera égal au diamètre moyen des pores de la structure initiale, sa longueur étant par exemple égale à la longueur moyenne développée de ces pores. Il est évident que l'étude de ce réseau modèle peut ensuite se ramener facilement à l'étude d'un de ses éléments. Toutefois, comme la réalisation et l'étude directe d'un tube de dimensions microscopiques sont difficiles, une électrode cylindrique plus grande sera en général choisie. Un tel modèle, s'il apporte d'utiles simplifications, doit néanmoins reproduire les phénomènes dont les électrodes sont le siège. Par conséquent, il est indispensable, dans le cas des électrodes à triple contact, que le modèle soit suffisamment petit pour que non seulement les effets mécaniques de la capillarité soient évidents, mais que de plus, comme dans les micropores, toute la surface gaz/électrolyte soit entièrement soumise aux forces capillaires. En effet, le ménisque alors obtenu dans ce tube modèle aura la même forme que celui existant dans les pores de diamètre considérablement plus petits. Cette condition d'identité morphologique du ménisque doit être généralisée au tube tout entier afin de reproduire aussi fidèlement que possible la répartition réelle du champ électrique. C'est ainsi que le rapport de la longueur au diamètre pour ce modèle doit être semblable à celui existant dans le réseau unidirectionnel. »⁵¹⁷

⁵¹⁶ Alsthom, « Historique de nos recherches sur les piles », le 24 décembre 1968, p. 8.

⁵¹⁷ BONNEMAY, Maurice, BRONOËL, Guy, LEVART, Eugène, « Applications de la radiographie à l'étude du fonctionnement des électrodes poreuses – II Étude expérimentale des phénomènes électrochimiques et interfaciaux dans les électrodes monotubulaires à triple contact », in *Electrochimica Acta*, Vol. 9, 1964, p. 728.

En même temps, Guy Bronoël transfère une partie de ses compétences antérieurement acquises sur la radiographie X dans les études, notamment pour définir la morphologie et la position du ménisque, en particulier la région où celui-ci se raccorde à la paroi, la répartition de l'électrolyte à l'intérieur de l'électrode poreuse et les limites de séparation des phases :

« On faisait de la radiographie, que j'avais déjà l'habitude de faire au ministère de l'Air, pour voir comment se répartissait l'électrolyte à l'intérieur du poreux et le modéliser. Donc on a réussi d'une part à voir ce qui se passait et à le modéliser, et d'autre part à faire à partir de ces modèles un certain nombre de calculs et de prévisions pour voir comment fonctionnaient les électrodes poreuses. C'est finalement le travail que nous avons accompli de 1961 à 1963. »⁵¹⁸

Une démarche que Arthur A. Pilla présente à Washington au congrès de l'Electrochemical Society en octobre 1965⁵¹⁹ et qui mène à la réalisation d'un prototype de pile à combustible de 50 watts exposé au CNAM le 13 juillet⁵²⁰. Sa notoriété nouvellement acquise, sa place de président de la commission « Piles à combustible » du comité « Conversion des énergies », sa récente élection au comité national du CNRS dans la section « chimie physique » et la voie recherche qu'il a impulsé sur les électrodes poreuses à triple contact permettent à Maurice Bonnemay de solliciter l'établissement d'une première RCP (recherche concertée sur programme) s'étalant sur trois années, à laquelle il souhaite associer Marcel Prettre de l'Institut de recherches sur la catalyse, Jean Besson du Laboratoire de chimie minérale et électrochimie de Grenoble et Jean Brenet du Laboratoire d'électrochimie de la Faculté des sciences de Strasbourg, pour étudier « la cinétique des réactions dont les électrodes des piles à combustible sont le siège, ainsi que le rôle des catalyseurs métalliques ou d'oxydes qui incorporés dans les espaces réactionnels déterminent les performances de ces générateurs électrochimiques »⁵²¹. Dans une lettre adressée au directeur du CNRS Pierre Jacquinet le 30 avril 1964, il justifie l'intérêt d'une telle entreprise dont le coût est estimé à 7 145 000 francs nouveaux : « les recherches sur ces générateurs ont pris, sur le plan national et sur le plan international, une très grande importance ces dernières années. [...] L'idée serait d'organiser une coopération de quatre laboratoires, pour mener à bien des recherches fondamentales sur les piles à combustible. »⁵²²

Maurice Bonnemay détaille le plan de travail :

⁵¹⁸ Source : entretien avec Guy Bronoël, Meudon, octobre 2016.

⁵¹⁹ CNRS, « Rapport d'activité du Laboratoire d'électrolyse et du centre d'électrophorèse », octobre 1964-octobre 1965, p. 27.

⁵²⁰ CNRS, « Rapport d'activité du Laboratoire d'électrolyse et du centre d'électrophorèse », octobre 1964-octobre 1965, p. 29.

⁵²¹ Lettre de Maurice Bonnemay à Mme Nieva, le 15 mai 1964.

⁵²² Lettre de Maurice Bonnemay à Pierre Jacquinet, le 30 avril 1964.

« Ces recherches consisteront à étudier la cinétique des réactions aux électrodes, à explorer les espaces réactionnels et à déterminer leurs propriétés géométriques, électriques et physico-chimiques, à mettre au point, pour chaque processus considéré, des catalyseurs électrochimiques suffisamment actifs, et enfin, à définir les conditions optimales de fonctionnement en ce qui concerne la température, les pressions totales et différentielles, la structure et la texture des électrodes et la conception de la cellule. »⁵²³

Marcel Prettre propose de poursuivre ses efforts sur les métaux actifs capables d'un emploi durable à température et pression modérées dans deux voies distinctes. La première concerne les processus superficiels capables de détruire rapidement l'activité d'une électrode à hydrogène en nickel Raney ou nickel ex-formiate qui se produisent de manière discrète dans les opérations catalytiques en n'entraînant qu'une baisse lente d'activité. L'objectif est donc de trouver une méthode pour y remédier sans l'aide de la diffraction électronique classique, impuissante dans le suivi de ces changements d'état de surface⁵²⁴. La seconde consiste à recourir à des éléments plus actifs que le nickel, le platine ou le palladium pour un dépôt à la surface d'électrodes poreuses au moyen de la diffusion de rayons X aux petits angles⁵²⁵. À Grenoble, l'essentiel des moyens du Laboratoire de chimie minérale, principalement orienté vers l'électrochimie des solides, est déjà consacré à l'étude applicative des piles à hautes températures et électrolyte solide. Les axes sélectionnés pour la RCP vont de l'élaboration de matériaux réfractaires à la construction d'une pile « préfigurant une réalisation industrielle »⁵²⁶ en passant par l'étude de la conduction électrique dans les oxydes réfractaires et les réactions d'électrodes en leur sein.

Un tel choix n'est pas anodin. La filière est généralement moins développée, aussi bien en France qu'à l'étranger, pour plusieurs raisons : bien que sur le plan théorique les piles à électrolyte solide soient connues de longue date, les études systématiques n'ont commencé que plus tard. La nécessité d'opérer à haute température (au-delà de 1000°C) et de disposer de spécialistes aux domaines de

⁵²³ Maurice Bonnemay, « Projet de programme d'action concertée sur les piles à combustible », 1964, p. 2.

⁵²⁴ Entre 1963 et 1964, Marcel Prettre obtient tout de même des résultats dans l'étude des électrodes de nickel Raney via cette méthode. Dans le rapport du CNRS pour la période, il note que « l'étude d'une électrode de nickel Raney dans les conditions de fonctionnement d'une pile à combustible a permis d'apporter des renseignements sur [la nature de l'hydrogène au contact du nickel Raney et le mécanisme de chimisorption]. La structure superficielle de l'électrode a été examinée par diffraction électronique et on peut conclure que le nickel Raney contient deux types d'hydrogène : un hydrogène qui est adsorbé chimiquement de manière réversible et un autre hydrogène appelé hydrogène structural dont la désorption électrochimique entraîne la disparition du nickel métallique et la formation d'hydroxyde et de carbonate basique de nickel à la surface de l'électrode. Une telle électrode ne peut être régénérée, car un traitement thermique à 200°C sous vide conduit à un catalyseur qui est constitué superficiellement d'oxyde de nickel. » Source : CNRS, « rapport d'activité », octobre 1963-octobre 1964, p. 460.

⁵²⁵ Maurice Bonnemay, « Projet de programme d'action concertée sur les piles à combustible », 1964, pp. 3-4.

⁵²⁶ Maurice Bonnemay, « Projet de programme d'action concertée sur les piles à combustible », 1964, p. 12.

compétence éloignés les uns des autres (techniciens de fabrications de réfractaires, physiciens du solide et électrochimistes) complique de plus les processus d'expérimentation. Miser sur ce type de pile à combustible permet ainsi à Jean Besson de s'imposer dans un champ de recherches où le nombre de laboratoires est encore très réduit et les publications peu nombreuses. Le Laboratoire d'électrochimie et de chimie physique de la Faculté des sciences de Strasbourg vise une autre voie, celle de l'étude des propriétés physicochimiques et électrochimiques des oxydes métalliques. Jean Brenet propose d'approfondir les recherches sur les composés métalliques en étudiant à la fois leurs propriétés respectivement physiques, chimiques et électrochimiques et de compléter celles de caractère thermodynamique et structurel ayant déjà cours dans ses locaux sur les réactions d'électrode en milieu de sels fondus par des travaux de cinétique électrochimique. Enfin, au Laboratoire d'électrolyse, Maurice Bonnemay souligne les compétences acquises par son équipe dans la détermination des paramètres cinétiques des différentes réactions d'électrodes. Dans le programme qu'il souhaite mettre en œuvre, il table à la fois sur des études sur la cinétique électrochimique, sur la structure des cellules et des électrodes et sur les propriétés des régions interphases.

Un autre marqueur démontrant l'importance prise par le Laboratoire d'électrolyse⁵²⁷ dans le champ de recherches universitaires sur les piles à combustible à cette période se retrouve dans les publications. Avant tout chose, il faut noter que, de manière générale, leur nombre s'accroît considérablement. Pour un total de 177 publications recensées - comprenant aussi bien des articles scientifiques dans des revues spécialisées que des conférences données, et ce en France ou à l'étranger⁵²⁸ - on passe ainsi de 8 papiers en 1960 à 51 en 1965, traitant de près ou de loin de la technique. Plus précisément, c'est entre 1962 et 1964 que l'accélération est la plus remarquable. Le nombre double : de 22 en 1962, il monte à 46 articles en 1964. Or, dans ce contexte, l'équipe de Maurice Bonnemay semble tirer son épingle du jeu. Les publications du Laboratoire d'électrolyse représentent en effet 13 % de l'ensemble avec 23 titres. À titre de comparaison, les travaux du Laboratoire d'électrochimie de la Faculté des sciences de Strasbourg de Jean Brenet représentent 9 % du total avec 16 papiers et ceux du Laboratoire de chimie minérale et électrochimie de Grenoble de Jean Besson 1,6 % avec 3 publications. Seul l'IFP fait mieux avec 23 % et 41 publications. Si l'on se penche maintenant sur les chiffres relatifs aux entreprises, les statistiques ne sont guère plus élevées.

⁵²⁷ En 1963, l'équipe du laboratoire est composée de la manière suivante. Personnel engagé sur contrat : Savy (DRME), Bernard, Franco, Hinnen, Pierrard, Pilla, Deschamps, Jonville, Moisset, Verschaffel, Harff, Valette. Personnel du CNRS : Bronoël, Momot, Haro, Peslerbe, Doniat, Verrier, Forveille, Sarradin, Garcia, Baticle, Thouvenin, Costa, Clavilier, Poirier d'Ange d'Orsay. Source : CNRS, Laboratoire d'électrolyse, « Rapport de synthèse des recherches effectuées au cours de l'année 1963. Convention DGRST n°61 FR 075 », février 1964, p. 2.

⁵²⁸ Ce nombre, tiré des archives de la DGRST et daté de 1965, ne comprend peut-être pas le nombre exact de publications pour la période. Il représente néanmoins les plus significatives aux yeux de la Délégation.

La CSF (5%), la CIPEL (0,5 %), la CGE (4,5 %), l'EDF (2,2 %), le Gaz de France (1,7 %) ou encore la Compagnie française Thomson-Houston (1,1 %) s'insèrent peu sur le marché universitaire⁵²⁹. Une exception tout de même du côté d'Alstom qui détient 10 % du total avec 19 papiers. Enfin, en entrant dans le détail d'une analyse factorielle de correspondances réalisée avec le logiciel R, on s'aperçoit que le Laboratoire d'électrolyse détient une place prééminente dans les publications touchant aux électrodes qui sont considérées, rappelons-le, comme les « pièces maîtresses »⁵³⁰ des piles à combustible.

Ainsi, sur ses 23 articles et conférences, 17 concernent directement les phénomènes qui s'y jouent. De fait, même si l'IFP affiche un nombre de publications sensiblement équivalent dans le domaine, il consacre le reste à des sujets tels que les principes généraux sur la technique, les applications et les hydrocarbures⁵³¹. Enfin, cette stratégie de publication provoque des répercussions au sein du Laboratoire d'électrolyse lui-même. Bien que Maurice Bonnemay en ait réorienté l'activité depuis le décès de René Audubert en 1957, les piles à combustible n'y constituent pas le seul sujet d'étude. On y trouve également des recherches diverses et variées sur les propriétés électrochimiques fondamentales⁵³². Mais, comme le note Michel Callon, les publications confortent la réorganisation du travail dans les locaux, qui se voient « balkanisés », avec d'un côté un grand sous-département dirigé par Guy Bronoël et de l'autre « une myriade de petites cellules adjacentes ». Ainsi, pour la seule année 1964, et alors que les publications sont les plus nombreuses, le sociologue estime que « quatre cinquièmes des articles produits par le laboratoire dans son entier ont trait aux piles à combustible et sont cosignés par [Bonnemay, Bronoël, Pilla et Poirier d'Ange d'Orsay]. C'est assez dire combien l'activité littéraire du laboratoire est publiquement centrée sur [les électrodes] et sur l'activité de son directeur qui devient aux yeux du plus grand nombre l'axe de recherches principal de [Bellevue]. »⁵³³

⁵²⁹ Un facteur évident peut cependant expliquer ces faibles statistiques du côté des entreprises. Publier des articles scientifiques n'est pas leur cœur de métier. D'autre part, il faut comprendre que les publications peuvent compromettre les travaux privés, qui risquent alors d'être récupérés ou copiés par des concurrents.

⁵³⁰ DGRST, « Les piles à combustible », communiqué de presse, 17 décembre 1965, p. 2.

⁵³¹ À noter que, contrairement à la volonté première du comité « Conversion des énergies », des logiques de concurrence se développent bien entre les différents organismes financés, et notamment entre le Laboratoire d'électrolyse et l'IFP. Guy Bronoël est explicite à ce sujet : « J'ai réussi à persuader Bonnemay de chercher à comprendre ce qui se passait dans les piles à combustible. Leur partie vive était constituée de galettes de métal fritté, généralement du nickel, imprégnées d'un catalyseur. C'est là-dedans que se produisaient les réactions. Mais ce qui s'y passait vraiment, on n'en savait rien. Et on allait se faire doubler sur le plan de la recherche fondamentale par d'autres, et notamment l'IFP. Donc ce que j'ai mis en place dès 1961, c'étaient des moyens de savoir ce qui se passait à l'intérieur des solides poreux. » Source : entretien avec Guy Bronoël, Meudon, octobre 2016.

⁵³² CNRS, « Rapport d'activité », octobre 1962-octobre 1963, pp. 235-236.

⁵³³ CALLON, Michel, *op. cit.*, 1989, pp. 188-189.

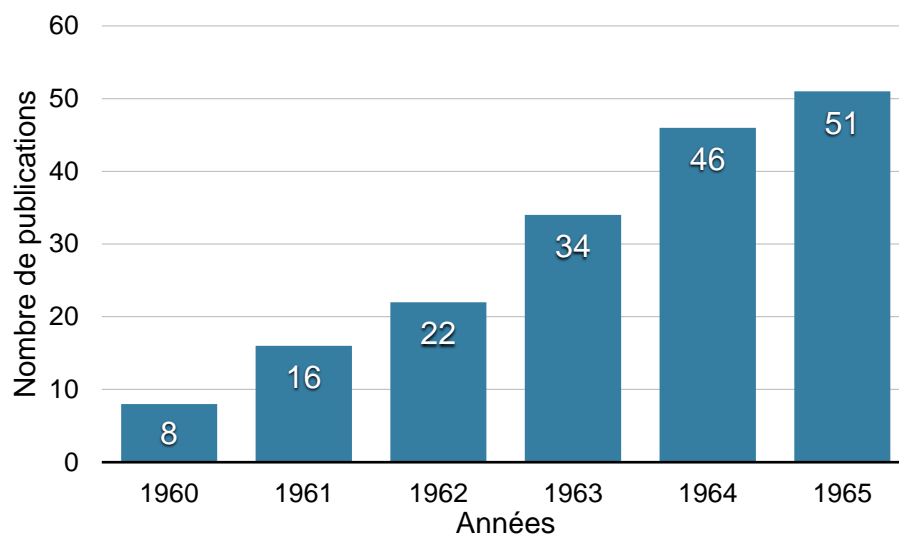


Fig. 8 – Nombre de publications scientifiques traitant des piles à combustible de 1960 à 1965 en France (Source : DGRST, 1965)

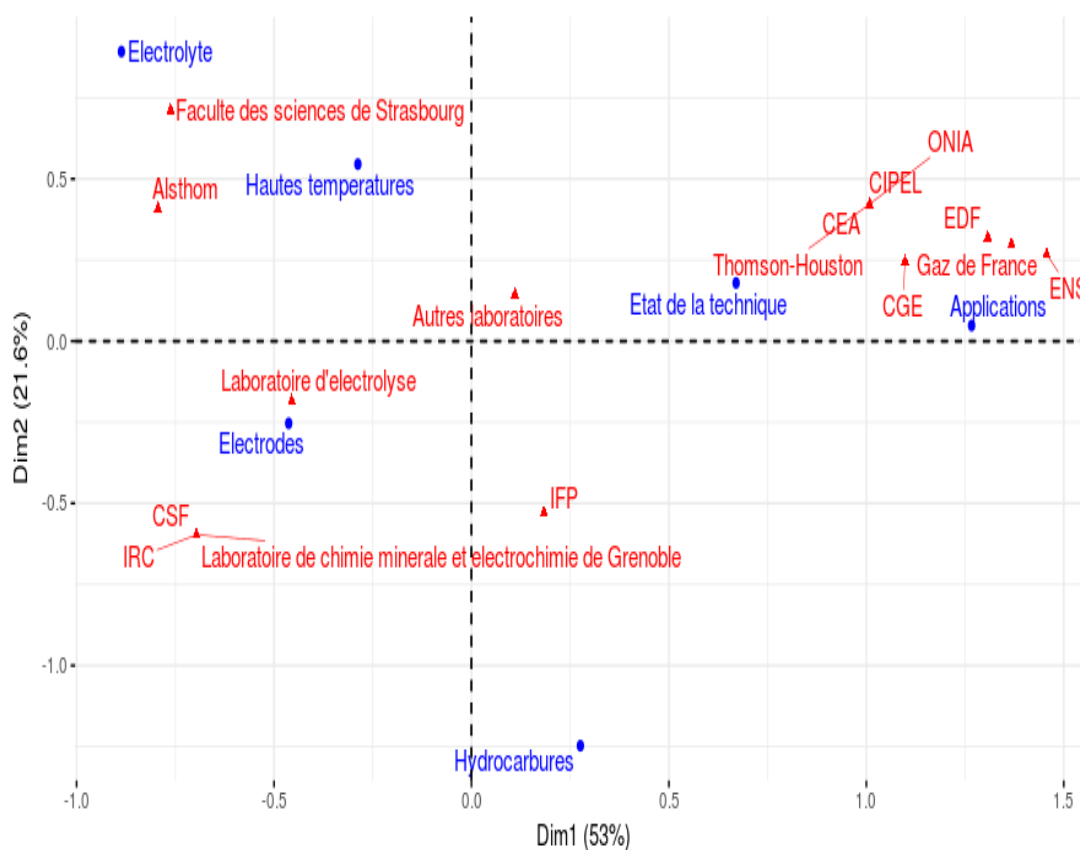


Fig. 9 – Analyse factorielle des correspondances entre les différents laboratoires et les thèmes de leurs publications entre 1960 et 1965 (Source : DGRST, 1965)

Concernant la RCP (recherche coopérative sur programme) proposée par Maurice Bonnemay, la commission « chimie physique » du CNRS émet finalement le 10 juin 1964 un avis favorable pour une durée de trois ans⁵³⁴. Elle lui attribue également 300 000 francs au titre des frais matériels de recherche. Et à la fin de l'année, le directeur du Laboratoire d'électrolyse et celui du Laboratoire d'électrochimie de la Faculté des sciences de Strasbourg rendent déjà compte de certains résultats obtenus. Au niveau de ses travaux relatifs au fonctionnement de piles à combustible à basse température, Maurice Bonnemay précise ainsi que sur les électrodes modèles monotubulaires à triple contact mises au point et étudiées, son équipe s'est efforcée de donner une expression générale explicite aux différents processus constituant les phénomènes qui s'y jouent : « À l'aide de méthodes analogiques, on a pu comprendre quelles étaient les étapes limitatives de la réaction d'électrode et on a pu dégager les limitations fondamentalement inhérentes à l'emploi d'électrodes classiques à triple contact. »⁵³⁵ Après avoir effectué des vérifications sur des électrodes poreuses de conception industrielle, les travaux sont réorientés vers des types d'électrodes ne présentant pas de limitations mises en évidence sur les systèmes classiques. Tout d'abord, des études sur les électrodes à diffusion dans le solide sont poursuivies. Mais les efforts se concentrent finalement surtout sur « un nouveau type d'électrode caractérisé par un découplage des processus d'adsorption et de transfert électrochimique ». D'autre part, l'étude met en évidence, pour certains catalyseurs, un mode de transport massique des réactants particulier rendant possible « la conception de piles ayant des caractéristiques remarquables » : « Ces systèmes [...] ont pour caractéristique essentielle d'éliminer les polarisations inhérentes au transport massique. Le phénomène limitatif dans de tels systèmes devient alors l'adsorption (ou chimisorption) ou le transfert électronique »⁵³⁶.

En conséquence, Maurice Bonnemay souhaite approfondir l'étude de la catalyse électrochimique pour découvrir des catalyseurs actifs pour la réduction de l'oxygène, en particulier dans les milieux acides. Si Jean Besson confirme lui aussi des avancées en matière d'élaboration et d'usinage de matériaux réfractaires, d'étude des modes de conduction dans les oxydes réfractaires et d'étude des interphases (réactions chimiques et électrochimiques aux électrodes), il se montre plus réservé concernant la réalisation de prototypes. Il considère d'ailleurs que « le fait même que l'on se pose encore actuellement le problème du choix non seulement du matériau constitutif de l'électrode mais même de la technique d'apport du combustible et du comburant par électrode du type L ou SM montre bien que les recherches sur les piles à électrolytes solides ne sortent pas encore du stade fondamental. »⁵³⁷ Aussi, Jean Besson admet que trop d'inconnues subsistent, à commencer par le

⁵³⁴ Lettre de M. Gabriel à Maurice Bonnemay, le 10 juin 1964.

⁵³⁵ Maurice Bonnemay, « Rapport d'activité de l'année 1964 », RCP n°66 « Piles à combustible », p. 1.

⁵³⁶ Maurice Bonnemay, « Rapport d'activité de l'année 1964 », RCP n°66 « Piles à combustible », p. 2.

⁵³⁷ Maurice Bonnemay, « Rapport d'activité de l'année 1964 », RCP n°66 « Piles à combustible », p. 50.

choix de l'électrolyte solide lui-même, et qu'il n'est pas raisonnable d'entreprendre la construction de véritables prototypes.

5.2 Penser les piles à combustible dans leurs cadres de fonctionnement et d'usage

À cette même période cependant, dans d'autres laboratoires, des modèles complets sont élaborés. Et ils ne peuvent plus être séparés de leurs applications attendues. Il s'agit même de la *conditio sine qua none* pour obtenir des subventions auprès des institutions, alors que, comme l'indique Jacques Yvon, « les travaux de développement commencent »⁵³⁸. Le rythme de production scientifique et technique semble s'accélérer brutalement. Cela est dû, en partie, aux décisions prises au sein du comité « Conversion des énergies », qui concentre désormais le collectif de pensée depuis la fin des réunions périodiques du groupe d'étude du CASDN. Au début de l'année 1964, ses membres se réunissent en effet pour examiner les recherches pouvant être poursuivies au-delà du IV^{ème} Plan⁵³⁹. Si André Maréchal considère comme « probable » que les efforts en matière de piles à combustible, à côté des études sur la magnétohydrodynamique et les supraconducteurs, continueront en 1966, il demande à Jacques Yvon « d'adapter sa gestion scientifique aux réalités qui se dégagent »⁵⁴⁰. En dehors des simples échéances budgétaires, ces réalités sont parfaitement décrites par Maurice Bonnemay dans un rapport qu'il transmet à la DGRST après un voyage effectué aux États-Unis : « si la France ne consent pas un effort important, il apparaît que dans quelques années elle sera distancée aussi bien sur le plan de la recherche fondamentale que sur le plan de la recherche-développement de telle sorte que les possibilités d'échanges ou de dialogue deviendront insignifiantes. »⁵⁴¹

Dans ce contexte, les différents laboratoires et entreprises se mobilisent pour faire part de leurs réalisations. La CGE fait par exemple visiter ses installations à Marcoussis à des représentants de la

⁵³⁸ YVON, Jacques, « Introduction », in *Annales des Mines*, Tome XI, 1964, p. 8.

⁵³⁹ Gaston Palewski fait aussi le 10 novembre 1964 une intervention à l'Assemblée nationale sur la thématique des résultats obtenus par les actions concertées : « Les résultats de la recherche ne peuvent, naturellement, se comptabiliser comme ceux de la construction de logements ou de l'exploitation minière. Et pourtant, dès maintenant, les résultats de notre action au cours des dernières années sont tout à fait identifiables. Grâce, notamment, aux actions concertées, les découvertes et les créations ont été nombreuses. Je cite, pour la physique, les substances magnétiques nouvelles, les ferrites, qui permettent d'accroître la rapidité et la sécurité des calculs dans les machines à calculer, les nouveaux types de spectrographes qui permettent de pousser plus avant l'étude des structures chimiques, les piles au silicium de haute performance permettant de transformer l'énergie solaire en énergie électrique, les piles à combustible qui tirent directement l'énergie électrique de l'énergie chimique, l'expérience de magnétohydrodynamique réalisée, pour la première fois, à l'Institut français du pétrole, tirant directement l'énergie du milieu ionisé d'une flamme. » Source : Assemblée nationale, 1^{ère} séance du 9 novembre 1964, pp. 5160-5161.

⁵⁴⁰ Lettre d'André Maréchal à Jacques Yvon, le 24 novembre 1964.

⁵⁴¹ CNRS, Laboratoire d'électrolyse, « Rapport de synthèse des recherches effectuées au cours de l'année 1963. Convention DGRST n°61 FR 075 », « VI – Annexe – Compte rendu du voyage d'études sur les piles à combustibles aux USA effectué par Mr M. Bonnemay », p. 73-19.

Direction des affaires économiques et du matériel naval de la Marine nationale en mars 1964⁵⁴². Le directeur des programmes du Centre de recherches Michel Gossot leur expose des piles à basse température fonctionnelles, à hydrogène et oxygène purs et électrodes en alliage de nickel et d'argent. Si l'ingénieur principal du Génie maritime Y. David établit que dans l'état actuel de la technique, « les piles à combustible ne sont pas encore susceptibles d'applications pratiques », il estime que « dans une dizaine d'années [leurs] performances ne seront sans doute pas très éloignées de celles des autres modes de propulsion classique » :

« Un sous-marin français du type “Narval” est équipé à l'heure actuelle d'un appareil propulsif Diesel et, pour les besoins de la navigation en plongée profonde, d'une batterie d'accumulateurs classiques de 200 t, capable de fournir une puissance de 3,5 MW pendant une heure, ou 0,4 MW pendant 20 heures. Une pile à combustible de même puissance que cette batterie pèserait 90 t et procurerait au sous-marin une autonomie trois fois plus grande. Il serait surtout possible de remplacer tout l'appareil propulsif du sous-marin par une pile qui, à poids égal, conférerait au bâtiment une autonomie de 250 h à puissance maximale, et lui permettrait de parcourir 23 000 milles à 8 nœuds. On conçoit que la Marine nationale s'intéresse à cette nouvelle forme de production d'énergie. [...] L'intérêt de ces piles est évident pour les sous-marins, du fait de l'autonomie considérable qu'elles peuvent leur conférer en plongée, mais elles pourraient également se révéler un jour concurrentielles avec d'autres modes de propulsion des navires de surface. Il convient donc de ne pas perdre de vue les progrès de cette technique, et peut-être serait-il utile dès maintenant d'analyser de plus près les perspectives à long terme d'application des piles à combustible pour les navires de commerce. »⁵⁴³

Cette même année, la CGE rédige un rapport sur les « débouchés possibles des véhicules terrestres à propulsion électrique ». Il faut rappeler que l'entreprise dispose déjà d'une certaine expérience en la matière, acquise dès la Seconde Guerre mondiale. Grâce à l'ingénieur Jean-Albert Grégoire, elle avait en effet réalisé toute une série de voitures électriques à accumulateurs en partenariat avec la Société des accumulateurs Tudor. En 1942, l'un de ses prototypes avait même battu le record de vitesse homologué sur longue distance en reliant Paris à Tours avec une moyenne de près de 42 km/h. Comme le fait remarquer Yves Bouvier, l'intérêt pour la technique avait ensuite perduré, la CGE

⁵⁴² À noter également qu'elle avait fait une démonstration d'un prototype de pile à combustible au Salon du Bourget en juin 1963. Source : *Électronucléaire. Revue bimestrielle internationale des techniques appliquées à l'énergie nucléaire*, n°1, 1966, p. 19.

⁵⁴³ Direction des affaires économiques et du matériel naval, sous-direction du matériel naval, bureau technique, « Compte rendu de visite », 11 mars 1964, pp. 3-4.

prenant part à la société Vetra (Société des véhicules et tracteurs électriques) en 1948 et portant sa participation dans la Sovel (Société de véhicules électriques) de 50 à 80 % en 1957⁵⁴⁴. Dans le rapport daté de 1964, la CGE met en tout cas en évidence l'intérêt que représentent ses piles à combustible pour la traction automobile :

« [...] la CGE se préoccupe aujourd'hui à nouveau de la propulsion électrique. Les techniques dont elle dispose dans ses quelque 30 entreprises et 80 usines, les relations qu'elle entretient avec l'industrie automobile, la qualifient pour apporter en ce domaine des innovations susceptibles de servir de point de départ à une progressive modification de nos habitudes. Les piles à combustibles constituent une nouvelle source de transformation de l'énergie, ayant un rendement tout à fait remarquable, silencieuses et sans vibrations, et ne produisant pas de vapeurs toxiques. Associées à des moteurs électriques classiques ou de conception nouvelle, elles semblent devoir bien se prêter à la propulsion de catégories diverses de véhicules terrestres. Un jour peut-être, elles serviront sur les voitures de tourisme. Les véhicules urbains, les camionnettes de livraison, les poids lourds civils ou militaires sont trois catégories qui, dans l'état de nos prévisions, semblent se prêter particulièrement bien dans un premier temps à ce type original de propulsion. »⁵⁴⁵

Pour accentuer son propos, l'entreprise établit une comparaison avec la situation américaine. Elle évoque notamment Pratt & Whitney qui consacre « 1500 personnes » au développement de la technique et qui insiste « sur l'importance de l'application à la propulsion terrestre ». De même, si elle reconnaît que « les constructeurs automobiles sont plus discrets », elle note que « Ford estime probable que d'ici quinze ans la majorité des véhicules seront à propulsion électrique »⁵⁴⁶. Chez Alsthom, qui comme indiqué précédemment a entrepris des recherches communes avec la Compagnie française Thomson-Houston, Pechiney et Saint-Gobain sur les piles Redox, la situation est similaire. Lors d'un colloque organisé par la DGRST les 11 et 12 février 1964, Bernard Warszawski affirme que « l'avènement d'une pile à combustible à usages industriels » sera capable de « concurrencer les générateurs classiques dans de nombreux domaines (centrales, centrales locales, centrales de secours et de pointe, traction ferroviaire, transport automobile, etc.). »⁵⁴⁷ Dans les *Annales des Mines*, le

⁵⁴⁴ BOUVIER, Yves, *Connexions électriques. Technologies, hommes et marchés dans les relations entre la Compagnie générale d'électricité et l'État, 1898-1992*, P.I.E. Peter Lang, 2014, p. 337.

⁵⁴⁵ Centre de recherches de la CGE, « Considérations sur les débouchés possibles des véhicules terrestres à propulsion électrique », juin 1964, pp. 1-2.

⁵⁴⁶ Centre de recherches de la CGE, « Considérations sur les débouchés possibles des véhicules terrestres à propulsion électrique », juin 1964, p. 2.

⁵⁴⁷ Bernard Warszawski, « Recherche sur les piles Redox. Action concertée : Alsthom, Compagnie française Thomson-Houston, Pechiney-Saint Gobain », Colloque DGRST des 11 et 12 février 1964, p. 2.

polytechnicien (promotion X 49) et ingénieur au Centre de recherches de la CGE Jean-Pierre Mayeur précise ces perspectives, en fonction des catégories de piles, qu'il rassemble sous quatre grands groupes : les générateurs de faible puissance, les grandes centrales statiques, les générateurs de moyenne puissance et les technologies spatiales.

Tous ces discours sont remarquables dans la mesure où ils renseignent sur l'imaginaire performatif qui est en train de se créer autour de la technique. Effet du poids du réseau, les applications envisagées commencent à fixer le cadre et l'orientation des recherches qui ne tiennent plus seulement compte des piles à combustible en elles-mêmes mais des « cadres de fonctionnement et d'usage »⁵⁴⁸ entiers dans lesquels elles doivent s'insérer. En d'autres termes, on voit ici se fixer des actions scientifiques en fonction d'objectifs et d'intérêts sociaux auxquels celles-ci sont associées⁵⁴⁹. Si Jean-Pierre Mayeur passe ainsi rapidement sur les applications spatiales déjà exploitées par les États-Unis dans le programme Gemini, les générateurs de faible puissance « étagés entre quelques centaines de watts et 100 kW environ »⁵⁵⁰ et fonctionnant à température ambiante pourraient être appliqués, nous dit-il, aux groupes électrogènes et à la propulsion automobile. C'est ici la question du rendement qui est au cœur du débat : si celui de la voiture à moteur thermique avoisine les 10 à 20 % et celui des groupes électrogènes les 20 à 25 %, le rendement d'engins équipés de piles à combustible pourrait atteindre 35 à 70 %. De plus, ils présenteraient des avantages considérables : « silence, absence de vibrations, absence de fumée et réduction de la pollution atmosphérique, démarrage instantané, [...] adaptation plus souple aux besoins ».

Mais, et c'est une nouveauté, le prix d'une telle installation est discuté dans une tentative de vision d'ensemble synthétique : « [...] le prix pourrait être de l'ordre de 150 F/kW. Ceci est encore notablement plus élevé que le prix d'un moteur thermique, qui se vend aux environs de 100 F/kW. Ce n'en est cependant pas éloigné d'un ordre de grandeur tel que la différence de prix d'achat ne puisse être compensée par la différence de rendement, et donc de consommation de combustible. »⁵⁵¹ Dans le cas des grandes unités de production d'électricité, couplées ou non au réseau général, l'auteur prévient cependant que les piles à combustible, quel que soit leur type (de températures ambiantes à 200°C, hautes températures de 700 à 1000°C) ne peuvent être vues comme « la panacée universelle » : même si ces dernières ont des rendements supérieurs à ceux des centrales thermiques, elles emploient des combustibles fossiles comme source primaire. Or, en suivant « le taux actuel

⁵⁴⁸ FLICHY, Patrick, *L'innovation technique : récents développements en sciences sociale : vers une nouvelle théorie de l'innovation*, La découverte, 1995, p. 258.

⁵⁴⁹ BARNES, Barry, *Interests and the Growth of Knowledge*, Routledge and Kegan Paul, 1977, p. 33.

⁵⁵⁰ MAYEUR, Jean-Pierre, « Perspectives d'applications des piles à combustible », in *Annales des Mines*, Tome XI, 1964, p. 20.

⁵⁵¹ MAYEUR, Jean-Pierre, *Ibid.*, 1964, p. 21.

d'accroissement de la consommation, l'humanité manquera de combustibles entre l'an 2000 et l'an 2020 ». Vu sous cet angle, les piles à combustible ne feraient que « retarder de dix ans environ l'échéance critique ». S'il admet que « certains types de pile qui fonctionneraient plutôt en accumulateurs régénérés en permanence par les rayonnements nucléaires » sont en cours d'étude à un stade fondamental, il imagine plutôt l'emploi des piles pour cette application sous un point de vue purement économique : « une telle utilisation n'est viable qu'à condition de pouvoir ainsi produire de l'énergie à un coût plus faible que le coût des autres solutions »⁵⁵². Les applications des piles à basses températures aux générateurs de moyenne puissance, de quelques mégawatts de puissance nominale, sont ensuite au nombre de deux : propulsion de locomotives d'une part et propulsion de navires, de surface ou sous-marins, d'autre part. Là aussi, les éléments de jugement entremêlent technique et économie. Pour la traction ferroviaire par exemple, Jean-Pierre Mayeur s'interroge :

« Quelles pourraient être les caractéristiques d'un générateur pour une telle locomotive ? Si on se base sur des chiffres moyens pour un service "marchandises" il faut une puissance de l'ordre de 2 MW et la consommation annuelle est de l'ordre de 3500 MWh (pour un trafic "voyageurs", il faut une puissance de 4 MW environ, mais la consommation annuelle ne nous est pas connue). Dans ces conditions, et avec notre évaluation de 10 kg/kW et de 200 F/kW au rendement de 70 % pour la pile, il faut un générateur de 20 tonnes qui coûtera 400 000 F. À cela, il nous faut ajouter le générateur de combustible, ce qui pourrait par exemple doubler poids et prix, et le combustible lui-même. Or, la puissance moyenne nécessaire sur un trajet peut être évaluée aux environs de la moitié de la puissance maximale; ceci signifie, d'une part, que le rendement moyen de la pile sera meilleur que 70 %, d'autre part, que pour l'autonomie actuelle de 5 heures, il faudra disposer de 5 MWh environ, ce qui ne fera que consommer par exemple que 1 tonne de combustible au lieu de 3 tonnes (valable pour fuel propane ou ammoniac - à multiplier par 1,5 dans le cas du méthanol). L'économie annuelle en fuel sera donc de 1400 tonnes, ce qui conduit, si le combustible est le fuel également, à une économie annuelle de 200 000 F environ sur le combustible. On voit donc que l'amortissement d'un tel ensemble est parfaitement viable. »⁵⁵³

On voit ainsi comment le cadre des recherches se transforme progressivement. D'une conception centrée sur la science des piles à combustible en elle-même, on passe à une approche plus générale. Travailler sur les propriétés de la technique, l'amélioration de ses électrodes et des réactions qui en

⁵⁵² MAYEUR, Jean-Pierre, *Ibid.*, 1964, p. 22.

⁵⁵³ MAYEUR, Jean-Pierre, *Ibid.*, 1964, p. 25.

découlent, etc., demande l'engagement d'une véritable réflexion sur les grands ensembles applicatifs puisque « les problèmes scientifiques [des piles à combustible] apparaissent comme étroitement conditionnés par des problèmes économiques »⁵⁵⁴. C'est désormais à *partir* des perspectives d'application que l'on va définir les voies de recherche dans le collectif de pensée. Plus qu'une simple justification des efforts de recherche et de développement entrepris, il est considéré que c'est ce qui permettra à la fois d'éviter des études inutiles sur des phénomènes coupés de leur portée globale et de diffuser au mieux l'innovation. Cette tendance est commune à tout le champ d'étude. Dans le même numéro des *Annales des Mines*, un grand nombre d'auteurs traitent de la technique de cette manière. Le directeur scientifique de la CGE Gérard Lehmann évoque notamment l'importance des « conditions d'exploitation » des appareils qui « résulteront d'un compromis ayant pour effet d'obtenir l'optimisation économique »⁵⁵⁵ du volume, du poids et du prix de construction. Dans son article consacré aux principales causes de polarisation des piles, Maurice Bonnemay argumente sur les applications finales influençant les choix effectués sur les recherches.

À l'IFP, les ingénieurs Yves Bréelle et Paul Degobert expliquent avoir cherché « à confirmer les espérances en traction [automobile], et à préciser des possibilités d'applications différentes, en évaluant l'importance des débouchés correspondants et en dégagant les voies de recherche pour y parvenir. »⁵⁵⁶ Mais c'est encore le directeur adjoint du Laboratoire d'électrochimie de la CGE Jean-Michel Auclair qui dresse le mieux le portrait de ce tournant scientifique lorsqu'il écrit que la réalisation de piles à combustible dépend de nombreux paramètres « dont la détermination fixe l'allure même » du générateur : « les piles peuvent en effet fonctionner dans des conditions très variées : toute réaction chimique est en principe susceptible de convenir; température et pression sont *a priori* quelconques; état physique des réactions, électrolyte, voire électrodes *a priori* indéterminé. Dans ces conditions, on imagine l'extrême diversité des types de réalisation possible. »⁵⁵⁷ Ce nouveau mode de travail bouscule les codes traditionnels antérieurs. Les acteurs de ce mouvement en ont conscience, à l'instar du directeur de l'École supérieure d'électricité Philippe Olmer qui écrit dans la revue *Sciences et Techniques* que les découvertes débouchant dans le domaine industriel supposent normalement que les stades successifs de recherche fondamentale, de recherche appliquée et de développement aient été franchis. Or, note-t-il, « l'accélération du progrès scientifique et technique

⁵⁵⁴ *Le progrès scientifique*, n°81, février 1965, p. 6.

⁵⁵⁵ LEHMANN, Gérard, « Piles à combustible et thermodynamique », in *Annales des Mines*, Tome XI, 1964, p. 13.

⁵⁵⁶ BREELLE, Yves, DEGOBERT, Paul, « Perspectives d'applications des piles à combustible dissous », in *Annales des Mines*, Tome XI, 1964, p. 37.

⁵⁵⁷ AUCLAIR, Jean-Michel, « La technologie des piles à combustible », in *Annales des Mines*, Tome XI, 1964, p. 32.

télescope de plus en plus les étapes intermédiaires et dans les secteurs à évolution rapide, comme celui des piles à combustibles, c'est simultanément que ces trois démarches se poursuivent. »⁵⁵⁸

De fait, la DRME est bientôt en mesure de présenter deux prototypes qu'elle a financés « en état de fonctionnement autonome hors des laboratoires, et constituant, avec les équipements et alimentations, des ensembles compacts transportables »⁵⁵⁹. Le 1^{er} juin 1965 en effet, une pile hydrogène-oxygène à température moyenne d'une puissance nominale de 1 kW, « prototype des futurs générateurs fixes, semi-mobiles ou embarqués pouvant occuper la gamme de puissance de 1 à 500 kW par exemple couvrant les applications de traction et de propulsion navale », et une pile à membrane échangeuse de protons de 50 watts « particulièrement destinée aux alimentations de matériel de télécommunications » et « à la fonction de source d'énergie de servitude à bord des petits et moyens satellites »⁵⁶⁰ sont respectivement exposés par l'ONIA et la Compagnie française Thomson-Houston dans les locaux de la DRME. D'ailleurs, à cette même période, le CASDN réitère la valeur qu'il accorde à la technique :

« [...] un intérêt exceptionnel s'attache aux piles à combustible. Il y a lieu de poursuivre les efforts : en recherche fondamentale notamment sur la catalyse, les électrodes et les membranes, en particulier les membranes macromoléculaires ; en recherche appliquée notamment sur les piles genre REDOX à température moyenne, sur les piles à électrolytes solides et surtout sur les piles à amalgame alcalin ; en recherche de développement en faveur des solutions les plus compétitives. Les résultats déjà acquis permettent de penser que les piles à combustible nous offrent actuellement une occasion de conquérir une primauté mondiale dans un secteur de pointe, aussi important pour la défense que pour l'économie. Aussi le Comité estime-t-il que les allocations budgétaires concernant les piles à combustible devraient faire l'objet d'un examen particulièrement bienveillant, et que l'attention du Gouvernement devrait être attirée sur ce point. »⁵⁶¹

Dans les premiers mois de l'année 1965, un palier semble ainsi avoir été franchi. À l'occasion d'un exposé fait au Groupe X-auto le 23 mars, Jean-Pierre Mayeur n'hésite pas à affirmer que l'avènement des piles à combustible est proche et que ses descendants pourront bientôt « s'esclaffer au musée de l'automobile devant ces monstres bruyants, vibrants et consommant de grosses quantités d'un produit

⁵⁵⁸ *Sciences et Techniques*, n°990, 14 janvier 1965, p. 21

⁵⁵⁹ *Entropie*, mai-juin 1965, p. 47.

⁵⁶⁰ *Entropie*, mai-juin 1965, p. 51.

⁵⁶¹ Source : CASDN, « Intérêts dégagés par le Comité d'action scientifique de la Défense au cours de sa réunion du II juin 1964 sur le rapport national de conjoncture du CNRS », section II : chimie physique, pp. 1-2.

compliqué qui s'appelait l'essence, que seront devenues pour eux les voitures des années 1960-1970 »⁵⁶². Dans un commentaire que fait la DGRST dans les pages du *Progrès scientifique* au sujet de l'ensemble de son action concertée traitant de la conversion des énergies, qui a permis depuis le départ de financer soixante-quatre contrats avec une cinquantaine de laboratoires et de déposer soixante-dix brevets, on comprend aussi que de toutes les techniques suivies les piles à combustible sont celles que l'on considère les plus proches d'aboutir à des réalisations industrielles :

« Dans le domaine de la conversion des énergies, de très nombreuses recherches ont abouti à des résultats intéressants. Celles qui touchent à la conversion directe de la chaleur en électricité ont notamment abouti à la réalisation de nombreux thermoéléments et d'un premier convertisseur à flamme. D'autres touchant aux procédés de conversion intéressant l'optique ont abouti par exemple à la réalisation de plaquettes au silicium satisfaisantes, pour la fabrication de photopiles, indispensables à la recherche spatiale. Les études sur l'énergie solaire ont entre autres abouti à l'expérimentation en grandeur réelle de dispositifs de climatisation totalement nouveaux qui emmagasinent l'énergie du rayonnement solaire et laissent ensuite l'édifice rayonner vers le ciel. A la faveur d'études sur les hautes températures de nouvelles ferrites à base de manganèse et non plus de fer ont été découvertes et leurs propriétés magnétiques étudiées : on sait l'importance des mémoires à tores de ferrite dans les nouveaux types de calculateurs. Toutes ces découvertes sont importantes. Cependant les résultats les plus prometteurs de cette action sont ceux qui touchent aux piles à combustible et à la magnétohydrodynamique. Cette méthode consiste à faire travailler dans un champ magnétique des gaz de combustion rendus conducteurs par ensemencement. Une maquette de générateur utilisant ce dernier principe est entrée en fonctionnement en juin 1964. Dans le domaine des piles, les études fondamentales sur la catalyse, l'électrolyse, etc., et les études industrielles de constituants pour électrodes, tout en se poursuivant, ont permis la réalisation de plusieurs maquettes de piles. La pile à méthanol, celle à ammoniac ont donné d'excellents résultats. »⁵⁶³

D'ailleurs, du 23 au 25 février 1965, un colloque sur les piles à combustible réunissant quelque deux cents personnalités issues de laboratoires publics et privés, français et étrangers, est organisé par la Délégation pour notamment « préciser les perspectives d'applications industrielles »⁵⁶⁴ de la technique. À cette époque, les différents organismes semblent avoir définitivement fixé leur choix

⁵⁶² *La jaune et la rouge*, n°194, juin 1965, p. 3.

⁵⁶³ *Le progrès scientifique*, n°81, février 1965, p. 9.

⁵⁶⁴ *Le progrès scientifique*, n°81, février 1965, p. 2.

sur les types de piles à développer chacun de leur côté et sur les objectifs qu'ils souhaitent leur assigner. D'autant plus que les recherches menées à l'étranger battent leur plein. Tandis qu'aux États-Unis près de 2600 personnes sont employées dans le domaine pour un budget de plus de trente-six millions de dollars – pour la seule année fiscale 1963 –, l'Allemagne fédérale y occupe plus de deux cents chercheurs, ingénieurs et techniciens. L'Angleterre, la Suisse, la Belgique et l'URSS viennent compléter le tableau. Même la Marine suédoise engage une somme de dix millions de francs pour l'étude d'un générateur de 200 kW fonctionnant à l'ammoniac. Gaston Palewski fait encore de cette concurrence internationale un des thèmes principaux de son discours d'inauguration du colloque :

« L'impact économique et financier des piles à combustible dans les années à venir sera tel que plutôt que jouer sur la notion de concurrence internationale, il paraît plus souhaitable d'évoquer l'émulation, l'œuvre commune. Il n'est pas impensable, en effet, que dans un avenir plus ou moins lointain, les données énergétiques de toutes les nations se trouvent profondément modifiées par la substitution, au moins partielle, aux sources d'énergie classique, de sources d'énergie nouvelles. Trois années de recherches sur les piles à combustible ont confirmé les possibilités techniques et économiques qu'elles avaient laissé pressentir à leurs promoteurs. »⁵⁶⁵

Jusqu'à là cependant, et même si des recherches sont menées un peu partout sur la planète, la connaissance de la technologie des piles à combustible reste globalement en France l'apanage du milieu scientifique ou d'amateurs éclairés. Ce sont les revues scientifiques et les colloques de recherche internationaux, tels que les « Journées internationales d'étude sur les piles à combustible » ayant lieu à Bruxelles en juin 1965⁵⁶⁶, qui concentrent la majeure partie des publications concernant

⁵⁶⁵ *L'information*, 25 février 1965.

⁵⁶⁶ De nombreuses communications sont présentées par des chercheurs français à l'occasion de cet événement : Yves Bréelle et Paul Degobert y présentent par exemple un papier intitulé « Technologie des piles à combustible dissous ». Jean-Michel Auclair intervient sur les « États d'avancement des travaux menés par le Centre de recherches de la Compagnie générale d'Électricité sur les piles à combustible fonctionnant à température ambiante ou un peu supérieure ». Odile Bloch et Michel Prigent sur « L'optimisation de la mise en œuvre du platine pour constituer l'électrode à méthanol ». Maurice Bonnemay, Guy Bronoël, Arthur Pilla et Eugène Levart sur les « Piles à combustible à électrodes rotatives ». L'ingénieur Georges Feuillade sur « L'emploi des oxydes métalliques semi-conducteurs comme catalyseurs dans les piles oxygène-hydrogène ». Jean Besson et Charles Déportes sur « Les processus élémentaires de la réaction d'électrode à oxygène dans les oxydes électrolytes solides à haute température » et sur la « Sélection d'oxydes réfractaires pour piles à combustible à haute température ». L'ingénieur Lemagnien sur « la contribution de la Compagnie française Thomson-Houston au développement des piles à gaz à membrane ». Lovy sur « les piles à gaz monobloc à électrolyte fondu ». Enfin, messieurs Vignaud et Brouillet présentent un papier sur « l'étude de la tension électrochimique mesurée sur une électrode de carbone ». D'autres communications sont écrites pour d'autres colloques. A. Salvadori présente une communication intitulée « Semi-industrial fuel cell element of the Gaz de France » lors du *150th Annual Meeting* de la division of fuel chemistry organisé par l'American Chemical Society à Atlantic City en septembre 1965, tout comme Maurice Bonnemay, Guy Bronoël, Arthur Pilla et Eugène Levart qui proposent un papier intitulé « Study of hydrocarbon oxidation by experimental separation of reaction steps. 1. Theoretical analysis and ethane adsorption on platinumium ». A la

leur évolution. Cette situation change en août lorsque le grand public est mis au courant de son importance au sein du programme spatial américain. En effet, le vol de la capsule Gemini V, pilotée par les astronautes Gordon Cooper et Pete Conrad, entre le 21 et le 29 août doit marquer un nouveau record de durée dans l'espace en même temps que répondre à certaines questions techniques telles que les rendez-vous orbitaux. Or, des problèmes liés aux piles à membrane échangeuse de protons et à hydrogène et oxygène de la General Electric embarquées surgissent dès les premières heures de navigation : leur pression descend brutalement sous les 138 newtons par cm²⁵⁶⁷. Sans possibilité de communication avec le centre des opérations de la NASA, Gordon Cooper choisit d'éteindre le système tout entier. Mais un tel acte signifie aussi la coupure d'énergie à bord et l'abandon de la mission. Finalement, et après rallumage, les piles à combustible recommencent à fonctionner dans des conditions exemplaires. L'incident fait la une du *Figaro* le 23 août : « Depuis hier soir, la “pile à combustible” qui a deux reprises avait failli provoquer l'interruption du vol fonctionne normalement »⁵⁶⁸, titre le quotidien. Et l'envoyé spécial à Cap Kennedy Daniel Garric de développer sur ces « centrales électriques de poche », « responsables des déboires » : « c'est un procédé nouveau qu'expérimentait “Gemini V” - celui des “piles à combustible” capables de fournir de l'électricité pendant un mois. Or c'est justement ce qui a flanché. Ces piles sont de véritables centrales. »⁵⁶⁹

5.3 L'exposition « Piles à combustible » du Palais de la découverte

La tendance scientifique liant étroitement les applications attendues des piles à combustible et la détermination des études à mener va se manifester publiquement à l'occasion d'une exposition dédiée à la technique au Palais de la découverte entre le 15 décembre 1965 et le 15 janvier 1966. Au cours de l'été 1965⁵⁷⁰, André Maréchal prend en effet contact avec le tout nouveau directeur du Palais de la découverte Adolphe-Jean Rose et arrête les grandes lignes de l'entreprise, dont le coût se chiffre à près de 68 000 francs⁵⁷¹. Dans une lettre qu'il lui adresse le 5 août 1965, il rappelle les raisons d'une telle action. D'une part, il souhaite « initier le public aux possibilités des piles à combustible et à l'état des recherches en France ». D'autre part, cette exposition doit « permettre de comparer entre

Direct Energy Conversion Conference en février 1965, Paul Degobert, Odile Bloch et Yves Bréelle interviennent enfin sur les « Perspectives d'application des piles à combustible dissous ».

⁵⁶⁷ HACKER, Barton C., GRIMWOOD, James M., *op. cit.*, 1977, p. 257.

⁵⁶⁸ *Le Figaro*, n°6526, le 23 août 1965, p. 1.

⁵⁶⁹ *Le Figaro*, n°6526, le 23 août 1965, p. 5.

⁵⁷⁰ Le CCRST est recomposé à cette période. Il comprend désormais le physicien André Blanc-Lapierre, le chimiste Raymond Paul, le médecin Marcel Bessis, le directeur de l'EDF Marcel Boiteux, le physicien Robert Chabbal, le directeur général adjoint de la CSF André Danzin, le directeur de la Société Rhône-Alpes Bernard Delapalme, l'astronome Jean-François Denisse, le professeur du Collège de France Jean Hyppolite, le médecin et biologiste Jérôme Lejeune, l'agronome Claude Martin et le chimiste Guy Ourisson.

⁵⁷¹ Lettre d'Adolphe-Jean Rose à André Maréchal, le 20 décembre 1965.

elles les performances atteintes dans ce domaine par les sociétés soutenues jusqu'ici par la Délégation générale. »⁵⁷² Plus marginalement, la DGRST décide aussi de la publication d'un ouvrage collectif sobrement intitulé *Les piles à combustible*. Coordonné par Odile Bloch de l'IFP, il a pour objectif d'appuyer d'un point de vue scientifique l'exposition et d'offrir un panorama « des efforts grâce auxquels on peut estimer que la France, malgré la relative modestie des moyens mis en jeu, se trouve occuper actuellement une place non négligeable sur le plan international. »⁵⁷³ L'année 1965 voit s'achever le IV^{ème} Plan et avec lui les crédits destinés à la technique par le biais du Comité « Conversion des énergies »⁵⁷⁴.

L'heure est donc au bilan et à la préparation des années à venir : « Il convient maintenant de faire un choix afin de pouvoir, dès le début de 1966, pousser plus à fond les seuls modèles prometteurs »⁵⁷⁵, confirme André Maréchal. Et pour que la DGRST puisse faire son choix en toute connaissance de cause et le plus rapidement possible, il est décidé que l'exposition des différentes maquettes se fera au plus tard en décembre. Un tel évènement nécessite toutefois une organisation logistique d'envergure. Si Alphonse-Jean Rose n'a pas de mal à obtenir du secrétaire d'État chargé des Affaires culturelles une « autorisation provisoire »⁵⁷⁶ pour une salle suffisamment grande pour accueillir l'ensemble des modèles – la salle Jean Goujon des galeries Nord du Grand-Palais⁵⁷⁷ – et met volontiers ses équipes techniques et artistiques au service de la DGRST, la préfecture de Paris s'inquiète de « la présence d'une quantité importante de combustibles liquides et gazeux, ainsi que d'oxygène, puisque les piles doivent être présentées en fonctionnement ». Pour les autorités étatiques, il en résulte que « les risques pour le public ne sont donc pas négligeables. »⁵⁷⁸ En raison de l'intérêt présenté par la manifestation, le Directeur de l'Hygiène et de la Sécurité publique ne s'oppose pas à sa tenue. Mais il exige que l'effectif du public soit encadré par des visites guidées et demande à ce que tous les exposants rencontrent le directeur du Laboratoire municipal. En outre, plusieurs consignes techniques sont données : les installations électriques doivent être antidéflagrantes ; un explosimètre doit être placé sur chaque stand pour mesure de la teneur en hydrogène ; des services de sécurité spéciaux sont attachés à l'exposition⁵⁷⁹.

⁵⁷² Lettre d'André Maréchal à Adolphe-Jean Rose, le 5 août 1965.

⁵⁷³ MARECHAL, André, « Préface », in DGRST, *Les piles à combustible*, Publications de l'Institut français du pétrole, 1965, p. V.

⁵⁷⁴ La répartition des crédits pour le comité s'effectue de la manière suivante entre 1961 et 1965 pour un total de 43 millions de francs : 10,6 millions de francs en 1961, 8,4 en 1962, 11 en 1963, 9,4 en 1964 et 3,4 en 1965. Il s'agit de l'action concertée qui reçoit le plus de crédits après l'Électronique et l'Exploitation des océans. Source : *Le progrès scientifique*, n°81, février 1965, p. 4.

⁵⁷⁵ Lettre d'André Maréchal à Adolphe-Jean Rose, le 5 août 1965.

⁵⁷⁶ Lettre d'Alphonse-Jean Rose à André Maréchal, le 24 novembre 1965.

⁵⁷⁷ Lettre d'Alphonse-Jean Rose au ministre d'État chargé des Affaires culturelles, le 28 septembre 1965.

⁵⁷⁸ Lettre du Directeur de l'Hygiène et de la Sécurité publique à Alphonse-Jean Rose, le 6 décembre 1965.

⁵⁷⁹ Lettre d'André Maréchal, le 29 novembre 1965.

L'inauguration a finalement lieu le 17 décembre sous la tutelle du Secrétaire d'État chargé de la Recherche scientifique et des Questions atomiques et spatiales Yvon Bourges, qui vient de remplacer Gaston Palewski. À l'occasion d'un examen effectué par un comité composé de Philippe Olmer, de Maurice Bonnemay – qui vient d'obtenir le grade de Chevalier dans l'Ordre de la Légion d'Honneur⁵⁸⁰ – et de divers « contrôleurs scientifiques »⁵⁸¹ pour le compte de la DGRST, tous les organismes financés sont enfin réunis avec leurs différents « modèles probatoires », inutilisables en tant que tels mais qui doivent permettre de « se faire une idée de leurs performances et de leurs possibilités »⁵⁸². Or, leurs configurations respectives démontrent bien que leurs caractéristiques techniques sont désormais fixées par les applications visées. Premier de la liste, le Laboratoire d'Électrolyse du CNRS expose une pile à diffusion latérale de 1 kW et 6 kg fonctionnant à l'hydrogène et à l'oxygène et composée de huit modules en série et de six électrodes (trois anodes et trois cathodes) par module. De surcroît, deux de ses appareillages servant à l'étude des électrodes poreuses et des propriétés électrochimiques des catalyseurs sont présentés. Il s'agit du seul exposant dont les piles n'ont pas un but autre que la recherche fondamentale. Mais comme l'admet Guy Bronoël, « il fallait prouver qu'on savait faire »⁵⁸³. Tout comme le laboratoire de Maurice Bonnemay, l'ONIA ne fait pas seulement état de sa pile à hydrogène et oxygène à moyenne température (200°C) et sous pression (40 bars), dotée d'une puissance nominale de 1 kW mais aussi d'une pile à moyenne température (250°C) et pression atmosphérique fonctionnant avec de l'ammoniac cracké ou de l'hydrogène comme combustible et de l'air ou de l'oxygène comme comburant et d'un générateur d'hydrogène à partir d'ammoniac⁵⁸⁴. Celles-ci, nous dit le service de physico-chimie de l'Office basé à Toulouse dans le fascicule de l'exposition, « sont particulièrement adaptées aux moyennes puissances de quelques kilowatts à quelques mégawatts » et « pourraient être employées comme groupes électrogènes fixes ou mobiles, pour la propulsion terrestre ou maritime, en particulier toutes les fois que l'on recherche l'absence de bruit et de pollution de l'atmosphère. »⁵⁸⁵

⁵⁸⁰ Décret en date du 30 décembre 1964, paru au Journal officiel le 1^{er} janvier 1965.

⁵⁸¹ Lettre d'André Maréchal, le 30 novembre 1965.

⁵⁸² André Maréchal, « Avant-propos », Palais de la découverte, « Piles à combustible. Recherches engagées sous l'égide de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique », exposition du 15 décembre 1965 au 15 janvier 1966, 1965, p. 4

⁵⁸³ Entretien avec Guy Bronoël, Meudon, octobre 2016.

⁵⁸⁴ La présence d'accessoires sur les stands, « peu abordés jusqu'ici » selon l'IFP (BLOCH, Odile, BREELLE, Yves, DEGOBERT Paul, « Les piles à combustible à basse température », rapport IFP n°12.302, p. 14), est un autre marqueur de l'insertion des piles à combustible dans les systèmes d'application.

⁵⁸⁵ Palais de la découverte, « Piles à combustible. Recherches engagées sous l'égide de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique », exposition du 15 décembre 1965 au 15 janvier 1966, 1965, pp. 18-20.

Vient ensuite la CGE. Outre une pile à usage didactique équipée de deux électrodes circulaires de 50 mm de diamètre et un module de 50 ampères comprenant douze électrodes creuses (six à hydrogène et six à oxygène) et formant onze piles montées électriquement en parallèle, elle met à disposition du public une maquette de pile froide de 24 volts. Surtout, la particularité de ces prototypes est de ne pas contenir de métal précieux. L'objectif est clair : « fabriquer en série » à des prix « bon marché » des produits qui compléteront la gamme constituée par les batteries et accumulateurs et qui se substitueront progressivement « aux groupes électrogènes classiques »⁵⁸⁶. Le Gaz de France, pour sa part, présente une pile à haute température (550°C) de 1,5 kW fonctionnant à partir de gaz industriels pour le combustible et d'un mélange d'air et de gaz carbonique pour le comburant. En fixant son choix sur ce type, il opte volontairement pour une solution industrielle à caractère économique : « le but visé consiste en effet à obtenir de l'électricité à partir de gaz industriels courant avec un prix de transformation aussi peu élevé que possible ». À partir des performances et des durées de vie espérées, il est ainsi projeté d'introduire sur le marché de l'énergie des batteries de piles à gaz à haute température et à puissance élevée. De tels ensembles pourraient, en principe, « produire l'énergie dont on a besoin à l'endroit même où elle doit être utilisée. C'est le cas, par exemple, de l'électrochimie et de l'électrometallurgie, toutes deux grosses consommatrices de courant continu basse tension et de chaleur, ces deux formes d'énergie étant fournies directement par la batterie de piles. »⁵⁸⁷ De façon analogue, le Service des études avancées du Landy pense à alimenter des sous-stations de transport ferroviaire électrifié à partir de piles construites à proximité d'artères de gaz et des unités consommant les produits gazeux transportés ou distribués par son réseau. Dans tous les cas, il s'agit de cibler stratégiquement des lieux bien desservis en gaz mais mal placés dans le réseau électrique national. « Par exemple », écrit Daniel Souriau, « dans le département du Nord, une pile de 500 kW paraît être rentable si son amortissement peut se faire sur 3,6 ans. Le transport ferroviaire peut être un client intéressant, ainsi que la construction métallique, dans les régions voisines des artères de gaz. »⁵⁸⁸

Sur le stand de l'association entre le groupe Carbone Lorraine, la CIPEL et Ugine-Carbone, deux types de piles à combustible sont présentés simultanément. L'obtention en 1962 d'un contrat de quarante mois de la DGRST a en effet permis à tous les participants de réinvestir et d'unir leurs expériences industrielles propres dans les recherches : Ugine-Carbone a en particulier étudié la réalisation d'électrodes en métaux frittés tandis que le Carbone Lorraine et la CIPEL se sont intéressés

⁵⁸⁶ Palais de la découverte, « Piles à combustible. Recherches engagées sous l'égide de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique », exposition du 15 décembre 1965 au 15 janvier 1966, 1965, p. 25.

⁵⁸⁷ Palais de la découverte, « Piles à combustible. Recherches engagées sous l'égide de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique », exposition du 15 décembre 1965 au 15 janvier 1966, 1965, pp. 27-29.

⁵⁸⁸ SOURIAU, Daniel, « Les applications des piles à combustible à haute température », in DGRST, *Les piles à combustible*, Publications de l'Institut français du pétrole, 1965, p. 495.

à l'emploi du carbone et à la réalisation des modèles. De fait, leurs travaux communs ont principalement porté sur l'obtention de structures favorables à la diffusion gazeuse, la mise au point de catalyseurs électrochimiques et l'imperméabilisation des électrodes. D'autre part, une fraction importante des études a été consacré aux problèmes d'ingénierie inhérents à la technique : élimination de l'eau, pompage des gaz, etc. Ainsi, une première pile, de 200 W (avec une pointe à 400 W au démarrage), fonctionne à l'hydrogène, à l'air libre et à température ambiante (< 70°C). Durant l'exposition, elle alimente un moteur de palan permettant d'élever un poids de 105 kg à une vitesse de 3 m/min. Sur le stand, deux autres modèles du même genre fournissent l'électricité d'une lampe. Proche du premier, le second type de pile est à hydrogène et oxygène. Produisant 12 à 20 W, il alimente un poste de télévision. Malgré ses modestes démonstrations, le groupement d'industriels attend de ses engins des retombées plus importantes. Munis de leurs dispositifs annexes de fourniture d'hydrogène soit à partir de bouteilles d'hydrogène cryogénique, d'ammoniac ou d'hydrocarbures, ils ont pour objectif d'être adaptés à de multiples tâches : signalisations maritime, ferroviaire, aérienne, lumineuse, sonore ou radioélectrique ; balisages de terrains d'aviation, etc. ; groupes de secours pour les hôpitaux et lieux publics : théâtres, cinémas, écoles ; alimentation de fermes ou de villages isolés (centrale locale), fourniture d'énergie sur les engins mobiles autres que la traction : bateaux de plaisance, caravanes, etc. ; alimentation en énergie pour la traction : bateaux, locomotives, locotracteurs, véhicules routiers.

À peu près les mêmes applications (signalisations, balises, télémessures, traction automobile, propulsion sous-marine, etc.) sont prévues du côté de l'IFP, où les travaux ont conduit à la réalisation de piles à CH₃OH et d'une pile à hydrazine. Là encore, il est explicitement indiqué que ce sont les usages prévus qui conditionnent dès le départ la forme de la technique : « la perspective d'accéder à de larges débouchés pour les piles à combustible implique nécessairement l'utilisation de l'air ambiant et de combustibles peu onéreux mis en œuvre de préférence sous forme liquide. »⁵⁸⁹ De fait, ce sont surtout sur l'activation de l'oxygène, pur d'abord puis atmosphérique, et sur l'activation du méthanol, qui semble représenter le meilleur compromis prix-réactivité, que se sont concentrées les recherches de l'Institut. D'autre part, pour pallier la limitation des débouchés induite par la rareté et le coût des électrodes platinés dans les dispositifs à électrolyte alcalin, les études se sont réorientées vers des catalyseurs plus largement disponibles et actifs en milieu acide. Mais pour des applications spéciales, d'autres solutions ont également été envisagées par Yves Bréelle, Jean-Claude Balaceanu

⁵⁸⁹ Palais de la découverte, « Piles à combustible. Recherches engagées sous l'égide de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique », exposition du 15 décembre 1965 au 15 janvier 1966, 1965, p. 37.

et leur équipe⁵⁹⁰, et c'est ce qui explique la présence sur le stand d'une pile à hydrazine notamment. Les caractéristiques générales des modèles de l'IFP montrent donc une exploration de ces voies :

« Les électrodes sont réalisés dans les différents cas par incorporation, à l'aide de liants plastiques, de poudres catalytiques à une toile métallique. Cette technique conduit à des électrodes minces : quelques dizaines de millimètres d'épaisseur. Pour les électrolytes alcalins : emploi de toiles de nickel (ou d'acier inoxydable) avec incorporation d'argent ou de charbon actif pour l'oxygène; de nickel ou de cobalt pour l'hydrazine; de charbons platinés pour le méthanol ou l'hydrogène à température ambiante et, éventuellement, de nickel activé pour une température plus élevée. Pour les électrolytes acides : emploi de toiles de tantale ou de tungstène avec incorporation de charbons platinés à la fois pour l'oxygène et les différents combustibles. De façon à éviter les sujétions de poids et de prix liées à l'utilisation d'oxygène pur, l'emploi de l'air en tant que comburant a été recherché pour tous les prototypes (ce qui conduit, dans les différents cas présentés, à des performances plus faibles que dans le cas de l'emploi d'oxygène). »⁵⁹¹

Il en résulte que les maquettes à CH₃OH sont présentées en deux versions : une pile directe à méthanol et une pile indirecte à méthanol. Dans la première, le méthanol est introduit à l'état dissous dans l'électrolyte alcalin, avec des performances moyennes qui varient de 10 à 50 watts à température ambiante. Cependant, un renouvellement périodique de l'électrolyte est nécessaire à cause de l'accumulation de carbonate. Dans la seconde, qui correspond à une pile à hydrogène classique, un catalyseur spécial évite la formation parasite d'oxyde de carbone susceptible d'empoisonner les électrodes. La pile à hydrazine, quant à elle, est conforme à un usage précis et comprend tous les accessoires nécessaires à un fonctionnement autonome à température ambiante : il s'agit d'un modèle d'une certaine taille (45 x 60 x 45 cm) conçu pour répondre à des applications de signalisation où les impératifs de poids (45 kg dont 20 kg pour la pile seule) ne sont pas rédhibitoires. En service, sa puissance s'étend de 50 à 100 watts sur près de 1000 heures. Sur le stand du groupement d'industriels réunissant Alsthom, Pechiney, Saint-Gobain et la Compagnie française Thomson-Houston, plusieurs systèmes sont aussi exposés : des piles et accumulateurs Redox, des piles à réactifs solubles et un générateur électrochimique à structure filtre-pressé. La compagnie française Thomson-Houston fait encore la démonstration de deux prototypes hydrogène-oxygène et hydrogène-air à membrane échangeuse de protons, nommés respectivement THN 901 et THN 902. Le premier, d'un poids de 7

⁵⁹⁰ Sur le stand de l'IFP, une équipe d'une taille importante est présente : mesdames Bloch, Chachaty, Chatelain, Funck, messieurs Auneau, Balaceanu, Bréelle, Degobert, Dezael, Hamard, Paty, Provost, Roche et Yot.

⁵⁹¹ Palais de la découverte, « Piles à combustible. Recherches engagées sous l'égide de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique », exposition du 15 décembre 1965 au 15 janvier 1966, 1965, pp. 38-39.

kg, atteint une puissance de service de 70 watts (et une puissance crête de 130 watts) pendant cinq heures d'affilée tandis que pour un temps de fonctionnement équivalent, le second atteint à 60 watts (et une puissance crête de 90 watts).

Ces résultats font dire au CASDN et à son groupe de travail « Chimie » que l'effort entrepris « a permis à la France de se mettre au niveau des nations les plus avancées, au moins sur le plan de la recherche fondamentale »⁵⁹² Mais surtout, les caractéristiques bien spécifiques de ces piles à combustible renseignent sur l'intérêt stratégique qu'y trouve leur commanditaire direct, la DRME : « la souplesse d'adaptation de leur structure permet de couvrir des gammes d'utilisation variées tant du point de vue puissance qu'autonomie. De plus, du fait qu'elles n'utilisent aucune source de chaleur, elles présentent l'avantage de ne pouvoir être détectées aux rayons infrarouges. »⁵⁹³ L'ingénieur principal chargé des évaluations économiques au Centre de prospective et d'évaluations du ministère des Armées Jean-Pierre Guillaume concède en effet au même moment que « l'apparition de ces nouvelles sources d'énergie électrique a provoqué chez les utilisateurs militaires potentiels un intérêt à la fois vif et diversifié » :

« [...] si les piles à combustible n'offrent dans tous les cas qu'une solution nouvelle à des problèmes comportant déjà une ou plusieurs autres solutions, elles seules permettront la fourniture de quantités importantes d'électricité par un moyen statique, donc silencieux. Or, il faut bien reconnaître que les militaires, plus encore que les citoyens, ont besoin d'équipements silencieux et que, par ailleurs, ils utilisent de plus en plus l'énergie sous forme électrique dans leurs systèmes d'armes. [...] La Délégation ministérielle pour l'armement fait expérimenter actuellement dans l'une de ses directions techniques un modèle de pile H₂-O₂ capable de fournir 1 kW pendant une durée assez longue. D'une façon plus extensive, les militaires désirent des piles en tant que sources d'énergie difficiles à détecter. Outre le silence acoustique, il faut mentionner le "silence infrarouge" dans le cas où l'on choisit des piles basse température. »⁵⁹⁴

Bien sûr, il ne s'agit pas des seules applications auxquelles songe la compagnie française Thomson-Houston. Elle mentionne encore notamment l'alimentation en énergie électrique de stations mobiles ou fixes telles que les émetteurs-récepteurs de campagne des unités civiles ou militaires, les stations

⁵⁹² CASDN, Préparation du V^{ème} Plan, Commission de la recherche scientifique et technique, « Rapport du groupe de travail "Chimie" », octobre 1965, p. 8.

⁵⁹³ Palais de la découverte, « Piles à combustible. Recherches engagées sous l'égide de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique », exposition du 15 décembre 1965 au 15 janvier 1966, 1965, p. 50.

⁵⁹⁴ GUILLAUME, Jean-Pierre, « Quelques applications militaires des piles à combustible », in DGRST, *Les piles à combustible*, Publications de l'Institut français du pétrole, 1965, pp. 437-438.

météorologiques, les radars de petite puissance, les caméras, les cars de reportage, les télécinémas, les bouées lumineuses et l'alimentation des équipements embarqués dans les véhicules spatiaux et les ballons sondes. En ce qui concerne le stand de l'EDF, ce sont des piles aux carbonates fondus de près de 100 kg qui sont déployées sous les yeux du public. Contenant un mélange eutectique de carbonates de lithium, de sodium et de potassium maintenu à une température de 600°C et disposant d'une cathode en fritté poreux d'acier réfractaire et d'une anode constituée par une fine membrane d'alliage argent-palladium, elles fournissent des puissances s'étalant de 220 W à 1 kW pour une durée légèrement supérieure à 1 000 heures. Après six années de travaux, l'entreprise nationalisée est cependant pessimiste sur les chances de la technique de percer dans le domaine des centrales de production industrielle d'électricité.

Si elle reconnaît lors de l'exposition qu'une étude technico-économique doit encore être effectuée, le chef du département Nouvelles techniques de production de la Direction des études et recherches Jean Fabre prédit ailleurs que leur sort s'inscrit dans des « usages plus restreints où le gigantisme des procédés classiques exclut leur application » et prévient que leur « compétitivité réelle est encore très aléatoire ». De fait, et au contraire de la magnétohydrodynamique⁵⁹⁵, il voit plutôt l'avènement industriel des piles à combustible se produire « d'abord dans des secteurs autres que celui de la production massive d'énergie électrique : transports ferroviaires ou maritimes, domaine spatial ou militaire. »⁵⁹⁶ Enfin, le dernier contractant à présenter un modèle de pile hydrogène-oxygène à basse température destiné aux alimentations mobiles de faible puissance du domaine électronique et radioélectrique est la CSF. Doté d'électrodes en nickel fritté structurés en trois couches et d'un électrolyte composé d'une solution de potasse 3 N et d'une autonomie de 1 000 heures, il affiche une

⁵⁹⁵ A l'occasion d'un débat suivant une série de conférences données à la séance du 28 janvier 1964 des 1^{ère} et 3^{ème} sections de la Société française des électriciens, Jean Fabre se montrait plus enthousiaste au sujet de la technique : « La pile à combustible a [...] fait naître des espoirs et on peut se demander à partir de quel moment elle sera utilisée. Une installation classique de production d'énergie comporte trois termes : il y a le terme équipement, le terme combustible et le terme entretien. On peut chiffrer les dépenses actuelles d'une telle installation à 75 000 F ou 80 000 F par kilowatt ; une usine thermique tournant environ 100 000 heures produit un kilowatt qui revient à peu près à 3 F aux bornes de la centrale, ce qui nous donne des frais de capacité de 250 000 F à 270 000 F. Je pense que, lorsque la pile à combustible commencera à donner un ensemble de trois termes qui ne sera pas trop éloigné des dépenses actuelles, elle sera prise en considération, au même titre que l'énergie nucléaire fut prise en charge quand elle apparut à des prix 3 ou 4 fois supérieurs. A l'heure actuelle, nous consommons 40 millions de tonnes de charbon représentant pour l'ensemble du pays des dépenses de 8 à 9 milliards de francs. Une économie globale de 10 % sur cette somme représente quelque chose d'extrêmement important. En résumé, le rendement de la pile a attiré l'attention sur elle. Quand elle deviendra compétitive (on peut même fixer le coefficient 3 ou 4) elle sera certainement prise en compte sur le plan industriel de production de l'énergie et, à partir de ce moment-là, elle fera certainement des progrès supplémentaires ». Source : *Revue générale de l'électricité*, Tome 74, n°14, janvier 1965, p. 174.

⁵⁹⁶ FABRE, Jean, « Perspectives de développement comparé des piles à combustible et de la magnétohydrodynamique dans la production industrielle d'énergie électrique », in DGRST, *Les piles à combustible*, Publications de l'Institut français du pétrole, 1965, pp. 520-521.

puissance maximum de 18 à 20 watts. Pour autant, la compagnie espère atteindre les 100 à 200 watts, ce qui permettrait, selon elle, de « couvrir la presque totalité des besoins »⁵⁹⁷ dans son secteur.

Penser à l'insertion de la technique dans des systèmes d'application pour modeler sa forme, voilà donc l'état dans lequel se trouvent les recherches sur les piles à combustible à la fin de l'année 1965. Après les phases d'exploration, d'études fondamentales et de recherches appliquées, les différents laboratoires et entreprises se positionnent désormais sur les marchés qu'ils souhaitent conquérir. Le parallèle éloquent entre le sort des piles à combustible et celui de l'énergie nucléaire effectué par le physicien du CEA Pierre Bergé dans la revue *Sciences et Techniques* donne la mesure de la nouvelle étape qui se met en place : « [...] les piles à combustible, malgré la modestie de leur entrée dans le monde moderne, se trouvent dans une situation analogue à celle des réacteurs nucléaires : un principe de base solide dans de nombreuses difficultés technologiques que l'on cherche à vaincre actuellement par le biais de filières aux solutions diverses. »⁵⁹⁸ D'ailleurs, la conférence du 18 décembre donnée par Maurice Bonnemay avenue Franklin Roosevelt et ayant pour titre « Les piles à combustible et leurs applications » confirme la prégnance de ce paradigme⁵⁹⁹.

Le vendredi 17 décembre 1965 toujours, à 16 heures, c'est au tour de la presse de faire son entrée au sein de la « première manifestation mondiale de cette importance »⁶⁰⁰ au sujet des piles à combustible. Parmi les journalistes présents, on trouve notamment des représentants d'*Industries et Techniques*, de *Pétrole Informations*, de *L'information*, de la revue *Pétrole*, de la *Revue française de l'énergie*, d'*Ingénieurs et Techniques*, de *Sciences & Avenir*, des *Échos*, d'*Europe 1*, de l'*ORTF*, de *France-Soir*, de *La correspondance économique*, du *Parisien libéré*, du *Figaro*, du *Monde*, de la revue *Combat* et de *La Croix*. Les quotidiens de province *La Voix du Nord*, *Sud-Ouest*, *Ouest-France* et le *Dauphiné libéré* font également le déplacement, tout comme *Paris-Match*, *L'Usine Nouvelle*, le *Figaro littéraire*, *L'Express* et la revue *Atomes*. La presse étrangère n'est pas en reste : *Le Soir* pour la Belgique, l'*Economist*, le *Financial Times* et l'*Observer* pour le Royaume-Uni, le *Corriere della Serra* italien, le *Stuttgarter Zeitung* allemand, la *Gazette de Lausanne* suisse et les Américains *International Science and Technology* et *Christian Science Monitor*. Outre les délégués des institutions directement concernées par l'exposition, telles que la DRME, l'EDF, le CNRS, l'IFP, l'ONIA et la CGE, on retrouve encore à la conférence de presse tout un ensemble d'entreprises vraisemblablement intéressées par l'évènement : L'Air liquide, la SNCF, IBM, les Ciments Lafarge,

⁵⁹⁷ Palais de la découverte, « Piles à combustible. Recherches engagées sous l'égide de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique », exposition du 15 décembre 1965 au 15 janvier 1966, 1965, p. 59.

⁵⁹⁸ *Sciences et Techniques*, n°990, 14 janvier 1966, p. 24.

⁵⁹⁹ Une autre conférence de clôture est organisée le samedi 15 janvier. Le maître de conférences à la Faculté des sciences de Grenoble Charles Désportes traite en effet ce jour-là des « Piles à électrolyte solide à haute température ».

⁶⁰⁰ DGRST, « Les piles à combustible », communiqué de presse, 17 décembre 1965, p. 4.

la Société du verre textile, Citroën et la Régie Renault, etc. Enfin, et plus marginalement, des enseignants-chercheurs et des étudiants de l'École pratique des hautes études, de la Maison des sciences de l'Homme, du LCIE, de l'ENSAM et du CEA sont dans les rangs.

Bientôt, les premiers articles paraissent. L'engouement est palpable. On salue de manière unanime les « nouvelles vedettes »⁶⁰¹ de la technologie française dont on est certain qu'elles n'appartiendront « plus pour longtemps au domaine de la “science-fiction” »⁶⁰² : *Le Figaro* traite par exemple d'applications escomptées « nombreuses », « de la petite pile pour poste de radio au groupe électrogène de grande puissance »⁶⁰³ tandis que *La Voix du Nord* énumère des avantages non négligeables tels que « des rendements élevés, un fonctionnement silencieux, l'absence de pollution atmosphérique, l'adaptation très souple aux besoins et la production d'eau »⁶⁰⁴. Dans *Sciences et Techniques* encore, on prévoit que le développement des piles marquera « une étape aussi importante que celle des circuits intégrés en électronique » et qu'il permettra, avec le nucléaire, d'échapper à la pénurie énergétique qui se dessine et de « préserver nos modes de vie »⁶⁰⁵ : les piles serviront aussi bien dans le domaine spatial que pour la propulsion des sous-marins et des véhicules terrestres et la distribution d'énergie dans les foyers. Il n'y a guère que *L'usine nouvelle* pour se montrer plus réservée, lorsqu'elle termine son article consacré à l'exposition, et dans lequel elle évoque des piles à combustible opérationnelles dans les « un ou deux ans » pour des « usages très particuliers », en se demandant si ces dernières finiront bien par « supplanter les moteurs à explosion ou par équiper les centrales électriques » : « les spécialistes estiment que c'est probable mais à échéance beaucoup plus lointaine. »⁶⁰⁶

⁶⁰¹ Plusieurs articles de journaux comportent cette appellation dans leurs titres.

⁶⁰² *Sciences et Techniques*, n°990, le 14 janvier 1966, p. 21.

⁶⁰³ *Le Figaro*, le 18 décembre 1965.

⁶⁰⁴ *La Voix du Nord*, le 19 décembre 1965.

⁶⁰⁵ *Sciences et Techniques*, n°990, le 14 janvier 1966, p. 22.

⁶⁰⁶ *L'Usine nouvelle*, le 4 mars 1965.

SIXIÈME CHAPITRE

Redirections socio-techniques (1966-1969)

Contrairement à ce que la presse ou la DGRST peuvent relayer au début de l'année 1966⁶⁰⁷, l'exposition « Piles à combustible » du Palais de la découverte n'a pas véritablement le succès scientifique escompté. Yves Bréelle est catégorique sur ce point : « La plupart des piles n'ont fonctionné que quelques heures avec de très nombreux incidents chez tous les exposants »⁶⁰⁸. Des problèmes similaires surviennent par exemple du côté de l'EDF et du Gaz de France, dont les assemblages présentent des difficultés de fonctionnement respectivement dues « à la non homogénéité des frittés » et à des questions de « reproductibilité et de mise en service »⁶⁰⁹. Pour autant, les 16 et 25 février, une table ronde est organisée par la DGRST sur la technique. Lors de cet événement, qui réunit un nombre considérable d'intervenants⁶¹⁰, on apprend notamment que le comité « Conversion des énergies » a été remplacé le 8 octobre 1965 par un comité « Électrotechnique nouvelle », dont le directeur de l'École supérieure d'électricité et professeur à la Faculté des sciences de Paris Philippe Olmer assure la présidence. Le rôle de ce nouveau comité ne diffère guère du précédent ; il en reprend d'ailleurs les missions et crée trois commissions traitant respectivement des piles à combustible, de la magnétohydrodynamique et de la supraconductivité⁶¹¹. De plus, il doit « préparer les programmes détaillés des travaux de recherche scientifique » à mener et « établir la liste des contrats de recherche à retenir »⁶¹² dans le cadre de l'action générale de la DGRST. Plus particulièrement, la commission « Piles à combustible » reçoit pour mission « de rassembler une information qui soit la plus large possible dans le domaine » et « d'élaborer un programme de travail

⁶⁰⁷ Dans une lettre à André Maréchal, Alphonse-Jean Rose écrit notamment que « l'exposition “Les piles à combustible” est terminée, les visiteurs y ont été très nombreux et particulièrement intéressés. La presse lui a fait une grande place et l'édition du catalogue est épuisée. » Source : lettre d'Alphonse-Jean Rose à André Maréchal, le 18 janvier 1966.

⁶⁰⁸ Entretien avec Yves Bréelle, Caumont, octobre 2016.

⁶⁰⁹ DGRST, « Compte rendu de la table ronde “Piles à combustible” organisée par la DGRST les 16 et 25 février 1966 », p. 4.

⁶¹⁰ Maurice Magnien directeur adjoint d'EDF, le conseiller technique de la DGRST Georges Dumesnil, le secrétaire scientifique du comité « Électrotechnique nouvelle » et ingénieur des télécommunications Michel Desécures, le secrétaire Jacques Millet, Jean-Michel Auclair de la CGE, Jean-Claude Balaceanu de l'IFP, Maurice Bonnemay du Laboratoire d'Électrolyse du CNRS, Yves Bréelle de l'IFP, Bogdan Broniewski d'Alstom, Philippe Brouillet des Piles Wonder, René Buvet de l'EPCI (École de physique et de chimie industrielle), J. Dubar de la Poudrerie de Sevran, le colonel Duffet de la DRME, H. Durand de la CGE, Pierre Dubois de la CGE, Michel Gossot de la CGE, Jean Laroche de l'ONIA, J. Lemaignien de la Compagnie française Thomson-Houston, J. Parisot du groupe Carbone Lorraine, Jean Royon du CNAM, Bernard Salé de l'IFP, Daniel Souriau du Gaz de France, Raymond Vic du groupe Carbone Lorraine et l'ingénieur G. Waternaux de la Poudrerie de Sorgues.

⁶¹¹ Une dernière commission pourrait éventuellement être créée, apprend-t-on lors de la table ronde, pour traiter de problèmes divers en fonction des nouveaux sujets d'études qui pourraient se présenter, tels que l'électrotechnique sans fer.

⁶¹² DGRST, « Compte rendu de la table ronde “Piles à combustible” organisée par la DGRST les 16 et 25 février 1966 », p. 2.

à soumettre au comité »⁶¹³ pour le guider dans son choix. Ainsi, et malgré des résultats en demi-teinte lors de l'exercice précédent, l'intérêt pour les piles à combustible ne s'est pas atténué dans un contexte où le rapport entre la recherche scientifique et l'indépendance nationale continue de se renforcer⁶¹⁴. Et entre 1966 et 1969, c'est encore la DGRST qui va concentrer et diriger l'ensemble des recherches à leur sujet en France. Mais, au cours de cette période, de profonds changements dans le réseau d'acteurs, à la fois sociaux, scientifiques et politiques, vont progressivement survenir et influencer le développement de la technique.

6.1 L'émergence d'un collectif de pensée hybride

Le comité « Électrotechnique nouvelle » n'est pas une création *ex nihilo*. S'il prend bien la suite du comité « Conversion des énergies », plusieurs réunions sont effectuées par un comité d'études préliminaires⁶¹⁵ tout au long de l'année 1965 pour faciliter la transition⁶¹⁶. D'autre part, Philippe Olmer réunit officieusement quelques spécialistes, le 11 janvier 1966 pour les supraconducteurs et la magnétohydrodynamique et le 19 janvier pour les piles à combustible, préfigurant ainsi les différentes commissions qu'il officialisera quelques jours plus tard. Lors du premier rassemblement de la toute nouvelle structure le 31 janvier, le ton est en tout cas rapidement donné par André Maréchal⁶¹⁷. En

⁶¹³ DGRST, « Compte rendu de la table ronde "Piles à combustible" organisée par la DGRST les 16 et 25 février 1966 », p. 2.

⁶¹⁴ En 1964, la DGRST prévient ainsi que « l'effort scientifique et technique entreprise par l'Amérique [risque] de créer au profit des États-Unis un "Science gap" dont les conséquences - si les brèches ne sont pas colmatées d'urgence - seront infiniment plus graves que celles du "Dollar gap" qui, jusqu'à présent, a été un poids déterminant dans les relations internationales ». Source : *La jaune et la rouge*, mars 1965, p. 11.

⁶¹⁵ Ce comité d'études préliminaires est composé de la manière suivante : Philippe Olmer, professeur à la Faculté des sciences de Paris, Raymond Allard, ingénieur de recherche (la DRME, Jean-Claude Balaceanu, directeur de l'IFP, René Bidard, directeur technique de la CEM (Compagnie électromécanique), Maurice Bonnemay du Laboratoire d'électrolyse du CNRS et du CNAM, Bogdan Broniewski, directeur de la recherche d'Alstom, Emile Carbonell, chef de service à l'Air Liquide, Jean Cazeneuve, capitaine de corvette et membre de la DRME, Alexis Dejou, directeur des études et recherches de l'EDF, Gérard Fournet, professeur à la Faculté des sciences de Paris, Michel Gossot, ingénieur du génie maritime et représentant de la CGE, Jacques Friedel, professeur à la Faculté des sciences d'Orsay, Jean Laroche, chef de service à l'ONIA, Fernand Picard, directeur des études et recherches de la Régie nationale des usines Renault, Pierre Ricateau, ingénieur au centre d'études nucléaires de Saclay, Pierre Roubeau, ingénieur de l'école navale, Daniel Souriau, ingénieur civil du génie maritime et représentant du Gaz de France, Louis Weil, doyen de la faculté des sciences de Grenoble et Jacques Yvon, professeur à la Faculté des sciences de Paris. En outre, pour la DGRST, Michel Désécures, ingénieur des télécommunications et Georges Dumesnil, agrégé de l'Université, sont les secrétaires scientifiques du comité d'études préliminaires. Source : *Le progrès scientifique*, n°100, septembre 1966, p. 90.

⁶¹⁶ DGRST, comité scientifique « Électrotechnique nouvelle », « Procès-verbal de la réunion du 31 janvier 1966 », p. 1.

⁶¹⁷ À noter qu'un nouveau gouvernement étant formé le 8 janvier 1966 par Georges Pompidou, Yvon Bourges est remplacé par Alain Peyrefitte au poste de ministre délégué chargé de la Recherche scientifique et des questions atomiques et spatiales. Le 3 février, ce dernier confirme une première tranche d'actions concertées et leurs présidents : Calculateurs (Lucien Malavard), Automatisation (M. Lagasse), Électronique (Pierre Aigrain), Électrotechnique nouvelle (Philippe Olmer), Exploitation des océans (M. Fontaine), Biologie moléculaire (Jacques Monod), Génie biologique et médical (M. Fessard), Lutte biologique (M. Grison). Source : DGRST, « Note d'information », février 1966, pp. 1-2. Seront ajoutées un peu plus tard dans l'année les actions concertées Mécanique, Instruments de mesure, Chimie macromoléculaire, Métallurgie, Eau, Recherches atmosphériques, Enseignement programmé, Sciences de la terre, Échanges respiratoires et circulatoires, Technologie agricole et Socio-économie du développement.

effet, le Délégué général de la DGRST « attire l'attention du comité sur la nécessité d'orienter ses travaux dans la perspective des applications industrielles, de façon à préparer la voie du développement »⁶¹⁸. Un mode d'action politique qu'il précisera au cours de l'été dans les pages du *Progrès scientifique* :

« Au cours des dix dernières années, la préoccupation majeure de l'État a été de doter l'université de nouveaux moyens de formation scientifique, et de fournir aux nouvelles équipes de chercheurs ainsi créées les grands instruments de travail dont elles avaient besoin. La politique de recherche a été essentiellement une politique de moyens visant à développer l'ensemble des recherches de base considérées comme un tout solidaire, sans se préoccuper, sinon presque marginalement, de faire des percées techniques sur des points particuliers. Le problème est maintenant autre. L'essor des disciplines fondamentales doit se poursuivre - sans elles tout effort de recherche technique serait vain -, mais il est temps de porter l'offensive sur le front de la recherche industrielle. Dès lors, la politique scientifique ne peut plus avoir pour seule ambition de pourvoir aux besoins matériels d'une activité inventant elle-même ses fins, seule juge de la validité et de la cohérence de ses progrès. Apprécier les besoins scientifiques des différents secteurs qui se situent en aval de la recherche, et notamment du secteur industriel, à la lumière du contexte économique international, orienter et stimuler sélectivement l'effort de recherche de manière à répondre à ces besoins constitue désormais une tâche nouvelle et essentielle. »⁶¹⁹

La perception politique de la science a donc évolué par rapport à la période précédente⁶²⁰. Comme l'exprime le ministre délégué chargé de la Recherche scientifique et des questions atomiques et

⁶¹⁸ DGRST, comité scientifique « Électrotechnique nouvelle », « Procès-verbal de la réunion du 31 janvier 1966 », p. 1.

⁶¹⁹ *Le progrès scientifique*, n°98-99, juillet-août 1966, p. 2.

⁶²⁰ Cette évolution est en fait inscrite dans le V^{ème} Plan : « La décennie actuelle est caractérisée, chez toutes les nations industrielles, par une intensification sans précédent de l'effort consacré à tous les ordres de la recherche : recherche fondamentale, recherche appliquée, "recherche-développement". La recherche-développement est faite principalement dans les entreprises, en vue de la mise au point de produits ou de procédés de fabrication nouveaux. Son efficacité détermine donc pour une large part, le progrès de la productivité des entreprises, et leur capacité d'affronter la concurrence internationale. Elle est moins active en France que dans les pays comparables - sans parler des États-Unis - en raison de la taille relativement petite et des ressources relativement faibles des entreprises françaises. Parallèlement aux réformes de structure et de financement, qui viseront à réduire ces deux handicaps, un effort spécial sera fait pendant la période du V^{ème} Plan pour stimuler directement l'innovation technique, en particulier grâce à des aides financières de l'État à certaines entreprises [...]. La recherche appliquée doit progresser parallèlement à la recherche-développement, à qui elle fournit les découvertes que celle-ci exploite. Une notable partie en incombe aux entreprises et, comme dans le cas précédent et pour les mêmes raisons, cette partie souffre en France, d'un retard certain, que le V^{ème} Plan vise à réparer autant que possible : des "actions concertées" entre administrations, universités et entreprises y contribueront dans quelques domaines judicieusement choisis. La *recherche fondamentale* enfin, créée dans la Nation, et spécialement autour des activités productives le climat intellectuel nécessaire au développement industriel des innovations à partir de la recherche

spatiales Alain Peyrefitte, la recherche doit devenir « un investissement rentable »⁶²¹. Il n'est donc désormais plus question, avec les 35 à 40 millions de francs prévus pour l'ensemble de l'action concertée⁶²², d'impulser des activités de recherche scientifique pure dans des domaines incertains mais de financer des projets identifiés ayant des chances raisonnables de se transformer en productions industrielles, sur un marché des piles à combustible notamment « qui pourrait représenter un million de francs à une époque qu'on peut situer entre 1970 et 1980 »⁶²³. Ce que confirme Philippe Olmer lorsqu'il prend la parole pour indiquer que « l'expérience du comité "Conversion des énergies" - qui a identifié les laboratoires valables - permettra de faire un appel de type "fermé" aux contractants intéressés ; on évitera ainsi une publicité trop large qui risquerait de noyer le comité sous des demandes d'intérêt contestable. »⁶²⁴

La composition du comité conforte d'ailleurs cette vision ; un collectif de pensée hybride émerge. Si le comité « Conversion des énergies » était majoritairement composé d'universitaires entre 1961 et 1965, le comité « Électrotechnique nouvelle » est plus coloré⁶²⁵. On y trouve encore des académiciens bien sûr, comme Philippe Olmer, Maurice Bonnemay, Louis Weil, Jacques Valensi de la Faculté des sciences de Marseille et Gérard Fournet de la Faculté des sciences de Paris mais aussi des industriels tels que le directeur adjoint de l'EDF Maurice Magnien⁶²⁶, le directeur du Centre de recherches de la CGE Michel Gossot, le directeur scientifique d'Alstom Bogdan Broniewski, et des chercheurs issus d'organismes publics proches de l'industrie tels que Jean-Claude Balaceanu, le chef de section au CEA Pierre Ricateau et le chef de service à l'ONIA Jean Laroche. La DRME, dont le chimiste Jacques-Émile Dubois vient de prendre la tête à la place de Lucien Malavard⁶²⁷, est enfin représentée

appliquée française ou étrangère. Son expansion régulière doit nous donner d'abord un enseignement supérieur vivant et moderne, et permettre en même temps à notre pays de mieux participer à son rang, à l'effort scientifique d'ensemble des nations civilisées. » Source : Cinquième plan de développement économique et social (1966-1970), p. 29.

⁶²¹ *Science & Vie*, n°593, février 1967, p. 48.

⁶²² Dont 6 millions pour la seule année 1966.

⁶²³ *Le progrès scientifique*, n°100, septembre 1966, p. 72.

⁶²⁴ DGRST, comité scientifique « Électrotechnique nouvelle », « Procès-verbal de la réunion du 31 janvier 1966 », p. 2.

⁶²⁵ Le comité « Supraconducteurs » est pour sa part composé de Bogdan Broniewski, René Duffet, Gérard Fournet, Michel Gossot et Louis Weil et le comité « Magnétohydrodynamique » de Jean-Claude Balaceanu, Maurice Bonnemay, Michel Gossot, Jean Laroche, Maurice Magnien et Pierre Ricateau. Source : « DGRST, Comité « Électrotechnique nouvelle », « Note de service », février 1966, pp. 1-2.

⁶²⁶ Il est d'ailleurs vice-président du comité « Électrotechnique nouvelle ».

⁶²⁷ Né en 1920, Jacques-Émile Dubois passe un doctorat à l'Université de Grenoble avant de devenir assistant en chimie. Il est résistant au sein du réseau Libération Sud pendant la Seconde Guerre mondiale puis assistant scientifique auprès du conseiller culturel de l'ambassade de France à Londres dans l'immédiat après-guerre. Il obtient un poste de professeur de chimie physique et de pétrochimie à l'Université de la Sarre en Allemagne en 1949, dont il reviendra le doyen en 1953. En 1957, il est nommé professeur titulaire de la chaire de chimie organique physique à la Faculté des sciences de Paris. Il occupe ensuite un poste de professeur émérite à l'Université Denis-Diderot jusqu'en 1988. En plus de ces fonctions académiques, il exerce successivement plusieurs activités : entre autres conseiller technique au sein du cabinet du ministre de l'Éducation Christian Fouchet, directeur adjoint de l'Enseignement supérieur (1963-1965), directeur de la DRME (1965-1977), président de la Société chimique de France (1974-1976), membre du conseil scientifique du CEA (1971-1977) et directeur scientifique de la CGE (1979-1983). Voir : CACALY, Serge, « Jacques-Émile Dubois, l'homme-frontière », in *Documentaliste-Sciences de l'Information*, Vol. 42, n°2, 2005, pp. 132-134.

en la personne du colonel et chef de la division « chimie avancée » René Duffet⁶²⁸. Dans le cas des piles à combustible, on apprend que le comité souhaite investir 10 à 12 millions de francs jusqu'en 1969, ce qui représente la deuxième somme la plus importante après la supraconductivité, dotée de 15 millions⁶²⁹. À titre indicatif, la DRME dispose elle aussi en 1966 de 5 millions francs pour la technique et de 1,8 millions pour les supraconducteurs. Des crédits inférieurs à ceux dépensés lors du précédent exercice qui s'expliquent par la nouvelle orientation choisie. Le changement le plus notable survient cependant dans la nomination du président pour la commission « Piles à combustible » : Maurice Magnien est en effet désigné à la place de Maurice Bonnemay⁶³⁰.

Le fait de mettre un directeur d'entreprise à un tel poste n'est pas anodin ; le message paraît clair : le stade des recherches fondamentales est dépassé et c'est désormais aux applications industrielles de prendre le relais. La situation est en fait plus nuancée : des intérêts divergents vont se confronter et enclencher des redirections socio-techniques. Au cours de la table ronde des 16 et 25 février 1966, Maurice Magnien va d'abord demander aux différents participants d'élaborer ensemble le programme de recherches pour les années à venir à soumettre au comité « Électrotechnique nouvelle ». Il en résulte la répartition suivante : Alsthom et la CGE acceptent de se charger des nouveaux couples réducteurs et oxydants, l'IFP de la génération d'hydrogène, l'ONIA et la CGE de la séparation d'hydrogène, LCL⁶³¹, Gaz de France, la CGE et Alsthom de la préparation et des propriétés des électrodes, la CGE et l'École d'électrochimie de Grenoble des électrolytes et le CNRS, la Faculté des sciences de Paris, Alsthom, l'IFP, l'ONIA et la CGE des recherches sur la combustion directe ou indirecte des hydrocarbures, sur les catalyseurs et sur la cinétique. Lors de la réunion de la commission « Piles à combustible » ayant lieu le 1er mars, et qui comprend en plus des membres habituels Jean Royon du CNAM, les crédits suivants sont donc proposés⁶³² :

Alsthom-CGE	Nouveaux couples et systèmes Redox	190 000 francs
-------------	------------------------------------	----------------

⁶²⁸ *Le progrès scientifique*, n°100, septembre 1966, p. 91.

⁶²⁹ Le reste des crédits est réparti de la manière suivante : 7,5 millions de francs pour la magnétohydrodynamique et 5 millions pour la rubrique « divers ».

⁶³⁰ Le reste de la commission « Piles à combustible » comprend Jean-Claude Balaceanu, Maurice Bonnemay, Bogdan Broniewski, René Duffet, Michel Gossot et Jean Laroche.

⁶³¹ Comprenant la CIPEL, UGINE Carbone et le Carbone Lorraine.

⁶³² DGRST, commission « Piles à combustible », « Procès-verbal de la réunion du 1er mars 1966 », p. 5. À noter que les contrats passés seront finalement les suivants : « composés semi-métalliques, piles à hydrocarbures, oxydes réfractaires, conducteurs par ions » (CGE, Paul Biro) ; « matériaux catalytiques pour piles à moyenne température » (ONIA, Jean Laroche) ; « matériaux permettant la purification de l'hydrogène par diffusion » (ONIA, Jean Laroche) ; « cinétique et catalyse de la combustion directe des hydrocarbures » (CNRS, Maurice Bonnemay) ; « Électrodes pour piles à hydrogènes » (Carbone Lorraine, M. Cabestan) ; « activation du méthanol ou des hydrocarbures dans les piles directes et indirectes » (IFP, Odile Bloch) ; « générateur électrique du type filtre-pressé » (Alsthom, Bernard Warszawski) ; « générateur électrique consommant des produits solubles » (Alsthom, Bernard Warszawski) ; « étude de nouveaux systèmes Redox » (Alsthom, Bernard Warszawski) ; « Piles à combustible à oxyde électrolyte solide, à haute température (Faculté des sciences de Grenoble, Jean Besson). Source : *Le progrès scientifique*, n°106, mars 1967, pp. 81-82.

Alsthom	Générateurs électrochimiques	150 000 francs
IFP	Génération d'hydrogène et conversion du méthanol en hydrogène	100 000 francs
CGE	Catalyse par oxydes semi-métalliques	150 000 francs
CIPEL	Propriétés et préparations des électrodes, préparation d'électrodes minces	150 000 francs
Laboratoire d'électrochimie et de chimie physique de la Faculté des sciences de Grenoble	Propriétés et préparation des électrolytes, électrolytes solides à haute température	200 000 francs
IFP	Recherche de catalyseurs bon marché	350 000 francs
CGE	Recherches sur les piles à hydrocarbures	300 000 francs
ONIA	Recherches sur les piles à hydrocarbures	200 000 francs
Laboratoire d'électrolyse du CNRS	Combustion directe des hydrocarbures	200 000 francs
ONIA	Séparation d'hydrogène et membranes plastiques	100 000 francs
CGE	Préparation des électrolytes, électrolytes solides	100 000 francs

*Fig. 11 – Répartition des crédits proposée par la commission « Piles à combustible » en 1966
(Source : DGRST, 1966)*

Ainsi, les recherches fondamentales vont encore se trouver au cœur de l'action de la commission mais dans *certaines voies* seulement et dans la mesure où elles « restent ouvertes aux problèmes industriels »⁶³³. Maurice Magnien a en fait des idées bien tranchées sur l'état d'avancement de la technique. Devant la Société française des électriciens en janvier 1965 et à l'occasion de l'allocution d'ouverture d'un colloque sur les piles à combustible, il tenait déjà un discours modéré sur leurs chances de donner des résultats satisfaisants pour la production industrielle d'électricité :

« Dans cette assistance nombreuse, je pense que beaucoup d'auditeurs sont venus s'informer des chances de voir aboutir prochainement la réalisation d'une pile

⁶³³ C'est notamment ce qui est demandé à Maurice Bonnemay par Philippe Olmer lorsqu'il lui accorde le renouvellement de son contrat en octobre 1967. Dans le procès-verbal de la réunion du 16 octobre, il est ainsi mentionné : « Le président souligne que ce soutien, apporté à un laboratoire universitaire, entraîne pour ce dernier l'obligation de rester très ouvert aux problèmes industriels. » DGRST, comité scientifique « Électrotechnique nouvelle », « Procès-verbal de la réunion du 16 octobre 1967 », p. 4.

véritablement industrielle. Les auteurs des communications ne doivent pas perdre de vue que leurs auditeurs d'aujourd'hui sont, pour employer un vocable à la mode, en quelque sorte "conditionnés" par les articles d'une certaine presse technique qui promet pour demain des réalisations industrielles qui nécessiteront sans doute une dizaine d'années d'efforts ou plus. Je ne pense pas être contredit en avançant qu'il y a loin entre une pile froide pour applications militaires et une pile de puissance moyenne à usage industriel qui entrera dans son domaine propre en compétition avec les procédés existants de production d'énergie. »⁶³⁴

Le temps est loin où l'électricien national organisait ses propres symposiums sur les piles à combustible, comme à Bréau-sans-Nappe en 1962⁶³⁵. Tout le travail du directeur adjoint de l'EDF, au début de l'action du comité « Électrotechnique nouvelle », va donc être de transformer le « cadre technologique »⁶³⁶ des piles à combustible, c'est-à-dire de fixer leur ontologie, de réorienter leurs objectifs, les applications dans lesquelles il estime qu'elles doivent s'insérer et, par conséquent, les recherches scientifiques et techniques pour y parvenir. Cette dynamique se rend particulièrement visible au cours de la deuxième réunion du comité le 18 mars 1966. Alors que sont rassemblés autour de la table les membres habituels, et que le thème des supraconducteurs vient tout juste d'être évoqué, Maurice Magnien prend la parole pour exposer ses vues au sujet des piles à combustible. Celles-ci peuvent être regroupées en trois points : a) les piles à hydrogène et oxygène doivent maintenant entrer dans une phase de développement, l'application essentielle étant la traction. Dans ce contexte, les efforts ont à porter sur l'augmentation de la puissance massique, l'emploi de métaux non-précieux et l'alimentation par hydrocarbures. D'autre part, les problèmes de recherche concernent essentiellement la séparation de l'hydrogène après reformage, la préparation des électrodes et la combustion directe ou indirecte des hydrocarbures ; b) les études sur les piles de type Redox sont à poursuivre, en particulier celles relatives aux piles en elles-mêmes et à la régénération des produits ; c) les recherches originales sur les accumulateurs doivent être encouragées⁶³⁷.

⁶³⁴ *Revue générale de l'électricité*, janvier 1965, p. 55.

⁶³⁵ Cette journée d'études est présidée par Maurice Bonnemay. Il y présente en particulier une méthode radiographique appliquée à l'étude des électrodes poreuses. Source : Archives du CNAM, « Notice sur les titres & travaux scientifiques de Maurice Bonnemay », octobre 1963, p. 15.

⁶³⁶ BIJKER, Wiebe E., *Of Bicycles, Bakelites, and Bulbs. Toward a Theory of Sociotechnical Change*, The MIT Press, 1995, p. 123.

⁶³⁷ Ce dernier point avait déjà été évoqué pendant la table ronde des 16 et 25 février. Dans le procès-verbal de cette dernière, il est ainsi indiqué : « du point de vue de l'utilisation, par exemple, dans le domaine de la traction automobile, il semble assez difficile de dissocier les piles à combustible des accumulateurs. C'est pourquoi M. Maurice Magnien a introduit dans l'ordre du jour certaines considérations concernant les accumulateurs. En effet, on peut se demander si certains laboratoires à vocation électrochimique n'envisagent pas d'apporter des améliorations aux accumulateurs existants ou de créer de nouveaux types d'accumulateurs utilisant des couples Redox tout à fait nouveaux. La question mérite d'être posée au sein d'un comité traitant de l'électrotechnique nouvelle. » Source : DGRST, « Compte rendu de la table ronde "Piles à combustible" organisée par la DGRST les 16 et 25 février 1966 », p. 5. Pour cette raison, lors de la

La controverse qui s'engage entre les membres du comité montre pourtant que ce sont moins les propositions scientifiques qui posent problème que la gestion financière des activités. Bogdan Broniewski déplore ainsi qu'une proposition de sa société soit associée à l'une de la CGE « car cela revient à diminuer la somme demandée »⁶³⁸. Jean-Claude Balaceanu signale aussi que l'IFP avait demandé à participer à la question de la séparation de l'hydrogène après reformage et « regrette qu'on n'ait retenu que la proposition de l'ONIA car il faudrait de plus gros moyens. »⁶³⁹ Il propose même de faire une demande de subventions à un autre comité, spécialisé dans la chimie macromoléculaire, pour l'étude des membranes. Jean Laroche se dit pour sa part « déçu » de ne recevoir que 100 000 francs alors qu'il en avait demandé le double. Enfin, à ces remarques s'ajoutent les interventions du colonel Duffet et de Maurice Bonnemay traitant des développements étrangers. Encore une fois, le complexe du retard est mobilisé dans le but d'appuyer des revendications budgétaires. Le colonel Duffet s'exprime en particulier sur les piles à combustible élaborées en Allemagne fédérale. « Des résultats remarquables ont été obtenus », dit-il, « dans le domaine des piles à haute température de même que dans l'utilisation du combustible méthanol. »⁶⁴⁰ Mais la question des piles à haute température n'est justement plus un sujet prioritaire pour la nouvelle direction du comité. Pour preuve, il ne reste plus qu'un seul organisme financé sur cette filière spécifique sur les douze contrats proposés, le Laboratoire d'électrochimie et de chimie physique de la Faculté des sciences de Grenoble dirigé par Jean Besson.

Par ailleurs, les travaux effectués depuis quatre ans par le Gaz de France sont rapidement écartés⁶⁴¹. Alors que l'entreprise demande le renouvellement de son contrat, Maurice Magnien répond « qu'on ne peut pas le faire, mais [qu'elle] pourra être tenu au courant des résultats obtenus par les contractants et, [si elle] le désire, assister aux “tables rondes”. »⁶⁴² Par souci de diplomatie, c'est néanmoins

réunion de la commission « Piles à combustible » du 1er mars 1966, il est proposé de transmettre une demande de financements pour la société Alstom de l'ordre de 105 000 francs au comité « Électrotechnique nouvelle » et à la commission des études spéciales au sujet des accumulateurs. Source : DGRST, commission « Piles à combustible », « Procès-verbal de la réunion du 1er mars 1966 », p. 5.

⁶³⁸ Bogdan Broniewski obtiendra finalement gain de cause après la visite des installations d'Alstom et de la CGE par Maurice Magnien et du colonel Duffet les 5 et 6 mai 1966. Il est en effet décidé d'octroyer la totalité du contrat de 190 000 francs à Alstom. Source : DGRST, comité scientifique « Électrotechnique nouvelle », « Procès-verbal de la réunion du 13 mai 1966 », p. 2.

⁶³⁹ DGRST, comité scientifique « Électrotechnique nouvelle », « Procès-verbal de la réunion du 18 mars 1966 », p. 5.

⁶⁴⁰ DGRST, comité scientifique « Électrotechnique nouvelle », « Procès-verbal de la réunion du 18 mars 1966 », pp. 5-6.

⁶⁴¹ En réalité, le Gaz de France va continuer ses recherches sur les piles à carbonates fondus de manière autonome. Entre 1966 et 1968, l'entreprise introduit notamment une matrice de rétention de l'électrolyte sous forme de poudre, abandonne la structure en doigt de gant et réutilise des électrodes planes, pour des progrès sur les performances « spectaculaires » : « la durée de vie passe à 2000 heures et la densité de courant atteint de 50 à 100 mA/cm². » Source : Gaz de France, « Historique du programme de recherche sur les piles à combustible à carbonates fondus mené par le Gaz de France », le 9 mai 1979, p. 2.

⁶⁴² DGRST, comité scientifique « Électrotechnique nouvelle », « Procès-verbal de la réunion du 18 mars 1966 », p. 6.

André Maréchal qui contacte personnellement le directeur des Études et techniques nouvelles pour lui annoncer cette décision⁶⁴³. Quant à l'EDF, qui avait investi la même filière avec ses piles à carbonates fondus, son sort est totalement passé sous silence. La question ne se pose pas, et pour cause : un tournant nucléaire est précisément effectué à cette époque par l'entreprise nationalisée⁶⁴⁴. De plus, comment continuer à financer des voies techniques qui iraient à l'encontre de l'unification de la production industrielle d'électricité décidée ?⁶⁴⁵ La réorientation socio-technique des activités et la diminution des crédits de la DGRST propres à la recherche incitent les laboratoires et les entreprises à chercher de nouvelles sources de financement à l'extérieur du réseau d'acteurs habituel⁶⁴⁶. La CGE, par exemple, organise des événements de promotion de ses technologies. Lors des 24 heures du Mans et sur le stand de la Société des ingénieurs de l'automobile, elle expose notamment une pile à combustible à destination des « foules innombrables du circuit. »⁶⁴⁷ Elle conclut aussi un accord de coopération en 1967 avec la société Siemens⁶⁴⁸ pour « des échanges approfondis de connaissances et des séjours croisés de chercheurs »⁶⁴⁹ et envoie l'un de ses collaborateurs travailler pour la société canadienne Hydro-Québec « afin de monter à Montréal un laboratoire de piles à combustible » ayant pour finalité l'alimentation de stations isolées dans le nord

⁶⁴³ Dans une lettre datée du 23 mai 1966, André Maréchal s'exprime en ces termes : « La mise en œuvre [de la politique du comité "Électrotechnique nouvelle"] s'est heurtée à des difficultés importantes, dans la mesure où les crédits destinés à la recherche sur les piles se sont vus diminuer d'un part très notable pour cette année et les années qui suivent, par rapport aux années antérieures. Bien qu'il ne puisse, en conséquence, être donné suite à votre demande de soutien financier, le comité souhaite donc très vivement que cette décision n'entraînera pas pour autant un relâchement de l'effort de votre organisme dans cette direction, mais que celui-ci persévère dans la voie de recherche originale qui est la sienne. » Source, lettre d'André Maréchal au directeur des Études et techniques nouvelles du Gaz de France, le 23 mai 1966.

⁶⁴⁴ Ce problème est aussi valable pour la magnétohydrodynamique, dont le sort est discuté par Jean-Claude Balaceanu - l'IFP étant impliqué dans des recherches sur le sujet - lors de la réunion du comité « Électrotechnique nouvelle » le 19 décembre 1967. Il déclare ainsi : « la MHD est à un tournant. Tout laisse penser que si elle débouche ce sera seulement pour quelques années car l'énergie nucléaire la rendra inutile. » Source : DGRST, comité scientifique « Électrotechnique nouvelle », « Procès-verbal de la réunion du 19 décembre 1967 », p. 3.

⁶⁴⁵ DÜRR, Michel, « Le tournant nucléaire d'Électricité de France » », in MORSEL, Henri (dir.), *Histoire de l'électricité en France, Tome troisième, 1946-1987*, Fayard, 1996, pp. 693-777.

⁶⁴⁶ Certaines entreprises qui avaient obtenu des résultats probants entre 1961 et 1965 se voient refuser des financements par la DGRST et sortent du circuit. C'est le cas de la Compagnie française Thomson-Houston. Dans le procès-verbal de la réunion du comité « Électrotechnique nouvelle » du 18 novembre 1966, il est ainsi indiqué : « Après étude par la commission "Piles à combustible" la demande CFTH n'est pas retenue. » Source : DGRST, comité scientifique « Électrotechnique nouvelle », « Procès-verbal de la réunion du 18 novembre 1966 », p. 2.

⁶⁴⁷ *Le Maine libre*, le 3 juin 1966.

⁶⁴⁸ À cette période, Siemens et le docteur Von Strum développent une pile hydrogène-oxygène et électrolyte alcalin de 5 kW grâce à un contrat passé avec le ministère de la Recherche allemand et une pile similaire de 50 kW en accord avec le fabricant d'accumulateurs Varta et le ministère de la Défense pour la propulsion de navires.

⁶⁴⁹ Le directeur des laboratoires de la CGE Michel Gossot s'inquiétera l'année suivante d'une rupture d'équilibre au sein de cette collaboration. Le 6 décembre 1968, il écrit à Pierre Aigrain : « A ce jour, nous craignons un déséquilibre. Siemens, en effet, a reçu un contrat du ministère allemand de la Recherche pour l'étude et la mise au point d'une pile de 5 kW ; il est en outre le chef de file d'une opération de mise au point d'une pile à terre de 50 kW pour la Marine allemande. Cela modifie l'état de choses présent en accroissant le potentiel de notre partenaire, jusqu'ici égal au notre et en jetant l'embargo sur certains travaux classifiés. Le maintien d'un coût d'échanges, jusqu'à présent très profitable, suppose que nous parvenions à maintenir nos équipes à un niveau correct. » Source : Lettre de Michel Gossot à Pierre Aigrain, le 6 décembre 1968.

du pays⁶⁵⁰. Elle passe enfin un contrat avec le ministère de l'Équipement pour étudier les possibilités d'utilisation des piles à combustible pour la production d'énergie à bord des navires de commerce. L'administration française venait quelques temps plus tôt d'apprendre que de telles études étaient déjà en cours en Allemagne, par le biais de la Marine marchande qui avait mis à sa disposition une communication scientifique présentée par l'ingénieur K. H. Otte lors d'un congrès à Hambourg en novembre 1965⁶⁵¹. Mais dans la conclusion de son rapport, la CGE reste prudente sur les débouchés éventuels. Elle indique :

« L'étude comparative que nous venons d'effectuer a montré que dans les dix à quinze années à venir, aucune solution globale à propulsion électrique et à piles à combustible ne pouvait être compétitive sur tous les plans avec une solution classique. Nous avons, toutefois, remarqué que les caractéristiques de certains ensembles électriques approchaient des valeurs nécessaires. C'est le cas de la pile à hydrogène-air avec stockage de l'hydrogène sous forme liquide ou sous forme d'hydrures de lithium et de la pile méthanol-air. »⁶⁵²

Au contraire, Alsthom n'hésite pas à voir grand, malgré l'état encore balbutiant des piles à combustible et le « caractère sommaire et précaire »⁶⁵³ de ses installations et de ses moyens de travail, et se rapproche de la SNCF pour un travail d'adaptation à la traction ferroviaire. La société nationale vient tout juste de lancer la création de son Service de la recherche dirigé par Roger Guibert, qui doit aider à « garantir l'avenir du chemin de fer au milieu d'autres modes de transport de plus en plus perfectionnés ». De fait, ce dernier entame des relations avec d'autres entreprises qui « se concrétisent

⁶⁵⁰ Michel Gossot révèle notamment cette information à Pierre Aigrain : « la CGE a procuré à l'Hydro-Québec le concours de l'un de ses collaborateurs qui va être embauché par cette grande société canadienne afin de monter à Montréal un laboratoire de piles à combustible. Le protocole d'accord est en cours de négociations aux termes duquel la CGE et l'Hydro-Québec vont collaborer pour l'étude et la mise au point de piles à combustible. Cela entraînera dans un premier temps une assistance technique française à la province du Québec, suivie ultérieurement d'une collaboration assez intime. » Source : lettre de Michel Gossot à Pierre Aigrain, le 6 décembre 1968.

⁶⁵¹ Marine marchande, « Texte en langue allemande sur les piles à combustible liquide. Traduction de ce texte », note adressée au directeur de la Flotte de commerce et de l'Équipement naval, sous-direction de l'Équipement naval, le 1er mai 1966.

⁶⁵² CGE, « Étude sur l'utilisation des piles à combustible pour la production d'énergie à bord des navires de commerce », 1966.

⁶⁵³ Dans une lettre datée du 1er juin 1966 et adressée au directeur d'Alsthom Georges Glasser, André Maréchal s'exprime en ces termes : « Le comité Électrotechnique nouvelle a reconnu tout l'intérêt de la voie de recherches dans laquelle vous vous êtes engagé. C'est pourquoi il a recommandé la signature d'un contrat, d'une durée de 18 mois, et pour un montant de 190 000 F. Il a noté cependant le caractère sommaire et précaire de vos installations, tant du point de vue locaux qu'au point de vue moyens de travail ; il estime donc très regrettable à ce point de vue que le concours de la CFTH ne soit plus accordé à vos recherches et que l'accord avec la CGE, un moment envisagé, n'ait pu être réalisé. Il vous demande en conséquence de bien vouloir porter une attention toute particulière à cette question, qui pourrait conditionner toute nouvelle demande que vous pourriez formuler à la Délégation générale. » Source : lettre d'André Maréchal à Georges Glasser, le 1er juin 1966.

souvent par des contrats de recherche⁶⁵⁴ dans des domaines où la SNCF ne dispose pas de moyens ou d'expérience suffisants »⁶⁵⁵. De plus, comme l'annonce André Maréchal, l'État vient tout juste de décider « d'intervenir sur l'un des points de passage entre la recherche et la production, la “phase du développement” », en aidant les industriels à la financer par un certain nombre de projets intéressants »⁶⁵⁶. Plus concrètement, cela signifie que la DGRST, par le biais de son Fonds de développement, accepte d'accorder des crédits allant jusqu'à 50 % du budget général des projets dont elle soutient la mise en œuvre⁶⁵⁷ et qu'elle contrôle par l'intermédiaire de deux représentants de la direction des Poudres, l'ingénieur en chef Waternaux et l'ingénieur principal Dubar⁶⁵⁸, du maître assistant au CNAM Jean Royon et de l'ingénieur du Gaz de France Daniel Souriau⁶⁵⁹. Le 29 décembre 1966, Bogdan Broniewski fait ainsi visiter les installations de la compagnie à toute une délégation du rail⁶⁶⁰ pour « tenter de [les] intéresser au développement »⁶⁶¹ de la technique. Mais celle-ci doute de la pertinence d'une telle affaire. Si, en premier lieu, elle paraît impressionnée par « la forte expansion de l'activité pile » d'Alsthom et par « la présentation de deux piles en état de marche » composées de

⁶⁵⁴ À ce sujet, et sur l'ensemble des contrats passés par la SNCF avec d'autres entreprises, Robert Guibert témoigne : « Pour le projet relatif aux infrastructures nouvelles (projet C 03), le C.N.R.S. et la S.E.S.S.I.A. (Société d'Études et de Constructions, de Souffleries, de Simulateurs et d'Instrumentation Aérodynamique) se sont vu confier des études aérodynamiques de base sur les effets de la circulation des trains à très grande vitesse. Quant au projet concernant la « fiabilité » (projet A 91), il a entraîné la conclusion de trois contrats avec MATRA pour les études de fiabilité de divers équipements et composants et d'un contrat avec la C.S.E.E. pour la fiabilité des systèmes de signalisation susceptibles d'être retenus dans le cadre du projet Paris-Lyon. En ce qui concerne l'économie et l'économétrie, ont été passés un contrat avec MATRA pour l'étude des interactions horaires-demande, un contrat avec l'IRIEC (Institut de Recherche et d'Informatique de l'Économie) pour la détermination de l'impact économique d'une ligne nouvelle sur les entreprises régionales et deux contrats avec l'I.T.A. pour des études documentaires sur le transport aérien. Enfin, en ce qui concerne les technologies nouvelles, ont été conclus un contrat avec Alsthom pour l'étude d'une pile à combustible et un autre avec l'Université de Grenoble pour l'étude d'une suspension magnétique. » Source : GUIBERT, Roger, « Le Service de la recherche de la SNCF vu par Roger Guibert », *Revue d'histoire des chemins de fer* [En ligne], n°39, 2008, mis en ligne le 01 juin 2011.

⁶⁵⁵ GUIBERT, Roger, *Ibid.*, 2008, mis en ligne le 01 juin 2011.

⁶⁵⁶ *Le progrès scientifique*, n°102, novembre 1966, p. 3.

⁶⁵⁷ Ce qu'explique le chef du service du Fonds de la recherche à la DGRST Jean-Didier Dardel dans le *Progrès scientifique* : « L'État ne s'engage pas dans une aide sans que l'industriel ait apporté la preuve de son intérêt et de son engagement. Cette preuve, il la fournit en participant lui-même, pour la moitié, au coût d'une opération soutenue par le Fonds de la recherche : c'est la règle du marché à 50 %, dit marché de participation à un programme de recherche. » Source : *Le progrès scientifique*, n°111, février 1967, p. 22.

⁶⁵⁸ André Maréchal ayant fait une telle demande au directeur des Poudres le 28 septembre 1966, ce dernier lui répond le 3 octobre que « c'est bien volontiers [qu'il] donne [son] accord pour que l'ingénieur en chef Waternaux et l'ingénieur principal Jacques Dubar continuent à surveiller les contrats [passés] avec la CGE, l'Institut français du pétrole et la CIPEL » Source : lettre du directeur des Poudres à André Maréchal, le 3 octobre 1966.

⁶⁵⁹ Une note interne de la DGRST datée du 2 mai 1966 rappelle ainsi que « le rôle du contrôleur consiste à suivre chaque contractant en particulier au moyen de visites périodiques (3 ou 4 fois par an environ), à se rendre compte de l'état d'avancement des travaux et des résultats acquis, à donner éventuellement au contractant conseils et indications. » Dans le cas des piles à combustible, la répartition suivante est proposée : Waternaux est chargée du contrôle des travaux de la CGE, de la CIPEL et du Laboratoire d'électrolyse du CNRS, Jacques Dubar de ceux de l'IFP et de l'ONIA, Souriau de ceux de la Faculté de Grenoble et Royon de ceux d'Alsthom. Source : DGRST, « Note. Propositions pour l'organisation des contrôles », le 2 mai 1966.

⁶⁶⁰ Composée de messieurs Camille Martin, Lamiral, Dupuy, le chef adjoint du service de la recherche Marcel Tessier, Nouvion, Boileau, Gaide, Labadie, Autruffe et Balège. Du côté d'Alsthom, on retrouve lors de cette réunion messieurs Desgeorges, Broniewski, Verger, Chalvon, Bedel, Horvilleur, Vaingnedroye, Dallery, Gaudichon, Leroux, Chriron et du Rivau. Enfin la DGRST est représentée par monsieur Cognard.

⁶⁶¹ Alsthom, « Pile à combustible. Réunion Alsthom-SNCF du 28/12/66 », le 29 décembre 1966, p. 1.

six blocs de trente éléments en parallèle et fonctionnant à l'hydrazine, le directeur du Matériel Camille Martin souligne qu'une « aide financière n'est concevable que pour une application spécifique de la SNCF, sinon l'aide demandée relève de la DGRST et la SNCF pense que, dans l'état actuel des choses, Alsthom doit s'adresser à la DGRST. »⁶⁶² Bogdan Broniewski et son équipe répondent alors avec vigueur :

« L'orientation des recherches est très influencée par nos clients. Les caractéristiques des piles SNCF sont différentes de celles de nos clients actuels. Le problème SNCF risque, dans ces conditions, de n'être pas - ou tardivement - abordé. Le niveau de puissance n'est pas en cause et des essais à faible puissance permettront de raccourcir les délais et de minimiser des frais d'expérimentation nécessaires à l'étude de l'adaptation de la pile à un système de traction. Seuls des organismes nationaux peuvent financer de telles recherches comme cela se fait aux USA : l'industrie privée ne peut le faire sans aliéner sa liberté d'action future. »⁶⁶³

Camille Martin concède finalement à ce « qu'on lui remette un projet de contrat d'étude et d'expérimentation spécifiant les différentes étapes envisagées dans le développement des piles traction »⁶⁶⁴. Plus particulièrement, un projet de locomotive expérimentale est conçu⁶⁶⁵, avec des organes prévus pour installer successivement des piles dont les puissances s'étalent de 100 à 300 kW : « cette locomotive », nous dit-on, « serait expérimentée sur le réseau SNCF et permettrait, tant sur le plan technique que commercial, d'en adapter l'évolution aux besoins du réseau électrique français »⁶⁶⁶. Dans le détail, Alsthom souhaite se servir des parties mécaniques et électriques (châssis, capots, cabine, moteurs de traction, etc.) d'une locomotive Diesel-électrique BB de 850 chevaux, déjà construite par ses soins, pour réduire au maximum les frais d'études. Bogdan Broniewski se met également en relation avec Peugeot pour « étudier l'application industrielle de ses piles aux domaines des fabrications du groupe »⁶⁶⁷, et en particulier à ses automobiles. À cette époque en effet, Bernard Warszawski et son équipe située au centre de recherches de Massy n'ont pas seulement effectué des progrès sur leurs générateurs, ils ont aussi commencé à considérer la propulsion électrique proprement dite et ont établi des avant-projets détaillés de roues électriques. Comme l'indique Francis

⁶⁶² Alsthom, « Pile à combustible. Réunion Alsthom-SNCF du 28/12/66 », le 29 décembre 1966, p. 2.

⁶⁶³ Alsthom, « Pile à combustible. Réunion Alsthom-SNCF du 28/12/66 », le 29 décembre 1966, p. 3.

⁶⁶⁴ Alsthom, « Pile à combustible. Réunion Alsthom-SNCF du 28/12/66 », le 29 décembre 1966, p. 3.

⁶⁶⁵ Au total, les dépenses pour le projet s'élèveront à 125 millions de francs. Source : *Revue générale des chemins de fer*, 91^{ème} année, janvier 1972, p. 44.

⁶⁶⁶ Alsthom, « Étude d'adaptation des piles à combustible à la traction ferroviaire. Projet de locomotive expérimentale », octobre 1966, p. 4.

⁶⁶⁷ Cabinet Lavoix, « Convention Peugeot-Alsthom », le 2 février 1967, p. 1.

Rougé de la direction générale au chef des services de l'expansion économique à l'Ambassade de France aux États-Unis, Peugeot s'était aussi intéressé de son côté à la question de la traction électrique, comme « tous les services de recherches des constructeurs d'automobiles, tant en Europe qu'aux USA »⁶⁶⁸.

Si bien qu'en février 1967, les bases préliminaires d'un protocole d'accord de près de seize millions de francs⁶⁶⁹ sont couchées sur papier pour la création d'une association de recherche et développement commune qui « permettrait un accroissement des moyens techniques et financiers, nécessaires au développement des piles à combustible destinées aux automobiles ainsi que la conception de véhicules adaptés à ce nouveau type de propulsion »⁶⁷⁰. Les deux parties entament ainsi une collaboration s'inscrivant dans les domaines des piles à méthanol elles-mêmes, des moteurs alimentés par ces dernières, des appareillages électriques et électroniques de contrôle des moteurs et de l'organisation complète des véhicules, avec pour objectif principal la réalisation d'une automobile à propulsion électrique dans un délai de l'ordre de quatre années. Le projet général comprend la construction d'un générateur d'une puissance de 30 kW utilisant le méthanol comme combustible, d'un moteur électrique avec système de contrôle adapté, de la transmission mécanique entre le moteur et les roues motrices et d'un véhicule tenant compte de l'ensemble pile-entraînement électromécanique⁶⁷¹.

Il ne s'agit pas des seuls contrats qu'Alsthom signe cette année-là. La société s'engage auprès d'une multitude d'institutions : le CPE (Centre de prospective et d'évaluation) du ministère de la Défense, la DRME, la DTCN (Direction technique des constructions navales), la DTEN (Direction technique des engins), la SEREB (Société pour l'étude et la réalisation des engins balistiques), la RATP (Régie autonome des transports parisiens) ou encore le CEMA (Centre d'études marines avancées)⁶⁷². La réorientation des piles à combustible vers la traction, voulue par Maurice Magnien, se confirme avec la passation au même moment d'un accord similaire entre l'IFP, la CSF et la Régie nationale des usines Renault pour la réalisation d'un « prototype de véhicule à piles d'une puissance estimée à 25

⁶⁶⁸ Lettre de Francis Rougé, de Peugeot, à Guy Chaumet, chef des services de l'expansion économique aux États-Unis à l'Ambassade de France, le 5 avril 1967. Dans cette lettre, Francis Rougé demande à Guy Chaumet de le tenir « au courant des publications concernant cette importante question ».

⁶⁶⁹ Répartis de la manière suivante : 8 millions pour les recherches concernant les piles, 5 millions pour les recherches sur les transmissions électriques ou électromécaniques, 3 millions pour la conception du véhicule et de ses auxiliaires.

⁶⁷⁰ Alsthom-Peugeot, « Accord en matière de véhicules électriques alimentés par des piles à combustible entre les sociétés Alsthom et Peugeot », 1er mars 1967, p. 2.

⁶⁷¹ Alsthom-Peugeot, « Accord en matière de véhicules électriques alimentés par des piles à combustible entre les sociétés Alsthom et Peugeot », 1er mars 1967, p. 3.

⁶⁷² Alsthom, « Piles à combustible Alsthom », Le Bourget, 1967, p. 2.

kW »⁶⁷³. Le groupe automobile s'était en effet déjà investi les années précédentes dans le domaine de la traction électrique pour un montant total de l'ordre de 2 835 000 francs tandis que l'IFP et la CSF avaient dépensé de leur côté respectivement 9 629 000 et 2 648 000 francs dans les piles à combustible⁶⁷⁴. Un programme de travail avec une répartition des tâches bien définie est donc mis en œuvre pour une durée totale de six ans : à l'IFP la réalisation de la pile destinée à la voiture, à Renault l'étude et la mise au point du moteur électrique et à la CSF les recherches sur les dispositifs électroniques nécessaires au fonctionnement général du véhicule. Le partenariat s'élargit même un peu plus tard avec l'entrée en son sein du groupe Carbone Lorraine⁶⁷⁵, qui reçoit pour mission de participer aux études de l'IFP sur les piles à combustible⁶⁷⁶. Ces travaux mènent encore la CIPEL, détenue par le Carbone Lorraine, à prendre des contacts avec le CNES. En effet, lors d'un congrès organisé par le centre spatial le 20 novembre 1967 sur la pile hydrogène-oxygène compacte, Raymond Vic tente d'intéresser ses auditeurs à l'investissement dans la technique développée par sa compagnie :

« Notre groupe composé de l'Institut français du pétrole, du Carbone Lorraine, d'usine Carbone et de la CIPEL, associé à la Régie nationale des usines Renault et à la CSF, bénéficie d'un contrat d'aide au développement de la DGRST faisant suite à des contrats de recherches du même organisme. Ces recherches de développement ont pour but, à moyen terme, les problèmes de sources d'alimentations destinées à la traction automobile. Bien qu'à court terme notre objectif soit plus modeste mais vise à l'obtention de groupes de petites puissances (de l'ordre du kW), nous considérons que cette étape est le prélude à la réalisation du groupe traction et c'est là que l'on s'aperçoit qu'existent de nombreux points communs avec les exigences spatiales. [...] De toutes ces considérations, il résulte que les piles air-hydrogène, basses températures, que nous étudions en vue de l'utilisation

⁶⁷³ Composé non seulement du Carbone Lorraine mais aussi d'Ugine Carbone et de la CIPEL. Régie Renault, « Contrat n°571 », le 27 janvier 1967, p. 1.

⁶⁷⁴ La justification des trois parties pour l'enclenchement de recherches communes est insérée dans le contrat passé : « L'IFP, dont les travaux visent à une meilleure utilisation du pétrole et de ses dérivés en vue de la production d'énergie, a poursuivi au cours du IV^{ème} plan des recherches dans le cadre de l'action concertée en matière de conversion des énergies sur les piles à combustible, recherches qui ont conduit à la réalisation d'un certain nombre de prototypes atteignant des puissances de quelques dizaines à quelques centaines de Watts. CSF a également, au cours du IV^{ème} plan, poursuivi des recherches sur la préparation des électrodes et la construction de prototypes de piles à combustible dans le but particulier de leurs applications aux problèmes de télécommunication. Renault recherche des perfectionnements et des moyens nouveaux de traction des véhicules automobiles et reste notamment attentives aux possibilités d'application de piles à combustible. » Source : Régie Renault, « Contrat n°571 », le 27 janvier 1967, p. 1.

⁶⁷⁵ Qui a de son côté investi 4 087 000 francs sur les piles à combustible jusqu'en 1965.

⁶⁷⁶ Régie Renault, « Avenant n°1 au contrat du 7 juillet 1966 ».

en traction utilitaire urbaine, modifiées par le fonctionnement à l'oxygène, nous paraissent le mieux s'adapter aux applications spatiales »⁶⁷⁷

Enfin, la recherche de financement en dehors du réseau d'acteurs traditionnel ne touche pas que les entreprises privées. Le Laboratoire d'électrolyse du CNRS notamment, qui est pourtant encore soutenu par la DGRST⁶⁷⁸, qui continue à déposer des brevets⁶⁷⁹ et dont la RCP sur les piles à combustible se poursuit⁶⁸⁰, va pour sa part jusqu'à nouer des relations avec la CIA. Guy Bronoël explique ainsi : « en 1966, la CIA nous a demandé de collaborer et j'ai eu un contrat avec elle. On a travaillé pendant deux ans pour eux. Il s'agissait d'une phase lourde, non plus de faire de l'électricité à partir de l'hydrogène et de l'oxygène. Nous devions voir quelles étaient les possibilités de transformation des hydrocarbures directement en énergie électrique. »⁶⁸¹ Il faut dire que l'agence de renseignement américaine suivait déjà officieusement les travaux de Maurice Bonnemay depuis quelques temps, et notamment ceux portant sur la réduction d'oxygène⁶⁸². De plus, ajoute Guy Bronoël, « il est possible que la CIA ait facilité l'obtention par notre équipe d'un contrat qui a été passé avec la NASA »⁶⁸³ deux ans plus tard.

Ces événements surviennent en même temps que se modifie le champ des recherches au sein du Laboratoire d'électrolyse. En effet, ce dernier se dirige de plus en plus vers l'approfondissement des connaissances liées aux mécanismes intimes de l'électrocatalyse. C'est un changement important dans la mesure où une controverse scientifique – finement analysée par Michel Callon – avait été engagée à ce sujet au tout début de l'action concertée « Conversion des énergies » en 1960, avant d'être rapidement étouffée. À cette époque, deux camps s'opposent. D'un côté, Maurice Bonnemay

⁶⁷⁷ VIC, Raymond, « Pile oxygène-hydrogène compactée », communication effectuée lors du congrès du CNES le 20 novembre 1967, pp. 1-2.

⁶⁷⁸ Ce soutien institutionnel ne vient pas sans provoquer de controverses. Lorsque Maurice Bonnemay présente par exemple une nouvelle demande de financement de l'ordre de 900 000 francs sur deux ans pour son laboratoire le 16 octobre 1967 auprès du comité « Électrotechnique nouvelle », pour une étude portant particulièrement sur les électrodes pour hydrocarbures et la réduction d'oxygène en milieu acide, Philippe Olmer le soupçonne de surtout tenter de « conserver le personnel engagé sur le précédent [contrat] ». Source : DGRST, comité scientifique « Électrotechnique nouvelle », « Procès-verbal de la réunion du 16 octobre 1967 », p. 4.

⁶⁷⁹ Notamment : « Générateur électrochimique à comburant et/ou combustible gazeux capable de fonctionner comme accumulateur » (invention de messieurs Bonnemay, Bronoël, Levart et Doniat) ; « Perfectionnements apportés aux générateurs électrochimiques à combustibles gazeux » (invention de messieurs Bonnemay, Bronoël, Levart et Doniat). Source : CNRS, « Rapport d'activité 1966 », p. 73.

⁶⁸⁰ En 1966, Maurice Bonnemay fait une demande supplémentaire de collaborateurs techniques. Source : lettre du directeur général du CNRS à Maurice Bonnemay, le 2 février 1967. Jean Besson fait également une demande similaire pour l'obtention de la création d'un poste d'ingénieur et d'un poste de technicien dans son département. Source : lettre de Mme Chakhoff, secrétaire du Laboratoire d'électrolyse, à Mme Theulier du CNRS, le 12 septembre 1966.

⁶⁸¹ Entretien avec Guy Bronoël, Meudon, octobre 2016. Il est ici nécessaire de mentionner que nous n'avons pas trouvé d'archives attestant d'un contrat passé entre le Laboratoire d'électrolyse du CNRS et la CIA.

⁶⁸² CIA, « Consolidated Translation Survey », Number 101, May 1966, p. 109.

⁶⁸³ Correspondance épistolaire entretenue avec Guy Bronoël, décembre 2016. Comme dans le cas précédent, nous n'avons pas non plus trouvé d'archives attestant d'un contrat passé entre le Laboratoire d'électrolyse et la NASA.

considère que l'électrocatalyse représente bien un problème mais que celui-ci doit se régler en même temps que d'autres dans la pratique par le biais d'une approche technique générale des électrodes. De l'autre, Jean-Claude Sohm⁶⁸⁴, alors rattaché au Laboratoire de physique de l'École normale supérieure de Paris, et Jean Germain, de la Faculté des sciences de Lille, recommandent d'étudier spécifiquement les phénomènes catalytiques en se servant des théories fondamentales issues de la physique du solide avant de se lancer dans la réalisation de modèles de piles.

Cette dernière voie n'est pas retenue pour la bonne raison qu'elle ne se situe pas à ce moment donné « dans un réseau de problèmes légitimes » : ce qui fait en effet la force du courant de recherches porté par Maurice Bonnemay en 1960, c'est qu'il permet – au contraire de celui soutenu par Jean-Claude Sohm et Jean Germain – de lier étroitement science et technique, d'obtenir des résultats matériels et de faire collaborer organismes publics et privés. Soit précisément la dynamique que souhaite mettre en œuvre la DGRST. Ainsi, « face à l'accord profond qui unissait milieux scientifiques, politiques et administratifs, des points de vue ouvertement critiques et ne portant de surcroît que sur un des aspects de la question [des piles à combustible] ne pouvaient dégager l'audience nécessaire à leur succès »⁶⁸⁵. Une telle analyse renvoie aux mécanismes sociologiques du rejet évoqués par Mary Douglas : une théorie ou une méthode scientifique a moins de chances d'être diffusée au sein d'une communauté sociale si elle n'est pas en adéquation avec les « préoccupations collectives » et le « climat des idées » qui y règnent⁶⁸⁶. Nous l'avons vu dans le chapitre précédent, l'électrocatalyse n'est évidemment pas écartée des études. Mais elle n'obtient pas non plus une place prépondérante dans les discussions de la communauté et dans les attributions de financements en tant que sujet autonome. Le cas d'Alsthom, qui est prêt à abandonner les filières de piles à combustible classiques pour ne pas avoir à s'y confronter, est peut-être l'exception qui confirme la règle.

La remarque que fait Philippe Brouillet de la société Wonder lors des discussions suivant une série de conférences prononcées devant la Société française des électriciens le 28 janvier 1964 prouve bien la pertinence encore tenace, plusieurs années après, de ce paradigme ne séparant pas la catalyse des autres processus électrochimiques : « il y a un mot sur lequel je souhaiterais revenir », dit-il, « c'est celui de "catalyseur" ». À mon avis, il ne fait nullement avancer la question. En effet, ou bien le catalyseur ne sert à rien, ou bien il permet la réaction électrochimique et il n'est autre en ce cas que l'électrode proprement dite »⁶⁸⁷. Personne dans l'assemblée, qui compte aussi bien des représentants du secteur industriel tels que Maurice Magnien, René Buvet et Hubert Autruffé que des universitaires

⁶⁸⁴ Agrégé de physique en 1960, 14^{ème} au classement, et ancien élève de l'École normale supérieure.

⁶⁸⁵ CALLON, Michel, *op. cit.*, 1978, pp. 84-87.

⁶⁸⁶ DOUGLAS, Mary, *Comment pensent les institutions*, La découverte, 2004 (1986), pp. 112-119.

⁶⁸⁷ *Revue générale de l'électricité*, Tome 74, n°14, p. 92.

tels que Maurice Bonnemay, Guy Bronoël et Jean Laroche, ne le contredit. Or, un renversement commence à s'observer sur cette thématique en 1966 dans le Laboratoire d'électrolyse après le constat d'échec des prototypes exposés au Palais de la Découverte. Guy Bronoël réoriente notamment une partie de son travail vers cette voie en visant « sur le plan fondamental à l'élucidation des mécanismes réactionnels (donc à une meilleure compréhension des processus de transfert et de chimisorption) et sur le plan pratique, par voie de conséquence, à la découverte de nouveaux catalyseurs »⁶⁸⁸. Pour sa part, Maurice Bonnemay reconnaît l'année suivante avoir fait en particulier « un gros effort de mise à jour dans le domaine de la physique du solide, que les membres du Comité de direction⁶⁸⁹ avaient considéré comme une “issue” pour l'électrochimie »⁶⁹⁰, et ce même si un certain « déséquilibre entre recherche fondamentale et recherche appliquée »⁶⁹¹ continue d'être d'actualité.

6.2 La France dans l'espace des recherches internationales

Sous la pression de Maurice Magnien⁶⁹², le réseau d'acteurs se reconfigure donc. Le 14 novembre 1966, le directeur adjoint de l'EDF va même jusqu'à organiser une table ronde réduite à cinq contractants sur les piles à combustible au sein des locaux de la Direction des études et recherches à Fontenay-aux-Roses pour appuyer un peu plus ses revendications. Sa position en ressort affirmée :

« [...] si le but à atteindre en définitive est bien une pile consommant directement des hydrocarbures, un objectif intermédiaire est visé par la majorité des équipes : la pile à combustion indirecte, consommant de l'hydrogène provenant du cracking de combustible plus courant. [...] Ces piles de “première génération” hydrogène-oxygène sont maintenant au stade du développement. En ce qui concerne les piles de “deuxième génération” à combustion directe d'hydrocarbures, chacun s'engage avec confiance dans la voie qu'il a choisie et apporte des éléments d'information montrant qu'à travers des

⁶⁸⁸ CNRS, « Rapport d'activité du Laboratoire d'électrolyse et du Centre d'électrophorèse », octobre 1965 – octobre 1966, p. 16.

⁶⁸⁹ Le Comité de direction étant alors composé des professeurs Prettre, Gallais, Besson, Valensi, Yvon, Piganiol, Bonnemay, Levart, Baticle, Isnard, Brenet, Guastalla, Pacault et Pannetier.

⁶⁹⁰ Comité de direction du Laboratoire d'électrolyse et du Centre d'électrophorèse du CNRS, procès-verbal de la réunion du 16 juin 1967, p. 5.

⁶⁹¹ Laboratoire d'électrolyse et service d'électrophorèse, 608/1E/68, 1968, p. 1.

⁶⁹² Si Maurice Magnien redirige effectivement les recherches, il ne souhaite néanmoins pas - pour le moment - les abandonner complètement. Au contraire, il se montre même enclin à les défendre au sein des réunions du comité Électrotechnique nouvelle. A l'occasion de la séance du 20 mars 1967 notamment, et alors que Philippe Olmer annonce que les crédits de l'action concertée viennent d'être revus à la hausse par le Commissariat du V^{ème} Plan, passant ainsi de 30 à 35 millions de francs, Maurice Magnien propose d'accorder deux millions supplémentaires aux recherches fondamentales « susceptibles de déboucher sur une nouvelle génération de piles (oxygène de l'air, hydrogène impur, gaz de reformage ou hydrocarbures). » Source : DGRST, comité scientifique « Électrotechnique nouvelle », « Procès-verbal de la réunion du 20 mars 1967 », p. 1.

difficultés qui peuvent être surmontées, les piles à électrolyte basique ou acide paraissent réalisables. On pourra sans doute tourner les écueils de la carbonatation pour l'une (électrolytes types amines, hydroxyde de tétraméthylammonium) et ceux de la corrosion pour l'autre ; les métaux rares et précieux n'apparaissent plus comme des catalyseurs absolument nécessaires à la réaction physico-chimique. Des composés de l'argent, du bore, du niobium, des bronzes, des spinelles, peuvent être substitués au platine. Enfin, l'examen des possibilités actuelles et futures des accumulateurs a montré que ces derniers pourraient constituer des auxiliaires précieux au même titre que les piles, si les études actuelles sur les couples électro-chimiques étaient poursuivies. »⁶⁹³

Les participants se mettent ainsi d'accord sur trois points : a) dans le cas des piles à hydrogène et oxygène, la tendance est à remplacer les métaux précieux par d'autres métaux moins nobles et de rechercher de nouveaux électrolytes ; b) dans le domaine des piles Redox, les études sont satisfaisantes et doivent être poursuivies ; c) la préparation et la séparation de l'hydrogène pur, ainsi que le domaine des accumulateurs sont des voies à approfondir⁶⁹⁴. Ces décisions sont d'autant plus acceptées qu'elles semblent suivre une tendance générale sur les recherches ayant lieu ailleurs dans le monde. En effet, après s'être rendu au *Seventh World Petroleum Congress* se tenant à Mexico du 2 au 9 avril 1967, Jean-Claude Balaceanu « en rapporte la certitude que les meilleures filières sont aussi celles qui ont été choisies par les milieux français : piles à hydrogène en milieu basique, piles à hydrogène en milieu acide, piles à hydrazine. »⁶⁹⁵ Odile Bloch, Yves Bréelle et Paul Degobert en reviennent également en estimant que les résultats obtenus avec des combustibles aussi réactifs que l'hydrogène, le méthanol et l'hydrazine vont avoir des répercussions sur le marché des produits pétroliers : « L'application qui influencera le plus profondément ce marché, est la traction électrique des véhicules urbains, pour lesquels les avantages spécifiques des piles (silence, gain de rendement, absence de pollution atmosphérique) seront particulièrement recherchés. [...] les budgets de fonctionnement des véhicules à piles utilisant l'hydrogène ou le méthanol avec leurs prix actuels, apparaissent déjà compétitifs », écrivent-ils dans leur rapport⁶⁹⁶.

⁶⁹³ *Le progrès scientifique*, n°106, mars 1967, p. 83.

⁶⁹⁴ DGRST, comité scientifique « Électrotechnique nouvelle », « Procès-verbal de la réunion du 18 novembre 1966 », p. 1.

⁶⁹⁵ DGRST, comité scientifique « Électrotechnique nouvelle », « Procès-verbal de la réunion du 5 juin 1967 », p. 3.

⁶⁹⁶ Odile Bloch, Yves Bréelle, Paul Degobert, « L'incidence future des piles à combustibles sur le marché des produits pétroliers », note interne de l'IFP, p. 1, archive personnelle d'Yves Bréelle pour le *Seventh World Petroleum Congress de 1967*.

On voit dans quelle mesure les dispositions étrangères vis-à-vis de la technique comptent pour les décideurs : la recherche française n'étant pas un effort isolé mais un jeu subtil entre contribution aux connaissances mondiales et nécessité stratégique vis-à-vis de l'indépendance nationale, l'opinion internationale, et en particulier celle ayant cours aux États-Unis, garde une influence prépondérante sur les choix à effectuer. En attestent les nombreuses missions d'information et d'observation effectuées régulièrement dans ce pays⁶⁹⁷. Celle d'Yves Bréelle pour l'IFP et la DGRST, ayant lieu entre les mois de septembre et octobre 1964⁶⁹⁸, a par exemple pour objet « la confrontation des problèmes posés, la reconnaissance des lignes directrices de recherche et des objectifs visés, l'estimation du stade de développement et l'importance de l'effort consenti »⁶⁹⁹. Les enseignements de tels voyages toquevilliens jouent sur l'orientation des dynamiques d'étude générales pour des chercheurs français qui ont tout à fait conscience de se situer dans un espace d'activité international. Ainsi, à la fin de sa première mission, Yves Bréelle peut rassurer ses collègues et les administrateurs de la DGRST sur « le bien-fondé des lignes directrices du programme de recherche [national] » :

« Découverte de matériaux non-précieux et actifs, qui conditionne l'envergure des débouchés, choix du milieu acide qui supprime les problèmes de carbonatation et de séparation éventuelle de l'hydrogène de conversion et qui pourrait ouvrir la voie à la traction, recherche d'électrodes durables à supports en matériaux répandus, bon marché et façonnables en série, pour obtenir un prix au kW faible, réalisation parallèle de prototypes grâce à des objectifs relais pour approfondir nos connaissances technologiques de construction (concevable en première étape en milieu basique). Ce programme devrait permettre de se maintenir au niveau des réalisations étrangères malgré le handicap considérable de nos moyens. »⁷⁰⁰

Dans une perspective similaire, qui démontre toujours l'importance attachée au contexte international, l'IFP va même jusqu'à produire un « inventaire des ressources mondiales en éléments catalytiques pour électrodes de piles à combustibles » en janvier 1965 : étant donné que les débouchés

⁶⁹⁷ Des missions plus générales, visant à recueillir des informations sur l'état de la science et de la technique aux États-Unis, sont aussi effectuées par le chargé de mission à la DGRST Pierre Cognard.

⁶⁹⁸ Au cours de cette mission, Yves Bréelle visite un nombre considérable de laboratoires : Esso Research à Linden, Texas Instruments à Dallas, l'Institute of Gas Technology à Chicago, Ford à Detroit, General Electric à Schenectady, Pratt & Whitney à Hartford, Union Carbide à Cleveland, Electric Storage Battery à Yardley, Cyanamid International à Philadelphie, Ionics à Boston, Prototech Incorporated à Boston, Atlantic Refining à Glennholder, Engelhard Ind à New Ark et Allis Chalmers à Milwaukee.

⁶⁹⁹ Yves Bréelle, « Compte rendu de mission aux États-Unis relative aux piles à combustibles », n°11468, janvier 1965, p. 1.

⁷⁰⁰ Yves Bréelle, « Compte rendu de mission aux États-Unis relative aux piles à combustibles », n°11468, janvier 1965, p. 41.

de grande envergure pour les piles à basse température, particulièrement étudiées par l'Institut du fait de la possibilité d'utilisation du méthanol, se trouvent limités « par la nécessité d'employer des catalyseurs d'électrodes (platine, palladium) pour lesquels les ressources mondiales sont particulièrement faibles »⁷⁰¹ et que les efforts de recherche se portent désormais « vers des catalyseurs susceptibles de remplacer les métaux nobles », Paul Degobert estime en effet utile de préciser les stocks d'éléments susceptibles d'entrer dans la composition de ces derniers⁷⁰² pour en tirer des conclusions économiques relatives à leurs futurs prix éventuels. Les missions d'information et d'observation se poursuivent au cours des années suivantes. Elles s'accroissent même. En avril 1967, Paul Degobert voyage encore aux États-Unis⁷⁰³ pour « suivre la tendance générale des recherches de développement et le niveau des performances atteint »⁷⁰⁴. En juillet, l'ingénieur de la CGE Pierre Dubois rend aussi visite à l'Union Carbide, la General Electric, Allis Chalmers, Pratt & Whitney, Monsanto et Texas Instruments pour connaître l'évolution de leurs programmes en matière de piles à combustible. En dehors de la différence d'effectifs⁷⁰⁵ et de l'avance importante prise outre-Atlantique dans le domaine des techniques de montage et du développement des accessoires associés, il ressort de ces deux missions une conclusion générale certifiant que les objectifs poursuivis en France s'accordent avec les lignes de conduite des firmes américaines⁷⁰⁶.

⁷⁰¹ Paul Degobert, « Inventaire des ressources mondiales en éléments catalytiques pour électrodes de piles à combustibles », n°11421, p. 1.

⁷⁰² Ces éléments sont, pour Paul Degobert, les suivants : lithium, rubidium, césium, titane, zirconium, hafnium, vanadium, niobium, tantale, chrome, molybdène, tungstène, cobalt, nickel, palladium, platine, cuivre, argent, cadmium, zinc, mercure, bore, germanium, étain, plomb, arsenic, antimoine, bismuth et or. Source : Paul Degobert, « Inventaire des ressources mondiales en éléments catalytiques pour électrodes de piles à combustibles », n°11421, p. 4.

⁷⁰³ Ce voyage comprend la visite des laboratoires de développement d'Allis Chalmers à Milwaukee, de l'Union Carbide à Parma, de la General Electric à Lynn, de Pratt & Whitney à Middletown, de l'Institute of Gas Technology à Chicago, de Monsanto Research Corporation à Everett, de Leeson Moos à Great Neck, d'American Cyanamid à Stamford, de Ford à Dearborn, de General Motors à Goleta et de l'US Army à Fort Monmouth et Fort Belvoir. Source : Paul Degobert, « Visite des laboratoires américains travaillant sur les piles à combustibles », rapport n°14 940, septembre 1967, p. 2.

⁷⁰⁴ Paul Degobert, « Visite des laboratoires américains travaillant sur les piles à combustibles », rapport n°14 940, septembre 1967, p. 1.

⁷⁰⁵ Les effectifs sont répartis de la manière suivante : 100 personnes à l'Union Carbide (90 personnes pour les piles à hydrogène et 10 personnes pour la pile à hydrazine-air), 290 personnes à la General Electric (280 pour la pile à hydrogène et 10 personnes pour la combustion directe des hydrocarbures), 300 personnes à Allis Chalmers (290 personnes pour la pile à hydrogène et 10 personnes pour la pile à hydrazine-air), 460 personnes pour l'association entre Pratt & Whitney, Leeson Moos et l'Institute of Gas Technology (450 personnes pour la pile à hydrogène et 10 personnes pour la pile à carbonates fondus, personnel de fabrication correspondant au programme Apollo non compris), 70 personnes à Monsanto (40 personnes pour la pile à hydrazine-air et 30 personnes pour la pile à carbonates fondus).

⁷⁰⁶ Pierre Dubois écrit notamment dans son rapport : « Au cours des visites que j'ai faites aux États-Unis en 1967, j'ai pu constater ce qui suit : a) les principales sociétés américaines actives dans le domaine des piles ont maintenu ou accru leur effort en 1967 ; b) cet effort est, à 90 %, orienté vers les piles à hydrogène travaillant à des températures peu élevées : piles à hydrogène-oxygène pour les applications spatiales ou sous-marines et piles à hydrogène-air pour les applications terrestres. L'hydrogène est produit dans un système associé à la pile à partir d'hydrures métalliques pour les faibles puissances et d'ammoniac, de méthanol ou d'hydrocarbures pour les puissances plus élevées. Les piles de première génération en cours de développement consomment de l'hydrogène pur. Les piles capables de brûler de l'hydrogène brut de reforming sans élimination du gaz carbonique, sont l'objet d'un programme de recherche important, les difficultés provenant au moins autant de l'électrode à air que de l'électrode à hydrogène ; c) la combustion directe des hydrocarbures ne fait pratiquement plus l'objet d'aucune étude importante des grandes sociétés américaines, la voie du reforming préalable paraissant beaucoup plus commode encore que déjà difficile. Le programme "combustion directe" de General Electric – Schenectady financé par l'armée a été substantiellement réduit ; d) les autres filières ne sont l'objet que d'un

Au même moment, des voix discordantes se font pourtant entendre, encore une fois liées à l'opinion diffusée outre-Atlantique. Le ministère des Armées, notamment, commence à douter de l'intérêt présenté par les piles à combustible⁷⁰⁷. D'une part en effet, il admet que persistent « des incertitudes plus ou moins grandes sur les possibilités de réussite technique » et que « les extrapolations que l'on peut trouver dans les publications ou faites par les spécialistes enquêtés n'ont souvent aucune justification économique »⁷⁰⁸. D'autre part, l'engouement américain pour la technique – qui avait motivé le CASDN à impulser les recherches en France dès 1959 – apparaît désormais plus mesuré. Certaines entreprises américaines, surveillées de près par les services de renseignement du ministère des Armées⁷⁰⁹, produisent bien des prototypes très avancés. La General Motors met par exemple au

effort très limité : piles à carbonate fondu de l'Institute of Gas Technology et de Texas Instruments, piles à électrolyte solide de General Electric et de Westinghouse. Des piles de faible puissance sont étudiées pour l'armée par Monsanto et Union Carbide. En outre, pour les engins sous-marins d'exploration ou de sauvetage, on envisage d'utiliser des piles à combustible travaillant sous pression et placées hors coque épaisse et deux voies paraissent devoir être retenues : piles à hydrazine-eau oxygénée et piles à hydrogène-oxygène cryogénique. » Source : Pierre Dubois, « L'activité de l'industrie américaine dans le domaine des piles », rapport CGE n°7P712, août 1967, pp. 1-2.

⁷⁰⁷ La DGRST émettait elle aussi quelques réserves sur les piles à combustible en mars 1965 dans les pages du *Progrès scientifique* : « L'effort français dans le domaine des piles à combustible n'est naturellement pas un effort isolé. Des efforts importants sont poursuivis depuis plusieurs années en Angleterre, en Hollande, aux États-Unis. Un engin aussi propre, susceptible de fonctionner commodément dans les enceintes confinées, où il faut de toute manière disposer de réserves d'oxygène, ne pouvait manquer d'attirer l'attention des experts de la recherche spatiale. Le principal de l'actuel effort américain semble être de munir les trois futurs explorateurs de la lune – projet Apollo – du matériel énergétique dont ils auront besoin. On se demande quelquefois si les gigantesques mises au point qu'imposent des programmes d'une telle envergure seront ultérieurement rentables dans des applications plus terre à terre. C'est ainsi que les photopiles qui équipent des satellites moins ambitieux ne sont pas assurées de trouver leur emploi sous nos cieux brumeux. La pile à combustible recèle peut-être plus de promesses. » Source : *Le progrès scientifique*, n°82, mars 1965, p. 7.

⁷⁰⁸ Ministère des Armées, Centre de prospective et d'évaluation, « Étude des conséquences économiques du développement industriel éventuel des techniques et produits nouveaux. Synthèse des résultats obtenus depuis 1966 », Volume II, Conclusion d'ensemble, étude réalisée par le Bureau d'informations et de prévisions économiques, 1967, p. 8.

⁷⁰⁹ Une note technique sur les actions de la General Electric, rédigée par le ministère des Armées, montre à quel point cette surveillance est détaillée : « General Electric développe actuellement un programme de fabrication de piles à combustible commercialisables à bref délai. Ce programme couvre la période de 1966 à 1973, mais seule la première étape de 3 années 1966-1968 peut être définie avec quelque précision. Après une étude de marché très poussée, GEICO s'est fixé comme objectif de disposer de piles standard (‘‘Standard Commercial Units’’) fonctionnant à l'air, pouvant remplacer les batteries classiques très chères, donc destinées, malgré leur qualificatif de commercial, à des usages militaires, ou civils très particuliers. Les spécifications de ces piles ont été établies en faisant la moyenne des exigences des clients éventuels, et les premiers matériels seront en quelque sorte des échantillons permettant aux utilisateurs de se familiariser avec leurs possibilités et d'émettre des observations qui pourront entraîner la modification des modèles ultérieurs. Destinées à se substituer aux batteries, ces premières piles ne dépasseront pas une puissance de 2 Kw. Toutefois, et dans la mesure où les efforts nécessaires ne compromettent pas la réalisation du programme standard, certains modèles plus puissants pourront être réalisés dès la période 1966-1968 si les utilisateurs le réclament. Compte tenu de cette possibilité, le programme prévoit : des piles de 6 à 100 watts avec génération d'hydrogène par action chimique de l'eau sur un composé hydrogéné. Celui-ci sera choisi en fonction de son bilan en eau, plutôt qu'en fonction de son prix. Le but est d'engendrer de l'hydrogène uniquement avec l'eau produite par la pile. Des piles de 500 watts et des piles de 1 à 2 Kw, avec reformer extérieur. La première réalisation concerne une pile de 12 W, à module très plat, de 20 cm x 20 cm x 4 cm. Cette forme est obtenue en montant sur une seule membrane 16 électrodes à oxygène et sur une autre membrane les 16 électrodes à hydrogène correspondantes. La membrane sert d'isolant électrique entre les zones actives. Cette pile, dont la commercialisation devrait intervenir dès 1967, reviendra à environ 150 dollars (y compris le générateur d'oxygène) dans un premier temps. GEICO espère atteindre, à la fin du programme, en 1973, un prix de l'ordre de 1 dollar par watt. » Source : Ministère des Armées, SDECE-DRST, « note technique n°/N1602/0/DRST/2C du 9 juin 1966 », le 15 juin 1966.

point en 1966 une fourgonnette fonctionnant avec une pile à hydrogène et basse température de 5 kW de l'Union Carbide, capable d'une vitesse de pointe de 110 km/h pour une autonomie de 160 à 240 km⁷¹⁰. Mais la tendance générale est plus mitigée, comme s'en rend compte le directeur du CPE (Centre de prospective et d'évaluation) et ingénieur en chef Hugues de l'Estoile lorsqu'il sollicite dans le plus grand secret⁷¹¹ l'avis de l'ingénieur des Arts et métiers et directeur des Études et recherches à la Régie nationale des usines Renault Fernand Picard sur la question :

« Pour le moment, les constructeurs américains seraient favorables aux accumulateurs en attendant que la pile à combustible devienne courante. Pratt & Whitney s'est orienté dans un domaine un peu particulier. L'origine de l'étude réside dans le nombre considérable - 20 millions - de maisons que les États-Unis devront construire avant 1980. Les compagnies d'électricité ont proposé de les équiper "tout à l'électricité". Les producteurs de gaz ont réagi et proposent au contraire de les équiper "tout au gaz", le gaz (méthane) alimentant les piles à combustible qui produiraient également l'électricité nécessaire à chaque maison ou groupe de maisons. Une étude économique a été faite, qui a comparé le coût des investissements (centrales nucléaires) nécessaire pour l'équipement de ces maisons, ainsi que le coût de la distribution, et elle aurait démontré une nette supériorité pour les piles à combustible. Ce projet est encore tout à fait secret. Cependant, comme il a été dit, les constructeurs américains sont actuellement orientés sur l'accumulateur. [...] On a, aux États-Unis, l'impression que si la pile ne capote pas dans un délai de quatre ou cinq ans, son essor sera considérable. »⁷¹²

Ces remarques rejoignent celles du Centre d'exploitation du renseignement scientifique et technique, rattaché au Secrétariat général de la Défense nationale, qui écrit dans une note d'information sur « les automobiles électriques à l'étranger » que la technique des accumulateurs (argent-zinc, zinc-air, lithium-chlore, lithium-fluorure, de nickel, sodium-soufre, batteries au plomb) se répand chez les grands constructeurs tels que General Motors, Westinghouse ou Daihatsu et dans l'armée américaine

⁷¹⁰ *Revue de défense nationale*, 1967, p. 891.

⁷¹¹ La note confidentielle précise en effet de ne pas dévoiler ces informations à Michel Gossot et la CGE. Source : Ministère des Armées, Centre de prospective et d'évaluations, rapport d'entretien avec Fernand Picard, note confidentielle, le 28 février 1966.

⁷¹² Ministère des Armées, Centre de prospective et d'évaluations, rapport d'entretien avec Fernand Picard, note confidentielle, le 28 février 1966.

et semblerait plus proche d'aboutir⁷¹³ que les recherches sur les piles à combustible⁷¹⁴. À peu près au même moment, et comme le note Yves Bréelle, la compagnie Ford adopte elle aussi une « position d'attente » similaire, défavorable à la technique. La raison affichée est que la concurrence entre les piles à combustible et les moteurs thermiques classiques commence à tourner à l'avantage des seconds, c'est-à-dire précisément au moment où ils adoptent une forme finale ne pouvant plus supporter de « transformations fondamentales, ni même de perfectionnements spectaculaires »⁷¹⁵ :

« Au sujet de la traction, signalons le point de vue de Ford qui a adopté vis-à-vis des piles, une position d'attente. Cette société estime que les applications des piles aux véhicules de tourisme ne pourront se faire que lorsque les piles pourront fournir des puissances de pointe comparables à celles du moteur thermique et si cette pile utilise un hydrocarbure commercial (l'installation d'un réseau de distribution de méthanol par exemple, leur semble d'ailleurs très difficile). Quant aux avantages de pollution et bruit propres à la pile, Ford trouve que les moteurs thermiques actuels sont très silencieux et que le problème de pollution du moteur peut se résoudre. Enfin le couple élevé fourni par l'association pile moteur série peut être obtenu également avec les perfectionnements des transmissions automatiques actuelles. »⁷¹⁶

C'est d'ailleurs le même point de vue qu'émet le directeur des Recherches et Laboratoires à la Régie nationale des usines Renault M. Bertetto devant le groupe X-Auto le 25 avril 1967 :

« La comparaison des puissances massiques actuelles des piles à celle des moteurs thermiques est [...] très défavorables à celles-ci. On peut se demander pourquoi ? D'abord, il faut dire que 70 bonnes années de patiente progression ont permis au moteur thermique d'atteindre son niveau actuel. S'il n'y avait que cela, on pourrait dire qu'avec les moyens de recherche et de développement disponibles aujourd'hui, l'équilibre des poids devrait rapidement s'établir entre les deux techniques. Mais il faut noter que les

⁷¹³ Le rapport du Centre d'exploitation du renseignement scientifique et technique rattaché au Secrétariat général de la Défense nationale mentionne notamment : « [...] malheureusement, beaucoup de temps s'écoulera encore avant que [les recherches sur les piles à combustible] débouchent dans l'industrie : au moins trois à cinq ans encore avant de passer à des réalisations concrètes. Pour ce qui est des accumulateurs avancés, ce délai est actuellement estimé à deux ans. » Source : Secrétariat général de la Défense nationale, Centre d'exploitation du renseignement scientifique et technique, « Note d'information. Les automobiles électriques à l'étranger », mai 1968, p. 5.

⁷¹⁴ Secrétariat général de la Défense nationale, Centre d'exploitation du renseignement scientifique et technique, « Note d'information. Les automobiles électriques à l'étranger », mai 1968, pp. 1-6.

⁷¹⁵ DAUMAS, Maurice, *Histoire générale des techniques, tome IV*, Presses universitaires de France, 1978, p. 196.

⁷¹⁶ Yves Bréelle, « Compte rendu de mission aux États-Unis relative aux piles à combustibles », n°11468, janvier 1965, p. 39.

mécanismes de base sont différents. Les réactions aux électrodes, génératrices d'électricité, sont des réactions de surface effectuées à des températures et pressions basses voisines des conditions atmosphériques. Le moteur thermique provoque la combustion par des réactions de volume et à des températures et pressions élevées. Il se trouve donc favorisé à la fois sur le plan des puissances massiques pour les fortes puissances, et sur le plan des exigences en combustible : il tolère plus facilement des combustibles peu réactifs créant lui-même l'activation de ces combustibles. »⁷¹⁷

Dans ces circonstances, le ministère des Armées confirme que « les perspectives d'application des piles à combustible à la propulsion des véhicules militaires ne sont pas entièrement séduisantes »⁷¹⁸. Et lors d'une réunion ayant lieu le 19 juin 1967, le CPE propose ainsi de ralentir la cadence : « en ce qui concerne les recherches sur piles et moteurs, ne pas envisager d'actions spécifiques immédiates, ne pas se lancer à fond sur les piles de puissance, mais ne pas arrêter les recherches en cours car il y a d'autres applications. Du point de vue du véhicule électrique, attendre les résultats de l'étude Alsthom en 1968 »⁷¹⁹. Les recherches en cours sur les générateurs électrochimiques, justement, sont nombreuses⁷²⁰ et laissent entrevoir un éloignement dans le temps des perspectives d'application. Alors que la DRME avait passé un contrat avec la CGE pour un montant de 320 000 francs nouveaux, sur la faisabilité et l'intérêt de la propulsion électrique pour les véhicules terrestres de la gamme militaire, l'analyse de ses rapports est par exemple contrastée : si les avantages tactiques évoqués, tels que « les déplacements silencieux et athermiques », ne sont pas négligeables, les systèmes propulsifs à piles à combustible pour la gamme s'étendant de 6 à 15 tonnes ne sont attendus qu'à

⁷¹⁷ *La jaune et la rouge*, n°218, août-septembre 1967, p. 26.

⁷¹⁸ Ministère des Armées, Centre de prospective et d'évaluations, le 28 juin 1967, « Compte-rendu de réunion du 19 juin 1967 : application des piles à combustible à la propulsion terrestre de la gamme militaire », p. 4.

⁷¹⁹ Ministère des Armées, Centre de prospective et d'évaluations, le 28 juin 1967, « Compte-rendu de réunion du 19 juin 1967 : application des piles à combustible à la propulsion terrestre de la gamme militaire », p. 4.

⁷²⁰ À la fin du mois de novembre 1968, les contrats passés par la DRME pour les recherches fondamentales concernant les générateurs électrochimiques sont au nombre de huit pour un total de plus de 800 000 francs : « étude de la conductance des électrolytes dans des solvants organiques » (Quintin, Faculté des sciences de Paris, 30 000 francs), « étude d'électrolytes solides à conductibilité ionique importante et sans conductibilité électronique (Vic, CIPEL, 140 000 francs), « Participation à une recherche de microtribométrie » (Courtel, CNRS, 140 000 francs), « étude électrochimique de la réduction d'oxygène (Bonnemay, CNRS, 107 000 francs), « étude des paramètres aux phénomènes d'interface métal-solution d'électrodes polarisées (Lacaze, ADFAC, 173 000 francs), « étude des phénomènes aux électrodes par analyse des variations tension-courant (Epelboin et Lestrade, CNRS, 80 000 francs), « étude de l'oxydation électrochimique de l'hydrogène et des hydrocarbures par RPE (Bonnemay, CNRS, 109 000 francs), « recherches de métaux et composés métalliques présentant des propriétés catalytiques pour l'oxydation des hydrocarbures (Barret, Faculté des sciences de Dijon, 40 000 francs). Source : lettre de l'ingénieur militaire en chef Esmanjaud à Maurice Magnien, le 4 novembre 1968. À noter également que la DRME continue à prendre des contacts à l'extérieur du pays à cette période pour connaître l'état d'avancement des recherches sur les piles à combustible, et notamment en Allemagne fédérale auprès du professeur Vielstisch de Bonn. Dans une lettre adressée au directeur du CNAM, Maurice Bonnemay écrit qu'il entend « participer à une rencontre entre le professeur Vielstisch et les représentants de la Direction des recherches et moyens d'essais (DRME) qui est un organisme militaire français ; objet : piles à combustibles. » Source : lettre de Maurice Bonnemay au directeur du CNAM Paul Guérin, le 12 octobre 1968.

« l'horizon 75/80 » et « ne deviendront économiques que plus tard ». De plus, « la compacité de [ceux-ci] ne sera pas encore suffisante, à moins d'un progrès très rapide, pour concurrencer les systèmes à moteurs thermiques sur les véhicules blindés chevillés »⁷²¹.

À cela, il faut ajouter que l'importance des crédits alloués à la recherche scientifique à caractère militaire commence à faire débat à l'Assemblée nationale. À l'instar du député François Mitterrand qui prend à partie le nouveau ministre d'État en charge de la Recherche scientifique et des Questions atomiques et spatiales Maurice Schumann en citant les propos du rapporteur spécial Maurice Herzog lors de la séance du 2 novembre 1967, il est notamment reproché au ministère des Armées de ne pas assez se concentrer sur des recherches ayant des retombées civiles plus directes :

« Certes, il existe des retombées technologiques. Mais, j'ai relevé dans un rapport que la première de ces retombées technologiques consistait en une avance appréciable de nos connaissances en matière de dessalement des eaux marines et saumâtres. On s'en félicite aussi pour le laser à gaz, les piles à combustible, la propulsion chimique, pour les progrès de la cryogénie, pour l'exploitation pétrolière, pour les instruments de mesure, pour certains alliages spéciaux. Très bien ! Il serait insensé que tant de milliards consacrés à la recherche militaire ne contribuent en aucune circonstance à la recherche civile. Mais la question est de savoir si, véritablement, une recherche civile qui bénéficierait des crédits de la recherche militaire ne sait pas capable d'en tirer encore un meilleur profit. (*Applaudissements sur les bancs de la fédération de la gauche démocrate et socialiste et du groupe communiste.*) »⁷²²

L'ensemble de ces éléments permet de dresser plusieurs constats sur la diffusion et l'adoption des innovations scientifiques liées aux piles à combustible à cette période. En réalité, il apparaît que notre cas d'étude s'insère fortement dans les modèles théoriques classiques sur les processus qui entraînent le passage ou le blocage d'une innovation entre systèmes sociaux différenciés. On retrouve en effet un certain nombre de points concordants. Tout d'abord, des « cercles sociaux » et des « réseaux d'interaction indirects »⁷²³ qui facilitent la communication d'idées et d'informations entre la France et les États-Unis. Les premiers sont représentés par des groupes de scientifiques situés dans des

⁷²¹ Ministère des Armées. Centre de prospective et d'évaluations, lettre de l'ingénieur en chef Hugues de l'Estoile, à destinataires « in fine », « Applications des piles à combustible à la propulsion des véhicules terrestres de la gamme militaire, étude préliminaire de la faisabilité et de l'intérêt de la propulsion électrique pour les véhicules terrestres de la gamme militaire », le 4 avril 1967.

⁷²² Assemblée nationale, 1^{ère} séance du 2 novembre 1967, p. 4317.

⁷²³ CRANE-HERVE, Diana, LECUYER, Bernard-Pierre, « La diffusion des innovations scientifiques », in *Revue française de sociologie*, Vol. 10, n°2, 1969. pp. 167-168.

espaces disciplinaires similaires et partageant des intérêts communs : les recherches publiques et privées sur les piles à combustible, ayant cours aussi bien dans les milieux académiques que dans les entreprises. Dans le cas français plus particulièrement, ce trait est accentué par la présence du comité « Électrotechnique nouvelle » qui fait office de cercle social formel et structurant. Ces cercles sociaux sont directement en relation par le biais des missions lancées par la DGRST pour connaître l'état de la technique aux États-Unis, par les événements institutionnels organisés régulièrement, tels que les colloques internationaux, et par les échanges professionnels et personnels entretenus entre les membres des deux systèmes. Les seconds sont constitués par les canaux de publication scientifique, c'est-à-dire les revues spécialisées et les brevets déposés, et par les organismes de renseignement. En France, il s'agit notamment du Centre d'exploitation du renseignement scientifique et technique et du Centre de prospective et d'évaluation du ministère des Armées qui évaluent, de façon plus ou moins secrète, la situation à l'étranger, et plus spécifiquement aux États-Unis qui est bien le « leader de l'opinion »⁷²⁴ sur le sujet. On retrouve ensuite une ou plusieurs innovations que l'on peut simplement définir comme « toute idée, pratique ou objet perçu comme nouveau par un individu ou toute autre unité d'adoption »⁷²⁵.

Dans notre cas précis, il s'agit des voies de recherche poursuivies. Les questions que se posent les décideurs et les scientifiques français sont les suivantes : était-il pertinent d'abandonner les filières à hautes températures, de se concentrer sur les piles à hydrogène-oxygène et de travailler sur l'emploi de métaux moins nobles ? Les recherches sont-elles menées dans la bonne direction ? Un décalage temporel existe-t-il entre l'état de la technique en France et aux États-Unis ? Les piles à combustible sont-elles des techniques sur lesquelles il faut continuer d'investir massivement ? Pour que les idées américaines soient intégrées en France, il ne faut pas seulement qu'il y ait un degré élevé de compatibilité avec le système américain, caractérisé par un partage de normes et de valeurs communes. Leur diffusion dépend aussi de certaines « caractéristiques perceptibles »⁷²⁶. Ainsi, si les voies de recherche américaines sont si facilement adoptées, c'est parce que le degré de compatibilité perçue entre l'état de la technique en France et aux États-Unis conforte la position des membres du comité « Électrotechnique nouvelle ». C'est tout le sens des mots de l'ingénieur de la CGE Pierre Dubois lorsqu'il écrit dans son rapport après sa mission en 1967 que « les objectifs poursuivis en France s'accordent avec les lignes de conduite des firmes américaines » : l'expérience de l'action concertée de la DGRST est conforme à celle ayant cours de l'autre côté de l'Atlantique. De là

⁷²⁴ KATZ, Elihu, LAZARSELD, Paul, *op. cit.*, 2009 (1955), p. 32.

⁷²⁵ ROGERS, Everett M., *Diffusion of innovations*, The Free Press, 1983 (1963), p. 11.

⁷²⁶ Everett Rogers définit plusieurs caractéristiques qui déterminent la diffusion d'une innovation entre un système social et un autre : l'avantage relatif, la compatibilité, la complexité, la possibilité de tester l'innovation et l'observabilité. Source : ROGERS, Everett M., *op. cit.*, 1983 (1963), pp. 15-16.

découlent d'autres attributs du processus d'évaluation qui assoient un peu plus la pertinence de la diffusion des idées localement : ni la « complexité » de ces dernières, ni leur « observabilité » ne sont un frein puisque les chercheurs français sont parvenus à des conclusions presque similaires dans leurs études, comprises ici comme des « phases de test ».

Enfin, la mise en retrait du ministère des Armées et de la DRME par rapport aux piles à combustible entre parfaitement dans le modèle si l'on prend en compte une dernière caractéristique, dite de « l'avantage relatif », qui correspond au degré d'avantage économique, stratégique et militaire que ces institutions pensent acquérir en continuant de financer le développement de piles à combustible plutôt qu'en misant sur d'autres techniques pour la traction terrestre et maritime. Or les incertitudes sur « les possibilités de réussite technique » persistant, les justifications économiques ne se trouvant être que des « extrapolations » et les perspectives d'application ne se révélant « pas entièrement séduisantes » au milieu des années soixante, l'avantage relatif possiblement acquis dans un futur toujours plus lointain s'étirole progressivement. De plus, les analyses effectuées par les constructeurs automobiles américains, désormais plus favorables aux accumulateurs et dont les progrès sur les moteurs thermiques s'accroissent, rejoignent les leurs et confirment leur choix d'arrêter temporairement les recherches dans le domaine.

6.3 Aux sources du retrait de la DGRST

En 1968, les premiers contrats de recherche passés dans le cadre du Fonds de développement dès le début de l'action concertée doivent juridiquement prendre fin. Dans ces circonstances, le comité « Électrotechnique nouvelle »⁷²⁷ prépare l'évaluation des résultats obtenus avant la fin de son activité qui doit intervenir le 1^{er} juillet 1969. Il fait appel à plusieurs examinateurs issus de ses rangs et des services de l'État⁷²⁸ et au LCIE (Laboratoire central des industries électriques), opérant dans le cadre

⁷²⁷ La composition du comité change au cours de l'été 1968. Il comprend désormais les membres suivants : Maurice Magnien (président), directeur adjoint de l'EDF, Hubert Autruffe, du service de la recherche de la SNCF, Bogdan Broniewski, directeur des recherches à Alstom, Emile Carbonell, chef de service à l'Air Liquide, Bernard Dreyfus de la Faculté des sciences de Grenoble, le colonel René Duffet, chef de la section chimie avancée à la DRME, Gérard Fournet de la Faculté des sciences de Paris, le directeur des laboratoires de la CGE Michel Gossot, Robert Lacoste de la Faculté des sciences de Toulouse, M. Lapeyre de la DIMEE (Direction des industries métallurgiques, électriques et électroniques), Jean Laroche de l'ONIA, le chef de section au CEA Pierre Ricateau, Jacques Valensi de la Faculté des sciences de Marseille, Maurice Bonnemay du Laboratoire d'électrolyse du CNRS et Jean-Claude Balaceanu de l'IFP.

⁷²⁸ La commission désignée pour assurer le contrôle des résultats est composée de la manière suivante : Maurice Magnien, directeur adjoint de l'EDF, Mme M. F. Boulay, de la DGRST, Hubert Autruffe, du service de la recherche de la SNCF, André Busson, rapporteur du comité technique « Constructions électriques », M. Courtemanche, de la DGRST, Michel Desécures, secrétaire scientifique du comité « Électrotechnique nouvelle », Jacques Dubar, ingénieur militaire principal au Laboratoire de la commission des substances explosives du ministère des Armées, M. Nouvion, de la SNCF et M. Patin de la RATP. Source : note de M. F. Boulay, le 16 février 1968. À ceux-ci s'ajoute le colonel René Duffet de la DRME suite à une demande de la DGRST. Source : lettre de J. E. Dubois, directeur des Recherches et Moyens d'essais, à André Maréchal, le 20 décembre 1968.

du comité technique d'aide au développement « Constructions électriques », pour exécuter des essais de 600 à 1000 heures, à raison de 60 à 120 heures par semaine, sur les prototypes produits⁷²⁹. L'examen doit conduire la DGRST soit à couper définitivement les crédits sur les piles à combustible, soit à les prolonger. Avant le mois d'octobre, la CGE, Alsthom, l'association entre la CIPEL et l'IFP, et l'ONIA doivent ainsi soumettre leurs modèles respectifs. Quel est l'état de la technique dans ces différentes sociétés à cette époque ? L'IFP et la CIPEL, qui d'après son directeur général Jean-Louis Rambach a depuis le départ investi 25 millions de francs nouveaux, souhaitent en particulier présenter une pile hydrogène-oxygène de 500 W⁷³⁰ qu'ils destinent à des applications de signalisation et de télécommunication⁷³¹. L'ONIA, ensuite, termine une pile hydrogène-air fonctionnant à 200°C. A la CGE, plusieurs modèles sont en cours de réalisation. Une pile hydrogène-oxygène de 2,5 kW, une pile hydrogène-air de 100 W et une pile hydrazine-eau oxygénée de 100 W. Dans une lettre adressée à André Maréchal le 11 mars 1968, Michel Gossot fait aussi mention de la construction d'une pile hydrogène-oxygène de 100 W étudiée pour le CNET (Centre national d'études des télécommunications)⁷³².

Mais les résultats ne semblent pas au rendez-vous. Ainsi, la CGE signale à la commission de contrôle que sa pile à hydrazine « ne peut fonctionner que quelques heures » et demande à ce que « les essais de longue durée ne portent que sur un élément de 100 W, et non sur la pile de 2,5 kW »⁷³³. Enfin, la situation du côté d'Alsthom est également contrastée. La société se dote à cette période de nouveaux moyens pour plancher sur le développement de ses recherches originales. Dès le début des années soixante, Bernard Warszawski pense en effet que « les piles à combustible classiques connaissent des difficultés dont le moins que l'on puisse dire est qu'elles ne rendent pas prévisible la date de l'industrialisation, spécialement dans le secteur de la traction automobile »⁷³⁴, et que les systèmes

⁷²⁹ Lettre d'E. Bellenet à André Maréchal, le 5 juin 1968.

⁷³⁰ Caractéristiques de la pile : hydrogène comme combustible (pureté 75 %), oxygène comme comburant (stocké dans des tubes sous pression), électrolyte de potasse à 85 %, anode de 1,5 mm (substrat : nickel poreux ; catalyseur : nickel réduit), cathode de 1,5 mm (substrat : nickel poreux ; catalyseur : oxyde de nickel dopé au lithium), température de fonctionnement du cœur de la pile à 230°C. Source : DGRST, « Fiche technique de la pile hydrogène-air de 500 watts », février 1968, p. 1.

⁷³¹ Lettre de Jean-Louis Rambach à André Maréchal, le 8 mars 1968.

⁷³² Dans une lettre adressée à André Maréchal le 11 mars 1968, Michel Gossot fait aussi état de la construction d'une pile hydrogène-oxygène de 100 W étudiée pour le CNET (Centre national d'études des télécommunications) : « La pile de 100 W, étudiée pour le CNET, est équipée d'une régulation thermique et d'une régulation du titre de l'électrolyte par injection d'électrolyte concentrée et rejet d'électrolyte par siphons. Le réservoir d'électrolyte concentré est prévu pour une autonomie de 200 heures à pleine puissance. Un convertisseur-régulateur de tension permet de fournir la puissance électrique produite sous la tension demandée par l'utilisateur. Cette pile est conditionnée pour des températures extérieures pouvant descendre jusqu'à -10°C. L'utilisation d'un échangeur compact électrolyte-liquide intermédiaire permet de prévoir à l'extérieur de l'enceinte calorifugée un radiateur liquide-air bon marché et à circulation naturelle. » Source : lettre de Michel Gossot à André Maréchal, le 11 mars 1968, p. 2.

⁷³³ DGRST, « Réunion de la commission de contrôle "Piles à combustible" », le 14 mai 1968, p. 2.

⁷³⁴ Bernard Warszawski, « Remarques sur l'origine des difficultés des piles à combustible de conception classique », le 28 août 1967, p. 1.

Redox solubles et rapides, dans lesquels les électrodes n'ont pas besoin d'être catalysées, restent la voie la plus prometteuse.

Cette position, qui n'est pas sans rappeler les propos tenus par Pierre Aigrain dans sa série d'entretiens avec Georges Charbonnier à l'ORTF (Office de radiodiffusion-télévision française) en 1965 quand il explique que « l'attitude de l'ingénieur devant un problème – réaliser un certain dispositif – est d'essayer de tourner les difficultés rencontrées plutôt que de les résoudre »⁷³⁵, le soumet à bon nombre de critiques. La filière choisie et la manière de l'aborder apparaissent d'abord « à certains comme une pure vue de l'esprit » et déclenchent « des plaisanteries et des ricanements » jusque dans les colloques où l'on considère que « la conception même de la batterie recelait une contradiction insurmontable » : « les plus indulgents de nos contradicteurs nous ont gentiment fait remarquer que notre pile serait une chaufferette, incapable d'évacuer l'énorme puissance calorifique parasite que supposaient les densités de puissance électrique annoncées »⁷³⁶, se souvient l'ancien étudiant de l'École de physique et de chimie de Paris. Après plusieurs années de recherches et de développement, la technique est approfondie : Alsthom développe une filière dite à produits solubles consommables au sein de laquelle les régénérateurs disparaissent au profit des réactifs directement admis dans les piles qui disposent d'électrodes désormais catalysées. En outre, celles-ci ne nécessitent plus d'auxiliaires tels que le groupe radiateur et le dispositif d'extraction des produits de réaction, l'emploi d'un électrolyte dilué autorisant leur remplacement par un orifice de trop-plein disposé en un point clé du cycle électrolytique.

Cependant, les critiques ne se sont toujours pas estompées et se focalisent sur le faible nombre d'applications permis par de telles évolutions, les plus larges supposant la consommation de l'oxygène de l'air comme comburant et donc la présence d'un régénérateur. L'équipe dirigée par Bogdan Broniewski opère alors une intégration totale du régénérateur et de la pile, qui revient à admettre dans le générateur électrochimique le comburant gazeux sous forme d'une émulsion avec l'électrolyte, puis envisage la réduction directe du gaz oxydant sur l'électrode catalysée. Supprimant donc tout régénérateur ou réacteur annexe même pour un réactif gazeux, et non plus seulement pour un réactif soluble, cette formule « aboutissait donc à la naissance d'un type entièrement inédit d'électrode à gaz : l'électrode à émulsion. Cette électrode à émulsion, feuille gaufrée ultra-mince non poreuse, bouleversait complètement les données traditionnelles sur la consommation d'un gaz dans une pile à combustible, fondée sur la classique électrode poreuse à diffusion gazeuse »⁷³⁷. En même

⁷³⁵ CHARBONNIER, Georges, *op. cit.*, 1966, p. 76.

⁷³⁶ Alsthom, « Historique de nos recherches sur les piles », le 24 décembre 1968, pp. 1-2.

⁷³⁷ Alsthom, « Historique de nos recherches sur les piles », le 24 décembre 1968, p. 6.

temps, Bernard Warszawski s'attache à résoudre un autre problème, celui de la décarbonatation, en faisant appel uniquement aux réactions électrochimiques normales des piles pour provoquer une évolution de l'électrolyte (électrodialyse interne), amenant celui-ci à un pH auquel tout le gaz carbonique s'élimine spontanément, sans pour autant ajouter des organes et sans autre consommation d'énergie que les polarisations de base. Puisque le cadre de ces recherches permet, d'une part de quitter le domaine des électrolytes acides et basiques concentrés au profit d'électrolytes dilués tamponnés peu corrosifs, d'autre part d'obtenir des densités de puissance correctes eu égard à la compacité des batteries, l'ingénieur imagine aussi l'utilisation de nouveaux catalyseurs qui pourraient s'avérer plus efficaces que les métaux de la famille du platine pour surmonter les difficultés liées à l'oxydation du méthanol.

Des moyens importants sont ainsi consacrés à la création à Massy d'un « catalysatron », sorte de laboratoire semi-automatique, dans lequel des dizaines de catalyseurs sont expérimentés à la fois. Face à ces annonces, les réactions dans le petit milieu des piles à combustible se font violentes. L'entreprise est accusée de « déconsidérer la recherche française auprès des organismes et des scientifiques étrangers » et de « compromettre les autres groupements » qui font, eux, « de la recherche sérieuse ». En clair, de « créer un malaise à l'échelle française et à l'échelle internationale »⁷³⁸. Certains contradicteurs, qui ne se contentent pas de citer des références scientifiques prouvant que les valeurs mesurées de l'adsorption des gaz sur différents catalyseurs ne permettent pas d'obtenir plus de quelques milliampères par centimètre carré, tentent de répéter les expériences de la Direction des recherches, Une méthode qui ne s'avère guère efficace dans un premier temps, puisqu'Alsthom ne diffuse que peu d'informations techniques détaillées dans un contexte marqué par le secret industriel. En attestent les échanges entre Maurice Bonnemay et Bogdan Broniewski au cours de l'été 1967. Le 7 juillet, Maurice Bonnemay contacte en effet le directeur des recherches d'Alsthom : « Des travaux ont été entrepris dans mon laboratoire tenant compte des précisions qui ont été données par Alsthom sur l'électrode à air conduisant à des résultats qui sont nettement en contradiction avec les vôtres »⁷³⁹, lui écrit-il. Le 12 juillet, Bogdan Broniewski lui répond :

« Je suis assez étonné d'apprendre que des essais aient pu être entrepris dans votre laboratoire sur la base des informations volontairement limitées que nous avons pu communiquer à diverses occasions. Comme vous ne l'ignorez pas, les contraintes de la concurrence industrielle nous obligent malheureusement à maintenir un certain secret,

⁷³⁸ Alsthom, « Historique de nos recherches sur les piles », le 24 décembre 1968, p. 6.

⁷³⁹ Lettre de Maurice Bonnemay à Bogdan Broniewski, le 7 juillet 1967.

d'autant plus nécessaire que nous sommes l'objet de diverses tentatives d'imitation. Il n'est donc pas surprenant que les essais effectués dans votre laboratoire donnent des résultats sans rapport avec les performances de notre électrode à air, pour lesquelles la texture fine de l'électrode et la structure relative des phases gazeuse et liquide – points sur lesquels nous n'avons fourni aucune indication – jouent un rôle fondamental. Il nous apparaît d'ailleurs extrêmement difficile de pouvoir reproduire les conditions d'apport correspondantes sans disposer d'une structure de pile et d'une technologie analogue aux nôtres. Compte tenu des liens qui existent entre les chercheurs des divers laboratoires, il nous est très difficile d'accepter de fournir des informations complémentaires avant de nous être assurés d'une avance suffisante. »⁷⁴⁰

Au début de l'année 1968, la situation a quelque peu évolué. L'IFP a pu confirmer les données d'Alstom sur ses électrodes à émulsion et sur son procédé de décarbonatation au cours des semaines précédentes. Odile Bloch, Michel Prigent, Bernard Salé et Yves Bréelle estiment la solution « valable » dans les deux cas : « il semble que la perte de rendement resterait faible et les performances acceptables », rapportent-ils lors d'une visite de Jean Germain et Jacques Dubar pour le compte de la DGRST⁷⁴¹. Mais Alstom, qui vient d'entamer des négociations en vue de la conclusion de deux contrats d'association sur les piles à combustible avec la société allemande AEG (Allgemeine Elektricitats-Gesellschaft)⁷⁴² et Rhône-Poulenc⁷⁴³, doute de pouvoir respecter les délais fixés par la commission de contrôle pour la présentation de sa pile de 2 kW⁷⁴⁴ fonctionnant à l'hydrate d'hydrazine et à l'eau oxygénée⁷⁴⁵. Ce qui ne manque pas de raviver les critiques. Le 19 mars, Hubert

⁷⁴⁰ Lettre de Bogdan Broniewski à Maurice Bonnemay, le 12 juillet 1967.

⁷⁴¹ DGRST, « Rapport de contrôle. Compte-rendu de visite à l'Institut français du pétrole du 1^{er} février 1968 », p. 2.

⁷⁴² Lettre de Bogdan Broniewski à André Maréchal, le 3 septembre 1968.

⁷⁴³ Alstom, « Memorandum sur les piles à combustible rédigé à l'intention de Monsieur le Délégué général à la Recherche scientifique et technique », le 18 septembre 1968, p. 7.

⁷⁴⁴ Caractéristiques de la pile suivant les informations de la DGRST : hydrate d'hydrazine comme combustible (stocké dans des réservoirs en matière plastique), eau oxygénée comme comburant (35 à 70 %, stockée dans des réservoirs en aluminium), solution de potasse ou de soude pour l'électrolyte, électrodes bipolaires en feuille de Ni ou Ag mince (50 microns) non poreuse gaufrée suivant un dessin à mailles (catalyseur de la face anode : noir de cobalt ; catalyseur de la face cathode : argent), température de fonctionnement à 60°C, batterie assemblée suivant un empilement répétitif d'une séquence de deux composants munis d'échancures et de reliefs divers dont la coopération dans l'assemblage détermine automatiquement l'ensemble des éléments, le réseau des canalisations nécessaires à leur alimentation en fluides et la mise en série électrique de tous les éléments, élimination des produits de réaction automatique grâce à une séparation par filtration, refroidissement automatique grâce à un groupe radiateur-ventilateur intégré et refroidissant l'électrolyte en circulation par l'air atmosphérique, rendement de 50 % en charge moyenne, puissance maximale de 4 kW, bilan par kWh en consommation de combustible de 350 g et de comburant de 680 g (à 70 %), 1 kWh de chaleur générée par kWh produit, masse de 5 kg pour le système complet, dimensions de 130 x 160 x 250 mm. Source : DGRST, « Fiche technique relative à la pile à présenter par Alstom au titre du contrat 4.609.14.1 », le 7 mars 1968.

⁷⁴⁵ La direction des recherches présente deux raisons principales pour justifier de ce retard. En premier lieu, elle rappelle que l'originalité de ses travaux qui posent plus de problèmes que la réalisation de piles classiques. Ensuite, elle évoque des contraintes liées à ses fournisseurs et sous-traitants : « [...] notre programme s'est trouvé perturbé dans son déroulement par les événements de mai-juin : non seulement notre laboratoire a subi un arrêt involontaire d'environ un mois, mais nos sous-traitants, pour lesquels nous sommes rarement des clients prioritaires à cause de nos exigences

Autruffe, Maurice Magnien et les autres membres n'hésitent pas à qualifier le travail d'Alsthom « d'électrochimie de papa dans un cœur révolutionnaire »⁷⁴⁶ : s'ils reconnaissent bien que « son élément de pile est sans doute le plus judicieux » et « le plus remarquable en ce qui concerne l'agencement interne du cœur de la pile », ils soulignent que ses performances électrochimiques ne répondent pas aux désirs des constructeurs »⁷⁴⁷. Un écho plus favorable est trouvé dans la presse. Les structures et les équipes de la Direction des recherches dédiées aux piles à combustible vont jusqu'à faire l'objet d'un reportage pour le journal télévisé de 13h de l'ORTF le 3 avril 1968, présenté par François de Closets :

« Ce centre de recherches tout neuf, que Maurice Schumann, ministre de la Recherche scientifique, vient d'inaugurer à Massy près de Paris, est essentiellement consacré à cet appareil, cet appareil c'est-à-dire la pile à combustible. Une pile à combustible, disons très schématiquement que c'est une pile électrique qui s'alimente de façon continue comme un groupe électrogène par exemple. Mais l'affaire est de très grande importance. C'est par exemple tout l'avenir de la voiture électrique qui est en cause dans ces recherches. Une pile à combustible, comme celle-ci qui produit 4 kW, est apparemment un appareil assez simple. En réalité, c'est horriblement compliqué. C'est une usine chimique automatisée et miniaturisée. Et pour que vous vous rendiez compte de la complexité de cet appareil, nous avons demandé aux ingénieurs d'Alsthom de nous démonter pièce à pièce une pile à combustible comme celle-ci. Voyez le nombre effroyable de pièces, d'électrodes, de pompes, de systèmes pour évacuer les produits de la réaction, etc. Voilà pourquoi depuis 10 ans des centaines de chercheurs dans le monde travaillent sur les piles à combustible. Voilà pourquoi ici même 70 chercheurs consacrent leurs travaux à cette question. »⁷⁴⁸

Un contraste remarquable avec l'époque où André Maréchal soulignait le « caractère sommaire et précaire des installations » d'Alsthom : Georges Glasser bloque en effet près de la moitié de ses moyens de recherche et des effectifs qui s'y rattachent (soit près de 90 personnes sur 175)⁷⁴⁹ pour

spéciales, nous ont imposé des délais supplémentaires, qui, en raison des imbrications entre les différents problèmes techniques, conduisent à des retards cumulés de trois mois en moyenne, mais qui, dans certains cas, sont encore plus importants. Nous confirmons donc qu'il ne nous sera possible de présenter un prototype conforme à notre objectif que dans les délais prévus initialement, augmentés des délais supplémentaires dus aux perturbations de mai-juin. » Source : Alsthom, « Memorandum sur les piles à combustible rédigé à l'intention de Monsieur le Délégué général à la Recherche scientifique et technique », le 18 septembre 1968, p. 5.

⁷⁴⁶ DGRST, « Réunion de la commission de contrôle "Piles à combustible" », le 19 mars 1968.

⁷⁴⁷ DGRST, « Réunion de la commission de contrôle "Piles à combustible" », le 7 octobre 1968, p. 3.

⁷⁴⁸ INA, « Laboratoire de recherche Alsthom », ORTF, journal télévisé de 13h, le 3 avril 1968.

⁷⁴⁹ Alsthom-Massy, Comité d'établissement, « Compte rendu de la réunion plénière », le 22 mai 1969, p. 3.

financer l'aventure. L'ORTF n'est pas le seul organe de presse à s'intéresser à la technique d'Alsthom en 1968. Alors que *Science & Vie* traite par exemple d'une véritable « course au trésor » qui « bouleversera notre mode de vie en prenant la relève de l'énergie du pétrole »⁷⁵⁰, et que *Le Figaro* mentionne la « révolution » qui se prépare dans les locaux de la société⁷⁵¹, *Science & Avenir* y consacre un long article au mois de juin dont en voici quelques extraits :

« Au cours de ces dernières années, la pile à combustible a connu des fortunes diverses. Elle suscita des espoirs immenses : la voiture électrique était pour demain. Puis les difficultés s'accumulèrent. Seules les piles chères – électrodes en platine – pouvaient utiliser les carburants bon marché. Quant aux piles bon marché, elles ne pouvaient accepter que l'hydrogène. Les ingénieurs d'Alsthom ont conçu un nouveau type de pile dont voici les principaux éléments : électrodes, diaphragme, membranes. Ils estiment qu'elle pourra être tout à la fois bon marché et utiliser des carburants économiques. Mais il leur reste à franchir un pas décisif : trouver un catalyseur bon marché pour le méthanol. Un atout : la nouvelle pile peut utiliser des catalyseurs organiques. [...] Mais le fait important dans l'aventure de la pile Alsthom, est que tous les problèmes ont été pensés en fonction de l'industrialisation et que celle-ci a été entreprise dans le temps même que se terminaient les études de mise au point. Chaque pièce, chaque élément de la pile, est conçu pour pouvoir être fabriqué aisément en grande série. Bien mieux, les machines propres à la fabriquer sont déjà construites. Au centre de recherche de Massy, des petites chaînes de production travaillent et produisent à des fins expérimentales trois batteries modulaires de 180 éléments chaque semaine. Déjà a été construite une batterie de 540 éléments fournissant une puissance de 4,2 kilowatts, tandis que se prépare un module de 30 à 100 kW. [...] Ils ont fait le pari, il nous faut leur donner rendez-vous dans trois ou cinq ans pour savoir si la véritable pile à combustible industrielle sera française. »⁷⁵²

Mais ces éléments ne convainquent pas tout le monde, et en particulier le désormais maître de conférences à l'École d'électrochimie et d'électrometallurgie de Grenoble Jean-Claude Sohm. Proche des membres du comité « Électrotechnique nouvelle », celui-ci lance au même moment une campagne de dénigrement systématique des piles à combustible dont on a abandonné à tort et trop rapidement, selon lui, le stade des recherches fondamentales. En atteste par exemple une lettre qu'il envoie à Maurice Magnien le 3 mai 1968 dans laquelle il « regrette que les contractants de la DGRST

⁷⁵⁰ *Science & Vie*, n°615, tome 114, décembre 1968, p. 124.

⁷⁵¹ *Le Figaro*, le 3 avril 1968, p. 11.

⁷⁵² *Science & Avenir*, n°256, juin 1968, pp. 449-455.

se soient lancés trop tôt dans le développement » et préconise de « garder la tête froide et de juger les choses telles qu'elles sont » face au « tapage » que représentent les exhibitions de prototypes et les articles de presse encenseurs⁷⁵³. Cette conclusion lui permet d'établir une comparaison avec ses propres travaux sur les accumulateurs, « à l'opposé de celles qui concernent les piles à combustible », qu'il cherche à légitimer auprès de Michel Desécures le 5 septembre pour obtenir des crédits : il a « beaucoup d'idées, mais peu d'argent »⁷⁵⁴. La demande de temps supplémentaire de la part d'Alsthom, estimé à près de six mois, pose en tout cas un sérieux problème à la DGRST. D'un côté, elle doit faire face au mécontentement des trois autres contractants qui se sont eux engagés à respecter les délais prévus. De l'autre, Maurice Magnien doit admettre que, même si des doutes persistent, l'entreprise pourrait changer la donne au niveau international. Cette opinion est partagée par Jacques Dubar qui écrit à Michel Desécures que Bernard Warszawski possède « un très haut pouvoir inventif ». Selon lui, si le résultat atteint du côté de la structure du modèle est « impressionnant », du côté de la catalyse, « il est nul ». Ce qui le fait conclure que « l'engin sera général ou digne du musée selon que les performances du catalyseur seront bonnes ou mauvaises »⁷⁵⁵.

La décision est finalement prise de plier à la demande d'Alsthom⁷⁵⁶ tout en accordant des contrats de clôture s'étalant du 1^{er} mars 1969 au 1^{er} mars 1970 à l'ensemble des organismes⁷⁵⁷. Au début de l'année 1969 justement, la situation vis-à-vis des piles à combustible aux États-Unis, qui compte tant pour les membres du comité « Électrotechnique nouvelle », est encore mitigée. Bogdan Broniewski vient notamment de visiter les laboratoires de Pratt & Whitney, de l'Union Carbide, d'Esso et de la General Electric et rapporte que les conclusions sont pour partie « pessimistes »⁷⁵⁸. Si Pratt & Whitney présente des résultats satisfaisants au sein du programme Apollo, la General Electric vient d'être remerciée par le gouvernement américain après les incidents répétés survenus sur les vols de la capsule Gemini. Esso et Monsanto ne sont guère mieux placés puisque le premier connaît des difficultés dans la mise au point de ses catalyseurs sans platine dans le but d'utiliser du méthanol et des carbures d'hydrogène tandis que le second, qui a équipé un véhicule militaire avec une pile hydrogène-air, doit s'occuper de dégagements d'ammoniac inappropriés. Michel Gossot demande à ce qu'on n'attache pas « trop d'importance » à ces événements qu'il décrit comme des

⁷⁵³ Lettre de Jean-Claude Sohm à Maurice Magnien, le 3 mai 1968.

⁷⁵⁴ Lettre de Jean-Claude Sohm à Michel Desécures, le 5 septembre 1968.

⁷⁵⁵ Lettre de Jacques Dubar à Michel Desécures, le 9 janvier 1969.

⁷⁵⁶ Philippe Olmer, André Busson et Maurice Magnien décident de « laisser toute latitude à la société Alsthom pour décider de la présentation de son prototype dans les limites prévues au contrat, c'est-à-dire avant le 1^{er} janvier 1970. » Source : DGRST, « Commission examen Piles », « Examen des piles à combustible prévu pour la fin de l'année 1968 », le 7 octobre 1970, p. 1.

⁷⁵⁷ Répartis de la manière suivante : 350 000 francs pour la CGE, 200 000 francs pour l'ONIA, 60 000 francs pour le Carbone Lorraine et la CIPEL, 300 000 francs pour l'IFP et 350 000 francs pour Alsthom.

⁷⁵⁸ DGRST, Comité « Électrotechnique nouvelle », « Procès-verbal de la réunion du 8 mars 1969 », p. 2.

épiphénomènes⁷⁵⁹. La mission effectuée du 20 mai au 4 juin par Jacques Dubar de la DRME, M. Jacquier de la CGE et Yves Bréelle de l'IFP⁷⁶⁰ afin « de recueillir des informations sur la politique américaine en matière de piles à combustible, de juger de l'effort actuel, et plus particulièrement de préciser la nature et l'importance des débouchés visés, les moyens mis en œuvre pour y parvenir et le niveau technologique nécessaire pour les atteindre »⁷⁶¹ lui donne en partie raison. Le chef du département « Énergie » à la CGE Pierre Dubois écrit notamment à Pierre Aigrain, qui vient de prendre quelques temps plus tôt la place d'André Maréchal à la tête de la DGRST, que « la décantation qui s'est faite aux États-Unis en matière de piles à combustible s'est traduite en définitive par le maintien d'un important effort de recherche ayant principalement pour objet d'étendre le champ d'application de ces générateurs d'énergie ». Il estime également que « la recherche systématique de larges débouchés civils, qui a été l'objectif français dès l'origine situe [les équipes] en position relativement favorable par rapport aux États-Unis et devrait permettre à l'Industrie française d'aborder la compétition internationale avec de bonnes chances de succès »⁷⁶².

En effet, l'effort de recherche s'est reporté à cette période sur un nombre plus restreint de laboratoires américains, principalement Allis Chalmers et Pratt & Whitney. Seuls restent encore en course l'Institute of Gas Technology, Texas Instruments et Westinghouse, Monsanto ; l'Union Carbide⁷⁶³ et la General Electric ayant de leur côté abandonné les recherches sur la technique. La première société vise surtout des applications spéciales (spatiales, sous-marines, militaires). La seconde, en revanche, se concentre sur le projet « Target ». Financé par l'industrie à hauteur de 40 millions de francs par an, celui-ci « concerne la mise au point de batteries de piles à combustible autonomes, fonctionnant au gaz naturel, pour fournir de l'électricité à un prix compétitif avec la distribution classique, à des résidences privées, des buildings, centres commerciaux, écoles, petites industries »⁷⁶⁴. Pratt & Whitney estime ainsi son marché potentiel à près d'un million d'unités de 12,5 kW. Mais, d'un autre côté, Jacques Dubar note qu'à la « 23^{ème} conférence annuelle des Power Sources » ayant lieu du 20

⁷⁵⁹ DGRST, Comité « Électrotechnique nouvelle », « Procès-verbal de la réunion du 8 mars 1969 », p. 2.

⁷⁶⁰ Les trois représentants de la DGRST visitent les installations de l'Institute of Gas Technology à Chicago, d'Allis Chalmers à Milwaukee, de Ford à Detroit, de l'Union Carbide à Cleveland, de Monsanto à Boston et de Pratt & Whitney à Hartford.

⁷⁶¹ Yves Bréelle et M. Jacquier, « Compte rendu de mission aux États-Unis sur les piles à combustible (20 mai-4 juin 1969) », p. 1.

⁷⁶² Lettre de Pierre Dubois à Pierre Aigrain, le 18 juillet 1969.

⁷⁶³ Au sujet de l'abandon des piles à combustible du côté de l'Union Carbide, Jacques Dubar fait le constat suivant : « Union Carbide a mis en sommeil (mais en gardant le matériel de façon à pouvoir redémarrer instantanément) son activité pile pour les raisons suivantes : les piles actuellement réalisées (pour Gemini) sont trop chères – 6000 dollars/kW, soit 30 000 F/kW (production : 1 à 10 unités, à la main) ; il n'y a pas de marché en vue ; la société ne reçoit plus de crédits de l'armée, ni de la NASA ». Source : Jacques Dubar, « Compte rendu de mission aux États-Unis du 20 mai au 5 juin 1969. Aperçu sur la position de quelques sociétés américaines concernant les piles à combustible », septembre 1969, p. 2.

⁷⁶⁴ Yves Bréelle et M. Jacquier, « Compte rendu de mission aux États-Unis sur les piles à combustible (20 mai-4 juin 1969) », p. 3.

au 23 mai 1969 à Atlantic City et organisée par l'USAEC (Us Army Electronics Command), l'assistance est « nettement plus importante aux conférences traitant des batteries qu'à celles consacrées aux piles »⁷⁶⁵ et rapporte que lors d'un entretien informel avec Karl V. Kordesch, ce dernier lui aurait confié que « la côte des piles aux USA serait dans le creux de la vague »⁷⁶⁶. Cette vision se retrouve chez William Carson, du Centre de recherches de la General Electric à Schenectady, qui est « très affirmatif quant à l'absence totale de marché civil pour les piles de grosse puissance et pour les petites », les premières pâtissant de la concurrence des centrales nucléaires⁷⁶⁷ et les secondes d'un prix trop élevé. Le collaborateur de Leonard W. Niedrach ajoute même que les recherches sur les piles à moyenne puissance, qui pourraient servir pour l'alimentation en électricité de sites isolés, commencent à paraître inutiles puisque le réseau de distribution vient d'être complété sur l'ensemble du territoire national. En mettant en perspective les marchés français et américain, Jacques Dubar conclut ainsi que :

« [...] les chances de succès ne pourront exister que si l'on se concentre sur un ou deux objectifs bien précis, en faisant un gros effort de conception fondamentale afin d'obtenir un résultat valable. Il ne faut pas se cacher qu'il s'agit d'un objectif difficile à atteindre. La recherche d'une solution simple pour la transformation du carburant en hydrogène et pour la catalyse devrait être poursuivie (en laboratoire et au bureau d'études). Aucune solution ne semble actuellement capable de concurrencer les générateurs classiques autrement que par des emplois très particuliers (espace, recherche sous-marine, besoins militaires). Il faut donc peut-être poursuivre plutôt la recherche fondamentale que le développement, ce qui n'exclut pas la construction de montages d'étude à une échelle suffisante. »⁷⁶⁸

Du côté de la direction de la DGRST – désormais rattachée au ministère du Développement industriel et scientifique –, on partage cet avis plutôt que celui d'Yves Bréelle et de M. Jacquier. Une note manuscrite interne, jointe au rapport de ces derniers et à l'intention de Pierre Aigrain, stipule par

⁷⁶⁵ Jacques Dubar, « Compte rendu de mission aux États-Unis du 20 mai au 5 juin 1969. Aperçu sur la position de quelques sociétés américaines concernant les piles à combustible », septembre 1969, p. 2.

⁷⁶⁶ Jacques Dubar, « Compte rendu de mission aux États-Unis du 20 mai au 5 juin 1969. Aperçu sur la position de quelques sociétés américaines concernant les piles à combustible », septembre 1969, p. 6.

⁷⁶⁷ Cet avis est généralisé. Ainsi le directeur des Electrochemical Technology Projects à la NASA Ernst M. Cohn écrit dans un rapport en janvier 1969 que « la plupart des autorités sont pessimistes quant aux centrales énergétiques de grande envergure, mentionnant que l'énergie nucléaire va vraisemblablement se révéler moins coûteuse que les piles à combustible à l'époque où celles-ci seront opérationnelles. » Source : Ernst M. Cohn, « An Introduction to Fuel Cells », NASA, janvier 1969, p. 11.

⁷⁶⁸ Jacques Dubar, « Compte rendu de mission aux États-Unis du 20 mai au 5 juin 1969. Aperçu sur la position de quelques sociétés américaines concernant les piles à combustible », septembre 1969, p. 20.

exemple que « seuls les usages spéciaux du côté militaire peuvent justifier un gros effort dans le domaine des piles à combustible, les usages civils bénéficiant ultérieurement des “retombées”, d’autant mieux en France (si l’on en croit les auteurs !) qu’on aura évité l’erreur américaine de ne pas se préoccuper du prix des catalyseurs »⁷⁶⁹. Le directeur de la Division du renseignement du SGDN (Secrétariat général de la Défense nationale) Jean Pechberty se montre lui aussi peu enthousiaste malgré le succès retentissant d’Apollo 11 et des piles de type Bacon embarquées à bord du module de commande, qui contribuent à faire marcher Neil Armstrong et Buzz Aldrin sur la Lune le 20 juillet 1969. Dans un rapport d’information datée du 28 août et notamment transmise à la présidence de la République, au cabinet du Premier ministre et à la Marine marchande, il écrit que « l’avenir des piles à combustible, qui est actuellement lié à celui des programmes spatiaux, est incertain. L’optimisme est très modéré pour les autres applications de ces générateurs (énergie électrique industrielle et traction des véhicules électriques) »⁷⁷⁰. Pour le général, les raisons essentielles qui expliquent ce phénomène sont d’une part que la NASA, qui était le fournisseur pratiquement exclusif des contrats sur la technique, « vient d’opérer des coupes sombres dans le budget qui leur était jusqu’alors alloué », et d’autre part qu’il est encore impossible « de fabriquer et de commercialiser des générateurs d’un prix abordable »⁷⁷¹.

À la réception de ce rapport, le directeur de la Flotte de commerce et de l’Équipement naval Jean Robert, qui était entré en négociation avec la CGE pour la commande d’un certain nombre de nouvelles études sur la question de l’adaptation des piles à combustible pour la production d’énergie à bord des navires quelques mois plus tôt⁷⁷², relève que ces éléments sont « peu encourageants » et se demande si « l’argent dépensé là-dedans a eu quelque utilité »⁷⁷³. Il n’y a finalement qu’à Erlangen en Allemagne⁷⁷⁴, où Hubert Autruffe du Service de la recherche à la SNCF et le professeur du CNAM

⁷⁶⁹ DGRST, note manuscrite anonyme à destination de Pierre Aigrain, le 22 juillet 1969.

⁷⁷⁰ Division du renseignement du Secrétariat général de la Défense nationale, Général Jean Pechberty, « Note d’information. USA – L’avenir des piles à combustible », le 28 août 1969, p. 2.

⁷⁷¹ Division du renseignement du Secrétariat général de la Défense nationale, Général Jean Pechberty, « Note d’information. USA – L’avenir des piles à combustible », le 28 août 1969, pp. 2-3.

⁷⁷² Lettre de Jean Robert à Pierre Aigrain, le 26 novembre 1969.

⁷⁷³ Note manuscrite de Jean Robert, le 18 septembre 1969.

⁷⁷⁴ De manière assez surprenante, il faut noter qu’une publicité du groupe allemand Bosch paraît en septembre 1969 dans le journal *Le Figaro* sous le titre « Voici comment l’hématine du sang nous a permis de résoudre le problème des piles à combustible ». Nous n’avons jamais vu, dans toutes les archives que nous avons consultées, de travaux de cette société sur les piles à combustible. Nous nous permettons donc de reproduire ici la totalité de cette publicité intrigante : « La pile à combustible, source d’énergie industrielle. Source d’énergie de l’avenir pour de nombreuses applications, la pile à combustible produit du courant électrique de “combustion froide” directement à partir de l’énergie chimique. Aucun gaz d’échappement nocif. Rendement plus élevé que les procédés traditionnels. Le problème “prix de revient” résolu. Les métaux du groupe platine, considérés jusqu’ici comme les seuls catalyseurs stables vis-à-vis des acides pour les électrodes à oxygène, apparaissaient trop coûteux pour l’utilisation industrielle de la pile à combustible. Nous avons cherché un matériau meilleur marché remplissant les mêmes fonctions, c’est-à-dire : réduire l’oxygène sans être décomposé lui-même. C’est l’hématine du sang qui nous a apporté la solution. L’hématine absorbe l’oxygène des poumons et la transporte au niveau des tissus par la voie de l’hémoglobine. Nous avons trouvé une combinaison organique de

André Busson se rendent pour le compte de la DGRST afin de visiter les installations de Siemens, que l'optimisme reste de mise⁷⁷⁵. Pendant ce temps, les premiers tests des prototypes français battent leur plein. Si la pile de la CIPEL, du Carbone Lorraine et de l'IFP⁷⁷⁶, qui a déjà dépassé les 600 heures de fonctionnement, présente des signes de vieillissement et de perte de tension⁷⁷⁷, les trois sociétés écrivent à Pierre Aigrain qu'elle a « satisfait aux essais probatoires » et que ceux-ci « prouvent la possibilité de réalisation industrielle »⁷⁷⁸. Des propos qu'elles réaffirment à l'occasion d'une conférence de presse le 27 mars 1969⁷⁷⁹.

C'est aussi la conclusion à laquelle arrive Jacques Dubar qui explique dans ses « remarques sur les piles à combustible » le 18 juillet que « la pile IFP semble au point » avec « un rendement légèrement supérieur à 30 % » et qu'il est donc « possible de pouvoir extrapoler jusqu'à la construction d'un véritable prototype, destiné à une application donnée ». Cependant, il indique que subsistent un nombre important de problèmes à résoudre (réduction du poids et du coût de montage, mise au point de l'unité de décarbonatation, alimentation en hydrogène, etc.), que le générateur ressemble « à une usine chimique à circuits de fluide complexes » et qu'en conséquence il ne « voit pas comment un tel système pourrait concurrencer les sources classiques de puissance électrique »⁷⁸⁰. D'autre part, il semble que ce soit la seule pile à combustible à peu près valable parmi l'ensemble : le modèle de l'ONIA présente un « rendement global mauvais » malgré sa « robustesse ». Il en va de même pour les piles à combustible de la CGE « qui ne sont pas au point et ont fait montre de graves défauts de conception » produisant aussi bien des fuites d'hydrogène et d'électrolyte que des bouchages et des performances faibles. Finalement, pour Jacques Dubar, les examens montrent que « l'on est resté à

composition chimique analogue à celle de l'hématine et de plus stable vis-à-vis des acides... C'est la phtalocyanine ferreuse. Un succès total. Dans notre pile à combustible à méthanol acide nous avons expérimenté des cathodes avec de la phtalocyanine ferreuse comme catalyseur : elles sont de 60 % plus actives que le plus efficace alliage à base de platine connu jusqu'ici. Source : *Le Figaro*, 27-28 septembre 1969, bulletin de recherche n°3.

⁷⁷⁵ André Busson et Hubert Autruffe écrivent notamment dans leur compte rendu de mission que « les travaux de Siemens sont semblables du point de vue définition à ceux de IFP et CGE. IFP semble plus en avance que Siemens pour l'électrode à air. Mais Siemens a poussé plus loin l'étude et la réalisation des circuits de contrôle et de régulation, de façon à avoir des ensembles autonomes. Chaque problème semble avoir une égale importance dans les recherches. Il semble également que Siemens ait poussé plus loin l'étude des générateurs à hydrogène. En d'autres termes, c'est une pile "complète" que Siemens étudie de façon homogène. Les équipes sont concentrées sur quelques sujets précis. Il n'y a pas de soucis d'industrialisation, stade que Siemens pense prématuré de développer. Les électrodes sont faites à la main. Il ne semble pas qu'il y ait des recherches aussi poussées qu'en France de certaines performances (faible épaisseur des cellules) car il n'y aurait pas homogénéité dans l'ensemble des performances. » Source : DGRST, comité technique « Constructions électriques et Électronique-développement », « Compte rendu de mission. Entretiens avec Siemens, à Erlangen, le 30 octobre 1969. Travaux de Siemens sur les piles à combustible », 1969, pp. 3-4.

⁷⁷⁶ En réalité, cette pile à combustible est non seulement développée par la CIPEL, le Carbone Lorraine et l'IFP, mais aussi par Ugine Carbone, la RNUR et la CSF. Par ailleurs, certaines études spécifiques concernant l'électronique, la thermique et l'aérodynamique sont sous-traitées par Saphymo et SRTI.

⁷⁷⁷ DGRST, « Réunion de la commission d'examen des piles à combustible », le 13 mars 1969, p. 1.

⁷⁷⁸ DGRST, CIPEL-IFP, note à l'intention de Pierre Aigrain, le 13 mars 1969.

⁷⁷⁹ CIPEL-IFP-LCL, « La pile à combustible développée par le groupe LCL et l'IFP », Conférence de presse du 27 mars 1969, p. 1.

⁷⁸⁰ Jacques Dubar, « Quelques remarques sur les piles à combustible. LCIE », le 18 juillet 1969, pp. 1-2.

la phase laboratoire ou tout au plus semi-grand » et « qu'aucune des piles présentées n'a atteint un stade de développement industriel »⁷⁸¹. Les conclusions présentées par le LCIE et les membres de la commission d'examen des piles à combustible, qui s'ajoutent aux avis extérieurs reçus⁷⁸², finissent de convaincre la DGRST que la suite du développement des piles à combustible s'inscrit désormais plus dans le cadre des recherches privées ou militaires que dans celui des recherches publiques civiles⁷⁸³. Le 4 novembre 1969, Pierre Aigrain envoie une lettre au ministre du Développement industriel et scientifique François Ortoli pour lui demander la permission d'arrêter le financement des projets de la CIPEL, de l'IFP, de la CGE et de l'ONIA, tout en réservant son appréciation pour Alsthom qui n'a pas encore présenté son prototype :

« Si cette décision présente un caractère de gravité particulier, c'est notamment parce que l'aide de la DGRST (4 MF par an sur les crédits de développement de 1966 à 1968) représentait une part très importante du financement des programmes industriels et que cela conduit les sociétés à revoir entièrement leur politique de R et D en matière de piles à combustibles. Toutefois, il convient de ne pas donner à cette décision une portée générale qu'elle n'a pas. Il s'agit d'interrompre les travaux de développement sur des filières de piles qui, en l'état actuel des résultats obtenus, progressent lentement et dont le débouché sur des marchés vraiment intéressants sur le plan industriel comme la traction automobile apparaît de plus en plus lointain. L'interruption de l'aide au développement DGRST n'implique pas l'interruption de toute aide de l'État. Des organismes qui ont des besoins spécifiques, comme les Armées ou le CNEXO peuvent apporter un certain soutien aux constructeurs si ceux-ci décident de poursuivre leur effort. Par ailleurs, en ce qui concerne l'aide de la DGRST sur le plan de la recherche, je vous rappelle que le comité "Électrotechnique nouvelle" a vu cesser son activité à compter du 1^{er} juillet 1969. Avant de terminer ses travaux, le comité a rédigé un document donnant les bases de la politique qu'il estime raisonnable de mettre en œuvre au cours des prochaines années. Peu d'idées originales ont été exprimées en ce qui concerne le secteur des piles à combustible et de l'électrochimie en général. Il est proposé cependant, dans ce domaine, de poursuivre les travaux, afin de valoriser les études faites, en polarisant les efforts sur

⁷⁸¹ Lettre de Jacques Dubar à Maurice Magnien, le 6 novembre 1969.

⁷⁸² Le 23 novembre 1969, Michel Desécures reçoit une lettre de Jean-Claude Sohm, avec qui il entretient de bonnes relations, dans laquelle il écrit qu'il faut selon lui que « la DGRST ait le courage d'arrêter les piles à combustible ». Source : lettre de Jean-Claude Sohm à Michel Desécures, le 23 octobre 1969, p. 4.

⁷⁸³ Il est notamment mentionné dans une note manuscrite de la direction de la DGRST : « Voir du côté des Armées pour la suite (ce qui est conforme aux conclusions de notre réunion avec le LCIE) ». Source : DGRST, note manuscrite anonyme à destination de Pierre Aigrain, le 22 juillet 1969.

des objectifs moins ambitieux, mais susceptibles de débouchés industriels à moyen terme : accumulateurs d'un type nouveau, piles pour usages spéciaux. »⁷⁸⁴

Voilà donc, au tournant de la décennie, le sort réservé aux piles à combustible en France. Si l'on doit maintenant faire le point sur les raisons qui poussent la Défense et la DGRST à arrêter le financement des études sur la technique à cette époque, complétant celles admises par Pierre Aigrain, on peut relever plusieurs éléments. Tout d'abord, entre 1966 et 1969, le collectif de pensée hybride formé autour des piles à combustible crée un courant de recherche particulier qui voit l'abandon de l'expérimentation fondamentale au profit d'une phase de développement à vocation industrielle. Dans ce contexte, il s'agit surtout pour les différents laboratoires d'atteindre la maîtrise des phénomènes électrochimiques plutôt que d'accroître les connaissances à leur sujet. Au contraire de celui à l'œuvre outre-Atlantique dans le cadre du programme Apollo et malgré son orientation vers la traction électrique, ce courant est de plus concentré sur la construction éparpillée de prototypes génériques susceptibles d'adaptation à plusieurs applications et non pas à un usage spécial très identifié. Enfin, à l'échec de cette voie, attestée par les faibles résultats atteints au LCIE par l'ONIA, la CGE et l'association entre la CIPEL et l'IFP à la fin de l'année 1969, s'ajoutent le scepticisme grandissant exprimé par certains détracteurs au sein du réseau social, la concurrence imposée par l'amélioration du moteur thermique et des accumulateurs et la situation contrastée des recherches aux États-Unis, modèle sur lequel s'appuie l'administration française en matière de tendance scientifique et technique.

⁷⁸⁴ Lettre de Pierre Aigrain au ministre du Développement industriel et scientifique, le 4 novembre 1969, pp. 2-3.

TROISIÈME PARTIE
Les piles à combustible entre enjeux scientifiques et
prises de position technologiques

SEPTIÈME CHAPITRE

Les piles à combustible à l'épreuve de la politique énergétique (1970-1973)

Au début des années soixante-dix, le réseau d'acteurs et d'institutions qui s'organisait autour des piles à combustible en France depuis près de dix ans vacille. Il s'agit de la première étape marquant sa lente érosion tout au long de la décennie. La perte du soutien de la DGRST et de la Défense, autant financier que moral et politique, porte un coup à la majeure partie des porteurs de projets qui se retirent définitivement, rejoignant ceux qui avaient déjà été écartés au cours des années précédentes. Pourtant, quelques organismes et entreprises refusent de se résigner et vont tenter de mobiliser d'autres espaces économiques et sociaux dans un contexte politique en pleine transformation. Les piles à combustible vont alors faire l'objet de nouvelles controverses à un moment où la question énergétique s'apprête à traverser une phase critique. Dans un premier temps, nous nous pencherons ainsi sur la transition qui s'effectue au sein du comité « Électrotechnique nouvelle » pour étudier de quelle manière la décision de Pierre Aigrain est remise en cause. Nous reviendrons ensuite sur les stratégies élaborées par les différents acteurs, décidés à ne pas abandonner la technique, pour continuer leurs activités. Enfin, nous analyserons comment il est impossible de penser les éléments précédents et le sort des piles à combustible pour les années suivantes sans prendre en considération le développement parallèle du véhicule électrique, porté par l'EDF.

7.1 Une transition difficile : le nouveau comité « Électrotechnique nouvelle » comme espace de conflit entre électrochimistes

La fin de l'année 1969 est marquée par la conclusion de la plupart des contrats sur les piles à combustible⁷⁸⁵ et la création d'un nouveau comité « Électrotechnique nouvelle »⁷⁸⁶ doté d'une durée

⁷⁸⁵ Fin 1969 et début 1970 se terminent les contrats passés avec Paul Biro de la CGE (« propriétés catalytiques des composés semi-métalliques » ; « piles à hydrocarbures »), Maurice Bonnemay du Laboratoire d'électrolyse du CNRS (« recherches sur la cinétique et la catalyse de la conduction directe des hydrocarbures »), Jean Besson de la Faculté des sciences de Grenoble (« réalisation et étude de piles à combustible à oxyde électrolyte à haute température »), Bernard Warszawski d'Alstom (« Catalyseurs Rédox pour l'air en milieu neutre » ; « étude d'un nouveau type d'électrode à gaz industriel : électrode à émulsion » ; « méthode de décarbonisation automatique d'une pile à combustible à électrolyte basique » ; « étude de la spécialisation des couches dans la technique des vernis catalytiques »), Odile Bloch de l'IFP (« recherche visant à remplacer les matériaux rares et chers utilisés dans les piles directes et indirectes »), Jean Laroche de l'ONIA (« étude de matériaux catalytiques pour piles à combustible à électrolyte acide fonctionnant à moyenne température »), M. Cabestan du groupe Carbone Lorraine (« électrodes fonctionnant en milieu acide »), M. Robieux des Laboratoires de Marcoussis (« combustion directe des hydrocarbures gazeux dans une pile à combustible à haute température à électrolyte solide »), Pierre Dubois des Laboratoires de Marcoussis (« étude des oxydes pour électrode à hydrogène en milieu acide »). Source : DGRST, comité « Électrotechnique nouvelle », « liste des contrats en cours d'exécution ou ayant expiré en 1969 », novembre 1969, pp. 2-4.

⁷⁸⁶ Composé de : Hubert Autruffe, ingénieur principal adjoint au Service de la recherche de la SNCF, René Bonnefille, professeur à la Faculté des sciences de Paris, Bogdan Broniewski, directeur des recherches d'Alstom, Yves Chapron, directeur du Centre d'études cryogéniques de L'Air liquide, Pierre Desforge, sous-directeur des industries électriques et électroniques à la Direction des industries mécaniques, électriques et électroniques du ministère du Développement industriel et scientifique, Bernard Dreyfus, professeur à la Faculté des sciences de Grenoble, René Duffet, chef de la

d'activité de deux ans. Ses commissions, dont celle concernant l'électrochimie, sont également réorganisées⁷⁸⁷. Un chercheur en particulier va venir prendre une place prépondérante au sein de cette nouvelle structure et cristalliser les tensions qui y prédominent : il s'agit de Jean-Claude Sohm. Le maître de conférences à la Faculté des sciences de Grenoble, qui entretient des relations étroites avec plusieurs personnalités liées à la DGRST telles que le directeur adjoint de la production et du transport d'EDF Maurice Magnien et le secrétaire scientifique du comité Michel Desécures, est en effet sollicité pour prendre la présidence de la commission « Électrochimie ». Dès sa prise de fonction, il remet un rapport visant à la fois à faire le point sur la situation et à proposer des recommandations. Les constats qu'il établit au sein de ce document sont simples : d'une part, l'étude et la réalisation de piles à combustible ont bien été des échecs⁷⁸⁸ mais ceux-ci ne doivent pas amener à tirer des conclusions pessimistes sur les générateurs électrochimiques en général. D'autre part, il faut tirer des enseignements de cette expérience pour repenser le rôle et la prise de décision au sein de la commission⁷⁸⁹ : suivre l'avis du Commissariat général du Plan qui recommande « l'économie des moyens »⁷⁹⁰, arrêter la poursuite de buts trop ambitieux, encourager la recherche avec réalisme et ne plus accorder une importance exagérée au « tapage » effectué outre-Atlantique sur des sujets « à la mode »⁷⁹¹.

division « Chimie-électrochimie » à la DRME, Bernard Favez, chef du service « Matériel électrique » à la Direction des études et recherches d'EDF, Roger Florent, chef du projet de la grande chambre européenne au Centre d'études de recherches nucléaires à Genève, Michel Gossot, directeur des laboratoires du Centre de recherches de la CGE, Maurice Magnien (président du comité), directeur adjoint de la production et du transport d'EDF, Marcel Matricon, directeur scientifique du groupement des activités nucléaires et de l'instrumentation scientifique de la compagnie Thomson-CSF, Pierre Ricateau (vice-président du comité), ingénieur au Centre d'études nucléaires de Saclay, Jean-Claude Sohm, maître de conférences à la faculté des sciences de Grenoble. Source : Journal officiel, le 6 décembre 1969, pp. 11862-63.

⁷⁸⁷ En plus de la commission « Électrochimie », deux autres commissions sont instituées : la commission « Cryoélectricité », dirigée par Roger Florent, et la commission « Electricité générale », dirigée par Bernard Favez. Source : DGRST, comité « Électrotechnique nouvelle », « procès-verbal de la réunion du 9 janvier 1970 », p. 2.

⁷⁸⁸ Sur la pile à combustible de type Alsthom, Jean-Claude Sohm écrit à Michel Desécures le 23 octobre 1969 en ces termes : « La structure Alsthom est bonne pour les réactifs solubles. Elle ne vaut pas cher dans le cas de l'électrode à air. De plus, les problèmes de catalyse sont à peu près les mêmes pour tout le monde, quelle que soit la structure. Les gens d'Alsthom n'ont pas été plus malins (ou plus heureux ?) que leurs concurrents dans ce domaine. » Source : lettre de Jean-Claude Sohm à Michel Desécures, le 23 octobre 1969, p. 2.

⁷⁸⁹ Le 8 avril 1970, Jean-Claude Sohm écrit à Michel Desécures pour lui faire part de son avis sur ce que lui inspirent ses premiers mois passés à la DGRST : « Tout se passe comme si rien n'avait changé à la DGRST. Les contrats sont muets sur les détails scientifiques et techniques des recherches proposées. Les utilisations éventuelles ne sont pas mentionnées. Les questions de prix de revient ne sont pas évoquées. Chacun s'accroche à ses recherches antérieures : tous ces routiniers me donnent la nausée. » Source : lettre de Jean-Claude Sohm à Michel Desécures, le 8 avril 1970, p. 2. Le 3 juillet, il écrit cette fois à Pierre Aigrain : « L'absence à peu près complète de liaison entre le comité de recherche et celui de développement, et l'absence d'expert compétent en matière de générateurs électrochimiques dans le comité de développement, frappent le néophyte que je suis. Les moins scrupuleux des industriels (j'entends par là les représentants des laboratoires de Massy et de Marcoussis) profitent depuis plusieurs années de cette situation. » Source : lettre de Jean-Claude Sohm à Pierre Aigrain, le 3 juillet 1970, p. 1.

⁷⁹⁰ Les recommandations du VI^{ème} plan sont explicites à ce sujet : « l'économie des moyens [...] sera recherchée par le développement des moyens communs de gestion et d'exploitation des laboratoires et l'utilisation intensive des moyens lourds. » Source : Commissariat général du Plan de modernisation et d'équipement, « VI^{ème} Plan de développement économique et social (1971-1975) », p. 73.

⁷⁹¹ Jean-Claude Sohm, rapport transmis au comité « Électrotechnique nouvelle », le 9 janvier 1970, p. 1.

Dans cette perspective, il suggère de réorienter les travaux vers d'autres types de piles plus classiques (de type Leclanché, piles amorçables CuCl/Mg, HgO/Zn, Ag₂O) et vers les accumulateurs. Si certains, comme Jean Brenet du Laboratoire d'électrochimie de la Faculté des sciences de Strasbourg⁷⁹², n'hésitent pas à se ranger derrière la nouvelle tendance proposée, ces quelques pages ne vont pas sans provoquer de remous chez d'autres. Le 14 février 1970, Bogdan Broniewski – qui n'a pas encore soumis son modèle de pile à combustible au LCIE (Laboratoire central des industries électriques) – répond vivement à Jean-Claude Sohm : si la note fait, dit-il, « une critique pertinente des recherches » et « correspond dans l'ensemble à la réalité », elle est « sans idée créatrice, sans originalité » et copie « les Américains avec des années de retard »⁷⁹³. En réalité, le directeur des recherches d'Alstom profite surtout de son droit de réponse pour défendre la technique dans laquelle il a investi la moitié de ses équipes. S'il reconnaît que les études françaises sur les piles à combustible ont souffert des voies spécifiques empruntées jusqu'alors, il milite pour « la prise en compte de [ce type de générateur] en tant que système, à partir de l'analyse de la mission technico-économique qui lui est demandée »⁷⁹⁴ et conclut en forme de pique que « la conduite d'une politique active d'incitation à la recherche industrielle en électrochimie devrait être confiée à une personnalité positive et avertie des problèmes industriels et commerciaux »⁷⁹⁵. Il écrit par ailleurs à Maurice Magnien pour dénoncer l'attitude de Jean-Claude Sohm qu'il juge inappropriée⁷⁹⁶. Bogdan Broniewski n'est pas le seul à faire part de ses doutes sur la nouvelle orientation choisie. Malgré les réserves qu'il peut émettre sur la technique⁷⁹⁷, le chef de la division « Chimie et électrochimie » à la

⁷⁹² Jean Brenet présente à cette période un projet de recherche concernant les piles classiques et les accumulateurs, et plus particulièrement « l'étude des processus d'accroissement de la réactivité électrochimique de bioxydes de manganèse par l'introduction d'ions étrangers ».

⁷⁹³ Bogdan Broniewski, « Remarques sur les problèmes de la recherche en électrochimie », le 14 février 1970, p. 1.

⁷⁹⁴ Bogdan Broniewski, « Remarques sur les problèmes de la recherche en électrochimie », le 14 février 1970, p. 2.

⁷⁹⁵ Bogdan Broniewski, « Remarques sur les problèmes de la recherche en électrochimie », le 14 février 1970, p. 7.

⁷⁹⁶ Dans sa lettre à Maurice Magnien, Bogdan Broniewski écrit : « Je ne conteste ni la compétence, ni la valeur scientifique de M. Sohm. Je suis également conscient qu'il faut rénover profondément la procédure et les critères du choix des projets soumis au nouveau comité Électrotechnique nouvelle, en particulier dans le domaine de l'électrochimie. Mais il me semble que l'attitude de M. Sohm, sa position tranchante sur les options en matière de recherche, les jugements qu'il porte sans informations sur les propositions de recherche soumises à la DGRST ne semblent pas tout à fait compatibles avec les fonctions de président d'une commission. » Source : lettre de Bogdan Broniewski à Maurice Magnien, le 28 avril 1970.

⁷⁹⁷ Le 11 juin 1970, Jacques Dubar écrit à Michel Desécures à ce sujet : « J'ai beaucoup de doutes quant à l'avenir des piles à combustible d'après ce que je peux voir. Supposons que la pile A brûle du méthanol et de l'air. On peut estimer que si le poids du générateur atteint 20 kg/kW on pourrait être très satisfait. [...] De plus il faudra acheter du méthanol, assez cher au kWh, le rendement étant assez médiocre, surtout si l'on compte par rapport à l'hydrocarbure de départ Dans quel domaine pourra-t-on vendre un pareil objet ? Peut-être pour les caravanes ou les maisons isolées, mais on ne risque pas d'y aller très vite à ce marché. Le pire est que l'obtention de 20 kg/kW n'est peut-être pas si facile ! En tout cas, je pense qu'on est encore dans la recherche de base et que le développement est prématuré. Un effort peut sans doute être poursuivi dans le domaine de l'électrochimie des piles mais cet effort doit peut-être être restreint et mesuré. Je crois qu'un effort sur la meilleure compréhension de l'électrochimie sur film mince serait payant à long terme. » Source : lettre de Jacques Dubar à Michel Desécures, le 11 juin 1970. Dans une lettre précédente, datée du 10 avril, Jacques Dubar tenait déjà un discours similaire : « Tu me demandes s'il faut faire quelque chose dans le domaine des piles ? Je pense qu'il faut surtout étudier la catalyse et les catalyseurs électrochimiques en faculté, et la technologie en usine. Mais c'est une œuvre de longue haleine, qui est loin d'être assurée du succès. Aussi je forcerais plutôt sur l'étude de la catalyse à grandes

DRME René Duffet soutient par exemple que « le comité a tort de balayer aussi complètement toutes les recherches sur les piles à combustible » : « l'engouement sur ce sujet a certainement été déplorable et injustifié mais on passe maintenant à l'excès inverse. Les Allemands qui sont "réalistes" intensifient au contraire leurs recherches dans ce domaine »⁷⁹⁸, prévient-il. Sous le coup de la critique, Jean-Claude Sohm réaffirme sa position sur la question à l'occasion d'une autre note qu'il soumet le 22 mai à la commission « Électrochimie » :

« [...] la DGRST finance depuis huit ans des travaux de recherche et de développement concernant les piles à combustible. Les résultats obtenus n'ont pas répondu aux espoirs que l'on avait mis en eux, au regard du but poursuivi, c'est-à-dire la propulsion électrique des véhicules. Certaines piles, directement inspirées des travaux anglais et américains, sont trop volumineuses ; d'autres manquent du catalyseur qui leur permettrait de fonctionner avec un combustible économique, toutes ont une durée de vie trop limitée. Tandis que les progrès de la recherche se faisaient de plus en plus lents et les dépenses cumulées de plus en plus considérables, le marché des applications possibles allait en se rétrécissant : des voitures électriques on passait aux camionnettes, puis aux véhicules de service urbain, puis aux chariots des gares, puis aux groupes électrogènes... en attendant les sous-marins de poche. Il n'est pas nécessaire de faire des calculs compliqués pour montrer que tout espoir est pratiquement perdu de rentabiliser les recherches consacrées aux piles à combustible. La conclusion doit être tirée avec netteté et avec courage : à défaut d'idées nouvelles et remarquables, ces recherches doivent être arrêtées au plus vite. Ceci n'est pas un avis personnel : c'est la conclusion à laquelle aboutit tout observateur impartial, compte tenu de la lenteur des progrès et du manque de rentabilité. »⁷⁹⁹

Si Odile Bloch, Yves Bréelle et Paul Degobert de l'IFP abondent partiellement en ce sens dans la revue *Industries et techniques* en concédant que les caractéristiques des piles « ne laissent que peu d'espoir pour leur utilisation en traction au cours des prochaines années »⁸⁰⁰, le directeur des laboratoires du Centre de recherches de la CGE Michel Gossot reprend les arguments précédemment évoqués par ses pairs pour dénoncer à son tour ce qu'il considère comme un exercice de

performances, en dynamique (avec circulation et en fonction du temps). » Source : lettre de Jacques Dubar à Michel Desécures, le 10 avril 1970.

⁷⁹⁸ Lettre de René Duffet à Jean-Claude Sohm, le 22 janvier 1970.

⁷⁹⁹ Jean-Claude Sohm, « Éléments de réflexion sur la politique de la commission Électrochimie », le 22 avril 1970, pp. 1-2.

⁸⁰⁰ *Industries et techniques*, n°138, janvier 1970, p. 46.

« masochisme collectif » relatif à une erreur d'appréciation de la situation⁸⁰¹. Dans une lettre qu'il adresse à Jean-Claude Sohm le 3 juillet 1970, il mentionne la profusion des recherches étrangères sur les piles à combustible qui démontrent leur actualité : l'investissement de vingt-huit millions de dollars de la part de Pratt & Whitney dans le programme Target pour la mise au point d'un modèle destiné au marché civil américain, les efforts de Siemens dans le développement d'une filière froide analogue à celle de l'IFP et de la CIPEL ou encore de ceux de Varta, qui vient d'effectuer près de dix mille heures de tests sur ses propres prototypes. D'autre part, il soutient que les industriels français tels que le groupe Carbone Lorraine ou Alsthom manifestent régulièrement leur intention de continuer les études sur la thématique⁸⁰².

Mis à part la direction des recherches de l'EDF, dont Maurice Magnien annonce à la réunion générale de la Société française des électriciens le 12 février 1970 qu'elle a écarté les piles à combustible pour des « raisons de rendement et de prix »⁸⁰³, l'intérêt pour la technique est en effet encore présent dans beaucoup de laboratoires : le CPT (Centre de perfectionnement technique) va d'ailleurs jusqu'à organiser sous le patronage de la DGRST une journée d'étude à la Maison de la chimie le 3 novembre 1969 où interviennent tour à tour le directeur du Laboratoire d'électrolyse du CNRS Maurice Bonnemay (« conférence inaugurale »), le chef de service à l'ONIA Jean Laroche (« piles à hydrogène à moyenne température et générateurs d'hydrogène par conversion »), l'ingénieur principal de l'IFP Yves Bréelle (« pile hydrogène-air de 500 watts alimentée à partir de combustible liquide »), le directeur du département « Énergie » du Centre de recherches de la CGE Pierre Dubois (« les piles à combustibles aux laboratoires de la CGE à Marcoussis ») et le maître de conférences à

⁸⁰¹ Le 30 mai 1969, Michel Gossot écrivait déjà à Pierre Aigrain pour lui faire part de son opinion sur la suite à donner au programme : « Les piles à combustibles suscitent aujourd'hui à travers le monde des opinions variées. Il apparaît cependant, que, d'une façon générale, on estime plus lointain que précédemment prévu l'accès de ces générateurs à des marchés très vastes tels que la propulsion automobile. On admet en revanche comme probable l'apparition, au cours des dix prochaines années, de marchés pour des usages plus limités mais d'un volume non négligeable. Les responsables de la CGE partagent cette opinion. En effet, les recherches du Groupe dans ce domaine sont loin d'être arrivées à ce jour à leur point d'aboutissement et les perspectives concrètes d'amélioration à court et moyen terme apparaissent considérables tant en ce qui concerne les électrodes (sans faire appel aux métaux précieux) que les structures, avec une influence bénéfique certaine et importante sur la fiabilité et les coûts. Il faut reconnaître également que ces travaux ont une répercussion favorable sur les progrès des autres générateurs électrochimiques. La CGE estime donc, en ce qui la concerne, souhaitable de poursuivre le plan de travail initial et d'aborder les deux dernières périodes annuelles qui avaient été prévues pour industrialiser les prototypes actuels, les optimiser du point de vue économique, les rendre aussi fiables que possible et pouvoir faire ainsi une approche sérieuse du marché. Compte tenu de l'aspect encore évolutif de la technique et de notre souci d'économie des moyens, il ne nous paraît pas opportun de construire des générateurs de puissance élevée et notre intention serait de s'en tenir à 5 kW, niveau qui devrait satisfaire la demande à court terme et permettre en même temps de préparer la voie de réalisations plus importantes. » Source : lettre de Michel Gossot à Pierre Aigrain, le 30 mai 1969, p. 3.

⁸⁰² Lettre de Michel Gossot à Jean-Claude Sohm, le 3 juillet 1970.

⁸⁰³ *Revue générale d'électricité*, tome 79, n°3, mars 1970, p. 9.

la Faculté des sciences de Grenoble Charles Desportes (« les piles à combustible à oxyde électrolyte solide »)⁸⁰⁴.

De fait, et ce malgré les recommandations de Jean-Claude Sohm⁸⁰⁵, le nouveau comité « Électrotechnique nouvelle » reçoit encore de nombreuses propositions sur les piles à combustible. Les Laboratoires de Marcoussis⁸⁰⁶ présentent un projet de « pile à combustible à haute température et électrolyte solide » (deux ans, 464 940 francs) et Alsthom quatre autres relatifs à des « électrodes à émulsion d'air » (dix-huit mois, 500 000 francs), à des « piles à combustible en régime haché » (un an, 350 000 francs), à des « membranes micro-poreuses » (un an, 250 000 francs) et à des « électrodes à émulsion d'air en milieu tamponné voisin du neutre » (un an, 300 000 francs). L'association entre la CIPEL et l'IFP demande pour sa part 3 contrats sur des « électrodes à air sans fuite d'électrolytes » (deux ans, 300 000 francs), une « pile à anode de magnésium utilisant l'eau de mer comme électrolyte » (un an, 210 000 francs) et la « réalisation de cadres d'électrodes par des matériaux plastiques (deux ans, 360 000 francs)⁸⁰⁷. Sur les 16 propositions, 8 concernent ainsi la technique que la DGRST avait pourtant décidé d'écarter. Le cas du Laboratoire d'électrolyse du CNRS est aussi significatif à l'égard des difficultés que connaît la commission à se renouveler : en février 1969, Maurice Bonnemay fait une demande de financement sur trois ans, de l'ordre de 1 070 829 francs, à la DGRST pour des recherches fondamentales en vue de la réalisation de « nouveaux accumulateurs et piles réversibles » et de « piles à combustion directe des hydrocarbures »⁸⁰⁸. Mais il semble plus préoccupé par le sort des douze chercheurs et techniciens de son laboratoire rémunérés sur contrat⁸⁰⁹ que par les recherches en elles-mêmes. Ainsi écrit-il à Pierre Aigrain le 26 juin 1969 pour lui faire part des soucis de traitement du personnel que poserait la non obtention de ce contrat⁸¹⁰. Dans un contexte marqué par les événements de mai 1968, l'intersyndicale de Bellevue contacte aussi

⁸⁰⁴ Lettre du directeur du CPT au secrétaire général de la DGRST, le 15 juillet 1969.

⁸⁰⁵ Dans une lettre à Michel Desécures datée du 8 avril 1970, Jean-Claude Sohm dénonce le « noyage » effectué par Alsthom avec ses propositions de contrat et propose de « mettre un coup d'arrêt immédiat ». Source : lettre de Jean-Claude Sohm à Michel Desécures, le 8 avril 1970.

⁸⁰⁶ En 1968, le Centre de recherches de la CGE devient une société anonyme et prend le nom de Laboratoires de Marcoussis. Lucien Gobin (X 1936) y prend la direction à la place de Jean Dauvin, lui-même ancien directeur de la recherche des PTT. Source : BOUVIER, Yves, « La recherche, interface privilégiée entre la Compagnie générale d'électricité et l'État (années 1950-années 1990), in FRIDENSON, Patrick, GRISET, Pascal (dir.), *Entreprises de haute technologie, État et souveraineté depuis 1945*, Comité pour l'histoire économique et financière de la France, 2013, pp. 73-74.

⁸⁰⁷ DGRST, « Liste des propositions. Électrotechnique nouvelle », 1970, pp. 1-2.

⁸⁰⁸ Maurice Bonnemay, « Proposition de contrat à passer avec la DGRST », février 1969.

⁸⁰⁹ En 1969, le Laboratoire d'électrolyse du CNRS accueille en effet 44 chercheurs et 34 personnes rattachées aux services techniques et administratif. Or sur cet ensemble 12 personnes sont rémunérées sur des contrats passés avec la DGRST : quatre chargés d'études (Lacharme, Harff, Vernières, Andro) et huit techniciens (Etman, Pankowska, Granelli, Vandewinckele, Soulages, Rolland, Pesant et Arricau).

⁸¹⁰ Lettre de Maurice Bonnemay à Pierre Aigrain, le 24 juin 1969.

directement le Délégué général pour l'inciter à régler « le problème social posé par la précarité de la situation des agents »⁸¹¹.

Ces pressions⁸¹² finissent par payer puisque le 16 janvier 1970 Pierre Aigrain répond à Maurice Bonnemay que le comité « Électrotechnique nouvelle » donne une réponse favorable à son projet⁸¹³ dans le but de l'aider « à se reconverter »⁸¹⁴. L'agacement de Jean-Claude Sohm est palpable suite à cette décision. Auprès de Pierre Aigrain, il critique les méthodes des contractants qui obtiennent des financements de la DGRST de deux façons : soit en envoyant « le polytechnicien de service passer la brosse » au comité de développement, soit en ayant « un syndicat puissant, dont le secrétaire traite directement avec le Délégué général »⁸¹⁵. Il s'indigne également des agissements d'Alsthom, coupable selon lui d'orchestrer « une campagne de presse où le bluff le dispute à la mauvaise foi », et du « profond malaise devant le silence de la DGRST » à ce sujet⁸¹⁶. À cette période, la société a enfin remis son prototype de pile et fait courir le bruit, par le biais de la revue *Entropie*, que celui-ci a passé les tests avec succès : « un générateur complet hydrogène-eau oxygénée de 30 kW a été expérimenté au LCIE et [...] l'excellente coopération mécanique, hydraulique et électrique de ses éléments démontre la parfaite reproductibilité des composants et le caractère pleinement industriel des technologies qui ont servi à les fabriquer », affirme-t-elle notamment⁸¹⁷.

Or le compte rendu des essais est moins dithyrambique : le rendement en courant de la pile de 1 kW – et non de 30 kW comme annoncé – n'a pas dépassé les 20 % et sa durée de vie n'a pas atteint les 100 heures. Pire, Bernard Warszawski est soupçonné de trafiquer les essais⁸¹⁸. Face à ces résultats, et suivant l'avis de Jean-Claude Sohm, le comité « Électrotechnique nouvelle » durcit le ton vis-à-vis

⁸¹¹ Lettre de l'intersyndicale de Bellevue à Pierre Aigrain, le 3 novembre 1969.

⁸¹² Dans sa lettre du 26 juin 1969 à Pierre Aigrain, Maurice Bonnemay évoque la question de la manière suivante : « [...] je crois devoir vous rendre compte du fait que le personnel engagé sous contrat est actuellement fortement sensibilisé à toutes les questions relatives à l'emploi et qu'un mouvement se développe, en rapport avec celui qui est en cours à l'INAG, qui pourrait prendre une certaine ampleur et serait difficile à contrôler. » Source : Lettre de Maurice Bonnemay à Pierre Aigrain, le 24 juin 1969.

⁸¹³ Lettre de Pierre Aigrain à Maurice Bonnemay, le 16 janvier 1970.

⁸¹⁴ DGRST, comité « Électrotechnique nouvelle », « procès-verbal de la réunion du 15 avril 1970 », p. 4.

⁸¹⁵ Lettre de Jean-Claude Sohm à Pierre Aigrain, le 3 juillet 1970.

⁸¹⁶ Lettre de Jean-Claude Sohm à Maurice Magnien, le 18 juin 1970, p. 2.

⁸¹⁷ *Entropie*, n°32, mars-avril 1970.

⁸¹⁸ C'est en tout cas ce que rapporte Loïk Le Floch-Prigent qui participe à l'évaluation du dossier : « A l'époque, Michel Desécures et moi-même regardons cela. En 1969, j'arrive à la DGRST et Michel Desécures me dit : “bon, ce sont des industriels que tu connais. Tu fais cela avec moi.” On fait des essais au LCIE et ces essais... On pense que ce sont des essais faits de bonne foi. Donc les gens qui font les essais partent le soir et reviennent le matin tranquillement. Et puis il y a un individu [...] qui est Warszawski qui indique qu'il va réussir là où tous les autres ont échoué. Et lorsqu'on regarde les essais [d'Alsthom], Michel Desécures et moi-même, nous nous apercevons qu'il y a un défaut. C'est-à-dire que le soir ça baisse et le lendemain matin ça marche. Donc nous allons au LCIE où nous retrouvons Warszawski qui la nuit... Vous imaginez le bruit que ça fait entre nous. Et donc Bogdan Broniewski qui est le directeur des recherches d'Alsthom continue à dire : “non, c'est un génie, c'est un génie”. Et c'est à cette occasion que je m'intéresse de façon plus approfondie aux piles à combustible. » Source : entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

de l'attribution des contrats sur les piles à combustible. Sans prendre en compte le Laboratoire d'électrolyse du CNRS qui fait l'objet d'un traitement spécifique, aucun demandeur (CGE, Alstom, IFP) n'en obtient un⁸¹⁹. Mais ce qui se joue aussi en filigrane derrière ces controverses, c'est une brisure dans le style de pensée du collectif. Deux raisons en sont à la source : a) leur rationalité étant dépendante de leurs biais cognitifs, emplois et positions hiérarchiques respectives⁸²⁰, tous les acteurs concernés ne mobilisent pas les mêmes schèmes de perception face au problème qui se pose ; b) l'état instable des connaissances scientifiques et techniques portant sur les piles à combustible autorise les luttes pour son cadrage⁸²¹. Une opposition émerge la fois entre différentes approches de l'électrochimie et entre universitaires et chercheurs du secteur privé. L'opinion de Jean-Claude Sohm sur la question des piles à combustible est claire : selon lui, et comme il l'avait eu l'occasion de l'exposer à Maurice Magnien en mai 1968, les recherches fondamentales ont été abandonnées trop tôt au profit du développement. D'autre part, lorsqu'il prend la direction de la commission « Electrochimie », c'est pour la recentrer avec un budget restreint par rapport aux années précédentes sur des projets de recherche appliquée à court terme, spécialement dans le domaine des petites puissances, susceptibles d'aboutir « après deux ou trois ans à un modèle probatoire démontrant la faisabilité du dispositif étudié »⁸²². Comme il le rappelle dans ses « éléments de réflexion sur la politique de la commission Electrochimie », « une commission “pauvre” ne peut qu'investir à court terme, surtout si elle a derrière elle huit années d'insuccès »⁸²³.

Pour appuyer son raisonnement, le maître de conférences à la Faculté des sciences de Grenoble retrace les trajectoires prises par la pile au mercure et la pile Leclanché alcaline qui ont demandé plus de cinq ans de développement et d'autres supplémentaires pour leur commercialisation : « où en seraient ces piles si leur phase recherche avait duré aussi longtemps que celle des piles à combustible, avec un succès aussi contestable ? », demande-t-il. Pour Jean-Claude Sohm, c'est donc sur « des idées simples »⁸²⁴ qu'il faut miser en particulier, en résolvant des problèmes précis tels que la modification de l'électrolyte dans le domaine des piles classiques à électrolyte aqueux. C'est un véritable renversement qui s'opère. Ce ne sont pas seulement les piles à combustible qui sont ici remises en cause mais la valeur scientifique des voies qui ont été sélectionnées et des chercheurs qui les ont portées. Or, pour Bogdan Broniewski, l'adoption d'une telle démarche, qui vise à associer une

⁸¹⁹ DGRST, comité « Électrotechnique nouvelle », « procès-verbal de la réunion du 15 avril 1970 », p. 4.

⁸²⁰ MOREL, Christian, *Les décisions absurdes : sociologie des erreurs radicales et persistantes*, Gallimard, 2002.

⁸²¹ GUSFIELD, Joseph, *La Culture des problèmes publics. L'alcool au volant : la production d'un ordre symbolique*, Économica, 2009 [1981].

⁸²² DGRST, comité « Électrotechnique nouvelle », « procès-verbal de la réunion du 15 avril 1970 », p. 2.

⁸²³ Jean-Claude Sohm, « Éléments de réflexion sur la politique de la commission Electrochimie », le 22 avril 1970, p. 3.

⁸²⁴ Jean-Claude Sohm, « Éléments de réflexion sur la politique de la commission Electrochimie », le 22 avril 1970, p. 3.

électrode positive, une électrode négative et un électrolyte de façon « aussi simple que possible » et à résoudre les problèmes propres à cette association est responsable « des échecs, comme celui des piles à combustible à électrodes poreuses », de « la stérilité » et du « piétinement que tout le monde s'accorde à reconnaître ». Ceci dans la mesure où les problèmes que l'on va tenter de résoudre sur des systèmes simplifiés ne coïncident souvent que très partiellement avec « les problèmes qu'on va rencontrer sur un bon nombre de systèmes réels »⁸²⁵.

Cette vision contradictoire découle directement de la position professionnelle du directeur des recherches d'Alsthom. Responsable industriel, Bogdan Broniewski ne peut pas imaginer une conception de la recherche et du développement « qui ignore que les conditions de développement doivent être incluses dès l'origine dans les recherches de base » et que les problèmes doivent être posés « du point de vue du système final, défini par sa mission technico-économique »⁸²⁶. C'est ainsi qu'au lieu de suivre la marche habituelle qui consiste à régler les problèmes du catalyseur et de l'électrode pour ensuite passer à ceux de la pile élémentaire et enfin ceux à la batterie, Alsthom a « pris le problème à l'envers »⁸²⁷ en partant de la conception directe d'une structure de batterie qui les a conduits à un type spécial d'électrode et à une composition particulière de l'électrolyte, lesquels les ont amenés à une approche nouvelle du phénomène catalytique.

Le départ de Jean-Claude Sohm, qui quitte ses fonctions de président de la commission « Electrochimie » en même temps qu'il s'engage avec la société Pechiney à la fin de l'année 1970⁸²⁸, et son remplacement par le conseiller technique de la DGRST et agrégé de l'Université en sciences physiques Georges Dumesnil ne provoquent pas de changement de situation. La reconversion des activités de la DGRST dans le domaine de l'électrotechnique est partagée au Sénat : « l'action en matière de magnétohydrodynamique, en raison des échecs rencontrés a été arrêtée. L'action "Piles à combustible" à l'échéance beaucoup trop lointaine et aux résultats décevants si on les compare aux sommes dépensées, laisse la place à des opérations de soutien, dans le domaine des générateurs électrochimiques (accumulateurs d'un type nouveau, piles rechargeables, micropiles...) », indique le sénateur Maurice Vérillon dans son avis sur la recherche scientifique et technique présenté au nom de la Commission des affaires culturelles sur le projet de loi de finances pour 1971. « Cette nouvelle action », ajoute-t-il, « poursuivie à un rythme très modeste et à plus court terme, a pour but de sensibiliser l'industrie à l'étude de ces problèmes tout en profitant du potentiel technique et

⁸²⁵ Bogdan Broniewski, « Remarques sur les problèmes de la recherche en électrochimie », le 14 février 1970, p. 3.

⁸²⁶ Bogdan Broniewski, « Remarques sur les problèmes de la recherche en électrochimie », le 14 février 1970, p. 3-4.

⁸²⁷ Bernard Warszawski, « Bases de développement et d'industrialisation de la pile à combustible », octobre 1968, p. 1.

⁸²⁸ DGRST, comité « Électrotechnique nouvelle », « procès-verbal de la réunion du 15 octobre 1970 », p. 5.

scientifique acquis. Mais l'essentiel des ressources du comité sera consacré aux études de cryoélectricité qui permettront éventuellement de préparer une révolution profonde dans les techniques de transport et de production d'électricité. »⁸²⁹ En même temps que l'action concertée « Électrotechnique nouvelle » se transforme, le rôle de la commission « Electrochimie » va en réalité s'affaiblir. Une nouvelle ère est inaugurée au sein de la DGRST : son service de l'Aide au développement vient prendre une place prépondérante dans les choix à opérer sur ces sujets pour leur fournir des objectifs plus industriels. C'est plus particulièrement Michel Desécures et Loïk Le Floch-Prigent⁸³⁰, un ingénieur diplômé de l'Institut national polytechnique de Grenoble et de l'Université du Missouri entré à la DGRST peu de temps auparavant, qui vont s'imposer comme les référents techniques incontournables de l'administration :

« Pierre Aigrain me fait embaucher au départ quand il est délégué général. Pour lui, je suis celui qui met de l'ordre, le technicien industriel. J'étais aux États-Unis et je rentre avec Jacques Monod. J'ai travaillé au Salk Institute à San Diego en biologie, sans avoir jamais fait de biologie de ma vie, et Jacques considère que je pose des questions pas trop bêtes ainsi que les deux ou trois mecs qui travaillent avec lui. Et Jacques me dit : "Tu ne vas pas rester à San Diego. Reviens et je te fais embaucher par Pierre Aigrain à la DGRST." [...] A la DGRST, je suis entré en 1969 au service Prospective. Puis très rapidement, j'ai été mis dans une organisation plus intéressante qui était l'Aide à la recherche-développement qui s'occupait du financement des prototypes ou des pilotes avec clause de remboursement en cas de succès. Ensuite, j'ai repris l'ensemble du secteur technique de la DGRST, laissant les scientifiques par ailleurs. Pour tout ce qui était proche de l'industrie, c'était moi jusqu'en 1981. »⁸³¹

Concernant les piles à combustible en tout cas, et comme l'exprime la revue *La recherche*, les programmes « sont au point mort »⁸³². Dans ces circonstances, les groupes sociaux mobilisés pour leur développement vont se déplacer et chercher de nouvelles sources de financement.

⁸²⁹ Maurice Vérillon, « Avis présenté au nom de la Commission des affaires culturelles sur le projet de loi de finances pour 1971, adopté par l'Assemblée nationale », première session ordinaire de 1970-1971, annexe au procès-verbal de la séance du 19 novembre 1970, tome IV, Développement industriel et scientifique, Recherche scientifique et technique, p. 178.

⁸³⁰ Diplômé de l'Institut national polytechnique de Grenoble en 1967 et de l'Université du Missouri en 1968, Loïk Le Floch-Prigent entre à la DGRST en 1969. Jusqu'en 1981, date de sa nomination au poste de directeur de cabinet du ministre de l'Industrie Pierre Dreyfus, il y occupe plusieurs fonctions : chargé de mission Urbanisme Transports, conseiller chargé de la Recherche industrielle, chef du Service du Fonds de la recherche, conseiller du directeur général de l'ANVAR (Agence nationale de valorisation de la recherche). De 1989 à 1996, il est successivement nommé président-directeur général d'Elf Aquitaine, président du Gaz de France et président de la SNCF.

⁸³¹ Entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

⁸³² *La recherche*, n°3, juillet-août 1970, p. 230.

7.2 D'Alsthom à GDF : résiliences et stratégies des acteurs en temps de crise

En 1969, la plupart des contrats d'Alsthom prennent fin en même temps que la CGE devient l'actionnaire principal de l'entreprise. En particulier, le projet de « locomotive à générateur électrochimique du type pile à combustible » mis en place avec la SNCF⁸³³ et les « études paramétriques de la propulsion électrique des véhicules terrestres alimentés par piles à combustible du genre Redox » effectuées pour le compte du Centre de prospective et d'évaluation du ministère de la Défense⁸³⁴, auxquels on ne donne pas suite. Pour justifier cette décision, ce dernier signale que « les débouchés militaires sont trop restreints pour que l'armée puisse supporter à elle seule les frais de développement industriel de ce nouveau mode de transmission »⁸³⁵. La SNCF, de son côté, décide de continuer à suivre d'un peu plus loin « l'évolution des piles à combustible, afin d'être prête à les exploiter éventuellement le moment venu, c'est-à-dire lorsque leurs performances et leurs prix auront atteint des valeurs raisonnables »⁸³⁶. Mais Bogdan Broniewski ne souhaite pas renoncer aux piles à combustible. Au moment où il comprend que la DGRST – et plus généralement l'administration publique – se montre de plus en plus réticente à financer de nouveaux travaux sur celles-ci, il tente de mettre en place une autre stratégie pour la faire plier à ses revendications. Plus précisément, il noue des contacts dans le but d'engager des collaborations internationales d'envergure. De cette manière, il espère prouver à la Délégation non seulement que l'intérêt pour les piles à combustible ne s'est pas atténué à l'étranger mais aussi qu'Alsthom s'affirme véritablement comme un leader dans le domaine. En plus des démonstrations qu'il organise au Salon aéronautique du Bourget et au Congrès international des piles à combustible à Bruxelles, il voyage ainsi en octobre 1969 à New York⁸³⁷ avec quelques collaborateurs⁸³⁸ pour participer à des symposiums organisés dans les locaux d'Esso Research and Engineering Company et à l'Université de Columbia⁸³⁹. À l'issue de ces événements, la Direction des recherches semble confiante en sa technique et ses chances de réussite :

« Les présentations de nos piles à combustible en fonctionnement, au Salon aéronautique du Bourget et au Congrès international des piles à combustible à Bruxelles, ont été des

⁸³³ Contrat SNCF n°0410-7-417-01

⁸³⁴ Alsthom, marché n°67-34-908-00-480-75-01

⁸³⁵ Alsthom, « Compte rendu de réunion CPE du 18.2.70 », p. 2.

⁸³⁶ *Revue générale des chemins de fer*, 91^{ème} année, janvier 1972, p. 44.

⁸³⁷ Alsthom, « Compte rendu de mission aux USA. Symposium sur les piles à combustible chez Esso Research & Engineering Co à Linden (N. J.) le 15 octobre et à Columbia University le 17 octobre, le 27 octobre 1969.

⁸³⁸ Messieurs Blondeau, Domenjoud, Verger, Weber et Rodocanachi (conseiller technique du ministère du Développement industriel et scientifique) participent au voyage.

⁸³⁹ Participant au symposium de l'Université de Columbia : C. P. Stanford et Roy Bruno d'Allis Chalmers, Serge Gratch et Thomas de Witt de Ford, Paul Chenea et Richard Witherspoon de General Motors, Herbert I. Fushfeld de Kennecott Copper Corp., D. H. Archer et J.T. Brown de Westinghouse et les professeurs Wesley J. Hennessy, Erwin H. Amick, Charles F. Bonilla, Harry T. Gregor, Henry B. Linford, Paul Duby et Herbert H. Kellogg de l'Université de Columbia.

succès. Une démonstration analogue, organisée sous l'égide d'Esso, a eu lieu aux États-Unis le 15 octobre. Les principaux organismes gouvernementaux américains que nos piles à combustible sont susceptibles d'intéresser étaient invités. Cette présentation a soulevé un grand intérêt. Pour toutes ces manifestations, nous avons été amenés à réaliser des prototypes de plus en plus élaborés et les progrès enregistrés ces derniers mois, en particulier en matière d'électrodes à air et de fonctionnement autonome, sont spectaculaires. »⁸⁴⁰

De fait, Bogdan Broniewski rencontre aux États-Unis le président de Jersey Enterprises Incorporated, filiale d'Esso Research and Engineering Company, H. Eugene McBrayer. L'entreprise américaine travaille sur la technique depuis les années cinquante, pour laquelle elle a dépensé près de 42 millions de dollars (7 millions dans l'étude des piles à combustible proprement dites et 35 millions dans l'étude des catalyseurs). H. Eugene McBrayer semble disposé à enclencher des démarches dans le sens d'un accord : « nous savons tous les deux que nous ne sommes pas en position d'engager nos sociétés respectives dans un projet commun mais l'objet de ma lettre est de faire avancer la discussion le plus rapidement possible pour qu'une décision soit prise en ce sens », écrit-il au directeur des recherches d'Alstom le 4 juin 1970⁸⁴¹. L'objectif principal partagé est alors le développement avant 1975⁸⁴² de prototypes industriels utilisant le mélange méthanol-air, dotés d'une durée de vie excédant les 1000 heures en opération et dont le coût ne dépasse pas 35 dollars par kW.

Parallèlement, Bogdan Broniewski cherche à renforcer les liens établis avec Peugeot depuis 1966 en faisant en sorte qu'il rejoigne la partie. Il s'agit d'une action qui appuie d'autant plus son point de vue. En mettant dans la balance le constructeur automobile, il crée un espace de travail entre de grands groupes français et américains et donne un objectif concret aux piles à combustible : la traction électrique. Cette stratégie se révèle payante. Lors d'une réunion se déroulant le 9 juillet 1970, Bogdan Broniewski fait part au polytechnicien – et protégé du directeur général de Peugeot François Gautier – Francis Rougé qu'Alstom pourrait bénéficier d'un prêt de trois ans « sous réserve que soit conclu

⁸⁴⁰ Alstom-Massy, Comité d'établissement, « Compte rendu de la réunion plénière », le 23 octobre 1969, p. 5.

⁸⁴¹ Lettre de H. Eugene McBrayer à Bogdan Broniewski, le 4 juin 1970, p. 1.

⁸⁴² La direction des études de Peugeot, en la personne de H. P. Huellan, s'exprime en ces termes à Francis Rougé en avril 1971 : « Un délai raisonnable de mise au point d'une première pile à méthanol à petite puissance mais à longue durée paraît être courant 1975. Une pile à méthanol d'environ 35 kW pourrait être construite pour fin 1975. Peugeot précise l'intérêt qu'il y a à s'imposer rapidement l'équipement d'une voiture genre 304 pour bien connaître le plus tôt possible les nécessités d'encombrement minimum. Cette étude d'une 304 adaptée à la propulsion électrique sera donc menée dès 1972 et 1973 avec pour but l'équipement en pile à méthanol, et les avant-projets de transmissions seront étudiés dès 1971. Alstom donne son accord de principe sur ce programme. Éventuellement il sera examiné vers septembre 1972 s'il y a lieu ou non d'équiper la 304 d'une pile à hydrazine pour commencer les essais. » Source : lettre de H. P. Huellan à Francis Rougé, le 5 avril 1971, p. 2.

l'accord avec Esso »⁸⁴³. Ce qui fait d'ailleurs dire au directeur de la division « traction » chez Alsthom Roger Chalvon que son entreprise « a misé sur le bon cheval »⁸⁴⁴. Au cours des mois suivants, Paul Domenjoud, rattaché aux laboratoires de Massy, se rend régulièrement aux États-Unis pour engager les négociations sur le fond et la forme. En retour, Alsthom invite plusieurs fois en France le personnel technique et les membres de la direction générale d'Exxon pour les convaincre de s'engager. Ce qui ne va pas sans certaines difficultés, comme s'en rappelle Bogdan Broniewski :

« Pour [les membres de la direction générale d'Exxon], la visite des laboratoires où on pouvait voir non seulement les chercheurs en blouse blanche mais aussi les ouvriers assurant la production avec des machines modernes fut un argument très favorable. Mais rien ne pouvait se décider sans une position sans équivoque de tous les responsables techniques concernés d'Exxon. Or, si la plupart étaient favorables, voir enthousiastes, il y avait aussi des négatifs, des critiques : ce n'était pas inventé chez nous, on ne peut pas compter sur le sérieux des Français, etc. Ils trouvaient toujours une objection. Pour convertir les incrédules, il n'y avait qu'un moyen : leur faire rencontrer Bernard. Dans tous les cas, ils sortaient enthousiasmés : Bernard fit une fois de plus des miracles. Pour couronner le tout, le président Glasser, qui nous avait toujours soutenus, organisait des réceptions dans les meilleurs restaurants parisiens, ce qui était très apprécié par les patrons d'Exxon. »⁸⁴⁵

La DGRST reste aussi sceptique⁸⁴⁶ et n'est pas loin de retirer son soutien malgré le premier avis qu'elle avait émis. En atteste une lettre que Francis Rougé adresse à Roger Chalvon le 24 juillet 1970 :

« Les indications que vous nous avez données hier concernant l'attitude de la DGRST en matière d'aide aux études de transmission et voitures électriques sont extrêmement préoccupantes. Elles sont de nature, tout autant que l'affaire Esso (en cas d'échec), à faire

⁸⁴³ Archives Peugeot, note manuscrite, le 9 juillet 1970.

⁸⁴⁴ Archives Peugeot, note manuscrite, le 9 juillet 1970.

⁸⁴⁵ BRONIEWSKI, Bogdan, *op. cit.*, 2014, p. 93.

⁸⁴⁶ Loïk Le Floch-Prigent témoigne du scepticisme qui règne à la DGRST : « Alsthom organise un voyage à l'étranger, aux États-Unis, pour voir ce que fait Exxon. Et donc on part pour voir ce que fait Exxon. [...] Et là je m'aperçois qu'ils ont mis la grosse caisse chez Exxon et qu'ils n'ont pas plus résolu le problème que nous. Je me dis qu'il y a des problèmes qui sont de mon point de vue plus importants que ceux qui sont traités. Et donc on est très loin de l'étape industrielle, on est bien dans la recherche. Et nous nous mettons à voir avec Desécures comment on va faire. Dans le même temps, je continue à financer les individus sur les accumulateurs parce que je me dis que les piles à combustible ça va être plus tard. » Source : entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

capoter nos projets. [...] cette attitude est tout aussi contraire aux déclarations de M. Ortoli à MM. Glasser et Gautier qu'à celles que m'a faites M. Aigrain. »⁸⁴⁷

Doivent aussi se régler tout un ensemble de détails entre les associés sur l'appropriation des marchés et des brevets. Un accord est finalement couché sur papier pour un budget total de 13,2 millions de francs par an à partir de 1971 et jusqu'en 1975⁸⁴⁸. Comme le note plus tard le ministère de l'Industrie, du Commerce et de l'Artisanat, ce sont surtout à cette époque « l'importance de l'enjeu et l'appui d'Esso » qui détiennent une influence prépondérante « sur l'acceptation de la demande » par la DGRST⁸⁴⁹. Les piles à combustible d'Alsthom représentent de plus pour les décideurs de la DGRST, dont Loïk Le Floch-Prigent, les seules qui détiennent un véritable avenir industriel :

« Le seul truc d'électrochimiste intelligent, c'est le truc de l'IFP. Mais il est en dehors des clous industriels. [...] L'IFP, il n'y a absolument aucune chance que ça marche un jour. Du point de vue scientifique, je dis : "si jamais il y a un mec qui peut réussir, c'est Warszawski." Mais encore faut-il qu'il ne mente pas. Donc on le surveille. Mais les autres ne sont pas dans les clous de mon point de vue d'industriel. C'est-à-dire que ça peut marcher scientifiquement mais je ne vois pas comment on industrialise. Ce qui m'intéresse moi à chaque fois c'est de regarder comment on va faire la chaîne de production, la ligne de production. Supposons que... Où est la ligne de production ? Dans le cas de l'IFP, il n'y a pas de ligne de production. L'essentiel de ma vie, sur l'électrochimie, ça a été ça : où est la ligne de production ? Comment la mettre en œuvre ? »⁸⁵⁰

L'annonce de cette nouvelle renforce peut-être la confiance des investisseurs potentiels puisque la Marine nationale et le CEMA (Centre d'études marines avancées) passent dans la foulée des contrats avec Alsthom pour des travaux sur les applications sous-marines de ses piles à hydrazine et eau oxygénée de 50 kW, dont de premiers essais en mer s'étaient révélés concluants⁸⁵¹. Cette situation d'apparence positive cache toutefois un malaise interne. À la Direction des recherches, le personnel est en effet beaucoup moins enthousiaste que sa hiérarchie à l'idée d'un rattachement à Esso. Même si le partage des études reste favorable à l'entreprise française (80 % pour Alsthom, 20 % pour Esso),

⁸⁴⁷ Lettre de Francis Rougé à Roger Chalvon, le 24 juillet 1970.

⁸⁴⁸ Répartis de la manière suivante : DGRST : 2,2 millions de francs ; Alsthom : 1,1 million de francs ; Peugeot : 1,1 million de francs ; Esso : 8,8 millions de francs.

⁸⁴⁹ Ministère de l'Industrie, du Commerce et de l'Artisanat, « Note pour ET. Pile à combustible Alsthom », le 15 juin 1977, p. 1.

⁸⁵⁰ Entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

⁸⁵¹ Alsthom-Massy, Comité d'établissement, « Compte rendu de la réunion plénière », le 29 octobre 1970, p. 9.

le département des piles à combustible – qui emploie toujours la moitié des effectifs scientifiques – déplore de vivre depuis trop longtemps sur des montages financiers caduques. L'expression « Esso ou mourir », que l'on emploie souvent dans les couloirs à Massy, pose ainsi des mots sur un sentiment de précarité venu seulement remplacer l'idée précédente selon laquelle Alsthom menait toute sa recherche « aux frais des contribuables ». D'autre part, des préoccupations s'élèvent quant aux objectifs réels du nouveau partenaire américain : ne va-t-il pas, à un moment ou à un autre, déployer « une stratégie de recherches en fonction des intérêts exclusifs des pétroliers qui détiennent “les cordons de la bourse” » ? Et n'y a-t-il pas à craindre dans ce « mariage » une perte de liberté et un « freinage des filières à applications particulières (hydrogène – eau oxygénée ; hydrazine – air) ou à application industrielle plus probable comme l'accumulation zinc – air »⁸⁵² ? Alsthom semble malgré tout en bonne posture en disposant encore du soutien de la DGRST et de la DIMELEC (Direction de la construction mécanique et électrique et de l'électronique) qui gère désormais ses dossiers de demandes d'aide au développement en tant qu'administration de tutelle⁸⁵³. La Délégation ne souhaite cependant pas réitérer les erreurs du passé et cherche à contrôler régulièrement le bien-fondé de son action. A l'occasion d'une mission à New-York en avril 1971 – officiellement pour le compte du Service de la recherche de la SNCF –, Hubert Autruffe profite notamment de sa présence pour visiter les installations d'Esso à Linden afin de « compléter ses informations en ce qui concerne leurs travaux sur les piles à combustible »⁸⁵⁴ et d'en faire un compte-rendu à Pierre Aigrain.

Si la DGRST se montre aussi attentive à la mise en œuvre de ce partenariat international, c'est que son appui à Alsthom est bien une exception ; le thème des piles à combustible est officiellement « mis en veilleuse »⁸⁵⁵. Ses nouvelles orientations en matière d'électrotechnique ne coïncident plus du tout avec la vision qu'en avait auparavant sa direction. À ce titre, le passage de Jean-Claude Sohm au sein du comité « Électrotechnique nouvelle » a eu un effet certain. Et Pierre Aigrain lui-même commence à se lasser d'un système général de gestion qui privilégie les « recherches “de” contrats » plutôt que les « recherches “sur” contrats »⁸⁵⁶. Le domaine reste bien sûr d'un intérêt capital pour le pays :

⁸⁵² Alsthom-Massy, Comité d'établissement, « Compte rendu de la réunion plénière », le 21 janvier 1971, p. 7.

⁸⁵³ Alsthom-Massy, Comité d'établissement, « Compte rendu de la réunion plénière », le 28 septembre 1971, p. 11.

⁸⁵⁴ Lettre de Michel Desécures à Bogdan Broniewski, le 19 février 1971.

⁸⁵⁵ Ministère du Développement industriel et scientifique, DGRST, Service de l'information et des relations extérieures, « Les actions concertées de la DGRST », vers 1971, p. 9.

⁸⁵⁶ Sur son rôle à la DGRST à cette période, Pierre Aigrain témoigne : « Je dois dire que j'ai trouvé à la DGRST, un organisme qui avait lui-aussi une certaine tendance à se rigidifier bien qu'il ne fasse pas de gestion directe (de labos). Il y avait eu des évolutions que j'ai un peu regrettées. Je crois que le système des actions concertées s'est révélé bon, mais elles s'étaient multipliées en nombre. Le résultat de cette évolution, est que le montant de chaque contrat était devenu ridicule. En francs constants, les contrats étaient trois fois plus faibles qu'ils l'étaient dix ans auparavant. Comme le travail de gestion par les bénéficiaires du contrat est indépendant de son volume, on arrivait à ce résultat que les gens faisaient plus que de la recherche "de" contrats que de la recherche "sur" contrat ! Le système était bon dans son principe, mais il devait être corrigé progressivement. J'ai réduit d'un facteur deux le nombre d'actions concertées et j'ai augmenté le volume des contrats d'à peu près le même facteur. Certaines actions concertées ont été arrêtées, comme il est normal quand on

l'incidence de l'électrotechnique sur l'ensemble de l'économie et la solidité de la position des entreprises françaises concernées sur les marchés intérieur et extérieur sont autant de raisons de continuer à veiller à ce qu'un retard ne soit pas pris dans l'introduction de méthodes de travail ou de produits nouveaux. Mais la formation d'une politique d'intervention claire n'est pas aisée, tout du moins en ce qui concerne les recherches avancées à long terme et les idées originales : « aux époques d'espoir irraisonné » a succédé un temps « de profond découragement », admet Michel Desécures au Délégué général le 29 novembre 1971 : « la multiplicité des voies possibles, la lourdeur des efforts financiers sur une grande période de temps, si l'on veut explorer l'une quelconque de ces filières, ainsi que certaines faiblesses de la position universitaire, rendent encore plus difficile l'élaboration et la poursuite d'un programme de travail cohérent et rationnel »⁸⁵⁷. Dans ces circonstances, la DGRST se lance promptement dans la réalisation d'une grande enquête visant à faire un état des lieux de la situation. Elle charge ainsi René Bonnefille, du LCIE, le polytechnicien et membre de la Direction des études et recherches de l'EDF Jacques Cladé, Jean-Claude Sabonnadière, de la Faculté des sciences de Grenoble, Guy Grellet, de l'École centrale de Lyon, et Hubert Autruffe de remettre un rapport sur le potentiel de la recherche universitaire et de réfléchir aux suites à donner. Maurice Magnien, qui vient de reprendre la présidence de la commission « Electrochimie », envoie également une série de lettres à un ensemble de personnalités issues du milieu industriel pour qu'ils lui fassent part de leurs préoccupations et de leurs suggestions.

Les propositions qui ressortent de cette investigation sont multiples mais unanimes : aucune ne concerne les piles à combustible. Il faut par ailleurs noter que la commission, qui fait le tour des laboratoires français concernés par l'électrotechnique dans le cadre de son enquête, ne prend pas la peine de visiter les installations des électrochimistes. Ni le Laboratoire d'électrolyse de Maurice Bonnemay, ni aucun autre, ne figurent dans la liste⁸⁵⁸. Leurs dix années d'études précédentes et leurs compétences acquises sur cette période sont même complètement décrédibilisées en conclusion du rapport lorsque Michel Desécures mentionne les raisons pour lesquelles l'électrochimie n'y apparaît

constate que ça ne marche pas. » Source : Archives orales du CNRS, « Intervention de Pierre Aigrain à l'Université de Paris 1 », le 27 avril 1987.

⁸⁵⁷ DGRST, « Note à l'intention de Monsieur le Délégué général. Orientations en matière d'Électrotechnique », le 29 novembre 1971, p. 1.

⁸⁵⁸ La liste des laboratoires visités : Laboratoire de Génie électrique de Paris (Blanc-Lapierre, Bonnefille), Laboratoire d'électrotechnique de l'Institut national polytechnique de Grenoble (Pillet), Laboratoire d'électrotechnique de l'Institut national polytechnique de Nancy (Gudefin), Laboratoire d'essais électriques de l'Institut national polytechnique de Grenoble (Brissonneau), Laboratoire de Génie électrique de Toulouse (Lacoste), Laboratoire d'électrostatique et de physique du métal de Grenoble (Felici), Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique industrielle de Toulouse (Marty), Laboratoire d'électronique des solides de l'Université de Montpellier (Caillon), Laboratoire d'électrotechnique de l'Université de Lille (Panet), Laboratoire de l'École des hautes études industrielles de Lille (Villemin), Laboratoire d'électrotechnique de l'École centrale de Lyon (Sabonnadière). Source : DGRST, « Recherches universitaires en matière d'électrotechnique industrielle », mars 1972, p. 2.

nulle part : « la faiblesse de la position française en matière de recherche universitaire est à cet égard caractérisée, et ce ne sont pas les quelques actions ponctuelles que l'on a pu lancer en 1970 qui auront pu sauver la situation... Tant qu'on ne disposera pas d'un bon laboratoire pilote, susceptible de former des chercheurs de haut niveau et d'essaimer pour créer d'autres centres, tous les efforts seront vains »⁸⁵⁹. Un nouveau collectif de pensée est venu remplacer l'ancien dans une action concertée désignée sous le titre « Électrotechnique générale ». Et celui-ci affiche plutôt une volonté claire pour des progrès rapides dans d'autres secteurs⁸⁶⁰.

On voit comment la logique de la connaissance scientifique est ici indissociable des contextes sociaux situés au sein desquels elle se développe. C'est tout le sens des mots de Michel Foucault⁸⁶¹ lorsqu'il écrit qu'il n'y a pas de savoir « qui ne suppose et ne constitue en même temps des relations de pouvoir »⁸⁶² : chaque groupe de chercheurs dispose d'un potentiel de reconnaissance et d'action plus ou moins grand en fonction de sa place dans le réseau. Ainsi, c'est la recherche sur les machines (élaboration de moyens de calcul et d'identification des machines et des systèmes électrotechniques) et les matériaux (plus spécifiquement les tôles magnétiques qui « conditionnent l'avenir des machines tournantes, des transformateurs » et les matériaux isolants solides et liquides « dont dépend également tout le domaine de l'électrotechnique »⁸⁶³) qui semble retenir toute l'attention. Mais sur ce dernier point, ce sont désormais à des équipes multidisciplinaires de s'atteler à la tâche, tout en effectuant un rapprochement avec la physique du solide : « les physiciens du solide ont, jusqu'à présent, essentiellement travaillé pour les électroniciens (spécialistes du magnétisme, de la cristallographie) ; il convient précisément d'utiliser leurs compétences au profit des électrotechniciens »⁸⁶⁴, annonce-t-on. C'est un véritable dynamitage en règle qui s'opère à l'encontre du courant de l'électrochimie porté par Maurice Bonnemay, auquel on reproche d'avoir été mal fondé. Cette critique à charge s'exerçait, rappelons-le, depuis longtemps : alors que la situation de la chimie physique à la fin des

⁸⁵⁹ DGRST, « Note à l'intention de Monsieur le Délégué général. Orientations en matière d'Électrotechnique », le 29 novembre 1971, p. 5.

⁸⁶⁰ La DGRST commente la création de ce nouveau comité dans les pages du *Progrès scientifique* : « Il paraît indispensable également de mener un certain nombre d'actions, dont chacune d'elles serait à plus courte portée, moins ambitieuse et moins onéreuse, et portant sur des domaines plus classiques de l'électrotechnique. Ainsi pourra-t-on espérer introduire dans ce secteur un esprit d'innovation et une collaboration plus étroite entre l'Université et l'Industrie, stimuler et encourager les centres universitaires compétents et aider les industriels à garder leur place dans la compétition internationale. » Source : *Le Progrès scientifique*, n°153-154, mai-juin 1972, pp. 82-83.

⁸⁶¹ Sur la relation entre la notion de réseau et la pensée de Michel Foucault, voir : BOCHER, Héloïse, et al., « Réseaux et pouvoir. Logiques de l'informel », in *Hypothèses*, Vol. 1, n°14, 2011, p. 235-246.

⁸⁶² FOUCAULT, Michel, *Surveiller et punir*, Gallimard, 2003 (1975), p. 36.

⁸⁶³ DGRST, « Note à l'intention de Monsieur le Délégué général. Orientations en matière d'Électrotechnique », le 29 novembre 1971, p. 3.

⁸⁶⁴ DGRST, « Note à l'intention de Monsieur le Délégué général. Orientations en matière d'Électrotechnique », le 29 novembre 1971, p. 5.

années cinquante était « médiocre du point de vue théorique »⁸⁶⁵, Jean Germain et Jean-Claude Sohm désapprouvaient déjà le trop grand écart existant entre l'approche systémique du directeur du Laboratoire d'électrolyse et l'étude fondamentale des matériaux. À partir de 1966, cette controverse l'avait même contraint à un effort de conciliation important. Mais il continuait d'estimer qu'il fallait miser sur la conception technologique et la collaboration industrielle, avant toute chose, pour produire des résultats significatifs⁸⁶⁶.

En 1970 néanmoins, la trop grande spécialisation de Bellevue dans les piles à combustible, « l'absence de renouvellement de ses thèmes de recherche » et « la répétition de travaux déjà publiés dans la littérature scientifique » fait que la direction du CNRS songe purement et simplement à sa « dissolution »⁸⁶⁷. Résilients face à ce tournant⁸⁶⁸, Maurice Bonnemay et Eugène Levart entament donc lentement une reconversion de l'institution. Ce processus se donne particulièrement à voir dans les rapports d'activité du laboratoire pour la période comprise entre octobre 1971 et octobre 1973. Alors que Guy Bronoël soutient sa thèse de doctorat⁸⁶⁹, le temps est à « la transition » et à « l'évolution »⁸⁷⁰. Cette réorganisation se traduit par une refondation de plusieurs départements, la constitution d'un groupe d'études théoriques en relation avec des spécialistes extérieurs et l'assignation de champs d'étude pour cinq ans au moins. Ceux-ci concernent plus particulièrement le comportement électrochimique des métaux de transition et de certains de leurs dérivés, l'étude ellipsométrique des composés superficiels formés à l'électrode, le rôle des états superficiels dans la réaction de l'hydrogène sur les métaux de transition, la structure des interfaces électrode/électrolyte, les effets de structure des électrodes sur les processus interfaciaux, l'étude électrochimique des semi-conducteurs organiques, l'électrocatalyse, les études cinétiques par RPE (résonance paramagnétique électronique) et les nouveaux générateurs électrochimiques⁸⁷¹. Les recherches rentrent en fait dans le rang et un basculement épistémique a lieu, se souvient Guy Bronoël : « on avait pris une espèce de

⁸⁶⁵ GUERON, Jules, MAGAT, Michel, « A History of Physical Chemistry in France », in *Annual Review of Physical Chemistry*, Vol. 22, 1971, p. 12.

⁸⁶⁶ Dans une lettre adressée au directeur du CNAM Paul Guérin, Maurice Bonnemay écrit : « Vous savez que j'ai toujours rencontré une grande difficulté à développer les piles que nos travaux de laboratoire nous amenaient à découvrir et que cela est dû au manque de collaboration industrielle sur le plan technologique. » Source : lettre de Maurice Bonnemay à Paul Guérin, le 17 février 1969, p. 1.

⁸⁶⁷ Correspondance épistolaire entretenue avec Guy Bronoël, décembre 2016.

⁸⁶⁸ Maurice Bonnemay explique notamment le 13 novembre 1970 face au comité de direction du Laboratoire d'électrolyse et du Centre d'électrophorèse : « Après 10 ans pendant lesquels elle a donné au laboratoire des contrats pour des travaux fondamentaux sur les générateurs électrochimiques, la DGRST estime en être arrivée au stade du développement. Tous les contrats de recherche fondamentale ont été supprimés. » Source : Comité de direction du Laboratoire d'électrolyse et du Centre d'électrophorèse du CNRS, « Procès-verbal », le 13 novembre 1970, p. 5.

⁸⁶⁹ BRONOËL, Guy, *Étude de la cinétique des phénomènes d'adsorption et de transfert de charges par perturbation de la structure cristalline des électrodes*, thèse de doctorat ès Sciences, décembre 1971.

⁸⁷⁰ CNRS, Laboratoires de Bellevue, « Rapport succinct d'activité », octobre 1971-octobre 1972, p. 1.

⁸⁷¹ CNRS, Laboratoires de Bellevue, « Rapport succinct d'activité », octobre 1972-octobre 1973, p. 1.

virage qui consistait à passer des histoires de piles à combustible et de leurs applications à la compréhension des phénomènes d'électrocatalyse, y compris sur les histoires de théorie de Levich sur les interactions à l'échelle moléculaire. Donc c'était quand même relativement éloigné. On était revenu sur des bases fondamentales »⁸⁷².

Les études sur l'électrocatalyse active au niveau des électrodes semi-conductrices, notamment, se reforment autour de la physique du solide : si des applications dans les piles à combustible sont encore envisagées dans le cadre de collaborations avec l'IFP, le but de l'équipe est plus certainement d'établir « les données fondamentales concernant les processus de réduction de l'oxygène sur composés chélates », qui présentent un intérêt « aussi bien pour les physiciens du solide que pour les biologistes »⁸⁷³. De ce point de vue, les travaux visent à instaurer « des corrélations entre les propriétés structurales et électrochimiques », tout en tentant de résoudre les problèmes posés par l'application « des théories du champ cristallin aux systèmes étudiés »⁸⁷⁴. Il en va de même pour les recherches sur les états superficiels mis en jeu dans la réaction de l'hydrogène sur les métaux de transition. L'interprétation d'une étude expérimentale comparative de l'oxydation de l'hydrogène sur des électrodes de noir de platine et de noir de palladium est ainsi faite en partenariat avec les équipes du Laboratoire de physique des solides de Jacques Friedel et du Laboratoire de physique des solides de Lille de Pierre Lengart. Le programme démontre clairement le glissement théorique et méthodologique qui s'opère à cette période dans le Laboratoire d'électrolyse :

« [L'interprétation] des phénomènes observés relie l'existence bien établie de deux formes superficielles d'hydrogène à la nature de l'écran électronique du proton au sein du palladium et à sa surface au contact de la solution. On cherche à mettre en évidence deux types d'écran en fonction de la concentration superficielle en atomes d'hydrogène auxquels correspondent deux énergies différentes de désorption électrochimique. On étudie dans quelle mesure on peut distinguer les deux formes d'hydrogène quant à leur structure électronique pour expliquer leur comportement électrochimique. »⁸⁷⁵

Maurice Bonnemay précise notamment cet état de fait à l'occasion des réunions du comité directeur de son institution : « actuellement, nous concentrons nos efforts sur la définition des modèles du complexe électrode-espèce électroactive. [...] Nous abordons le problème par les méthodes de la

⁸⁷² Entretien avec Guy Bronoël, Meudon, octobre 2016.

⁸⁷³ CNRS, Laboratoires de Bellevue, « Rapport succinct d'activité », octobre 1971-octobre 1972, p. 52.

⁸⁷⁴ CNRS, Laboratoires de Bellevue, « Rapport succinct d'activité », octobre 1971-octobre 1972, p. 52.

⁸⁷⁵ CNRS, Laboratoires de Bellevue, « Rapport succinct d'activité », octobre 1972-octobre 1973, p. 57.

physique quantique »⁸⁷⁶. Dans cette optique, il en appelle aux « conseils de personnes qui s'occupent de physico-chimie des surfaces » et organise des séminaires présidés par Jacques Friedel en physique des solides et le professeur à la Faculté des sciences de Marseille André Julg en chimie quantique, pour débattre des « questions indispensables à la poursuite du travail théorique »⁸⁷⁷. Un changement radical de « philosophie » se met même en place en cinétique pour combler la « lacune » qui fait que « les propriétés électrochimiques des électrodes n'ont été que peu étudiées en tenant compte des facteurs qui définissent l'état solide de l'électrode »⁸⁷⁸. Plus généralement, ce sont deux voies qui sont dégagées. Au niveau théorique, il s'agit maintenant « de définir la manière de relier les propriétés électrochimiques aux propriétés électroniques massiques et superficielles des électrodes dans les relations qui expriment la densité de courant en fonction de la polarisation » à l'aide d'une méthode « quanta-statistique » et en la complétant « de manière à introduire les facteurs décrivant l'interphase électrode/solution ». Au niveau expérimental, le travail est double : « tester les résultats théoriques au fur et à mesure de leur obtention » et « rechercher des méthodes nouvelles permettant de rassembler les données manquantes qui caractérisent essentiellement la région interphase. »⁸⁷⁹ Enfin, preuve qu'une page se tourne, il est à noter que l'étude des nouveaux générateurs électrochimiques au sein du laboratoire fait la part belle non plus maintenant aux piles à combustible mais aux accumulateurs⁸⁸⁰. La collaboration avec le Centre de recherche physico-chimique des surfaces solides de Mulhouse donne par exemple lieu à une invention brevetée relative au traitement thermo-chimique des carbones d'une cellule à air capable de subir des polarisations anodiques répétées, particulièrement utile dans le processus de « fabrication des cathodes pour piles réversibles air-zinc »⁸⁸¹.

La situation est également contrastée du côté de l'IFP, où l'on digère mal le fait qu'Alsthom, perçu depuis quelques temps comme un « ennemi politique »⁸⁸², soit le seul organisme encore soutenu par

⁸⁷⁶ Comité de direction du Laboratoire d'électrolyse et du Service d'électrophorèse, « Procès-verbal », le 12 novembre 1971, p. 2.

⁸⁷⁷ Comité de direction du Laboratoire d'électrolyse et du Service d'électrophorèse, « Procès-verbal », le 12 novembre 1971, p. 2.

⁸⁷⁸ Comité de direction du Laboratoire d'électrolyse et du Service d'électrophorèse, « Procès-verbal », le 14 avril 1972, p. 11.

⁸⁷⁹ Comité de direction du Laboratoire d'électrolyse et du Service d'électrophorèse, « Procès-verbal », le 14 avril 1972, p. 11.

⁸⁸⁰ Maurice Bonnemay, Guy Bronoël et l'ingénieur du CNAM et du CNRS Joël Sarradin ont l'occasion de s'exprimer sur la caractérisation de la pile air-zinc dans les pages de *Sciences et techniques* : « Bien que la pile Air-Zinc [...] soit souvent appelée pile à combustible, nous ne la comprendrons pas dans cette catégorie, car elle n'assure pas une stabilisation chimique de l'électrolyte (celui-ci est modifié irréversiblement) et surtout le combustible utilisé se caractérise par un transfert dépourvu d'acte électrocatalytique. » Source : *Sciences et techniques*, n°21, 15 mars 1975, p. 16.

⁸⁸¹ CNRS, Laboratoires de Bellevue, « Rapport succinct d'activité », octobre 1972-octobre 1973, p. 63.

⁸⁸² Jacques Chéron résume ainsi comment les équipes de l'IFP reçoivent la nouvelle de l'attribution des financements à Alsthom après les essais de piles au LCIE : « Alsthom, on n'a jamais très bien su ce qu'ils ont fait. On ne les a jamais vus ou presque pendant les essais. Et officiellement, ce sont eux qui ont gagné l'argent. Ça nous a écœuré. On a bien vu qu'il

la DGRST. À cette époque, sa Division Applications achève ses principaux contrats avec le Carbone Lorraine, la CIPEL et Ugine Carbone, ayant abouti à la mise au point d'une pile hydrogène-air d'une puissance de 100-200 W et dotée d'une grande autonomie de fonctionnement (de 5000 à 10 000 heures) pour alimenter en électricité les régions isolées ou difficiles d'accès⁸⁸³, d'un générateur d'hydrogène à partir de méthanol et d'une pile compacte (5 kg) hydrogène-air d'une puissance s'étalant de 500 W à 2 kW, déjà présentée au LCIE en 1969 et destinée à la traction utilitaire (véhicules urbains, de circulation intérieure ou de livraison)⁸⁸⁴. Le développement d'une pile hydrogène-air de 70 W pour applications terrestres est par ailleurs toujours en cours dans le cadre d'un contrat passé avec le Service technique de la navigation aérienne⁸⁸⁵. Si l'Institut ne modifie pas, comme le Laboratoire d'électrolyse, la logique de ses pratiques instrumentales dans l'approche de ses études⁸⁸⁶, il reconnaît néanmoins qu'au vu des résultats expérimentaux et des connaissances acquises dans le domaine de la catalyse, « l'industrialisation des piles consommant directement des combustibles liquides bon marché (hydrocarbures ou même méthanol) semble encore lointaine » et que « seules les piles directes à hydrogène ou à hydrazine présentent les qualités techniques suffisantes pour franchir cette étape décisive »⁸⁸⁷. Les objectifs de ses recherches sont donc fixés pour les années à venir : « le prix du combustible étant l'élément déterminant du bilan d'exploitation », l'hydrazine, « dont le prix restreint l'emploi à quelques usages spécifiques », est

y avait des contacts entre Alstom et les pouvoirs publics qui n'étaient pas que techniques. C'était un peu désespérant. » Source : Entretien avec Jacques Chéron, Paris, février 2018.

⁸⁸³ « Cette pile est constituée par l'association en série de 6 batteries électrochimiques contenant chacune 16 éléments unitaires de l'ordre de 200 cm². Les électrodes employées ont une épaisseur d'environ 5/10 mm et fonctionnent pratiquement sans surpression tant à la cathode qu'à l'anode. L'électrode à air contient un catalyseur au charbon actif argenté (moins de 1 mg/cm² d'argent), l'électrode à hydrogène contient un catalyseur à 0,9 mg/cm² de métaux précieux ; toutefois, on peut concevoir cette dernière avec un catalyseur au nickel qui permettrait d'obtenir les mêmes performances moyennant certaines précautions lors de la première mise en fonctionnement. Pour réduire au maximum les contraintes de la maintenance, les accessoires tournants ont été supprimés : l'alimentation en air s'effectue par convection naturelle ; la circulation des fluides, électrolyte et solution d'épuration d'air est assurée par des exhausteurs alimentés par l'hydrogène consommé. La régulation de la température est réalisée par deux vannes thermostatiques qui permettent la circulation de l'électrolyte par thermosiphon dans un échangeur. L'eau, seul produit de combustion de la pile, est éliminée par l'air en excès. » Source : IFP, Division Applications, « Les piles à combustibles », juin 1971, pp. 8-9. Yves Bréelle, Jacques Chéron, Alain Grehier et Raymond Vic (de la CIPEL) présenteront un exposé sur ce modèle de pile à la *7th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference* à San Diego le 26 septembre 1972.

⁸⁸⁴ Pour la pile de 500 W, les électrodes sont dotées d'une structure tricouche : une structure métallique frittée à base de nickel, poreuse et conductrice, une structure catalytique poreuse et une structure hydrofuge poreuse. L'électrode à air possède du charbon actif argenté comme catalyseur tandis que l'électrode à hydrogène se présente sous deux versions : l'une qui contient de l'ordre de 0,9 mg/cm² de catalyseur précieux dans la proportion de 1/3 de platine et 2/3 de palladium. L'autre qui évite tout catalyseur précieux. Source : Yves Bréelle, « Pile hydrogène-air de 500 watts alimentée à partir de combustible liquide », communication faite à la Journée d'étude des piles à combustible du Centre de perfectionnement technique, p. 2.

⁸⁸⁵ CIPEL-IFP-LCL-UC, « Projet de pile hydrogène-air de 70 watts pour applications terrestres », février 1970, p. 1.

⁸⁸⁶ Jacques Chéron reconnaît que l'IFP « a fait beaucoup de développements technologiques ». Source : Entretien avec Jacques Chéron, Paris, février 2018.

⁸⁸⁷ IFP, Division Applications, « Les piles à combustibles », juin 1971, p. 7.

abandonnée au profit de l'hydrogène, obtenu indirectement ou directement « sous forme comprimée ou cryogénique, à un prix abordable »⁸⁸⁸.

C'est encore l'avis soutenu par Daniel Bernardo Lucesoli, de l'Université nationale de Buenos Aires. Le 26 janvier 1971, ce dernier présente une thèse de docteur-ingénieur, financée par la DGRST, effectuée à l'IFP et dirigée par Paul Laffitte de la Faculté des sciences de Paris avec Marius Chemla, Maurice Bonnemay et Odile Bloch comme rapporteurs. Si « l'utilisation [des hydrocarbures liquides et du méthanol] est le but recherché par la plupart des laboratoires », confirme-t-il en première page de son document, « il faut reconnaître que leur introduction directement dans une pile de “basse température” (température inférieure à 100°C) pose des problèmes qui sont encore loin d'être résolus ». La solution réside ainsi pour lui dans « leur transformation préalable en hydrogène dans un réacteur qui sera ensuite couplé à une pile à hydrogène-air »⁸⁸⁹.

Yves Bréelle multiplie alors les activités de « transcodage »⁸⁹⁰ et les interventions pour vanter les mérites de ses appareils et passer de nouveaux accords. Lors d'une communication à la Journée d'études des piles à combustible du Centre de perfectionnement technique le 14 janvier 1970 par exemple, il évoque les secteurs d'action possibles de la pile hydrogène-air de 500 W : « l'océanographie », « la recherche pétrolière off-shore », « la transmission aérospatiale », « la civilisation des loisirs (caravaning, bateaux de plaisance) » et « la propagation de la culture dans les pays en voie de développement (alphabétisation par télévision) »⁸⁹¹. On voit comment la perte du parrainage de la DGRST transforme une fois de plus les cadres d'interprétation et contribue à la redéfinition de l'ontologie des piles à combustible. Il n'est en effet plus question de prendre des engagements sur des horizons incertains mais de conquérir des marchés de niche. Dans les pages du *Journal de la Société des ingénieurs de l'automobile*, Yves Bréelle en arrive aussi à une conclusion mesurée au sujet du développement des piles à combustible à destination de la traction électrique : celui-ci ne pourra se faire en premier lieu qu'au sein d'applications « spéciales », alors même que « la compétition est ouverte entre cette nouvelle source d'énergie et les nouveaux accumulateurs dont les progrès actuels sont importants »⁸⁹². Une conviction qu'il réitère dans le livre *Principes, technologie,*

⁸⁸⁸ IFP, Division Applications, « Les piles à combustibles », juin 1971, p. 7.

⁸⁸⁹ LUCESOLI, Daniel Bernardo, *Contribution à l'étude et la mise au point d'électrodes pour piles hydrogène-air*, thèse de docteur-ingénieur dirigée par Pierre Laffitte et présentée le 26 janvier 1971 à la Faculté des sciences de l'Université de Paris, p. 1.

⁸⁹⁰ LASCOURMES, Pierre, *L'éco-pouvoir : environnements et politiques*, La découverte, 1994, p. 272.

⁸⁹¹ Yves Bréelle, « Pile hydrogène-air de 500 watts alimentée à partir de combustible liquide », communication faite à la Journée d'étude des piles à combustible du Centre de perfectionnement technique, p. 7.

⁸⁹² *Ingénieurs de l'automobile (Journal de la SIA)*, 45^{ème} année, Tome XLIV, n°5, mai 1971, pp. 278-279.

applications des piles à combustible publié aux éditions Technip⁸⁹³ et dans l'article « Piles et accumulateurs » qu'il signe dans l'*Encyclopédie Universalis*⁸⁹⁴ en 1972.

Bien que la presse se fasse l'écho d'un passage éventuel à « une civilisation de l'hydrogène »⁸⁹⁵, cette stratégie de publicisation ne porte pas vraiment ses fruits. Le seul contrat qu'obtient l'IFP – en collaboration avec la CGE qui avait décidé de continuer ses activités « à moindre frais »⁸⁹⁶ – est avec la SEFT (Section d'étude et fabrication des télécommunications). Celle-ci lui commande un reformeur à méthanol de 500 l/h⁸⁹⁷ et une pile hydrogène-air de 500 W sous 28 volts ou 1,5 kW sous 10 à 15 volts, pesant 55 kg dont 15 kg d'électronique et régulation⁸⁹⁸, devant servir pour l'équipement énergétique de stations isolées. Un modèle qui sera plus tard rendu plus robuste pour correspondre aux exigences d'un déploiement en OPEX (opérations extérieures), grâce à des tests de froid à moins 20 degrés et de résistance aux chocs de parachutage. Cet intérêt résurgent de la Défense pour les piles

⁸⁹³ Dans ce livre à plusieurs mains, Yves Bréelle, Odile Bloch, Paul Degobert et Michel Prigent écrivent : « [...] la comparaison des caractéristiques des piles et des moteurs thermiques [...] ne laisse que peu d'espoir pour leur utilisation en traction au cours des prochaines années, ceci tant que les poids, encombrement et prix de revient n'auront rejoint ceux des moteurs thermiques. [...] Ce sont surtout les véhicules utilitaires urbains, pour lesquels la puissance massique a une importance moindre que précédemment en traction légère, que l'on peut envisager en priorité l'emploi de ces générateurs électrochimiques. » Source : BRELLE, Yves, BLOCH, Odile, DEGOBERT, Paul, PRIGENT, Michel, *Principes, technologie, applications des piles à combustible*, Technip, 1972, pp. 96-97.

⁸⁹⁴ Yves Bréelle écrit ainsi : « Pour la traction, les qualités de silence et de non-pollution de certaines piles à combustible permettent de penser qu'elles pourront constituer le générateur de traction de l'avenir, si l'on parvient à atteindre un prix de revient suffisamment faible. Grâce à elles, on pourrait résoudre en partie le difficile problème de la pollution urbaine. La compétition est ainsi ouverte entre cette nouvelle source d'énergie et les nouveaux accumulateurs dont les progrès actuels sont également très importants. » Source : *Encyclopédie Universalis*, article « Piles et accumulateurs », 1972, p. 76.

⁸⁹⁵ C'est en particulier ce qu'évoque la une du magazine *Science & Avenir* en décembre 1972. Le reportage qui y est consacré dépeint l'hydrogène comme pouvant être utilisé dans tous les secteurs énergétiques de la société grâce à son couplage à l'énergie de la fusion nucléaire : « Il n'est pas invraisemblable qu'au siècle prochain la fusion thermonucléaire soit maîtrisée. Nous tirerions alors notre énergie de la transmutation d'hydrogène lourd ou deutérium en hélium, la réaction même qui alimente le soleil et confère sa puissance terrible à la bombe H. Les grands réacteurs à fusion seraient installés sur le bord de la mer, voire sur des îles artificielles. Ils fourniraient des milliards de calories. L'hydrogène peut s'utiliser de deux façons : par une combustion vive qui fournit des calories, par une combustion lente qui fournit du courant électrique. Des centrales électriques urbaines, des réacteurs d'avion, des fours industriels brûleraient de l'hydrogène. Des véhicules et des appareils domestiques l'utiliseraient dans des piles à combustible qui produiraient, sur place, l'électricité nécessaire. Les avantages d'un tel système seraient nombreux. On remplacerait la diversité par l'unité, la complexité par la simplicité. Quand une idée aussi séduisante n'est pas appliquée, il faut penser qu'elle se heurte à de sérieux obstacles. Ceux-ci sont de plusieurs ordres : sécurité, production, transport, utilisation. Certains sont aisément solubles, d'autres supposent des progrès technologiques considérables. Aucun, il faut le souligner, ne paraît insurmontable dans l'avenir. Il s'agit donc d'anticipation, non de science fiction. » Source : *Science & Avenir*, n°310, décembre 1972, p. 1026.

⁸⁹⁶ Lettre de l'administrateur directeur général de la CGE Raymond Pelletier à Pierre Aigrain, le 8 janvier 1970, p. 2.

⁸⁹⁷ IFP, « Historique du programme de développement de piles à combustible hydrogène-air-potasse mené par l'Institut français du pétrole », le 19 mai 1979, p. 2.

⁸⁹⁸ Les caractéristiques précises de cette pile sont les suivantes : puissance nominale continue de 1380 watts, soit 115 A sous 12 V ; puissance de pointe de 1800 watts, soit 180 A sous 10 V ; longueur de 280 mm, largeur de 208 mm, hauteur de 266 mm ; poids de 14,4 kg sans électrolyte ; couple d'électrodes : 72 éléments, soit 18 groupes en série, chaque groupe comprenant 4 éléments en parallèle ; puissance massique nominale de 95 W/kg ; puissance massique de pointe de 125 W/kg ; manœuvres de démarrage et d'arrêt automatiques (démarrage par clef de contact) ; changement des cartouches d'épuration d'air en CO₂ toutes les 500 heures (temps de chargement de la cartouche : 1 minute ; poids de la cartouche : 3 kg). Source : lettre de Bernard Salé à Jacques Gallot, le 22 janvier 1975, p. 2.

à combustible contraste avec la position qu'elle avait affichée en 1969. L'explication réside à la fois dans les possibilités d'utilisation stratégique de tels appareils et dans l'état d'avancement des accumulateurs : malgré des progrès non négligeables effectués dans certaines filières, ceux qui peuvent être réalisés sont encore lourds et encombrants – on pense aux accumulateurs au plomb – et ne représentent donc pas une technique concurrente pour les déploiements sur le terrain. Comme le souligne l'ingénieur de l'École nationale supérieure d'Électrochimie et d'électrometallurgie de Grenoble Jacques Chéron, qui travaille alors depuis 1967 au sein de l'équipe d'Yves Bréelle, ce contrat est en tout cas venu les « sauver » :

« Côté traction, on voyait bien que ce n'était pas terrible. Et c'est Michel Gastarriet de la SEFT, un ingénieur militaire [reçu à Polytechnique en 1962] que je connaissais bien puisqu'on avait fait une partie de nos études ensemble à Hoche, qui est venu nous voir à l'IFP en disant qu'il cherchait une source d'énergie non-bruyante et sans infrarouges pour le RITA (Réseau intégré des transmissions de l'Armée). Alors à l'IFP, moi j'étais un des derniers ingénieurs introduits et je n'étais pas au courant de tout. Mais c'est là que Jean-Claude Balaceanu, qui était directeur de l'IFP, a dit : “écoutez, on n'a peut-être pas beaucoup d'appui pour la traction mais si vous êtes financés à 100 % ou quasiment, d'accord”. Et c'est vrai que la SEFT nous a beaucoup soutenus et c'est pour cela qu'on a fait cette pile-là »⁸⁹⁹

L'influence des recherches sur les piles à combustible poursuivies outre-Atlantique doit jouer un rôle plus important dans la décision prise par le Gaz de France de ne pas interrompre ses travaux, auxquels la DGRST avait pourtant déjà renoncé dès 1966. Sans aide financière majeure, l'équipe de Daniel Souriau avait continué ses expérimentations sur les carbonates alcalins fondus dans son coin, aboutissant entre 1969 et 1971 à la sélection de l'aluminate de lithium comme support de rétention aux carbonates, pour lutter contre les mécanismes de corrosion, puis à l'utilisation de solutions solides oxyde de nickel-oxyde de lithium (NiO-Li₂O) en remplacement de l'argent comme matériau cathodique. Les résultats globaux obtenus étaient encourageants, puisque certaines piles faisaient montre d'une durée de vie supérieure à 4000 heures, mais leur reproductibilité restait « très mauvaise »⁹⁰⁰. Or, plusieurs initiatives sont encore en cours aux États-Unis au début des années soixante-dix. À cette date en effet, qui voit Richard Nixon prendre Francis T. Bacon dans ses bras pour lui avouer que son pays n'aurait jamais atteint la Lune sans son aide⁹⁰¹, certaines concernent

⁸⁹⁹ Entretien avec Jacques Chéron, Paris, février 2018.

⁹⁰⁰ Gaz de France, « Historique du programme de recherche sur les piles à combustible à carbonates fondus mené par le Gaz de France », le 9 mai 1979, p. 2.

⁹⁰¹ TEISSIER, Pierre, *op. cit.*, 2017, p. 80.

bien toujours les domaines spatial et militaire : Rockwell International livre à la NASA une pile à combustible alcaline d'une durée de vie de 5000 heures pour l'équipement de la navette spatiale Enterprise⁹⁰² et Pratt & Whitney fournit à la Navy des piles hydrogène-oxygène pour ses sous-marins de type DSSV (Deep Submergence Search Vehicle)⁹⁰³.

D'autres pourtant sont similaires à celles du Gaz de France et sont destinées au renforcement des réseaux publics de distribution d'électricité. Entre 1971 et 1973, Pratt & Whitney enclenche notamment la deuxième phase de son projet Target dans la filière à acide phosphorique, soutenu par trente-trois entreprises de transport et de distribution de gaz naturel et d'électricité, et met en service près de soixante unités visant à produire un total d'un million de kWh dans des bâtiments résidentiels pour un coût d'expérimentation estimé à 22 millions de dollars⁹⁰⁴. Le géant de la technologie américain se voit aussi attribuer un autre marché pour les piles de puissance dans le cadre du programme FCG 1 (Fuel Cell Generation n°1) par un groupe de neuf distributeurs d'électricité tandis que l'Electric Power Research Institute et la United Aircraft prennent en main le « Research Project 114 » traitant des piles à carbonates fondus⁹⁰⁵. Mitigé mais ne voulant pas avoir à rattraper un retard

⁹⁰² Gaz de France, « Évolution des performances des piles à combustible alcalines aux États-Unis », le 6 mai 1979, pp. 1-2.

⁹⁰³ Si la Navy avait d'abord désigné Pratt & Whitney et Allis Chalmers comme contractants dès 1969 pour la réalisation d'un système de pile à combustible destiné à être utilisé à bord de DSSV, ce projet est annulé en 1971 en raison de coupes budgétaires. Pratt & Whitney obtiennent ensuite un marché pour le DSSP (Deep Submergence Systems Project) du Naval Ship Systems Command mais celui-ci n'aboutit pas non plus. Ce qui n'empêche pas la Navy de donner un troisième contrat à Pratt & Whitney dans d'autres conditions : « The largest potential fuel cell application for the Navy was in the Deep Submergence Search Vehicle (DSSV), which was cancelled when the Navy submitted their FY 1971 budget. Both Pratt & Whitney and Allis Chalmers were awarded preliminary design contracts in Feb. 1969 for the fuel cell power system to be used in the DSSV. Subsequently, the P&W design was selected by the Navy's Deep Submergence Systems Project (DSSP) of the Naval Ship Systems Command, but the Navy then decided to eliminate funds for the DSSV. Although the DSSV was cancelled, the Navy decided to continue the development of the DSSV supporting technology, including the fuel cell power system. This decision resulted in a research and development award to P&W of \$3.1 million from Ship Systems Command in Nov. 1970 to build a fuel cell power system for general deep submergence vehicles. The contract called for P&W to design and construct a fuel cell weighing 430 lbs. That will fit into a pressure vessel displacing 6-1/2 cubic feet. The hydrogen-oxygen power plant, which P&W designated Powercel 15, will deliver 200 KW of electricity at approximately 120 volts. This 20 KW gaseous-hydrogen-oxygen fuel cell breadboard power module was developed for a protected one atmosphere operation in a deep submergence vehicle and was tested and evaluated in FY 1973. The fuel cell will be used by the Navy for studies in connection with advanced programs for prolonged ocean operations at great depths. » Source : « Military & Other Government Oceanography », Vol. II, Frost & Sullivan, Inc., September 1973, pp. 90-91.

⁹⁰⁴ Le prototype de pile PC 11-A-1 de 12,5 kW alimenté au gaz naturel fonctionne alors au sein du processus suivant : « reformage à la vapeur d'eau du gaz naturel dans un réacteur dont le rendement a pu être porté de 78 % (valeur initiale) à 85 % en améliorant la conception du réacteur ; la chaleur nécessaire à la réaction est fournie par l'hydrogène évacué du module de puissance. Conversion du CO en H₂ dans un "shift convertor". Module de puissance constitué de 4 assemblages en série comportant chacun cinquante piles élémentaires refroidies par eau ; la vapeur dégagée par le fonctionnement des piles est injectée dans le réacteur, ce qui accroît de 10 % le rendement du système. Convertisseur électrique à semi-conducteur transformant le courant continu en courant alternatif mono ou triphasé ; le rendement en triphasé est de 87 %. » Source : Gaz de France, « Historique du programme américain de développement de piles à combustible à acide phosphorique pour la production d'électricité et de chaleur sur les lieux d'utilisation », le 19 juin 1979, p. 2.

⁹⁰⁵ Gaz de France, « Historique des programmes américains de développement de piles à combustible de puissance supérieure à 1 MW », le 21 mars 1979, pp. 1-2.

trop conséquent en cas de succès et de diffusion générale de ces opérations, le Gaz de France continue donc l'exploration de sa filière en entamant des études systématiques dont le but affiché est l'amélioration de la reproductibilité de ses expériences.

7.3 L'EDF et le véhicule électrique au centre de la reconfiguration des recherches

Pour comprendre précisément comment le milieu des piles à combustible se reconfigure au sein d'un nouveau paradigme, il faut cependant décentrer le regard et analyser en parallèle le rôle joué par l'EDF dans la promotion du véhicule électrique. Ce dernier connaît en effet un regain d'intérêt fulgurant au début des années soixante-dix, au point de mobiliser non plus seulement les milieux scientifiques et industriels mais aussi les plus hautes sphères de l'État. Plusieurs « facteurs déclenchants »⁹⁰⁶ semblent être à l'origine de ce phénomène. Tout d'abord, et même si elles n'ont pas réellement abouti, les recherches sur les piles à combustible effectuées depuis les années soixante ont amené politiques et constructeurs automobiles à s'interroger sur la filière. Tandis que Renault et Peugeot avaient entrepris leurs propres expérimentations à partir de 1966 sous l'égide de la DGRST, plusieurs ministères s'étaient ainsi activés sur la question. En 1969, le service des Affaires économiques et internationales du ministère de l'Équipement et du Logement préconisait de prendre « des mesures urgentes » pour faire face aux « difficultés croissantes dues à la circulation et au stationnement en zone urbaine »⁹⁰⁷. Une étude d'une cinquantaine de pages, confiée à la Régie nationale des usines Renault, la GESPA, la BCEOM et la société ESOP débouchait même sur un plan détaillé de véhicule électrique à deux places, censé remplacer des automobiles inadaptées aux déplacements en ville, et alimenté en énergie par « une pile à moyenne température et à basse pression hydrocarbure d'une puissance de 3 kW » ou par « des accumulateurs classiques au plomb d'une puissance de 9 kW »⁹⁰⁸.

Ces choix minutieusement déduits d'un ensemble large de solutions correspondaient alors à la prise en compte de critères à la fois techniques, économiques et sociaux : s'il était fait peu cas des accumulateurs dans le texte, le thème de la pile à hydrocarbures-air à électrolyte acide y était discuté longuement. Celle-ci constituait un compromis permettant entre autres de démarrer « dans un laps de temps acceptable », d'éviter « l'emploi de grandes quantités de métaux rares et coûteux (emploi du

⁹⁰⁶ NICOLON, Alexandre, *Le véhicule électrique*, monographie réalisée dans le cadre d'une ATP – CNRS, « Recherche sur la recherche – Étude de cas d'innovation », décembre 1974, p. 4.

⁹⁰⁷ Ministère de l'Équipement et du Logement, Service des Affaires économiques et internationales, « Note de présentation de l'étude "Véhicule urbain" », le 7 mai 1969, p. 1.

⁹⁰⁸ Ministère de l'Équipement et du Logement, Service des Affaires économiques et internationales, « Note de présentation de l'étude "Véhicule urbain" », le 7 mai 1969, p. 3.

niobium comme catalyseur à la place du platine) », d'utiliser avantageusement l'air « pour des raisons de sécurité, de prix et de facilité de distribution » ou encore de se passer de l'adjonction d'épurateurs de gaz carbonique, inévitables avec un électrolyte alcalin pour empêcher « la destruction progressive des électrodes par neutralisation de l'électrolyte et précipitation de carbonate dans les pores »⁹⁰⁹. Ces ambitions sont d'ailleurs reconduites conjointement en 1970 par le ministère de l'Équipement et du Logement et par le ministère des Transports⁹¹⁰. Sur le sujet, la DGRST participe quant à elle principalement à l'accord entre Alsthom et Exxon. Mais elle finance également, par le biais de l'Aide au développement, un second projet complètement différent à partir de 1969 et à hauteur de 800 000 francs nouveaux : la voiture électronique. Initialement construit selon un procédé établi par les frères Jean et Jacques Jarret, ce véhicule utilitaire non carrossé fonctionne avec des accumulateurs au plomb et ne manque pas de susciter la curiosité de Charles de Gaulle au Salon de l'automobile cette année-là⁹¹¹. Le contrat passé avec la CEEDEVE (Compagnie européenne d'étude, de développement et d'exploitation de véhicules électroniques), rapidement créée pour fabriquer les premiers modèles en série⁹¹², est caractéristique du franchissement d'une étape pour la Délégation : il démontre la dissociation qui commence à s'opérer en son sein entre les piles à combustible et le véhicule électrique, non plus regroupés sous un objectif commun mais considérés comme deux problèmes à résoudre distinctement⁹¹³.

Dans un même temps, un deuxième facteur déclenchant est à trouver dans l'établissement des cadres de la protection publique et institutionnelle de l'environnement. Tandis que des mesures législatives conséquentes sont prises aux États-Unis au cours des années soixante-dix⁹¹⁴, l'environnement est en effet « inventé » en France d'un point de vue politique, pour reprendre l'expression consacrée de Florian Charvolin⁹¹⁵. La fondation du premier ministère de la Protection de la nature et de l'Environnement en 1971 bouscule ainsi jusqu'au lexique en la matière, comme en témoignera plus tard Robert Poujade⁹¹⁶. Une remise en cause progressive du modèle automobile traditionnel

⁹⁰⁹ Ministère de l'Équipement et du Logement, Service des Affaires économiques et internationales, « Rapport de synthèse du Véhicule urbain », mars 1969, pp. 13-14.

⁹¹⁰ Ministère de l'Équipement et du Logement, ministère des Transports, « Véhicule urbain », 1970, p. 2.

⁹¹¹ Larousse, *Journal de l'année, 1969*, p. 181.

⁹¹² Commission des communautés européennes, « La reconversion des bassins houillers en France », *Cahiers de reconversion industrielle*, n°22, juin 1972, p. 121.

⁹¹³ CHAPUIS, C., *La transformation d'un projet scientifique en affaire d'Etat. De la pile à combustible au véhicule électrique : l'Aide au développement*, CORDES, mars 1978, p. 23.

⁹¹⁴ On retiendra le vote du National Environmental Policy Act en 1970, du Clean Air Act en 1972 et du Technology Assessment Act en 1972. Le Clean Air Act prescrit notamment aux constructeurs automobiles de réduire de 90 % les émissions polluantes de leurs véhicules mis en vente à partir de 1975.

⁹¹⁵ CHARVOLIN, Florian, *L'invention de l'environnement en France. Chronique anthropologique d'une institutionnalisation*, Éditions La découverte, 2003.

⁹¹⁶ « [J'ai trouvé le mot "environnement"], si mes souvenirs sont bons, dans des journaux ou américains ou britanniques qui l'employaient, alors qu'en France, il était quasiment inconnu. Quand on l'a utilisé en 1971, les gens sont tombés des

accompagne cette montée des préoccupations environnementales. Après avoir été synonyme de modernité, élevé jusqu'au rang de « cathédrale gothique » par Roland Barthes⁹¹⁷, le véhicule à moteur thermique compile les critiques : il est bruyant, encombrant et pollue l'air des villes. De premières études sont mises en œuvre pour dresser un état des lieux de la situation. La SETEC (Société d'études techniques et économiques) réalise en particulier un « inventaire, bilan et perspectives des activités de recherche et développement en matière de transport terrestre et maritime » pour le compte de la Direction générale des Affaires industrielles, technologiques et scientifiques rattachée à la Commission des communautés européennes, dans lequel elle mentionne les possibilités induites par les « moteurs moins polluants ou “non polluants” », les « accumulateurs » et la « pile à combustible »⁹¹⁸. Mais ce vent de renouveau politique se donne surtout à voir dans la participation financière du ministère de la Protection de la nature et de l'Environnement, par l'intermédiaire du FIANE (Fonds d'intervention et d'action pour la nature et l'environnement), à un programme mené plus tard par l'EDF ayant pour but d'adapter une chaîne de traction électrique à des Renault 4L⁹¹⁹.

La dynamique interne du géant français de l'électricité constitue justement la troisième grande raison située à la genèse du succès que connaît le véhicule électrique à partir de 1970 : l'EDF inaugure son « tournant commercial » vers le tout électrique, dont l'objet est d'accentuer la politique d'offre⁹²⁰. Alors que l'entreprise vient de s'engager véritablement dans la production et la distribution de l'énergie nucléaire – cette dernière étant encore conçue « comme une sorte d'assurance contre les aléas de l'approvisionnement en pétrole »⁹²¹ dans les années précédentes – un plan quinquennal d'action commerciale présenté au conseil d'administration le 23 octobre stipule que le niveau des consommations n'est pas satisfaisant, se situant bien en dessous de ceux affichés par les États-Unis, la Norvège, la Grande-Bretagne ou encore l'Allemagne fédérale. Grâce à sa prise d'autonomie encadrée par le premier contrat de programme accordé par l'État deux mois plus tard, l'EDF se lance

nues. Heureusement, l'appellation du ministère incluait les termes « protection de la nature » ; cela ils comprenaient, mais « environnement », ils ne connaissaient pas. C'est un terme anglo-saxon démarqué du français... Donc je l'ai utilisé. Pompidou a été surpris parce que j'étais intervenu dans le cercle Nouvelle Frontière, un cercle gaulliste dirigé par Jean Charbonnel, et on avait publié une brochure qui reproduisait mon intervention, où j'avais parlé d'environnement ; cela avait frappé Pompidou qui s'intéressait au mot ; par ailleurs, j'ai employé le mot notamment à l'arrivée de Chaban à Matignon [en 1969]. Dans les discours qui ont précédé ou suivi son investiture, j'ai dit qu'il faudrait que l'on conduise en France une politique de l'environnement qui devrait être la grande affaire de la fin du siècle, et Pompidou a été très intéressé par cette formule. » Source : POUJADE, Robert, « Le premier ministère de l'Environnement (1971-1974). L'invention d'un possible », in *Vingtième Siècle. Revue d'histoire*, Vol. 1, n° 113, 2012, p. 52.

⁹¹⁷ BARTHES, Roland, *Mythologies*, éditions du Seuil, 1957, p. 140.

⁹¹⁸ Commission des communautés européennes, Direction générale des Affaires industrielles, technologiques et scientifiques, « Inventaire, bilan et perspectives des activités de recherche et développement en matière de transport terrestre et maritime », le 20 avril 1972.

⁹¹⁹ NICOLON, Alexandre, *op. cit.*, décembre 1974, p. 14.

⁹²⁰ DUBOIS, Jean, « La société de consommation électrique », in MORSEL, Henri (dir.), *Histoire de l'Électricité de France. Tome troisième, 1946 -1987*, Fayard, 1996, p. 657.

⁹²¹ DEBEIR, Jean-Claude, DELEAGE, Jean-Paul, LEMERY, Daniel, *Une histoire de l'énergie*, Flammarion, 2013.

dans l'incitation. La promotion du véhicule électrique, qu'elle alimente en plus de celle d'autres appareils tels que le CEI (chauffage électrique intégré) à destination des ménages, doit être comprise en ce sens comme la possibilité d'améliorer « l'image de marque du produit kilowattheure »⁹²² et de pénétrer un marché qui ne lui était pas réservé jusque-là : en ajoutant un ensemble nouveau à sa « structure », l'entreprise nationale tente d'accroître son influence générale sur le « système technique » français⁹²³. Le directeur adjoint à la direction générale de l'EDF Jacques Gallot résume bien les raisons qui poussent l'électricien à se préoccuper du sort du véhicule électrique et les avantages qu'il tirerait de son développement :

« Il semble tout d'abord qu'EDF ne peut rester étranger à cette action. En effet, son rôle a toujours été de favoriser le développement de l'électricité, facteur de progrès et de mieux vivre, tout spécialement lorsqu'une utilisation ne trouve pas, au début de sa carrière, le ressort de son développement dans l'activité de l'industrie, la demande des utilisateurs restant insuffisante, par ignorance notamment, pour créer naturellement un marché. C'est bien le cas des véhicules électriques. EDF doit par ailleurs sauvegarder son image de défenseur des techniques anti-nuisances et du bilan énergétique de la Nation. EDF ne peut enfin se désintéresser d'une application qui est susceptible de lui apporter à terme un développement appréciable de ses ventes. »⁹²⁴

D'autre part, il est à noter que l'EDF n'est pas la seule à effectuer cette démarche. Celle-ci est à réinscrire dans un espace de recherches plus général, les compagnies d'électricité de plusieurs pays, dont l'Electricity Council of England and Wales en Grande-Bretagne, la Rheinisch Westfalish Electrizaritatzwerk en Allemagne et l'Electrobel en Belgique, étant porteurs de projets similaires. Une convergence internationale sera même établie à partir de 1972 avec les Premières journées européennes d'études sur le véhicule électrique organisées à Bruxelles par l'Union internationale des producteurs et distributeurs d'électricité⁹²⁵. Le passage à l'action de l'EDF se fait le 28 août 1970. Ce

⁹²² C'est notamment ce que déclare le directeur à la direction générale de l'EDF Albert Robert pour justifier de l'engagement de son entreprise dans le développement du véhicule électrique. Source : Ministère de l'Équipement, « Vers une deuxième génération de véhicules ? Les véhicules électriques », La documentation française, 1974, p. 150.

⁹²³ GILLE, Bertrand, « La notion de "système technique" : essai d'épistémologie technique », in *Culture technique*, n°1, 1979, pp. 8-18.

⁹²⁴ Jacques Gallot, « Développement des véhicules électriques », le 4 juillet 1974, p. 3.

⁹²⁵ Le programme de ces journées est le suivant : « L'UNIPÉDE organisera les 13 et 14 mars 1972 à Bruxelles des Journées d'études du véhicule électrique. La matinée du 13 mars sera réservée aux producteurs et distributeurs d'énergie électrique. L'après-midi du même jour sera consacré à la présentation par les constructeurs électriques de leurs véhicules. Enfin, des séances de travail auront lieu le 14 mars, auxquelles prendront part les représentants des producteurs et distributeurs d'énergie électrique et les constructeurs intéressés. Parmi les problèmes qui seront mis en discussion au cours de la première séance de travail on peut citer : l'intérêt du véhicule électrique dans le cadre des problèmes d'environnement ; le point de vue des distributeurs sur le marché possible dans les différentes catégories de véhicules, l'incidence sur les courbes de charge, le volume de la consommation annuelle escomptée, etc. ; le développement du

jour-là, le directeur général Marcel Boiteux réunit chez lui un petit comité, notamment composé de Charles Chevrier et d'Alexis Dejou⁹²⁶, pour discuter de la réalisation de véhicules peu polluants. Si plusieurs solutions sont évoquées, la majeure partie d'entre elles sont très vite écartées. Les véhicules Diesel-électriques de la RATP, par exemple, sont relégués au « stade de l'étude » peu engageante. Alexis Dejou se positionne pour sa part contre les moteurs à gaz dont les effets polluants « ne sont pas ou peu atténués ». Quant aux piles à combustible, la question se pose à peine : « les progrès sont très lents et les espoirs d'une solution économique semblent s'éloigner ».

« Reste le véhicule électrique à accumulateurs », déclare-t-on comme une évidence. Si le « poids énorme » de l'accumulateur au plomb – le seul « sur lequel on puisse sérieusement tabler » – leur apparaît à tous comme repoussant pour une diffusion auprès des particuliers, les membres du groupe envisagent d'autres champs d'application : « les petits véhicules de service (gerbeurs) à l'intérieur des usines », « l'autobus électrique » et « le petit véhicule urbain (taxi, véhicules légers de livraison) ». Cette décision prise, les modalités d'exécution doivent encore être définies. On admet sans ambages que ce genre de recherches ne peut être conduit « directement par l'EDF » puisqu'il portera « exclusivement sur une spécialité électro-chimique (la technologie des accumulateurs) et sur la structure même des véhicules qui doit être profondément repensée », deux secteurs dans lesquels l'entreprise ne possède pas les compétences requises. L'idée d'une association avec des constructeurs de véhicules et d'accumulateurs est retenue⁹²⁷ : outre la Direction des études et recherches qui devront nouer de premiers contacts, il est prévu de réquisitionner la Distribution et le Service des études économiques générales pour penser le niveau « ultérieur de la recherche des marchés »⁹²⁸.

La machine se met en route. Le 23 novembre, Marcel Boiteux écrit à Alexis Dejou pour lui signifier que la CEEDEVE « bat de l'aile » et que l'IDI (Institut du développement industriel) « n'a pas voulu

véhicule électrique dans les divers pays ; les actions d'information et de promotion. Les types de véhicules retenus pour les rapports, discussions et présentations seront les types nouveaux prêts à être mis sur le marché à court et moyen terme, à l'exclusion des véhicules courants, qui ne posent pas de problème sur le plan technique ou commercial. En outre, ces véhicules devront présenter des performances telles qu'ils puissent s'insérer directement dans le trafic, sans occasionner de gêne à celui-ci. » Source : UNIPEDE, « Énergie électrique et environnement », *L'économie électrique*, 45^{ème} année, n°62, avril 1971, p. 28.

⁹²⁶ Étaient également présents à la réunion messieurs Lefort et Dubois. Source : EDF, Études économiques générales, « Véhicules électriques. Réunion chez Monsieur Boiteux le 28 août », le 31 août 1970, p. 1.

⁹²⁷ La démarche que l'EDF souhaite mettre en place est réaffirmée en 1974 par Jacques Gallot ; « EDF considère [qu'il] doit exercer une action devant favoriser le développement des véhicules électriques. Sa vocation n'étant pas de construire ces véhicules ni d'assurer lui-même la fourniture de l'énergie à la manière des sociétés distributrices de gaz de pétrole liquéfiés, EDF estime que son rôle doit être d'animer les industries concernées et de veiller à leurs actions s'exercent dans le sens de la politique qu'il a arrêtée. » Source : Jacques Gallot, « Développement des véhicules électriques », le 4 juillet 1974, p. 3.

⁹²⁸ EDF, Études économiques générales, « Véhicules électriques. Réunion chez Monsieur Boiteux le 28 août », le 31 août 1970, p. 2.

la soutenir » : « les Finances cherchent une solution, mais nous demandent si nous sommes d'accord pour “ manifester notre intérêt ” », lui indique-t-il⁹²⁹. S'il propose en premier lieu de « commander quelques exemplaires », Marcel Boiteux va finir par faire bien plus : avec le soutien du directeur du Gaz, de l'Électricité et du Charbon Henri Malégarie⁹³⁰ et par arrêté du 6 avril 1971, il participe non seulement à l'augmentation du capital de la société à hauteur d'un million de francs nouveaux⁹³¹ mais il convainc aussi l'IDI de réaliser la même chose⁹³². Au-delà des inquiétudes environnementales, les raisons de cet engagement sont bien en relation avec le tournant commercial impulsé : « un intérêt immédiat est de développer un nouveau type de consommateurs qui se placerait en grande partie en heures creuses, c'est-à-dire sans demander des investissements supplémentaires importants »⁹³³, annonce spécifiquement l'électricien pour se justifier. Il ne s'agit pas du seul geste de cet ordre. Marcel Boiteux passe en fait une multitude de contrats : avec la société Bertin pour la construction de deux modèles probatoires de véhicule urbain, avec la Régie Renault pour l'électrification de Renault 4L⁹³⁴, avec Teilhol pour la production de la « Ménagère » et de la « Citadine », et avec Wonder et la CIPEL pour des études à moyen terme sur des batteries zinc-air et redox organique. De plus, il organise des expérimentations sur trois autobus dans le Centre des renardières. Comme indiqué précédemment, l'État le suit dans son mouvement⁹³⁵. D'abord via le ministère de la Protection

⁹²⁹ Lettre de Marcel Boiteux à Alexis Dejou, le 23 novembre 1970, p. 1.

⁹³⁰ Le 23 février 1971, Henri Malégarie écrit à Marcel Boiteux en ces termes : « J'ai l'honneur de vous faire connaître que, compte tenu de l'intérêt que présente le développement de l'activité de cette société et de l'accueil réservé à ce projet par les représentants des ministères intéressés, je n'ai pas d'objections à formuler concernant cette opération ». Source : lettre de Henri Malégarie à Marcel Boiteux, le 23 février 1971, p. 1.

⁹³¹ Journal officiel, « Autorisation à Électricité de France de participer à l'augmentation de capital de la société La voiture électronique (compagnie européenne d'étude de développement et d'exploitation de véhicules électroniques », le 17 avril 1971, p. 3715.

⁹³² Les différents actionnaires de la CEEDEVE en 1969 sont : SOFIREM (Société financière pour favoriser l'industrialisation des régions minières)-Charbonnages de France (2 700 000 francs nouveaux), SOPROME (Société de promotion économique ; 200 000 francs nouveaux), CIF Loire (Compagnie industrielle et financière des ateliers et chantiers de la Loire ; 750 000 francs nouveaux), CGFTE (Compagnie générale française des transports et d'entreprise ; 200 000 francs nouveaux) ; Crouzet S.A. (200 000 francs nouveaux) ; Leroy-Somer (620 000 francs nouveaux) ; MAOM (Manufacture d'accumulateurs et d'objets moulés)-Groupe CGE (200 000 francs nouveaux) ; TEJ (Techniques Électriques Jarret : 1600 francs nouveaux) ; différentes personnes privées (128 400 francs nouveaux). Augmentation de capital en 1971 : EDF (1 000 000 francs nouveaux), IDI (1 000 000 francs nouveaux) ; SOFIREM (700 000 francs nouveaux) ; Leroy-Somer (500 000 francs nouveaux) : MAOM (225 000 francs nouveaux). Le conseil d'administration est composé de : M. Arrighi de Casanova, directeur général de la Chambre de commerce de Paris, Jean Jarret, Bernard Leveque, Jacques Mary, chargé de mission aux Houillères du Bassin de Lorraine, Robert Sarrazac-Soulage, André Tranie, PDG des Techniques électriques Jarret, Georges Chavanes, PDG de Leroy-Somer, Jean Moussu, secrétaire général des Houillères du Bassin de Lorraine-SOFIREM-Charbonnages de France. 2 sièges sont prévus pour l'EDF et l'IDI. Le comité de direction est composé de messieurs Chavanes (Leroy-Somer), Tranie (La voiture électronique), Pouquet (SOFIREM), Raynaud (IDI), Mary (Houillères du Bassin de Lorraine) et d'un représentant de l'EDF. Source : Archives de l'EDF, « La voiture électronique », vers 1971, pp. 1-2.

⁹³³ Archives de l'EDF, « La voiture électronique », vers 1971, p. 3.

⁹³⁴ Ces véhicules pèsent 1000 kg, ont une charge utile de 250 kg (passagers compris) et ont une autonomie moyenne de 80 km pour une vitesse maximale de 60 km/h. Six modèles sont construits et expérimentés entre l'été 1971 et l'hiver 1972, préfigurant la construction d'une présérie de 60 véhicules entre les mois de juin et de décembre 1972. Source : lettre de Marcel Boiteux au Chef de la mission de contrôle économique et financier auprès d'Électricité de France et du Gaz de France, le 23 mars 1972, p. 3.

⁹³⁵ Lettre de Marcel Boiteux au Chef de la mission de contrôle économique et financier auprès d'Électricité de France et du Gaz de France, le 23 mars 1972, pp. 1-3.

de la nature et de l'Environnement et le FIANE puis bientôt au sein d'un groupe de travail interministériel « Véhicules électriques » spécialement constitué le 10 mars 1972 et présidé par l'ingénieur général Louis Saulgeot⁹³⁶. À Paris, les cabinets politiques des ministères de l'Équipement (Direction des routes, Division recherche), des Transports (Direction des transports terrestres) et du Développement industriel et scientifique (DIMELEC, DGRST) s'emballent. « Ça mord », écrit même Marcel Boiteux au directeur de l'Équipement de l'EDF Michel Hug à ce sujet le 13 juin⁹³⁷. Progressivement, l'EDF entraîne donc dans son sillage tous les acteurs français gravitant autour des véhicules électriques à choisir la technologie des accumulateurs.

La filière des piles à combustible n'est pourtant pas enterrée. Dans la presse parascientifique, on mentionne encore que l'hydrogène est « le combustible parfait » et « l'intermédiaire énergétique idéal »⁹³⁸ pour remédier aux maux écologiques modernes. Les activités d'Alstom demeurent également. Des mesures vont être prises pour tenter d'y pallier : il s'agit d'éviter de remettre en question la « cohérence »⁹³⁹ de la structure portée par l'EDF⁹⁴⁰. Au cours de deux journées d'études sur le véhicule électrique organisées par le groupe de travail interministériel et l'électricien national les 8 et 9 février 1973 à Arc et Senans, d'une part ; au sein de la commission « Electrochimie » de la DGRST, d'autre part. À Arc et Senans, un nombre important de représentants de l'État et de journalistes, ainsi que quelques industriels, constructeurs automobiles et chercheurs, sont alors réunis autour du directeur des recherches de l'EDF Maurice Magnien, du chef de service régional de l'équipement de la région parisienne André Laure et du directeur à la direction générale de l'EDF Albert Robin pour discuter de trois questions principales : quel est l'état d'avancement de la technique du véhicule électrique ? Quelle stratégie de développement doit-on adopter pour le faire véritablement décoller ? Quel pourra être son coût d'achat et d'exploitation pour les particuliers et quelles en seront les répercussions sur l'économie énergétique ?

⁹³⁶ Le 18 février 1972, le secrétaire général de la mission interministérielle pour l'Environnement demande son avis au directeur du cabinet du ministre du Développement industriel et scientifique sur la compétence de Louis Saulgeot pour le poste de directeur du groupe de travail : « Plusieurs personnes m'ont signalé que Mr. Saulgeot du Conseil général des Ponts et Chaussées actuellement mis à la disposition du ministère du Développement industriel et scientifique serait particulièrement compétent pour diriger ce groupe de travail. Peux-tu me dire si nous pouvons envisager de confier une mission particulière en ce sens à Mr. Saulgeot ? » Source : lettre du secrétaire général de la mission interministérielle pour l'Environnement au directeur de cabinet du ministre du Développement industriel et scientifique, le 18 février 1972, p. 1.

⁹³⁷ Archives de l'EDF, note manuscrite de Marcel Boiteux à Michel Hug, le 13 juin 1972.

⁹³⁸ *Science & Vie*, n°658, tome CXXII, juillet 1972, p. 22.

⁹³⁹ GILLE, Bertrand, *op. cit.*, 1979, p. 10.

⁹⁴⁰ Le fait que la pile à méthanol ne remette pas en cause la cohérence du système technique est d'ailleurs une des raisons qui poussent la DGRST à accepter la demande d'Alstom et d'Esso en 1970, comme le souligne plus tard la Direction générale de l'industrie : « En cas de succès, le fait d'utiliser un combustible liquide de haut pouvoir calorifique, susceptible d'être distribué dans des conditions similaires à celles de l'essence, écartait d'emblée un certain nombre d'obstacles pratiques. » Source : Direction générale de l'industrie, « Note pour le Service des affaires techniques. Pile Alstom », le 18 décembre 1978, p. 1.

Entouré de l'administrateur délégué de la Société des véhicules électriques Ferdinand Dierkens, du directeur des recherches de la Régie Renault Yves Georges, du directeur général de Fulmen Yves Jarreau, du directeur de la société Bertin Georges Mordchelles-Régnier et du directeur de Gesellschaft für Elektrischen Strassenverkehr Hans Müller, Maurice Magnien ouvre la séance concernant l'état d'avancement de la technique par le problème des sources d'énergie. Les accumulateurs sont évoqués en premier. Des discussions controversées portent bien sur les performances, la durée de vie et les prix des technologies au plomb, alcalines ou encore zinc-air. Maurice Bonnemay et Guy Bronoël sont d'ailleurs confiants dans le fait que leurs résultats dans ce dernier domaine « devraient intéresser l'industrie » tandis que Jean-Claude Sohm ne voit pas les systèmes sodium-soufre opérationnels « avant 1980 »⁹⁴¹. En revanche, personne ne dément les propos de Maurice Magnien lorsqu'il affirme avec vigueur que l'accumulateur au plomb « demeure encore le support du véhicule électrique de ce soir et de demain matin ».⁹⁴²

Vient le tour des piles à combustible. En réalité, il en est peu fait cas au sein de la table ronde. Maurice Magnien va s'employer à couper court sur la question. Yves Bréelle prend la parole le premier pour dresser un constat en la matière. « Les espoirs ont pu s'émousser », commence-t-il, et « la formule la plus avancée actuellement est la formule hydrogène-air, ou hydrogène-oxygène ». Il élimine d'emblée pour la traction les solutions hydrogène-oxygène « à cause de son prix » et méthanol-air « qui pose un important problème de catalyseur », pour ne retenir qu'un seul système : « la seule pile qui pourrait servir au véhicule est la pile hydrogène-air. L'hydrogène est totalement non polluant et n'exige pas l'emploi de métaux précieux, si l'on adopte la filière alcaline. Le platine anodique peut être remplacé par le nickel ». « La faisabilité paraît assurée », ajoute-t-il : « le véritable problème est celui du combustible, l'hydrogène : sécurité, mode de distribution et de stockage, prix qu'il faudrait abaisser à 0,50 ou 1 F le m³. » Maurice Bonnemay confirme tout de suite en disant qu'il lui a été rapporté « que quatre filières de piles à combustible aux États-Unis », toutes à « acides et à l'hydrogène ». Yves Bréelle se veut optimiste : « il reste effectivement un travail important à faire pour que la pile à combustible soit au point ; mais il reste moins à faire que ce qui a déjà été fait ».

⁹⁴¹ Ministère de l'Équipement, « Vers une deuxième génération de véhicules ? Les véhicules électriques », La documentation française, 1974, pp. 107-109.

⁹⁴² Ministère de l'Équipement, « Vers une deuxième génération de véhicules ? Les véhicules électriques », La documentation française, 1974, p. 105.

Maurice Magnien ne semble pas forcément réticent⁹⁴³ mais renvoie les piles à combustible au futur : dans l'immédiat, inutile pour les différents acteurs du véhicule électrique de compter dessus. Il donne rendez-vous la décennie suivante uniquement : « il ressort de ces débats que l'on peut envisager, pour les années 1980-1985, l'utilisation de la pile à combustible à terre, en tant que concurrent du groupe Diesel »⁹⁴⁴. Une ressource argumentative qu'il réutilisera ensuite pour répondre à un journaliste s'inquiétant de l'évacuation de cette technique au profit des accumulateurs : « l'objectif poursuivi [par Alsthom] est de mettre à disposition vers 1980-1982 une pile à combustible pour usage terrestre qui soit fiable. Lorsqu'elle aura été suffisamment éprouvée à terre, j'ai le sentiment que l'on pourra alors l'embarquer sur un véhicule. »⁹⁴⁵ Cette ligne d'horizon dessinée, le message paraît clair : il est nécessaire de développer le véhicule électrique d'abord à l'aide de sources d'énergie existantes et fiables, à savoir les accumulateurs au plomb ; d'autres technologies pourront prendre le relais une fois qu'il sera opérationnel et durablement installé. La reprise de ce scénario par Louis Saulgeot dans le rapport⁹⁴⁶ qu'il remet au ministre de la Qualité de la vie André Jarrot le 15 novembre 1974⁹⁴⁷ prouve d'ailleurs l'efficacité de la démarche entreprise par le directeur des recherches de l'EDF.

Si Maurice Magnien apporte un soutien à Alsthom déjà relatif en public, c'est encore moins évident en privé. Ce contraste se donne à voir à partir de l'été 1973. Alors qu'en plein choc pétrolier l'électricien national est acclamé dans la presse pour sa participation au programme de la société Teilhol⁹⁴⁸ et que Yves Bréelle continue son travail de publicité en faveur des piles à combustible⁹⁴⁹,

⁹⁴³ À ce sujet, Yves Bréelle témoigne que Maurice Magnien se situait dans « un entre-deux » vis-à-vis des piles à combustible. Source : entretien avec Yves Bréelle, Caumont, octobre 2016.

⁹⁴⁴ Ministère de l'Équipement, « Vers une deuxième génération de véhicules ? Les véhicules électriques », La documentation française, 1974, p. 110.

⁹⁴⁵ Ministère de l'Équipement, « Vers une deuxième génération de véhicules ? Les véhicules électriques », La documentation française, 1974, p. 154

⁹⁴⁶ Dans ce texte, Louis Saulgeot est écrit que : « [...] L'accumulateur au plomb [est] la seule source disponible jusqu'en 1982. [...] Après 1982, un second type de source doit être commercialisé. Il est nécessaire de poursuivre conjointement les efforts sur les deux générateurs envisageables, accumulateurs zinc-nickel et générateur zinc-air à circulation. [...] Quant aux sources de troisième génération, sodium-soufre ou pile à combustible, il ne paraît pas pensable de vouloir trancher, dès maintenant. Les travaux sur la pile à combustible et sur l'accumulateur sodium-soufre doivent se poursuivre. La pile à combustible peut avoir, en effet, de multiples applications, surtout dans la mesure où l'hydrogène paraît être, pour l'avenir, un vecteur privilégié. Cependant, les accumulateurs sodium-soufre peuvent avoir aussi leur rôle à jouer et la poursuite des recherches de base s'impose encore, du moins dans les années à venir. Outre des recherches sur ces sources, il ne faut pas oublier les études des problèmes connexes, tel que le stockage de l'hydrogène dans le cas des piles à combustible. Une étude d'évaluation des filières est en cours, il sera nécessaire ensuite de procéder aux expérimentations correspondantes. » Source : Louis Saulgeot, « Pour un développement des véhicules électriques. Rapport remis au gouvernement le 15 novembre 1974 », La documentation française, 1974, pp. 22-24.

⁹⁴⁷ Journal officiel, Débats parlementaires, Sénat, « Compte-rendu intégral – 28^{ème} séance. Séance du samedi 30 novembre 1974 », pp. 2222-2223.

⁹⁴⁸ Une grande partie de la presse traite de ce sujet en des termes élogieux à l'automne 1973 : « Sous l'égide de l'EDF, la voiture électrique prépare pour demain son départ à la conquête des villes » (La Montagne, 24 octobre 1973), « Au printemps prochain : mise en route de deux modèles de voitures électriques » (Le Figaro, 29 octobre 1973), « Du nouveau dans la voiture électrique » (Le Monde, 31 octobre 1973).

⁹⁴⁹ Dans *Sciences et Techniques*, Yves Bréelle, Jacques Chéron et Alain Grehier établissent un pont entre la protection de l'environnement et les piles à combustible : « Deux préoccupations majeures marquent depuis quelques années le

Bogdan Broniewski soumet une demande de renouvellement de son contrat de subvention⁹⁵⁰ – à hauteur de 9,3 millions de francs pour la période octobre 1973 - décembre 1975⁹⁵¹ – auprès du physicien Hubert Curien⁹⁵², nouvellement nommé à la tête de la DGRST. Mais comme chez d'autres, un glissement ontologique est venu requalifier les appareils construits par la société française et Esso (devenue Exxon en 1972). Le docteur Carl E. Heath, directeur général de l'opération, stipule en particulier dans une note adressée à la DGRST qu'il ne considère pas que leur système « puisse être économiquement concurrentiel en tant de source de propulsion pour l'automobile de tourisme ou pour la production d'énergie électrique à grande échelle » avant plusieurs années⁹⁵³. Des applications qu'il envisage comme « buts de programme ultérieurs », tout en supposant que leur effort commun « soit couronné de succès ». À l'instar des chercheurs de l'IFP avant lui, il répertorie donc d'autres marchés : « les groupes électrogènes de 1 à 50 kW pour fonctionnement dans les lieux isolés », « les groupes de secours », « l'alimentation de chariots élévateurs et de véhicules de service » et « le secteur des loisirs (maisons de vacances, car-caravanes, bateaux de plaisance) »⁹⁵⁴.

Toujours président de la commission « Electrochimie » de la Délégation, Maurice Magnien demande à son collègue de l'EDF Jacques Millet, à Hubert Autruffe de la SNCF et à Jean-Claude Sohm de prendre l'affaire en main⁹⁵⁵. Après plusieurs visites des laboratoires d'Alstom, Jacques Millet ne tarde pas à rendre son verdict. S'il souligne bien « l'élégance » des propositions des deux entreprises, il confirme que « l'application à l'automobile est « maintenant écartée » et que « l'ambition des demandeurs » a « sensiblement diminué avec le temps »⁹⁵⁶. Face à un tel retournement, Michel Desécures, déjà réticent à tout projet concernant l'électrochimie depuis quelques temps, résume le

domaine de l'énergie : réduire la pollution atmosphérique et économiser les ressources en combustibles fossiles. Cette prise de conscience ne peut manquer d'avoir de profondes répercussions sur les systèmes de transformation de l'énergie, secteur actuellement dominé par les moteurs thermiques et principalement les moteurs à explosion. Dans ce contexte il apparaît opportun de faire à nouveau le point sur la pile à combustible qui précisément présente l'avantage de principe de pouvoir apporter à la fois économie de fonctionnement et absence de pollution. » Source : *Sciences et Techniques*, n°6, 15 septembre 1973, p. 5.

⁹⁵⁰ Lettre de Bogdan Broniewski au délégué général à la Recherche scientifique et technique, le 7 septembre 1973, pp. 1-2.

⁹⁵¹ Maurice Magnien, « Note à H. Curien. Demande de renouvellement du contrat de subvention n°1.318.222 1-2-3/1 quater au profit des "piles à combustible Alstom" », le 20 novembre 1973, p. 2.

⁹⁵² Normalien (promotion 1945), ancien résistant, Hubert Curien connaît un parcours ascendant : d'abord enseignant à la Sorbonne après l'obtention de son doctorat de physique, il devient directeur de la physique en 1966 puis directeur général au CNRS en 1969. Il succède à Pierre Aigrain à la tête de la DGRST en 1973 et devient président du CNES en 1976. Il est ministre de la Recherche et de la Technologie entre 1984 et 1986 et entre 1988 et 1993. Il obtient également la présidence de l'Agence spatiale européenne de 1981 à 1984 et du CERN en 1994. Source : SALOMON, Jean-Jacques, « Hubert Curien (1924-2005). Stateman of Science », in *Hermès*, n°42, 2005, pp. 209-213.

⁹⁵³ Chez Peugeot, on suit ces péripéties de loin. L'entreprise reste engagée dans le projet mais ne prend pas part aux débats.

⁹⁵⁴ Carl E. Heath, « Note à la DGRST sur la pile à combustible Alstom-Jersey. Objectifs, statistiques résultats. Programme et financement des travaux 1973-1976 », le 8 décembre 1972, p. 1.

⁹⁵⁵ Archives de l'EDF, « Réunion Electrochimie du 13 juin 1973 », p. 1.

⁹⁵⁶ Jacques Millet, « Demande de renouvellement du contrat de subvention au profit des "piles à combustible Alstom" », le 27 août 1973, pp. 1-4.

sentiment qui l'anime sur un ton foncièrement sarcastique : « C'est vraiment attristant. On se demande pourtant s'il ne faut pas rire quand on entend encore parler du marché de pile pour les caravanes (est-ce par pudeur qu'on ne parle plus de marché des phares et balises ?). On ne croirait quelques années en arrière. Ça nous rajeunit. »⁹⁵⁷ Hubert Autruffe se montre également plus véhément que son collègue de l'EDF dans son rapport confidentiel :

« Les trois visites que nous avons faites à Alsthom-Massy ont confirmé que le développement de ces piles était loin d'avoir atteint les objectifs qui avaient justifié notre avis favorable en 1970. De plus, à chaque visite, Alsthom a présenté des éléments nouveaux, comme par exemple une structure de pile en "rouleau" qui conduit à repartir presque à zéro pour certains développements. Reprenant un mot de M. Sohm, je dirais que le flou de la situation ne permet pas aux experts d'en présenter une photographie nette à une période donnée. De plus, ces remises en cause et modifications parfois profondes empêchent de donner une valeur élevée aux assertions relatives aux objectifs des prochaines années. En résumé, et du point de vue strict de l'expertise, on ne peut que constater que les objectifs prévus ne sont pas atteints, que les marchés prévisibles s'amenuisent et, qu'en fait, le développement est un échec. On devrait donc en toute logique, reconsidérer le jugement porté en 1970 et se demander donc s'il ne serait pas plus correct de reprendre le développement de la pile IFP. Cet Institut peut en effet, faire état de la non réussite d'Alsthom à l'issue de ces trois années pendant lesquelles l'aide à IFP a été supprimée. »⁹⁵⁸

Il est vrai que les appareils d'Alsthom ne cessent d'évoluer au fil des progrès effectués grâce au développement parallèle d'instruments et d'outils scientifiques nouveaux, tels que l'ESCA (Electron Spectroscopy for Chemical Analysis) et la sérigraphie pour la fabrication des électrodes. Les catalyseurs sont par exemple remplacés par des mélanges de platine-ruthénium sur carbone à faible teneur à l'anode et de pérovskite (NiCO_2O_4 sur graphite) à la cathode. La structure même de la pile élémentaire change aussi puisque en visant l'emploi de techniques moins coûteuses et une plus grande souplesse dans l'optimisation des caractéristiques physiques de la cathode – qui ne doit plus jouer qu'un rôle de collecteur de courant et de conduit d'air –, le catalyseur est déplacé directement sur le séparateur-membrane. Les électrodes en acier inoxydable, utilisés en premier lieu, font quant à eux place à des électrodes en plastique conducteur mis au point dans les laboratoires d'Esso-Chimie à Bruxelles tandis que le choix d'un électrolyte basique ou tamponné n'est plus arrêté. A ces travaux

⁹⁵⁷ Lettre de Michel Desécures à Maurice Magnien, le 9 novembre 1973, p. 1.

⁹⁵⁸ Lettre confidentielle de Hubert Autruffe à Maurice Magnien, le 29 mars 1974, p. 1.

s'ajoutent ensuite ceux sur le décarbonateur censé évacuer le CO₂ produit et sur l'échangeur d'enthalpie qui sert à la fois à refroidir la pile et à récupérer le méthanol non consommé au moyen de membranes microporeuses⁹⁵⁹.

Chez Peugeot, qui a tout de même investi 4 800 000 millions sur un total de 48 600 000 millions de francs pour les recherches sur les piles à combustible et 6 400 000 millions sur 11 700 000 millions de francs pour la mise au point d'un véhicule adapté entre 1967 et 1973, on adopte une approche réaliste face à ces changements : si son directeur des études Marcel Dangauthier concède d'un côté que les résultats d'Alsthom sont encourageants, il évalue de l'autre qu'il est « exclu qu'une application à l'automobile puisse être envisagée avant un certain nombre d'années » et que ces péripéties « stérilisent » des travaux propres qui pourraient être adaptés à d'autres moyens de propulsion. De fait, et sans pour autant rompre le contrat liant Peugeot à Alsthom, il décide de se rapprocher de la CGE dont les accumulateurs zinc-air et sodium-soufre l'intéressent particulièrement⁹⁶⁰. L'ensemble de ces événements appellent Maurice Magnien à faire part à Hubert Curien des « inquiétudes »⁹⁶¹ de son groupe d'experts, pour qui le procédé d'Alsthom « aboutit à un niveau qui semble encore plus proche du stade la recherche que celui du développement »⁹⁶², et à présenter des conclusions allant contre le renouvellement du contrat, d'autant plus pour un objet dont « l'incidence sur le marché français n'est pas démontré »⁹⁶³ :

« Il semble aux experts que le générateur étudié nécessite un gros effort pour être opérationnel en 1975. [...] L'avantage du système méthanol-air qui était de fournir pour la voiture un combustible relativement bon marché, comparé à l'hydrogène, ne semble pas aujourd'hui présenter la même importance vu les difficultés qui apparaissent au cours des travaux de développement de cette filière. Des piles du même niveau de puissance ont été mises au point en France par l'association CGE-IFP-LCL, mais leur dossier de développement avait été écarté en 1970, pour caractéristiques insuffisantes, en ce qui concernait en particulier l'application à l'automobile. Aux États-Unis, Pratt & Whitney a continué ses recherches et propose des piles de 50 kW à l'essai. L'une d'elles est

⁹⁵⁹ Dans son rapport, Jacques Millet écrit : « La pile méthanol-air a évolué depuis le modèle Warszawski : les électrodes sont en plastique conducteur avec une structure nid d'abeille intégrale, le catalyseur placé sur la membrane et non plus sur l'électrode faisant barrage à la diffusion du méthanol vers l'air [...] Le dispositif original Alsthom n'a pas de concurrent. » Jacques Millet, « Demande de renouvellement du contrat de subvention au profit des "piles à combustible Alsthom" », le 27 août 1973, p. 3.

⁹⁶⁰ Lettre de Marcel Dangauthier au directeur général technique de la CGE Pierre Chavance, le 10 mai 1974, pp. 1-2.

⁹⁶¹ Lettre de Maurice Magnien à Hubert Curien, le 22 novembre 1973, p. 1.

⁹⁶² Maurice Magnien, « Note à H. Curien. Demande de renouvellement du contrat de subvention n°1.318.222 1-2-3/1 quater au profit des "piles à combustible Alsthom" », le 20 novembre 1973, p. 4.

⁹⁶³ DGRST, Secrétariat permanent de l'Aide au développement, « Rapport de M. Magnien, directeur des recherches EDF. Demande présentée par la société Alsthom concernant une pile à combustible », 1973, p. 9.

actuellement en cours d'examen à Hydro-Québec. Le dispositif Alsthom est original certes, mais ses concurrents utilisant des techniques différentes semblent obtenir des résultats supérieurs. Le caractère de nouveauté du procédé est indiscutable. Les différentes parties du projet comportent à la fois des phases de développement et de recherche. Bien que les études soient conduites sur des électrodes en conditions réelles, de nombreuses recherches restent à faire sur la diminution du taux de platinoïdes, le fonctionnement du décarbonateur et celui de l'échangeur d'enthalpie durant des temps supérieurs à 1000 heures et avec un fonctionnement efficace. Il reste que les objectifs prévus en 1970 pour 1973 s'éloignent vers 1977. L'originalité du dispositif semblait permettre bien des espoirs mais on est, en fin de compte, conduit à la considération de problèmes fondamentaux difficiles. Rappelons qu'il semble acquis, après les examens d'août et septembre 73 que la société demanderesse ait renoncé à l'application à la traction électrique, objet de la demande initiale. »⁹⁶⁴

Au-delà de l'appréciation négative, ce discours établit surtout implicitement une comparaison avec l'EDF, qui a réussi là où les autres ont échoué. Toujours est-il qu'Alsthom obtient une réponse favorable à sa demande de subvention, moyennant le contrôle des résultats obtenus à des rendez-vous définis. Les raisons de cette décision prise par la DGRST, au demeurant surprenante compte tenu de l'opinion de sa commission « Electrochimie », doivent se trouver en dehors des laboratoires à proprement parler. D'une part, et bien qu'ils aient conscience que les études sur les piles à combustible « relèvent plus d'un pari que d'un choix cartésien »⁹⁶⁵, les membres de la Délégation sont convaincus par la volonté d'Exxon de continuer l'aventure. Le sérieux du groupe américain, dont le raisonnement est appuyé sur « une priorité absolue accordée aux critères économiques par rapport à toute solution technique figée prématurément »⁹⁶⁶, n'est pas remis en question. La réorientation des activités que le comité de direction du programme entreprend à la fin de l'année 1973 en témoigne : c'est parce que l'on se fixe comme objectif un prix de deux cents dollars par kW que l'on sélectionne le milieu tamponné permettant l'élimination d'auxiliaires coûteux. La commercialisation par Alsthom de sa pile à hydrazine dans les délais prévus démontre aussi que les équipes de l'entreprise française « travaillent bien et avec un but industriel »⁹⁶⁷ et qu'il existe donc des chances – quoique minces –

⁹⁶⁴ Maurice Magnien, « Note à H. Curien. Demande de renouvellement du contrat de subvention n°1.318.222 1-2-3/1 quater au profit des "piles à combustible Alsthom" », le 20 novembre 1973, p. 7.

⁹⁶⁵ DIMELEC, Rodolphe Greif, « Note pour Monsieur le Directeur. Objet : dossier Alsthom. Entretien avec Robert Remillon », le 10 avril 1974, p. 1.

⁹⁶⁶ Jacques Millet, « Remarques sur l'opération Alsthom-Exxon », le 5 avril 1974, p. 2.

⁹⁶⁷ DGRST, Secrétariat permanent de l'Aide au développement, « Rapport de M. Magnien, directeur des recherches EDF. Demande présentée par la société Alsthom concernant une pile à combustible », 1973, p. 9.

pour que ses recherches sur la filière méthanol-air se concrétisent. À cela s'ajoutent les pressions exercées par la CGE, principal actionnaire d'Alstom, sur la DIMELEC et la DGRST : la compagnie insiste fortement auprès des deux institutions publiques sur l'obligation de poursuivre « sous peine de se déconsidérer totalement aux yeux d'Exxon »⁹⁶⁸. Et comme le souligne Loïk Le Floch-Prigent, Hubert Curien « n'a pas trop envie de fâcher cet aéroport »⁹⁶⁹.

D'autre part, la DGRST s'affiche en profonde opposition contre l'EDF sur la question du véhicule électrique. Une situation qui n'est d'ailleurs pas sans conséquence pour Maurice Magnien : celui-ci admet à Hubert Curien se retrouver avec un « problème de conscience »⁹⁷⁰ par rapport aux deux affaires, pendant qu'à la DIMELEC on doute de la pertinence de son opinion compte tenu de son statut⁹⁷¹. Au 103 rue de l'Université à Paris en tout cas, on pense qu'avant de construire et de diffuser des modèles, il faut en priorité régler le problème des sources d'énergie qui ne sont pas satisfaisantes. Les possibilités de recherche sur de nouveaux générateurs représentent même tout l'intérêt que trouve la DGRST dans ce type de développement⁹⁷². Bien sûr, les piles à combustible ne sont plus pour son personnel un sujet qui suscite autant d'attentes que dans la décennie précédente. Mais elles constituent tout de même un marché potentiel dont il ne faudrait pas se priver en pleine crise énergétique, d'autant plus que d'autres pays – et les États-Unis en tête – n'y ont pas totalement renoncé.

C'est Hubert Autruffe – pourtant très critique dans son rapport technique – qui donne peut-être en substance la meilleure interprétation de ce regard que pose la DGRST sur le contrat d'Alstom. En se plaçant « dans un cadre plus large que celui d'une expertise au développement » et au vu « de la conjoncture énergétique », ce dernier estime que la réalisation d'un générateur électrique autonome de moyenne puissance constitue un motif suffisant de poursuite des efforts financiers : « à un niveau ministériel ou gouvernemental », écrit-il, « on peut en effet juger qu'Alstom n'a pas totalement épuisé ses idées puisque cette société en présente de nouvelles à chaque réunion et que l'intérêt d'une pile méthanol-air mérite d'aller vraiment jusqu'au bout des possibilités »⁹⁷³. Il en ressort que la Délégation va donc adopter une sorte de politique de la porte entre-ouverte en laissant une entreprise dans la partie, moins pour des raisons purement scientifiques que pour « des raisons de politique

⁹⁶⁸ DIMELEC, Rodolphe Greif, « Note pour Monsieur le Directeur. Objet : dossier Alstom. Entretien avec Robert Remillon », le 10 avril 1974, p. 1.

⁹⁶⁹ Entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

⁹⁷⁰ Archives de l'EDF, note manuscrite de Maurice Magnien, 1974, p. 1.

⁹⁷¹ C. Palvadeau, de la DIMELEC, note que si Maurice Magnien est nettement réticent au projet d'Alstom, « on peut s'interroger sur les raisons de ces réticences ». Source : DIMELEC, C. Palvadeau, « Note pour Monsieur le Directeur », le 8 mars 1974, p. 4.

⁹⁷² CALLON, Michel, CHAPUIS, C. *La production des marchés*, CORDES, 1978, pp. 48-49.

⁹⁷³ Lettre confidentielle de Hubert Autruffe à Maurice Magnien, le 29 mars 1974, p. 2.

industrielle (et énergétique) visant à conforter la position de l'Alstom dans une coopération internationale malgré les risques très réels d'échec. »⁹⁷⁴ On voit comment le réseau d'acteurs⁹⁷⁵ évoluant autour des piles à combustible s'est reconfiguré en à peine trois ans. Majoritairement délaissé par les pouvoirs publics et concurrencé par les actions de l'EDF en faveur de la traction automobile électrique par le biais de la promotion des accumulateurs, il ne tient plus qu'à un fil : il n'est plus porté que par une minorité d'organismes qui ont eux-mêmes dû redéfinir leurs objectifs d'applications et de recherches pour continuer à exister.

⁹⁷⁴ DIMELEC, C. Palvadeau, « Note pour Monsieur le Directeur », le 8 mars 1974, p. 4.

⁹⁷⁵ L'importance de l'organisation sociale et du choc pétrolier dans le redéveloppement des recherches sur les piles à combustible à cette période est confirmée par Loïk Le Floch-Prigent : « C'est un réseau social de types qui à un moment s'entendent pour faire évoluer les choses, d'autant que le choc pétrolier de 1973 conduit à regarder tout. Le choc était dans nos têtes. » Source : entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

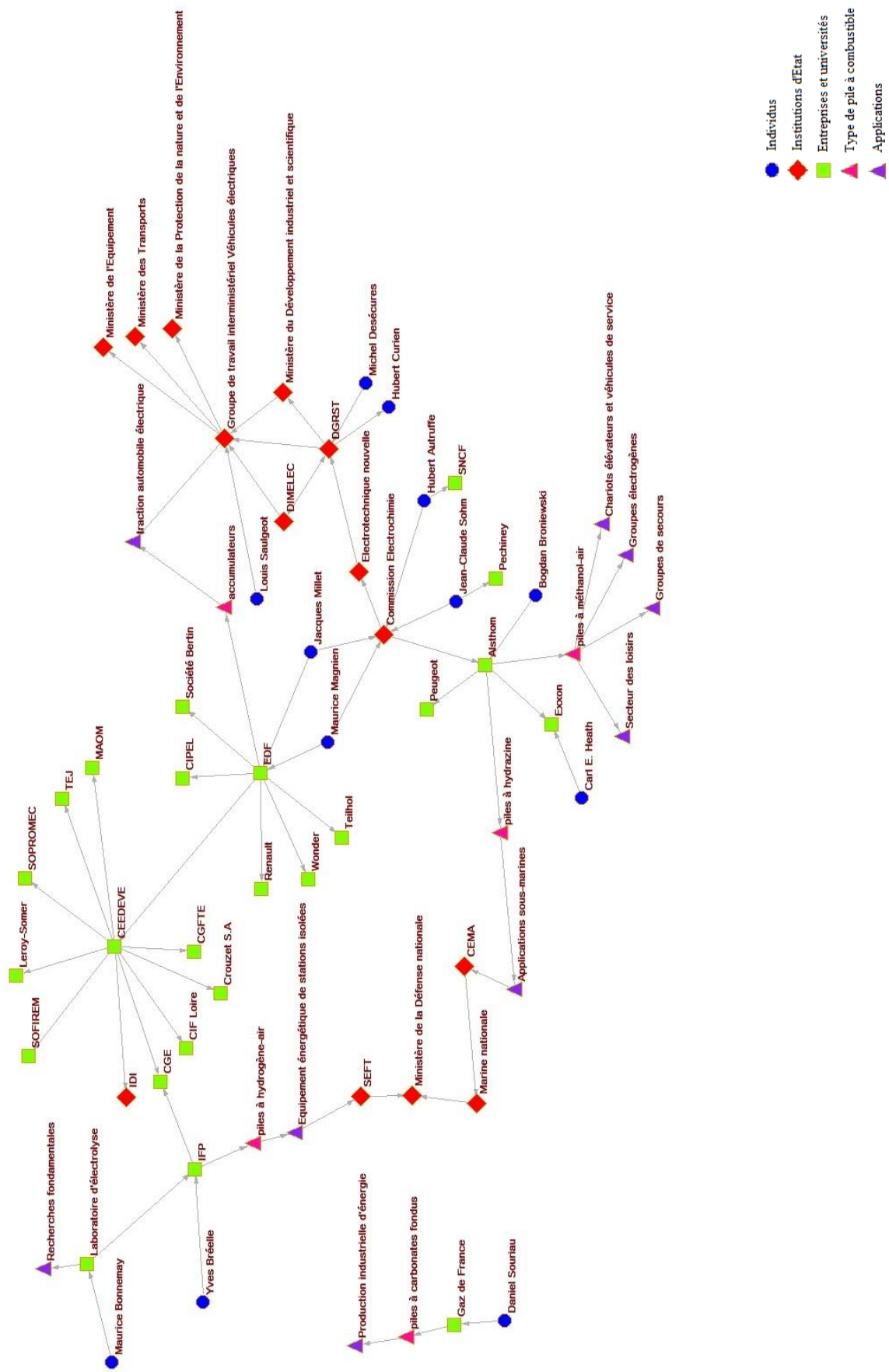


Fig. 13 – Le réseau social autour des piles à combustible en France en 1973

HUITIÈME CHAPITRE

Des piles à combustibles à la pile à hydrogène (1974-1975)

Après la première crise pétrolière, on assiste à une montée en puissance des préoccupations énergétiques et environnementales. Les acteurs de la recherche scientifique et technique s'engouffrent dans cette « fenêtre d'opportunité »⁹⁷⁶. À la demande du délégué général à la DGRST Hubert Curien et du délégué général à l'énergie Jean Blancard est par exemple créé en mars 1974 un Comité consultatif de la recherche et du développement dans le domaine de l'énergie, devant consacrer ses efforts « à essayer de définir ce que pourraient être les grandes lignes d'une politique nationale de recherche-développement énergétique »⁹⁷⁷. Ce cadre profite aux piles à combustible, dont on salue dans les discours le large éventail de possibilités. Hubert Curien lui-même pense que l'évolution des problèmes de l'énergie fait « ressortir l'intérêt » de celles-ci, « pour équipements stationnaires »⁹⁷⁸. Les piles à combustible prennent effectivement une place plus importante dans les débats publics, à un niveau national mais aussi européen. En atteste une réunion sur la thématique tenue à Bruxelles le 28 juin 1974 sous l'égide de la Commission des communautés européennes. L'économiste britannique et directeur des Affaires industrielles et technologiques de la Commission Christopher Layton⁹⁷⁹ y suggère particulièrement que « la crise énergétique a ravivé l'intérêt de la Communauté et des gouvernements pour les recherches sur les piles à combustible comme moyens de substitution pour les transports »⁹⁸⁰. Un changement majeur a surtout lieu pour les promoteurs de la technique à

⁹⁷⁶ GEELS, Frank, SCHOT, Johan, « Typology of Sociotechnical Transition Pathways », in *Research Policy*, n°36, 2007, p. 400.

⁹⁷⁷ Comité consultatif de la recherche et du développement dans le domaine de l'énergie, « Rapport de situation sur la recherche-développement en matière d'énergie », 26 avril 1977, p. 1.

⁹⁷⁸ Lettre de Hubert Autruffe à Maurice Magnien, le 26 janvier 1974, p. 1.

⁹⁷⁹ Christopher Layton est également chef de cabinet d'Altiero Spinelli en 1972, lorsque celui-ci est commissaire en charge des Affaires industrielles, technologiques et scientifiques sous la commission Malfatti-Mansholt. Source : COMMISSION EUROPÉENNE, *La commission européenne 1928-1972. Histoire et mémoires d'une institution*, Office des publications de l'Union européenne, 2014, p. 193.

⁹⁸⁰ Dans son discours d'ouverture de séance, Christopher Layton précise plus en détail l'intérêt que porte la Commission aux piles à combustible et les raisons de l'organisation d'une telle réunion : « Dans le cadre de la crise énergétique il serait utile de réaliser des économies de combustible dans le domaine des transports. C'est pourquoi il est important de mettre au point de nouveaux moyens de propulsion et de nouvelles sources d'énergie. Les travaux de recherche dans ce domaine se poursuivent depuis des années mais n'ont pas toujours été couronnés de succès et un certain découragement, un certain scepticisme sont apparus quant à l'avenir de ces recherches. La crise énergétique a ravivé l'intérêt de la Communauté et des gouvernements pour les recherches sur les piles à combustible comme moyens de substitution pour les transports. Il était donc utile de rassembler les différentes sociétés engagées dans ce domaine pour voir si le travail pouvait être accéléré par un effort de collaboration. Il est clair que des problèmes de concurrence et de commercialisation peuvent entraver cette collaboration. Mais d'autre part, la nature à long terme des recherches et les problèmes à résoudre suggèrent que le moment est venu d'envisager une coopération dans des domaines d'intérêt commun. Le but de la réunion est double : tout d'abord donner un bref panorama de l'orientation et de l'état d'avancement des recherches dans les différents laboratoires ; sur cette base, voir si on peut cerner des problèmes clés communs où un effort conjoint peut être rentable. Actuellement, il n'est pas encore question d'une aide financière de la Commission car cette réunion est exploratoire et doit seulement permettre de discerner des domaines de collaboration possible. Dans l'avenir et si des arguments suffisants militent en faveur d'un soutien Communautaire, la Commission pourra envisager la possibilité d'un tel soutien financier. » Source : Commission des communautés européennes, « Séminaire sur les piles à combustible. Compte-rendu de la réunion tenue à Bruxelles le 28 juin 1974 », 1974, p. 2.

cette période, au moins en France : sous l'influence du développement d'un paradigme nouveau visant à l'utilisation de l'hydrogène produit par voie nucléaire, ces derniers délaissent les *piles à combustibles* au profit de la *pile à hydrogène* . Dans ce chapitre, nous analyserons ainsi comment s'opère ce passage de la pluralité au singulier et ses effets sur la reformulation des recherches.

8.1 Une « révolution » ? La construction d'un nouveau paradigme au regard des promesses de la production d'hydrogène par voie nucléaire

En 1974, les recherches sur les piles à combustible vont entrer sous un nouveau paradigme ayant trait à la production d'hydrogène par voie nucléaire, via l'électrolyse ou la décomposition thermique de la vapeur d'eau (fig. 14). Pour comprendre sa construction, il est nécessaire d'analyser sa « trajectoire argumentative »⁹⁸¹ dans les discours des acteurs autant que les actions que ces derniers vont entreprendre dans un contexte historique où le secteur électronucléaire prend un « virage industriel »⁹⁸². Ce sujet prend forme en France au moins à partir de 1971 : à cette date, le Gaz de France entame des recherches en ce sens, permettant « d'étudier expérimentalement un cycle particulier d'oxydoréduction et d'analyser les critères exigés pour qu'un cycle puisse être développé avec un rendement et une rentabilité satisfaisants »⁹⁸³. Pierre Verret, membre de la Direction des études et techniques du Gaz de France et de la Commission de l'énergie du Plan, rédige en suivant un document dans lequel il s'interroge également sur la faisabilité d'extraction de l'hydrogène « par dissociation d'eau grâce à l'énergie nucléaire ». En admettant que l'électricité n'est pas « la seule et unique “structure d'accueil” » pour les centrales, il envisage plusieurs scénarii, dont une « production d'énergie gaz sous forme d'hydrogène et la production d'électricité dans des piles à combustible » associés dans un même ensemble⁹⁸⁴. Alors que le Premier ministre Pierre Messmer lance un plan visant à « accélérer la réalisation du programme de production d'électricité nucléaire »⁹⁸⁵ pour faire face au quadruplement du plan du pétrole – il enclenche la mise en chantier de 13 000 mégawatts en deux ans⁹⁸⁶ –, cette idée va se répandre rapidement dans plusieurs espaces

⁹⁸¹ CHATEAURAYNAUD, Francis, « Trajectoires argumentatives et constellations discursives. Exploration socio-informatique des futurs depuis le nanomonde », in *Réseaux* , Vol. 6, n°188, 2014, pp. 121-158.

⁹⁸² LE RENARD, Claire, « Les débuts du programme électronucléaire français (1945-1974) : de l'exploratoire à l'industriel », in *Hérodote* , Vol. 2, n°165, 2017, p. 62.

⁹⁸³ *Le Progrès scientifique* , n°171, juillet-août 1974, p. 44.

⁹⁸⁴ Pierre Verret, « La production d'hydrogène par dissociation de l'eau grâce à l'énergie nucléaire », 27 décembre 1972, pp. 1-10.

⁹⁸⁵ MESSMER, Pierre, « Un Premier ministre dans le premier choc pétrolier », in *Mémoires de l'Académie nationale de Metz* , A175, Ser7, 1994, p. 36.

⁹⁸⁶ GUILLAUMAT-TAILLIET, François, « La France et l'énergie nucléaire : réflexions sur des choix », in *Revue de l'OFCE* , n°19, 1987, pp. 189-227.

sociaux et arènes publiques. Le succès d'un tel déplacement repose sur la « force des arguments »⁹⁸⁷ présentés, qui lient la production et l'utilisation de l'hydrogène, l'énergie nucléaire, la problématique de la politique énergétique française et les préoccupations environnementales dans une seule vision du futur. Dès le début de l'année, le comité « Énergies nouvelles » du Groupe interministériel d'évaluation de l'environnement, dirigé par Robert Gibrat⁹⁸⁸, liste par exemple l'hydrogène parmi ses priorités⁹⁸⁹. Très en faveur de ce vecteur, le polytechnicien et ancien ministre de Vichy est d'autant plus conforté dans son sentiment qu'il participe à la « Hydrogen Economy Miami Energy Conference » du 18 au 20 mars 1974 : il y note que « l'enthousiasme pour l'hydrogène » est « général »⁹⁹⁰ et international.

De son côté, Jacques Millet, qui siège le 5 mars 1974 au comité « Prospective électrochimie » du CNRS, en revient en ayant appris par le professeur à l'École d'électrochimie de Grenoble Charles Desportes que le CEA lui a confié un contrat de trois mois pour une étude bibliographique sur la thématique⁹⁹¹. Œuvrant toujours à la promotion du véhicule électrique à accumulateurs⁹⁹² mais

⁹⁸⁷ CHATEAURAYNAUD, Francis, « Sociologie argumentative et dynamique des controverses : l'exemple de l'argument climatique dans la relance de l'énergie nucléaire en Europe », in *A contrario*, Vol. 2, n°16, pp. 131-150.

⁹⁸⁸ Polytechnicien, ingénieur des Mines et ancien ministre du gouvernement de Vichy, Robert Gibrat est notamment président du conseil de surveillance de la SOCIA (Société pour l'industrie atomique) et conseiller scientifique de la société Solmer dans les années soixante-dix.

⁹⁸⁹ EDF, Direction des études et recherches, Service machines et automatismes de production, Département machines, « Note flash n°74.03 », le 25 janvier 1974, p. 1.

⁹⁹⁰ Dans les pages de *Sciences et techniques*, Robert Gibrat fait état de l'ambiance qui règne à la conférence et des réticences qui peuvent s'y exprimer : « La conférence a eu un succès considérable dépassant de loin les espoirs des organisateurs. Plus de sept cents savants ou ingénieurs de vingt-cinq pays y assistaient dont plus de six cents Américains. Nous signalerons particulièrement parmi les étrangers les fortes participations japonaise (114) et française (14). L'ambiance très décontractée, facilitée par la tenue de la conférence au Playboy Plaza Hotel au nom suggestif, rappelait celle des premiers congrès nucléaires aux USA il y a vingt ans. Mais ceux-ci comportaient une majorité d'hommes de vingt-cinq à trente ans, alors qu'à Miami la majorité avait entre trente-cinq et quarante ans, ce qui accuse un certain vieillissement de la jeunesse USA, sans doute par déplacement des centres de recherches de l'industrie vers les Universités. L'enthousiasme pour l'hydrogène « cet inépuisable combustible sans pollution pour l'ère postfossile » était général. Quelques fausses notes cependant : ainsi Mr T. R. Reed du Massachusetts Institute of Technology a commencé son exposé sur le Méthanol, qui ne laisse aucune place à l'hydrogène, par ces trois mots : « Welcome fellow dreamers » (Bonjour amis rêveurs !). Mais le plus vigoureux fut sans doute Mr P. N. Ross, un directeur de Westinghouse prenant une position résolument « tout électrique ». Il faut le citer car il est caractéristique de la position des grands constructeurs américains peu désireux de troubler leurs lignes de recherches *par une ouverture d'esprit inopportune* (c'est lui qui souligne). « Nous devons placer nos efforts : sur le transport en masse, non sur la magnétohydrodynamique, sur la liquéfaction et la gazéification du charbon, non sur la géothermie, sur l'enrichissement de l'uranium, non sur les piles à combustible, sur le pompage de chaleur et sur l'utilisation accrue de l'électricité, non sur son recul, sur les réacteurs rapides et la fusion, non sur la mise en orbite de stations d'énergie solaire, sur la voiture électrique, non sur les moteurs Wankel ». Il a conclu : « L'économie électrique est un corollaire absolu de l'utilisation du charbon et de l'électricité. Même plus tard si nous trouvons un moyen d'utiliser la fusion ou l'énergie solaire, ou l'énergie géothermique, ou l'énergie des marées ou le vent, l'électricité est le seul moyen de le faire. Quelle que soit la source primaire, il n'y a littéralement aucune alternative à une économie bâtie sur l'électricité, sauf le déclin de l'économie. » Source : *Sciences et techniques*, n°21, 15 mars 1975, pp. 45-46.

⁹⁹¹ EDF, Direction des études et recherches, Service GECTN, « Note flash n°74.05 », le 6 mars 1974, p. 1.

⁹⁹² Le 12 juillet 1973, le président de l'EDF Paul Delouvrier écrit au ministre Robert Pujade en ces termes : « Ainsi que vous le savez, Électricité de France a construit un certain nombre de voitures électriques à partir d'éléments de la voiture Renault, type R4. Le programme de fabrication portait sur quatre-vingt véhicules et s'achève actuellement. Nous avons procédé déjà à des essais en exploitation mais il paraît aujourd'hui nécessaire d'organiser une plus large expérimentation

intéressée par la possibilité d'exploiter son énergie d'heures creuses, l'EDF va y voir une occasion de réinvestir partiellement la technique qu'elle avait auparavant contribué à écarter et confirme par là même son statut « zigzagant » sur la question⁹⁹³. Lors d'un cycle de conférences sur les nouveaux systèmes énergétiques et les cycles thermodynamiques associés que l'électricien national organise avec le CEA à Ermenonville du 30 septembre au 4 octobre, Yves Bréelle de l'IFP et Jean Mascarello de l'EDF sont invités à intervenir pour en parler. Les deux ingénieurs confient que « le développement de l'énergie nucléaire va entraîner probablement une production massive d'hydrogène » et que dans cette perspective « les piles à combustible qui représentent l'un des convertisseurs d'énergie les mieux adaptés à ce combustible vont certainement être appelées à jouer un rôle de premier plan grâce aux progrès acquis ces dernières années »⁹⁹⁴. Dans la chaîne des arguments, on perçoit bien que c'est l'usage de l'énergie nucléaire qui doit conditionner le processus de relance des générateurs électrochimiques. Ce mode d'administration de la preuve⁹⁹⁵ est en effet fondé sur une structure de raisonnement par syllogisme, selon lequel $(A \rightarrow B) \wedge (B \rightarrow C) \rightarrow (A \rightarrow C)$. C'est ce qui fait toute la puissance du nouveau paradigme et explique la valeur qu'on lui accorde dans l'espace public : alors que les piles à combustible étaient encore présentées quelques années auparavant comme les émissaires d'une remise en cause générale du système technique, elles sont au contraire désormais l'un de ses compléments logiques.

Ce type de propos atteint la presse parascientifique puisque *Science & Vie* consacre sa une de mars 1974 à l'esquisse d'un « avion à hydrogène » de Boeing : « tous les experts sont aujourd'hui d'accord pour prédire », mentionne-t-on avec un engouement certain dans le dossier qui l'accompagne, « que l'hydrogène, tiré de l'eau (“matière première” inépuisable) constituera, en l'an 2000, la première source d'énergie »⁹⁹⁶. Cette « révolution » que le magazine promet comme tant d'autres⁹⁹⁷, et au sein de laquelle les piles à combustible doivent servir à la traction automobile à partir de 1985 et à la

conformément à un plan qui sera réalisé dans le courant de 1974. Comme je vous l'avais annoncé l'année dernière, j'ai fait prendre des dispositions pour que la première phase de ce plan se déroule à Dijon en confiant dix véhicules aux Services Publics de cette ville. Ces véhicules devant être amenés sur place au mois de décembre prochain, pour être mis en service au début de janvier, je pense qu'il serait opportun qu'une réunion de travail se tienne à Dijon dans le courant de septembre afin de déterminer, en accord avec vous, leurs conditions d'exploitation et les services utilisateurs ». Source : lettre de Paul Delouvrier à Roberet Poujade, le 12 juillet 1973, p. 1.

⁹⁹³ C'est en particulier ce que note Jacques Chéron : « le rôle de l'EDF était toujours zigzagant. On n'a jamais su très bien ce qu'ils voulaient, ce qu'ils ne voulaient pas. » Source : entretien avec Jacques Chéron, Paris, février 2018.

⁹⁹⁴ Yves Bréelle et Jean Mascarello, « Vers les systèmes à hydrogène. La pile à hydrogène », CEA-EDF, Cycle de conférence sur les nouveaux systèmes énergétiques, cycles thermodynamiques associés », Ermenonville, 30 septembre – 4 octobre 1974, p. 1.

⁹⁹⁵ Sur ces questions, voir : JORION, Paul, *Comment la vérité et la réalité furent inventées*, Gallimard, 2009.

⁹⁹⁶ *Science & Vie*, n°678, tome CXXV, mars 1974, p. 85.

⁹⁹⁷ Notons par exemple les propos émis au journal télévisé de 20h de l'ORTF le 16 septembre 1973 : « L'énergie de l'avenir immédiat, ce sera peut-être un combustible, l'hydrogène [...] tiré de la mer qui peut en offrir des quantités illimitées [...] Comme le gaz naturel, l'hydrogène sera distribué partout par de simples tuyaux. » Source : INA, « Le pétrole, quel avenir ? (5^e volet) », journal télévisé de 20h, ORTF, le 16 septembre 1973.

fourniture d'électricité pour les centrales d'appoint, les lieux isolés et les heures de pointe, certaines institutions vont s'en saisir. Non plus en se concentrant sur la réalisation de piles à combustible en elles-mêmes, qui ne représentent plus qu'une partie de la solution d'utilisation énergétique finale, mais en s'attaquant au modèle général de la production, du stockage et de la distribution de l'hydrogène⁹⁹⁸. Après avoir appréhendé le système technico-économique par le bas, on le prend donc cette fois-ci par le haut. C'est le cas du CEA, qui note que « l'hydrogène est un élément qui peut être intéressant pour le transport et le stockage de l'énergie »⁹⁹⁹. C'est aussi celui du Gaz de France. D'un côté, l'entreprise nationale abandonne sa filière à carbonates fondus « devant les échecs enregistrés » et l'impossibilité de reproduire correctement les éléments de pile¹⁰⁰⁰. De l'autre, elle s'attèle avec le CEA à la résolution des problèmes de mise au point d'un réacteur nucléaire compatible à l'échelle industrielle, du cycle d'oxydoréduction et du système de liaisons pour le transfert des fluides et de l'énergie calorifique entre le réacteur et l'installation chimique¹⁰⁰¹.

Si la majeure partie des entreprises privées et des institutions publiques ne positionnent généralement plus leurs recherches de manière directe sur les piles à combustible, cela ne signifie pas qu'elles n'y accordent pas d'intérêt. La conférence d'Ermenonville n'est ainsi pas la seule que donne Yves Bréelle en 1974. En réalité, il est sollicité à de nombreuses reprises du fait de sa position quasi-monopolistique d'expertise sur l'espace social de la technique. Suite aux contractions successives du réseau d'acteurs qui portait les piles à combustible à l'origine, l'IFP et Alsthom ne sont en effet presque plus que leurs derniers spécialistes français reconnus. L'Institut est néanmoins le seul organisme à avoir produit et livré des modèles complets en état de fonctionnement, Alsthom œuvrant

⁹⁹⁸ Nous ne traiterons du stockage que de manière succincte dans ce chapitre puisque les archives montrent qu'il s'agit d'une problématique moins importante pour les acteurs que la production. Nous pouvons cependant mentionner que le stockage de l'hydrogène est envisagé par le biais des hydrures, du stockage souterrain, de bouteilles, d'hydrogène liquéfié et parfois même de piles à combustible.

⁹⁹⁹ *Le Progrès scientifique*, n°171, juillet-août 1974, p. 40.

¹⁰⁰⁰ En 1979, le Gaz de France fait le bilan de ses recherches arrêtées en 1974 : « Le bilan "brut" des quinze années de recherches de Gaz de France sur les piles à carbonates fondus est le suivant : les électrodes semblent pouvoir donner satisfaction dans le cadre de l'objectif fixé (pile débitant plus de 50 mW/cm² pendant 10 000 h) ; la rétention des carbonates dans une matrice poreuse, sans être maîtrisée, permet de faire des progrès notables. Elle apparaît toujours comme une solution possible du problème de l'immobilisation de l'électrolyte ; divers perfectionnements technologiques conduisent à une augmentation des performances électriques permettant d'atteindre et même de dépasser les 50 mW/cm² fixé comme but minimum (sous 0,7 à 0,8 V) ; d'autre part, la durée moyenne d'un élément de pile est passée de quelques heures à quelques centaines d'heures, voire exceptionnellement à quelques milliers d'heures. Toutefois, de nombreuses difficultés ne sont pas résolues. Le plus gros écueil est la non reproductibilité des éléments de piles construits. Deux ensembles de facteurs semblent être les principaux responsables de la non reproductibilité : il s'agit d'une part de l'ignorance des propriétés et du comportement en place des pastilles d'électrolyte, dont la préparation est, même après de longs travaux, difficilement reproductible, (en particulier la caractérisation des propriétés des poudres d'électrolyte de départ et de la texture des pastilles obtenues est encore incomplète), d'autre part, de la prise en compte un peu tardive des phénomènes de dégradation de l'électrolyte (dissociation, solubilisation, grimpage, réaction avec les aciers, avec l'hydrogène). » Source : Gaz de France, « Historique du programme de recherche sur les piles à combustible à carbonates fondus mené par le Gaz de France », le 9 mai 1979, p. 3.

¹⁰⁰¹ *Le Progrès scientifique*, n°171, juillet-août 1974, p. 44.

encore à un niveau largement plus expérimental malgré son statut industriel. Deux secteurs d'application se distinguent particulièrement pour les générateurs électrochimiques : l'automobile électrique et l'océanographie. Les interventions d'Yves Bréelle dans le premier secteur y représentent surtout l'occasion de promouvoir la technique auprès des constructeurs, des fournisseurs d'énergie et des pouvoirs publics : par son argumentation, il tente de faire basculer le rapport de force et le jeu des alliances en place. Au colloque « Transports » organisé par Elf en avril, et alors que les pétroliers s'interrogent quant à « la situation énergétique créée par la cherté des produits pétroliers »¹⁰⁰² et au rôle futur de l'hydrogène dans le système énergétique, Yves Bréelle fait par exemple de la pile H₂-air le seul type à émerger « des différentes filières étudiées »¹⁰⁰³ depuis 1960 et « capable d'un développement industriel »¹⁰⁰⁴.

Un point de vue qu'il émet de nouveau au colloque « Le véhicule urbain et son avenir », institué par l'ATEC (Association pour le développement des techniques de transport, d'environnement et de circulation) à Paris en octobre, précisant toutefois que l'hydrogène « se prête moins bien que l'essence au stockage en petite quantité » et que le poids du réservoir « devient un facteur non négligeable dans le bilan des évaluations massiques »¹⁰⁰⁵. Ces déclarations portent partiellement puisque TREGIE (Transports, recherches, études, groupement d'intérêt économique) et Renault donnent leur accord à l'IFP pour une coopération d'études portant sur « la conception et l'évaluation de piles à hydrogène adaptées à la traction électrique routière »¹⁰⁰⁶. Yves Bréelle participe également à la réunion sur les piles à combustible qui se tient à Bruxelles sous la présidence de la Commission des communautés européennes¹⁰⁰⁷, et dont le rôle est de définir une nouvelle version de leur potentielle contribution à

¹⁰⁰² Elf, « Colloque Transports », 10 avril 1974, p. 1.

¹⁰⁰³ Au cours des discussions suivant son intervention, Yves Bréelle mentionne notamment que la pile à méthanol « pose encore plusieurs problèmes graves : a) le catalyseur : la seule solution qui semble valable est le platine, mais elle conduit à une consommation de 0,3 g/cm² d'électrode pour 500 mV/cm² [...] ce qui est inacceptable. Les efforts actuels consistent donc à essayer de remplacer le platine. b) la pollution : la pile à méthanol ne produit que CO₂, H₂O. L'élimination de l'eau ne pose pas de problème. Mais l'élimination du CO₂ conduit à un entraînement important du méthanol dont la tension de vapeur est élevée. Il est donc indispensable de piéger ce méthanol entraîné et, de plus, de mettre un pot catalytique à l'échappement. » Source : ELF, « Colloque Transports », 10 avril 1974, p. 72.

¹⁰⁰⁴ ELF, « Colloque Transports », 10 avril 1974, p. 65.

¹⁰⁰⁵ SALE, Bernard, BREELLE, Yves, « Les nouveaux systèmes de propulsion envisageables pour les véhicules urbains », in *La revue de l'Institut français du pétrole*, Vol. XXIX, n°6, novembre-décembre 1974, p. 910.

¹⁰⁰⁶ IFP, projet de lettre de Claude Lancelle de TREGIE à Bernard Salé de l'IFP, le 5 mars 1980, p. 1.

¹⁰⁰⁷ Participent à cette réunion : le chef de département au CEN G. Spaepen (Belgique), l'ingénieur principal à l'IFP Yves Bréelle (France), le chef du département Piles d'Alstom Bernard Verger (France), H. G. Giorda de la Direzione Laboratori Centrali Fiat (Italie), le docteur F. J. Rohr de Brown, Boveri & Cie (RFA), le docteur Franz A. Pohl de AEG-Telefunken (RFA), le docteur H. Jahnke de Robert Bosch GmbH (RFA), le docteur von Strum de Siemens (RFA), le docteur K. R. Williams de Shell International Petroleum Company Ltd. (Royaume-Uni), le docteur G. M. Dijkhuis de DSM Centraal Laboratorium (Pays-Bas). La commission des communautés européennes est représentée par le directeur Christopher Layton, le chef de division C. Garric et le secrétaire J. G. Wurm. Source : Commission des communautés européennes, « Séminaire sur les piles à combustible. Compte-rendu de la réunion tenue à Bruxelles le 28 juin 1974 », 1974, p. 2.

« la prospérité de l'industrie automobile »¹⁰⁰⁸. Le tour de table effectué donne d'ailleurs à voir que les recherches de l'IFP et d'Alstom en la matière ne sont pas un effort isolé au niveau européen et que tous les pays en sont à peu près au même stade d'avancement.

Le CEN (Centre d'études nucléaires) de Mol en Belgique a par exemple repris en 1969 les activités de la firme SERAI, qui avait réalisé une pile hydrogène-oxygène sous le contrôle d'un petit groupe d'entreprises belges et du gouvernement. À partir de cette date, une équipe de quatre personnes du CEN avait entrepris de diriger les travaux vers la fabrication d'électrodes multicouches avec pour objectif « la production industrielle et l'abaissement des coûts tout en maintenant la plus grande stabilité possible »¹⁰⁰⁹. Au Royaume-Uni, Shell n'a « pas encore pris de décision » pour le combustible qui devrait être utilisé dans le futur mais a tout de même réussi à équiper une voiture d'une pile de 2, 5 kW. L'orientation des recherches reste donc étendue : « méthanol, hydrogène, production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures, abaissement des coûts »¹⁰¹⁰. Aux Pays-Bas, la Dutch States Mines n'est pas plus avancée puisqu'elle vient à peine de commencer à s'intéresser au domaine avec un groupe de « 2 à 3 personnes » pour d'une part obtenir « l'expérience pour la construction d'une pile prototype » et d'autre part étudier « la catalyse électrique du méthanol en électrolyte acide »¹⁰¹¹. En Italie, Fiat a quant à elle « naturellement » décidé de se pencher sur l'adaptation à la traction électrique mais s'est concentrée sur l'utilisation du couple zinc-air.

C'est peut-être en République fédérale d'Allemagne¹⁰¹² que les recherches sont les plus poussées : la compagnie R. Bosch GmbH s'est essayée au méthanol avec des catalyseurs inorganiques jusqu'en 1971 puis organiques ; Siemens possède une équipe de 25 chercheurs pour la construction de piles hydrogène-oxygène à électrolyte alcalin et électrodes poreuses en nickel Raney allant de 700 W à 35 kW et des piles à hydrazine pour des applications stationnaires ; AEG, qui a dû repartir de zéro après l'incendie de son laboratoire, est en état de commercialiser des modèles à basse température et

¹⁰⁰⁸ Commission des communautés européennes, « Séminaire sur les piles à combustible. Compte-rendu de la réunion tenue à Bruxelles le 28 juin 1974 », 1974, p. 3.

¹⁰⁰⁹ Commission des communautés européennes, « Séminaire sur les piles à combustible. Compte-rendu de la réunion tenue à Bruxelles le 28 juin 1974 », 1974, p. 4.

¹⁰¹⁰ Commission des communautés européennes, « Séminaire sur les piles à combustible. Compte-rendu de la réunion tenue à Bruxelles le 28 juin 1974 », 1974, p. 4.

¹⁰¹¹ Commission des communautés européennes, « Séminaire sur les piles à combustible. Compte-rendu de la réunion tenue à Bruxelles le 28 juin 1974 », 1974, p. 7.

¹⁰¹² Loïk Le Floch-Prigent donne des indications sur la faiblesse des relations entre la France et l'Allemagne sur la question des piles à combustible. Pour lui, elle est en grande partie due à un problème de communication : « Le problème que nous avons tous à l'époque, c'est que les Allemands ne parlaient pas très bien anglais et que nous ne parlions pas l'allemand. Et ça a conduit la plupart d'entre nous à regarder beaucoup plus les États-Unis que l'Allemagne. À cause d'un problème de langage. C'était extrêmement difficile. J'ai été à une conférence sur les piles à combustible en Allemagne. Je pensais que j'allais avoir un écouteur pour la traduction en anglais. Il n'y avait rien. Je suis resté deux jours poliment en essayant de déchiffrer. J'avais les documents. Comme il y avait pas mal de trucs techniques, je n'ai pas complètement perdu mon temps... » Source : entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

électrolyte acide pour petites stations radio dans les pays en voie de développement » ; enfin, la firme Brown Boveri & Cie a sélectionné les piles à haute température (800 à 1000°C) et à électrolyte solide (zircone) pour installations stationnaires grâce à un financement gouvernemental.

Il ressort surtout de la discussion que les mêmes thématiques préoccupent les laboratoires : la sécurité (voir encadré 1), les catalyseurs, les électrodes à air et les combustibles, qui restent l'apanage d'un « choix politique » selon le chef du département Piles d'Alsthom Bernard Verger. Ce dernier rend compte des différences existantes : « la France s'oriente vers l'hydrogène tandis que l'Allemagne et les États-Unis envisagent plutôt le méthanol. L'Italie (Fiat) est la seule à étudier un combustible solide : le zinc. » Et si Yves Bréelle confirme que l'hydrogène est « une voie sage étant donné que le développement des piles à hydrogène est le plus avancé » et qu'il est « le seul combustible non polluant », on s'accorde à dire qu'un tel choix « ne peut plus être fait à l'échelle nationale » et qu'il appartient donc « à la Communauté de définir quel sera le combustible européen de l'avenir »¹⁰¹³. *Mutatis mutandis* on se retrouve là aussi face à un ensemble de positions similaires à celles exprimées par les constructeurs automobiles en France, qui peinent de leur côté à s'engager dans la voie de la traction électrique malgré les efforts fournis en ce sens par l'EDF¹⁰¹⁴. Une discussion entre le directeur à la direction générale de l'électricien Albert Robin et le chef du Service des études avancées de la Régie nationale des Usines Renault Pierre Bouthors, ayant eu lieu à Arc et Senans en 1973, résume bien l'état des enjeux. Au cours d'une table ronde sur le « passage de la situation présente à la situation future », le premier interroge l'assemblée : « qui va être la locomotive industrielle ? » Le second lui répond alors de façon catégorique :

« Lorsque des batteries plus performantes seront disponibles, les règlements à peu près au point, il existera un marché et le constructeur d'automobile sera la locomotive. Dans le cadre de l'économie qui existera à ce moment-là il pourra faire face aux problèmes posés par un développement d'abord progressif, ensuite à plus grande échelle. Dans l'étape intermédiaire, il y a des solutions à trouver qui ne dépendent pas du tout des constructeurs d'automobiles : problèmes des sources, des réglementations, de distribution

¹⁰¹³ Commission des communautés européennes, « Séminaire sur les piles à combustible. Compte-rendu de la réunion tenue à Bruxelles le 28 juin 1974 », 1974, p. 11.

¹⁰¹⁴ Il s'agit d'un constat qu'établit également Loïk Le Floch-Prigent : « D'une façon générale, dans tous les développements que nous avons fait sur les accumulateurs, il y avait une réticence forte de l'ensemble du monde industriel français à s'engager dans la voie. C'était un bâton de pèlerin permanent avec des réticences du secteur automobile qui ne voulait pas en entendre parler, des réticences de nos experts Maurice Magnien et Alexis Dejou. Le seul qui avait envie de regarder pour des raisons intellectuelles, c'était Hubert Autruffe. Le seul qui avait envie qu'on aille jusqu'au bout des accumulateurs c'était lui. » Source : entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

d'énergie. Il faut une formule de progression faisant intervenir l'ensemble des parties intéressées, pilotées par l'État, véritable locomotive dans l'étape intermédiaire. »¹⁰¹⁵

Ces remarques soulignent l'importance, pour la diffusion des piles à combustible, des représentations sociales que se font les chercheurs et les industriels des propriétés du jeu d'acteurs avec lesquels ils interagissent : comme dans les années quarante en Angleterre et dans les années cinquante en France, et au-delà des performances propres à la technique, ceux-ci attendent des pouvoirs publics qu'ils prennent des décisions structurelles leur permettant l'orientation de leurs travaux. Sans impulsion étatique ou supranationale, c'est une position d'attente qui est adoptée. Certains ont parfaitement conscience de ces problèmes de dissémination de la responsabilité, à l'instar Derek P. Gregory de l'Institute of Gas Technology qui admet en conclusion de la « Hydrogen Economy Miami Energy Conference » que « chacun attend que l'hydrogène devienne universellement utilisable grâce aux efforts des autres et ne veut pas être impliqué dans les recherches et développements nécessaires »¹⁰¹⁶. Une situation qui n'a guère évolué depuis¹⁰¹⁷. Face à des générateurs susceptibles de bouleversements majeurs pour la structure des systèmes techniques nationaux, cette posture n'est pas dénuée de réalisme historique : comme l'a montré Nuno Bento, les États d'Europe de l'ouest ont souvent eu un rôle capital dans le déploiement des systèmes énergétiques caractérisés par un développement d'infrastructures d'ampleur et la nécessité d'investissements lourds, tels que les réseaux d'électricité et de gaz¹⁰¹⁸.

Le second secteur d'application qui se dessine, l'océanographie, est plus actif. Mais c'est justement parce que l'État y représente encore le stimulus initial. L'IFP reçoit ainsi, en partenariat avec Matra, la charge d'un contrat passé avec le CNEXO (Centre national pour l'exploitation des océans) pour « l'étude d'un générateur électrique autonome sous-mariné »¹⁰¹⁹ Si l'objectif est d'abord d'alimenter de manière probatoire une tête de puits, trois gammes de puissance sont tout de même envisagées : une gamme de 300 watts - 1 kW « pour les applications de longue durée (plusieurs années avec une opération de maintenance tous les trois à six mois) ; une gamme de 2 - 5 kW « pour des applications de quelques jours pour l'alimentation en énergie de modules d'intervention habités ou automatiques » ; une gamme de 10 -30 kW « pour la propulsion d'engins pendant plusieurs heures,

¹⁰¹⁵ Ministère de l'Équipement, « Vers une deuxième génération de véhicules ? Les véhicules électriques », La documentation française, 1974, pp. 150-151.

¹⁰¹⁶ *Sciences et techniques*, n°21, 15 mars 1974, p. 50.

¹⁰¹⁷ PICARD, Fabienne, REY, Bénédicte, *op. cit.*, 2015, pp. 205-212.

¹⁰¹⁸ BENTO, Nuno, « Le défi du déploiement des nouveaux réseaux énergétiques : quel rôle pour l'État ? », in *Vie & sciences de l'entreprise*, Vol. 1, n°190, 2012, pp. 71-94.

¹⁰¹⁹ ASTEO, « VIème colloque sur l'exploitation des océans. Recueil des résumés, V. Sources autonomes d'énergie en environnement marin », colloques de l'ASTEO, année 1974.

voire même quelques jours »¹⁰²⁰. Les caractéristiques techniques des prototypes montrent que l'on tient compte de multiples facteurs économiques et environnementaux : on fait par exemple le choix d'une pile à hydrogène de faible puissance à la fois pour favoriser sa durée de vie, sa fiabilité et son rendement, et pour diminuer les quantités de réactifs à stocker et les risques de pollution du milieu. En raison de l'écart existant entre la puissance moyenne de 300 watts requise et les pointes à 15 kW nécessaires plusieurs fois par semaine pour la manœuvre des vannes, le système – entre autres composé d'un bloc électrochimique de soixante-douze éléments unitaires – est aussi couplé à une batterie d'accumulateurs nickel-cadmium (Ni-Cd). Pour limiter les dangers représentés par l'emploi de l'oxygène sous forte pression, éviter d'adapter son fonctionnement aux variations de la pression extérieure et simplifier les problèmes de manipulations et de sécurité, la pile est enfin placée dans une enceinte d'air proche de 1 bar¹⁰²¹.

Le programme du projet se compose d'essais de qualification de la pile et des auxiliaires associés afin de pouvoir garantir leur fiabilité : avant la réalisation du générateur complet de 300 W - 1 kW capable de fonctionner en enceinte fermée pendant trois mois, un premier modèle subit avec succès des tests à 50 watts, 200 watts et 1, 3 kW, à température ambiante et à 0°C, des essais de vibrations selon les normes marines en vigueur et un essai de chocs correspondant à une accélération de 25 g. Au « VI^{ème} colloque sur l'exploitation des océans » organisé par l'ASTEO (Association scientifique et technique pour l'exploitation des océans) au Grand Hôtel à Paris du 13 au 15 février 1974, et dans le cadre de la séance présidée par le directeur de la prospective technique de la SAFT Jean-Paul Gomis et consacrée au « sources autonomes d'énergie en environnement marin », Yves Bréelle réinscrit cette production dans un schéma discursif similaire aux précédents. Dans un exposé qu'il fait sur « les possibilités d'application des piles à hydrogène en milieu marin », avec l'ingénieur au département Off-shore des Engins Matra Michel de Wolf, il impose un énoncé futuriste « cohérent » entremêlant sous un même régime une échelle temporelle, un modèle de transformation et une logique d'action¹⁰²² :

¹⁰²⁰ IFP, « Possibilité d'application des piles à hydrogène en milieu marin (communication présentée lors du VI^e colloque de l'ASTEO », février 1974, p. 1.

¹⁰²¹ Le fonctionnement du système complet est finement décrit de la manière suivante par Yves Bréelle : « La pile absorbe l'air de l'enceinte en consommant l'oxygène et en rejetant l'azote. La dépression qui en découle provoque l'ouverture de l'électrovanne d'arrivée d'oxygène, jusqu'à rétablir le taux d'oxygène initial. L'hydrogène issu du stockage après détente est introduit dans une boucle de circulation qui traverse la pile. Cette circulation est assurée par une pompe. Lorsque le taux d'impureté dans cette boucle atteint une valeur limite, une fraction de ce mélange combustible est envoyée sur un réacteur catalytique situé dans l'enceinte, lui-même alimenté à partir de l'air de l'enceinte par un ventilateur. Enfin, l'électrolyte circule dans la pile entre un réservoir supérieur et un réservoir inférieur par l'intermédiaire d'une pompe, l'eau formée se dilue dans l'électrolyte jusqu'à une limite de concentration [...] Une autre option prévoit la condensation de l'eau formée dans la boucle d'hydrogène et son évacuation à l'extérieur de l'enceinte. » Source : IFP, « Possibilité d'application des piles à hydrogène en milieu marin (communication présentée lors du VI^e colloque de l'ASTEO », février 1974, pp. 4-5.

¹⁰²² CHATEAURAYNAUD, Francis, DEBAZ, Josquin, « Scénariser les possibles énergétiques. Les gaz de schiste dans la matrice des futurs », in *Mouvements*, Vol. 3, n°75, pp. 53-69.

« Les piles à hydrogène seront donc appelées à jouer un rôle de plus en plus important dans le domaine de l'exploitation et de l'exploration des ressources océanographiques. Elles bénéficieront, au cours des prochaines années, et dans une très large mesure de la promotion de l'hydrogène en tant que combustible relais de l'énergie nucléaire. La production et la distribution de ce combustible en quantité massive pourraient intervenir dès 1985. Dans cette perspective les recherches actuellement menées pour l'utilisation des piles en traction urbaine vont permettre d'abaisser de façon importante le prix de ces piles qui devrait tendre progressivement vers une valeur située, pour la pile seule, entre 200 et 300 F/kW. Parallèlement d'ailleurs, le développement en cours du nouveau mode de stockage sur hydrure devrait apporter une réduction importante de poids du stockage et simplifier de façon notable les problèmes de sécurité. »¹⁰²³

L'IFP n'est pas le seul organisme à œuvrer dans le secteur des piles à combustible à destination de l'océanographie. L'association entre Alsthom et Exxon poursuit en effet ses travaux entamés en 1970 pour le CEMA (Centre d'études marines avancées) et la Marine nationale, visant à « l'investigation des fonds marins et l'extraction des matériaux »¹⁰²⁴. Elle obtient même un prêt de la CEE (Communauté économique européenne) sur le sujet¹⁰²⁵. Au contraire de l'IFP pourtant, les deux entreprises ne se sont pas insérées dans le paradigme hydrogénique. Sous la direction du chef de service Claude Hespel, ce sont toujours des piles à hydrazine et eau oxygénée qui sont réalisées « à un stade de développement assez avancée »¹⁰²⁶. Dotées d'électrodes bipolaires, de membranes poreuses et de catalyseurs sans platinoïdes, celles-ci utilisent de plus des structures filtre-pressé de type « Warszawski », où les éléments empilés sont alimentés en convection forcée par des solutions électrolytiques faiblement concentrés en réactifs. Il en va de même pour les piles devant servir à la traction électrique, qui utilisent encore du méthanol.

Encadré 1 – L'accident du dirigeable LZ 129 Hindenburg et la peur de l'hydrogène : analyse de la mobilisation d'un évènement au regard des cadres sociaux de la mémoire

Au milieu des années soixante-dix, la sécurité vis-à-vis de l'hydrogène est un problème que l'on aborde de façon récurrente dans les espaces de dialogue entre les milieux de la recherche, de l'industrie et de l'administration. Au moment où l'on envisage de produire, de distribuer et d'utiliser

¹⁰²³ IFP, « Possibilité d'application des piles à hydrogène en milieu marin (communication présentée lors du VI^e colloque de l'ASTEO », février 1974, p. 9.

¹⁰²⁴ ASTEO, « VI^e colloque sur l'exploitation des océans. Recueil des résumés, V. Sources autonomes d'énergie en environnement marin », colloques de l'ASTEO, année 1974.

¹⁰²⁵ Archives Peugeot, lettre de H. Cuffé à MM. Lazare et Guerreau, « Historique de l'association AP-Alsthom », le 29 novembre 1979, p. 3.

¹⁰²⁶ *Sciences et techniques*, n°6, 15 septembre 1973, p. 7.

ce gaz à grande échelle, l'interrogation des mesures à prendre pour pallier les dangers potentiels de sa manipulation semble être la composante d'un processus de protection publique assez classique. Pourtant, l'accroissement de ces préoccupations ne trouve pas uniquement sa source dans le développement du paradigme hydrogénique mais aussi dans un ensemble de représentations sociales négatives de l'hydrogène reliées à l'accident survenu au dirigeable LZ 129 Hindenburg le 6 mai 1937. Jacques Chéron explique : « Dès qu'on présentait les piles, les gens dans la salle disaient : "oui, mais l'Hindenburg" ». Chaque fois que je faisais une conférence sur les piles à hydrogène, ça venait tout de suite. »¹⁰²⁷ Ce témoignage n'est pas isolé. D'autres chercheurs font référence à des expériences similaires à l'occasion d'interventions publiques. Dans un article sur les possibilités d'exploitation de l'hydrogène paru en 1972, le magazine *Science & Avenir* consacre également un encart au Hindenburg pour souligner que « son explosion frappa les imaginations, prévenant contre l'utilisation généralisée de ce gaz »¹⁰²⁸. La mobilisation de cet événement, que Ed Regis qualifie d'expression de la « technologie pathologique »¹⁰²⁹, ainsi que son traitement posent question quant au conditionnement des discours et des mises en récit du passé : quels sont les ressorts ayant permis à l'histoire de ce dirigeable de perdurer dans les représentations de certains groupes sociaux pendant plusieurs dizaines d'années ? Est-ce parce que cet accident aérien se démarque des autres ? Et quelles en sont les conséquences pour les milieux promouvant l'hydrogène dans les années soixante-dix ? Sans prétendre fournir une interprétation exhaustive de ce sujet, qui nécessiterait une thèse à part entière, nous proposons ici des éléments d'analyse permettant de dégager quelques pistes de recherche.

Pour comprendre comment cet accident s'impose dans les représentations collectives de l'hydrogène, il faut tout d'abord le replacer dans son contexte socio-historique. Jusqu'à l'orée de la Seconde Guerre mondiale, les zeppelins assurent la seule liaison transatlantique par les airs¹⁰³⁰. Parmi eux, le LZ 129 Hindenburg, est « le plus large, le plus long et le plus luxueux »¹⁰³¹ à voler. S'il est initialement conçu pour fonctionner à l'hélium, c'est finalement à l'hydrogène qu'il est rempli : le gouvernement des États-Unis, où se situe la majeure partie des réserves mondiales d'hélium, ordonne l'arrêt des exportations à cette période pour ne pas aider au développement de flottes étrangères pouvant servir en temps de guerre. Après avoir accompli plusieurs dizaines de trajets en 1936, c'est à l'arrivée du premier vol inaugural du Hindenburg pour l'année 1937, à Lakehurst dans le New Jersey, que survient son accident dont les causes réelles sont encore discutées. Trente-cinq personnes, sur les quatre-vingt-dix-sept passagers et membres d'équipage, y perdent la vie. Or c'est moins l'accident qui fait la singularité de cet événement que le traitement médiatique qui lui est réservé, lui-même déterminé par les attentes sociales de l'époque. L'arrivée d'un zeppelin est une chose rare en 1937 et attire les journalistes et les caméras de compagnies proposant des films d'actualités. L'explosion du Hindenburg est ainsi filmée par la Movietone News et la Paramount. Elle est également commentée pour la radio par Herb Morrison, qui prononce l'expression « Oh the humanity! », intégrée depuis dans le langage courant américain.

Sans surestimer l'importance de la couverture médiatique pour la mesure de l'impact d'un événement sur les représentations collectives, il est toutefois possible d'admettre qu'elle en reste un indicateur significatif¹⁰³² : comme dans le cas de l'universalisation des savoirs scientifiques¹⁰³³, c'est ici la circulation des images de la catastrophe qui en fait sa notoriété et non l'inverse. Celle-ci contribue

¹⁰²⁷ Entretien avec Jacques Chéron, Paris, février 2018.

¹⁰²⁸ *Science & Avenir*, n°310, décembre 1972, p. 1028.

¹⁰²⁹ REGIS, Ed, *The Hindenburg Disaster and the Birth of Pathological Technology*, Basic Books, 2015.

¹⁰³⁰ DIENEL, Hans-Liudger, SCHIEFELBUSCH, Martin, « German Commercial Air Transport until 1945 », in *Revue belge de philologie et d'histoire*, n°78, 2000, pp. 945-967.

¹⁰³¹ LACE, William W., *The Hindenburg Disaster of 1937*, Chelsea House, 2008, p. 12.

¹⁰³² MOYER, Robert C., « 'When That Great Ship Went Down': Modern Maritime Disasters and Collective Memory », in *The International Journal of Maritime History*, Vol. 26, n°4, 2014, pp. 734-751.

¹⁰³³ EHRHARDT, Caroline, « How Mathematicians Remember? », in *Cahiers de l'UNESCO*, 2012, pp. 103-120.

directement à la marginalisation de l'hydrogène et des dirigeables comme moyen de locomotion, qui doivent de plus faire face à la concurrence croissante des avions à la fin des années trente¹⁰³⁴. C'est toute la « puissance du milieu matériel »¹⁰³⁵ que décrit Maurice Halbwachs. Mais la mémoire de l'événement n'aurait pas perduré sans la présence de socles symboliques la fixant dans l'espace social et dans le temps : livres et films notamment, dont *The Hindenburg* de Robert Wise sorti en 1975, alimentent régulièrement la culture populaire. L'émergence du paradigme hydrogénique dans les années soixante-dix vient lui donner un appui supplémentaire. Elle encadre alors socialement les discours et oblige les promoteurs de l'hydrogène à la gérer sinon la réactiver et l'entretenir régulièrement au travers d'usages publics du passé. Une situation qui est d'ailleurs encore d'actualité, comme le fait remarquer en 2015 un universitaire français travaillant sur l'hydrogène : « Avec S., nous faisons un congrès sur l'hydrogène un jour. Donc nous passions et nous faisons une animation. M. [un autre chercheur] nous a sorti le Hindenburg (rires). Donc il fallait remonter la pente (rires). Moi je l'anticipe maintenant. »¹⁰³⁶ En ce sens, la mémoire de l'accident du Hindenburg est aussi bien un « poids » qu'un « choix » du passé¹⁰³⁷.

8.2 Diffusion, renforcement et institutionnalisation du paradigme hydrogénique

La position d'Alstom sur les piles à hydrogène va pourtant évoluer en même temps que de nouveaux générateurs sont étudiés. Présentées comme des impératifs au succès commercial, les idées qui présidaient aux travaux en 1971, à savoir l'absence de recours au triple contact, l'emploi d'un mélange électrolyte-combustible liquide créant des contacts dynamiques sur les électrodes, l'usage de catalyseurs non nobles et d'éléments filtre-presses minces, sont presque toutes abandonnées au profit d'une nouvelle pile dite « BW2 » (pour Bernard Warszawski 2). Les difficultés rencontrées du côté du décarbonateur, faute de membranes à la fois suffisamment peu coûteuses et peu dispendieuses en consommation d'électricité, ainsi que la complexité du système de régulation, avaient déjà incité à une réorientation des activités en 1973. Œuvrant toujours dans une optique industrielle de résolution simultanée des questions de recherche pour aboutir directement à des appareils exploitables¹⁰³⁸, la DRE d'Alstom était en effet passée à l'utilisation d'un électrolyte tamponné de façon à éviter la formation de carbonate et donc le recours au décarbonateur, tout en conservant la structure de la pile. D'autres problèmes étaient alors apparus : la puissance obtenue était plus faible qu'en milieu basique tandis que le catalyseur – notamment nécessaire à la cathode dont l'activité naturelle était trop faible – s'empoisonnait plus aisément et sa durée de vie était plus courte. À cela, il faut ajouter que le

¹⁰³⁴ BRAUN, Helmut, BRUGMEIER, Klaus, « Understanding Why Airships lost the sky to aeroplanes », Communication paper, Annual Conference of the Economic History Society, University of Durham, 26-28 march 2010, pp. 80-85.

¹⁰³⁵ HALBWACHS, Maurice, *La mémoire collective*, Les classiques des sciences sociales, 2001 (1950), p. 83.

¹⁰³⁶ Entretien avec P., 2015.

¹⁰³⁷ LAVABRE, Marie-Claire, « La “mémoire collective” entre sociologie de la mémoire et sociologie des souvenirs ? », <halshs-01337854>, 2016, p. 2.

¹⁰³⁸ C'est ce que confirme le directeur général de l'opération Carl C. Heath à la DGRST : « L'évolution de notre programme de recherche et développement de la pile à méthanol au cours des années écoulées peut quelque peu dérouter si l'on n'a pas présent à l'esprit l'objectif de la coopération qui est d'aboutir à une pile à combustible commercialisable. Il aurait été possible, il y a déjà deux ans de cela, de réaliser un modèle de démonstration, mais celui-ci n'aurait jamais eu de suite sur le plan industriel. C'est ce double objectif, technique et économique, qui nous a conduit à des réorientations de travaux avant de figer la solution qui présentent des chances raisonnables de succès. » Source : Carl C. Heath, « Note pour la DGRST », le 17 janvier 1975, p. 6.

méthanol continuait à diffuser dans l'air présent à la cathode, de sorte qu'il y avait besoin d'un système de récupération du combustible, sans compter que celui-ci se décomposait chimiquement au contact du catalyseur. Bien que des mesures supplémentaires aient été prises pour limiter la diffusion du méthanol et améliorer les rendements, telles que l'insertion d'une barrière entre les électrodes et l'élévation de la température de fonctionnement jusqu'à 130°C, les gains obtenus étaient encore insuffisants. Au-delà de ce seuil, les matériaux bon marché utilisés n'auraient d'ailleurs plus convenu et des techniques différentes auraient dû être mises au point. À l'automne 1974, le comité de direction du projet décide ainsi de « demeurer dans le cadre de technologies déjà acquises, donc de s'en tenir à des températures de fonctionnement moindres et de revenir au milieu basique naturellement favorable à une activité électrochimique élevée »¹⁰³⁹.

Bernard Warszawski dépose un nouveau brevet intitulé « Nouvelle structure et nouveau système de pile à combustible notamment pour combustible carbone et air atmosphérique »¹⁰⁴⁰. Il revient au triple contact – le méthanol étant introduit sous forme vaporisée –, à des électrolytes alcalins et à l'utilisation du platine comme catalyseur. Comme on l'analyse à la DGRST, tous ces changements sont en fait dus à une conception tournant encore autour du problème de la décarbonatation : cette solution consiste « à piéger le carbonate dans un matériau placé entre l'électrode et l'électrolyte, puis, en retirant périodiquement l'électrolyte tout en laissant l'alimentation en méthanol se poursuivre, à laisser le pH de ce matériau s'abaisser (grâce à l'acidité du méthanol) jusqu'à un taux auquel le carbone se dégage spontanément sous forme de CO₂ »¹⁰⁴¹. En pratique, ce principe revient à faire circuler alternativement l'électrolyte dans un réservoir, à l'y laisser une minute, et à le réinjecter dans la pile pendant deux minutes. De cette manière, un tiers des éléments sont « en permanence »¹⁰⁴² en décarbonatation et deux tiers en générateur, ce qui permet de ne plus disposer de dégagement de méthanol et de se passer de récupérateur. Si le système fonctionne en laboratoire avec des rendements très variables, les équipes d'Alsthom retombent inévitablement dans un travail d'optimisation classique pour définir les meilleurs catalyseurs et électrodes possibles. Elles repartent même « presque de zéro »¹⁰⁴³ : « faisabilité et durée de vie restent à établir. Le remplissage et la vidange quasi continus peuvent soumettre chimiquement et mécaniquement la pile à des contraintes élevées. Comment se comporteront dans le temps les matériaux pièges à carbone ? » se demande notamment Hubert Autruffe.

¹⁰³⁹ DGRST, « Note sur la pile à combustible Alsthom Exxon », le 10 juin 1975, p. 2.

¹⁰⁴⁰ SOSPI Service des brevets, « Nouvelle structure et nouveau système de pile à combustible notamment pour combustible carbone et air atmosphérique. Invention de Bernard Warszawski », déposé le 15 janvier 1974, 8 pages.

¹⁰⁴¹ Hubert Autruffe, « Alsthom/Exxon. Pile à combustible à décarbonatation cyclique », le 8 juin 1975, p. 3.

¹⁰⁴² Hubert Autruffe, « Alsthom/Exxon. Pile à combustible à décarbonatation cyclique », le 8 juin 1975, p. 3.

¹⁰⁴³ Hubert Autruffe, « Alsthom/Exxon. Pile à combustible à décarbonatation cyclique », le 8 juin 1975, p. 3.

Guy Bronoël, mandaté dans un même temps par la DGRST pour produire un rapport technique, reste lui aussi perplexe. Il considère que cette filière « est viable » mais qu'il s'agit d'un retour à une conception « extrêmement classique » des électrodes. De surcroît, il ne voit pas les modèles proposés se diffuser largement en raison de l'utilisation de platinoïdes : « la mise en service de par exemple 10⁷ kW impliquerait la mobilisation de tous les stocks existants (or cela correspondrait à l'équipement de 500 000 petits véhicules). De façon plus générale, ce type de générateur apparaît d'emblée comme mal adapté à son application au véhicule électrique, ne serait-ce que par un coût prévu beaucoup trop élevé du kW »¹⁰⁴⁴. Marque de la dichotomie survenue dans le style de pensée du collectif au début des années soixante-dix et séparant approches universitaires et industrielles, le maître de recherches au Laboratoire d'électrolyse de Bellevue ne propose pas de poursuivre le projet selon les modalités en vigueur dans les laboratoires de l'entreprise – à savoir un traitement technico-économique des piles à combustible s'appuyant tout en même temps sur les moyens de recherche, de développement, d'industrialisation et de commercialisation – mais de le réorienter vers « une étude de longue durée sur une pile complète de petite puissance »¹⁰⁴⁵.

Sous la pression de ces événements, l'ontologie des piles à combustible d'Alstom se reconfigure une fois de plus. Si la traction automobile reste envisageable dans « un futur lointain », ce sont les « utilisations statiques » et « l'espoir d'obtenir de très fortes puissances »¹⁰⁴⁶ qui priment désormais : on ambitionne d'utiliser les appareils en tant que centrales électriques. En outre, des dissensions commencent à poindre au sein du partenariat en 1975. Exxon se donne notamment encore trois ans « avant de se résigner à un éventuel abandon des études »¹⁰⁴⁷. En dehors des critères purement économiques, les mauvaises relations entretenues par le directeur général de l'opération Carl E. Heath avec Bernard Warszawski ne sont peut-être pas étrangères à une telle décision. C'est en tout cas ce que reconnaît Bogdan Broniewski lorsqu'il évoque « des problèmes internes à la collaboration » à cette période : « j'avais tout mis en œuvre pour établir des rapports humains acceptables entre les deux hommes. À cet effet je me transformai en pasteur, en psychologue, en conseiller, le tout avec une grande douceur car on marchait sur un terrain miné. C'était une situation pénible pour toute l'équipe [...] », explique le directeur des recherches de la société¹⁰⁴⁸. Contestée en son sein par la direction du projet, la DRE d'Alstom ne l'est pas moins en externe : la DGRST et la DIMME

¹⁰⁴⁴ Guy Bronoël, « Remarques sur le projet pile à combustible “air-méthanol” présenté par Alstom », vers 1974, p. 2.

¹⁰⁴⁵ Guy Bronoël, « Remarques sur le projet pile à combustible “air-méthanol” présenté par Alstom », vers 1974, p. 3.

¹⁰⁴⁶ Direction générale de l'Industrie, « Note pour le Service des affaires techniques. Pile Alstom », le 18 décembre 1978, p. 2.

¹⁰⁴⁷ DGRST, « Note sur la pile à combustible Alstom Exxon », le 10 juin 1975, p. 2.

¹⁰⁴⁸ BRONIEWSKI, Bogdan, *op. cit.*, 2014, p. 137.

(Direction des industries métallurgiques, mécaniques et électriques)¹⁰⁴⁹, ont de nombreux doutes et menacent de retirer leur soutien financier. Une lettre qu'envoie un autre évaluateur du dossier¹⁰⁵⁰, Jean Delsey, du Centre d'évaluation et recherche des nuisances rattaché à l'Institut de recherche des transports, à Loïk Le Floch-Prigent de la DGRST en atteste : « les résultats obtenus au cours de la phase I sont trop insuffisants pour engager la phase II et les risques d'échec paraissent très grands », écrit-il¹⁰⁵¹. Surtout, l'objectif de résultat, c'est-à-dire la livraison d'un prototype évalué à 200 dollars/kW, n'a pas été atteint en juin 1975, date initialement prévue pour les contrôles¹⁰⁵².

Pour ne pas perdre les faveurs de la Délégation, Alsthom va alors tenter de faire entrer ses appareils dans le paradigme hydrogénique en modifiant leurs qualités intrinsèques. Bogdan Broniewski se rapproche en effet de la demande que Maurice Magnien avait formulée quelques temps plus tôt pour valoriser « l'utilisation d'hydrogène au lieu de méthanol »¹⁰⁵³ : la nouvelle pile élaborée par Bernard Warszawski « peut être adaptée à l'utilisation de l'hydrogène », annonce-t-on¹⁰⁵⁴. Mieux, le pari est pris de reconcentrer les efforts sur un système de même architecture mais « utilisant de l'hydrogène obtenu à partir de méthanol »¹⁰⁵⁵. Cette voie avait pourtant été abandonnée dès 1970 « parce que moins intéressante et plus compliquée a priori »¹⁰⁵⁶. Et si Alsthom et son actionnaire la CGE avaient tout de même estimé nécessaires un travail de veille et une prise de contact avec Pratt & Whitney¹⁰⁵⁷ en vue « d'explorer les variantes », il avait été décidé de ne pas intervenir de façon aussi directe que sur la filière à méthanol pour « ménager la susceptibilité d'Exxon »¹⁰⁵⁸. Preuve supplémentaire de ce processus de légitimation s'inscrivant dans la tendance générale, un électrolyseur « filtre-presse à compartiments minces et à circulation forcée », utilisant les mêmes structures que celles des piles à combustible » est mis à l'étude par l'entreprise. Un rapport caractérisant la technique fait bien montre

¹⁰⁴⁹ En conséquence de la création de la Direction générale de l'Industrie, la DIMETAL (Direction des industries métallurgiques) et la DIMELEC (Direction de la construction mécanique, électrique et de l'électronique) – qui gérait les évaluations techniques sur les piles à combustible pour le compte de la DGRST – fusionnent pour fonder la DIMME en 1974.

¹⁰⁵⁰ Quatre rapports techniques sont demandés en tout sur le dossier Alsthom par la DGRST à Jacques Millet, Hubert Autruffe, Jean Delsey et Guy Bronoël. Source : DGRST, « Note à l'intention de MM. Autruffe, Bronoël, Delsey, Millet », le 30 juin 1975, p. 1.

¹⁰⁵¹ Lettre de Jean Delsey à Loïk Le Floch-Prigent, le 5 juin 1975, p. 1.

¹⁰⁵² DIMELEC, Rodolphe Greif, « Note pour Monsieur le Directeur. Objet : dossier Alsthom. Entretien avec Robert Remillon », le 10 avril 1974, p. 3.

¹⁰⁵³ DIMELEC, Rodolphe Greif, « Note. Objet : dossier R et D, pile à combustible Alsthom. Entretien avec M. Magnien le 22 mars 1974 », le 25 mars 1974, p. 1.

¹⁰⁵⁴ Carl C. Heath, « Note pour la DGRST », le 17 janvier 1975, p. 6.

¹⁰⁵⁵ DGRST, « Note sur la pile à combustible Alsthom Exxon », le 10 juin 1975, p. 3.

¹⁰⁵⁶ DIMELEC, C. Palvadeau, « Note pour Monsieur le Directeur », le 8 mars 1974, p. 2.

¹⁰⁵⁷ De 1967 à 1975, Pratt & Whitney investit l'équivalent de 250 millions de francs dans les recherches sur les piles à combustible. Il s'agit du leader mondial dans le domaine à cette période. Source : IFP, « Perspective d'avenir de l'hydrogène », juillet 1975, p. 40.

¹⁰⁵⁸ DIMELEC, Rodolphe Greif, « Note pour Monsieur le Directeur. Objet : dossier Alsthom. Entretien avec Robert Remillon », le 10 avril 1974, p. 1.

des efforts de glissement vers la promotion de l'hydrogène qu'opèrent les équipes dans leurs discours. Bernard Verger précise notamment que ce vecteur apporte une réponse « à la crise énergétique engendrée par l'augmentation du prix du pétrole et par la limitation prévisible des ressources en hydrocarbures »¹⁰⁵⁹.

Dans ces circonstances, Hubert Autruffe concède qu'il serait « jugé regrettable de ne pas vraiment avoir épuisé toutes les idées avant d'abandonner » compte tenu de « l'ampleur de l'enjeu » qui subsiste et qu'il est donc « licite de continuer le soutien à ces travaux »¹⁰⁶⁰. Le 17 juin 1975, le comité Quater 1 en charge de l'attribution des financements pour la DGRST suit son avis : un crédit de 4,5 millions de francs est débloqué. Loïk Le Floch-Prigent prévient : « L'Alsthom ne pourra revenir à la charge en recherche-développement que dans la mesure où il peut démontrer qu'un poly-élément peut fonctionner dans des conditions satisfaisantes pendant un grand nombre de cycles ». « Dans le cas contraire », ajoute-t-il, « il conviendrait d'examiner, si cette filière n'est pas définitivement condamnée, dans quelle mesure on pourrait suivre, à budget beaucoup plus restreint, un programme progressif de recherches, conduisant pas à pas à résoudre les problèmes difficiles, auxquels sont confrontés les industriels »¹⁰⁶¹. Cette décision d'apparence positive cache néanmoins une réalité plus lourde de sens. En effet, Loïk Le Floch-Prigent se retrouve seul référent technique du dossier à la DGRST après le départ de Michel Desécures qui retourne prendre son poste aux télécoms¹⁰⁶². Or, et bien qu'il soit engagé dans une sorte de « dépendance au sentier »¹⁰⁶³ vis-à-vis d'Alsthom, c'est à partir de cette période qu'il prend la décision de réduire les financements de la société pour les piles à combustible. Comme à la fin des années soixante, le regard porté sur l'actualité scientifique et technique aux États-Unis en est encore la raison principale :

À ce moment-là, je regarde un organisme américain qui s'appelle EPRI (Electric Power Research Institute) qui est sur la côte californienne, qui essaie également de financer des recherches sur les piles à combustible. Et je pars en Californie pour voir ces gens. Je passe plusieurs jours avec eux pour regarder les programmes, etc. Et je m'aperçois effectivement qu'il n'y a pas eu de réels progrès dans cette matière et que je ne vois pas

¹⁰⁵⁹ Alsthom, DRE, Département pile à combustible, « Électrolyseur fitre-presse à structure mince Alsthom », le 1^{er} avril 1975, p. 1.

¹⁰⁶⁰ Hubert Autruffe, « Alsthom/Exxon. Pile à combustible à décarbonatation cyclique », le 8 juin 1975, p. 3.

¹⁰⁶¹ DGRST, « Note à l'intention de MM. Autruffe, Bronoël, Delsey, Millet », le 30 juin 1975, p. 1.

¹⁰⁶² Loïk Le Floch-Prigent fait la remarque suivante à ce sujet : « Michel Desécures s'en va. Il retourne aux télécoms. Il est remplacé par Raymond Fourastier. Il n'est pas électrotechnicien, il est électronique. Donc il s'intéresse essentiellement à l'informatique, à la télématique, etc. L'électrotechnique ça l'embête. Et par conséquent c'est moi qui reprends le dossier complètement. » Source : entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

¹⁰⁶³ PIERSON, Paul, « Path Dependence, and the Study of Politics », in *American Political Science Review*, Vol. 94, n°2, 2000, pp. 251-267.

quel est le produit qui va sortir de tout ça. Donc d'une manière ou d'une autre, on décide d'arrêter. On n'arrête pas de façon frénétique mais on... [il signe avec la main une diminution progressive]. »¹⁰⁶⁴

Quoi qu'il en soit, au travers de ces séries de décisions, de réajustements et de confrontations d'intérêts, profondément liés aux contextes politiques, sociaux et économiques – la sociologie pragmatique les qualifie « d'épreuves »¹⁰⁶⁵ –, la *pile à hydrogène* finit par s'imposer en tant que modèle dominant dans tous les espaces à la place des *piles à combustibles*. C'est également le cas dans le milieu universitaire. Au Laboratoire d'électrolyse du CNRS par exemple¹⁰⁶⁶. Ses activités ont été largement restructurées depuis 1971, c'est-à-dire « depuis la vogue des piles à combustibles »¹⁰⁶⁷. En 1975, l'axe principal des efforts qui y sont fournis concerne l'étude du transfert d'électrons et des interfaces chargées. Ce sont plus spécifiquement les interfaces constituées par une électrode solide au contact de solutions électrolytiques aqueuses qui retiennent l'attention, avec un accent mis sur les propriétés de l'électrode et leur rôle dans les réactions électrochimiques. Le comité de direction¹⁰⁶⁸ précise ces travaux : « ce que nous cherchons à connaître, lorsque nous étudions l'interface électrode-électrolyte, c'est la distribution de la matière dans le champ électrique et l'influence de cette distribution sur la cinétique des réactions électrochimiques »¹⁰⁶⁹. Des méthodes expérimentales

¹⁰⁶⁴ Entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

¹⁰⁶⁵ MARTUCELLI, Danilo, « Les deux voies de la notion d'épreuve en sociologie », in *Sociologie*, vol. 6, n°1, 2015, pp. 43-60.

¹⁰⁶⁶ En 1975, le personnel du Laboratoire d'électrolyse est composé de la manière suivante : un personnel chercheur (33 personnes dont 19 docteurs) dont Levart, Baticle, Hamelin, Bronoël, Clavilier, Costa, Chao, Contamin, Hinnen, Nguyen, Jacquot, Lamy, Perrault, Savy, Schreiber, Vennereau, Sotto, Lacharme, Lecœur, Lemasson, Tadjeddine, Bonnemay, Ganon, Redon, Bellier, Sculfort, Harff, Maximovitch, Haim, Nguyen, Drogowska, Tronoel-Peyroz, Etman, Grehier, Lecoustumer ; un personnel ITA (35 personnes dont 4 docteurs, 14 ingénieurs et 19 techniciens) dont Farcy, Lheritier, Petit, Dalbera, Pesant, Peslerbe, Rousseau, Sarradin, Valette, Boutry, Costa, Gizard, Aslanoff, Rudelle, Angely, de Mende, Elkaim, Koehler, Magner, Meyer, Scarbeck, Piq, Lamarre, Farcy, Rolland, Andro, Bender, Vandewinckele, Rodier, Vigneron, Chakhoff, Pankowska, Fauconnier, Helleu. Source : CNRS, Comité de direction, « Rapport d'activité et programme de recherche du Laboratoire d'électrolyse du CNRS », le 12 mars 1975, pp. 144-145. En 1976, la composition du Conseil de laboratoire est la suivante : Maurice Bonnemay, Eugène Levart, Anne-Marie Baticle, Suzanne Maximovitch, Pierre Vennereau, Jacqueline Costa, Jean-Claude Pesant, Guy Bronoël, Max Costa, Antoinette Hamelin, Monique Petit. Source : CNRS, Comité de direction, « Rapport d'activité du Laboratoire d'électrolyse du CNRS », le 8 octobre 1976, p. 3.

¹⁰⁶⁷ CNRS, Directoire, « Laboratoire d'électrolyse de Bellevue », le 19 janvier 1977, p. 1.

¹⁰⁶⁸ En 1976, le comité de direction du laboratoire est composé de Maurice Bonnemay (directeur du laboratoire), François Figueras (représentant de la section de physico-chimie des interactions et des interfaces), Jean-François Laurent (représentant de la section de physico-chimie des interactions et des interfaces), Jean Brenet (professeur d'électrochimie à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg), Jean-Louis Fabre (conseiller scientifique à la Direction des études et recherches de l'EDF), Lucien Gierst (professeur à l'Université libre de Bruxelles), Bernard Hocheid (professeur au CNAM), Jean-Michel Saveant (président du comité de direction, professeur à l'Université de Paris VII) et Robert Schaal (professeur à l'Université Paris VI). Source : CNRS, comité de direction, « Rapport d'activité du Laboratoire d'électrolyse du CNRS », le 8 octobre 1976, p. 2.

¹⁰⁶⁹ CNRS, Comité de direction, « Rapport d'activité et programme de recherche du Laboratoire d'électrolyse du CNRS », le 12 mars 1975, p. 1.

purement issues de l'électrochimie (impédance classique ou opérationnelle¹⁰⁷⁰, voltammétrie linéaire) sont toujours employées pour obtenir des informations sur les propriétés de l'interphase (réaction des espèces dans la couche double, courant d'échange, coefficient de transfert), sur les paramètres de l'électrode ou sur ceux de la solution déterminant la structure de l'interface et le mécanisme des réactions qui s'y déroulent. Mais la mise en œuvre de méthodes physiques, permettant notamment la caractérisation à l'échelle atomique (arrangement cristallin, structure électronique, niveaux énergétiques), se poursuit.

Comme l'annonce lui-même le laboratoire, de tels angles de recherche sont bien la manifestation directe de la réorientation théorique implémentée : « l'utilisation de plus en plus importante de méthodes physiques d'investigation, révélatrice de l'évolution de nos préoccupations au cours des dernières années, s'est avérée nécessaire pour relier les résultats de mesures électrochimiques à la nature et à la structure de l'électrode solide »¹⁰⁷¹. L'organisation d'un colloque à Paris cette même année, en partenariat avec le laboratoire du professeur Alexander N. Frumkine de l'Institut d'Électrochimie de Moscou – considéré comme l'un des pères de l'électrochimie russe contemporaine¹⁰⁷² –, est un autre témoignage du renforcement de ce mouvement puisqu'un des thèmes majeurs retenus traite de l'application de la théorie quantique à l'électrochimie. Les études du comportement électrochimique des électrodes d'or et de l'hydrogène sur les métaux de transition en tirent les premiers bénéfices :

« L'orientation que nous avons donnée à notre travail nous a conduit, parallèlement à un approfondissement de nos connaissances en ce qui concerne les théories du transfert électrochimique, à effectuer un effort théorique dans différents domaines. En particulier, nous avons dû faire appel à des outils empruntés à la physique du solide, à la physique des surfaces ou à la catalyse hétérogène afin de les adapter à la description de l'interphase en incluant les interactions entre le métal – polarisé électriquement – et le solvant ainsi que les interactions électrode-espèces adsorbées. Par exemple, dans le cas de l'hydrogène, les états adsorbés de métaux de transition (Pt, Pd) ont pu être décrits [...] à partir de l'adaptation d'un modèle d'écran électrostatique. De même, le modèle de Bond, décrivant

¹⁰⁷⁰ On se référera sur cette question à l'article d'Eugène Levart et Daniel Schuhmann : LEVART, Eugène, SCHUHMAN, Daniel, « Impédance opérationnelle et impédance classique dans l'analyse des mesures électrochimiques en régime transitoire », in *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, Vol. 21, n°1, 1971, pp. 129-136.

¹⁰⁷¹ CNRS, Comité de direction, « Rapport d'activité et programme de recherche du Laboratoire d'électrolyse du CNRS », le 12 mars 1975, p. 5.

¹⁰⁷² STRADINS, Janis, « Alexander N. Frumkin and the Electrochemistry of the 20th Century », in *Electrochimica Acta*, Vol. 42, n°5, 1997, pp. 731-736.

l'adsorption de l'hydrogène, a été adapté, à l'interface Pt (ou Ir)/électrolyte pour décrire géométriquement les sites d'adsorption et prévoir leur remplissage. »¹⁰⁷³

Par ailleurs, l'importance accordée à ce dernier sujet montre que les recherches sur les piles à combustible n'ont pas été abandonnées à Bellevue, en dépit de la révolution enclenchée. Si l'on s'intéresse à nouveau à l'hydrogène, c'est pour maîtriser son « oxydation contrôlée [...] dans les piles à combustible » et à sa « production [...] à partir de l'eau en vue du stockage »¹⁰⁷⁴. Une coupure avait bien eu lieu puisque les dernières grandes interventions publiques du laboratoire sur ces questions remontaient en 1972. À cette date, Guy Bronoël avait signé un article « Piles à combustibles et piles réversibles » dans la revue *Techniques de l'ingénieur*¹⁰⁷⁵ et effectué une intervention avec Maurice Bonnemay sur les « problèmes fondamentaux dans les piles H₂-air » à la conférence « PAC (projet Pégase) » du CNRS. Trois ans plus tard néanmoins, et si les études sont effectivement réactivées, ce ne sont plus que les possibilités de l'hydrogène qui concentrent les regards. Les autres combustibles des piles ont été écartés. En atteste l'animation d'une journée « Stockage de l'hydrogène » en octobre 1974, l'ajout d'un thème « Électrocatalyse. Problèmes à l'électrochimie posés par l'économie de l'hydrogène » au colloque institué avec le laboratoire du professeur Frumkine, ou encore l'entrée d'Alain Grehier de l'IFP au sein de l'équipe. De son côté, Guy Bronoël va continuer à son travail de positionnement : il dépose avec Maurice Bonnemay un brevet portant sur de « nouveaux catalyseurs pour l'oxydation électrochimique de l'hydrogène », participe à la rédaction des rapports des groupes CNRS de réflexions « Énergie et électrochimie » et « Hydrogène et énergie » et signe le chapitre « Hydrogène » de *l'Encyclopédie électrochimique des éléments* aux éditions A. Bard¹⁰⁷⁶. L'autorité scientifique qu'il exerce en la matière permet de comprendre pourquoi la DGRST fait appel à lui pour l'évaluation du dossier Alsthom.

Bellevue profite en fait de l'essor plus général des études sur l'énergie, l'hydrogène et les piles à combustible à l'université. De nouvelles équipes académiques, telles que celles du Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide fondé par Robert Collongues et du Laboratoire de chimie du solide de Bordeaux dirigé par Paul Hagenmuller, font leur entrée dans la thématique et la stimule. Au Laboratoire de chimie appliquée de l'état solide, le démarrage de recherches portant sur les piles à

¹⁰⁷³ CNRS, Comité de direction, « Rapport d'activité et programme de recherche du Laboratoire d'électrolyse du CNRS », le 12 mars 1975, p. 5.

¹⁰⁷⁴ CNRS, Comité de direction, « Rapport d'activité et programme de recherche du Laboratoire d'électrolyse du CNRS », le 12 mars 1975, p. 6.

¹⁰⁷⁵ *Techniques de l'ingénieur*, D. 932, n°12, 1972, pp. 1-20.

¹⁰⁷⁶ CNRS, Comité de direction, « Rapport d'activité et programme de recherche du Laboratoire d'électrolyse du CNRS », le 12 mars 1975, p. 132.

combustible est rattaché à la conductivité ionique. Plus spécifiquement, il est la conséquence de l'engouement international qui a lieu autour des superconducteurs ioniques. En 1967, la Ford Motor Company met en effet en évidence que les propriétés de l'alumine β permettent d'espérer la fabrication d'une nouvelle génération de piles à combustible à oxyde solide mais surtout d'accumulateurs sodium-soufre puissants¹⁰⁷⁷ : un tel matériau détient à la fois une conductivité ionique forte et une conductivité électronique faible et représente donc un électrolyte solide de grande qualité¹⁰⁷⁸.

La mise au point du Nafion, une résine fluorée échangeuse d'ions, par l'entreprise américaine DuPont de Nemours en 1969 ne fait ensuite que renforcer l'intérêt pour le domaine. Formé par « une colonne vertébrale ne contenant que des groupes CF_n sur laquelle sont branchés des groupements d'acide sulfonique »¹⁰⁷⁹, permettant une forte acidité et une bonne stabilité chimique et thermique, ce polymère thermoplastique est rapidement utilisé sous forme de film par la General Electric qui en fait une membrane électrolytique solide pour une pile à combustible de 350 watts à destination de la NASA. Ces événements motivent de nombreuses entreprises à lancer leurs propres travaux, plus reliés en France aux accumulateurs devant servir à la traction électrique qu'aux piles à combustible cependant. La CGE, l'EDF et l'Air Liquide demandent ainsi tour à tour à Robert Collongues d'entamer des études sur l'alumine β et des sujets connexes¹⁰⁸⁰. Le directeur du laboratoire place plusieurs élèves en thèse grâce à ces financements industriels. Philippe Colombar est l'un d'entre eux :

« [En 1975, la conductivité protonique] était alors envisagée comme une alternative énergétique. On était après le premier choc pétrolier et les énergies propres étaient désirées. C'est l'époque de la mise au point du Nafion par DuPont pour les piles à combustibles du programme Gemini [Apollo] et l'on voulait des matériaux susceptibles de fonctionner à plus haute température pour éviter les catalyseurs de platine. Pour l'Air Liquide l'intérêt était de pouvoir réaliser des capteurs de teneur en hydrogène stables, rapides pouvant fonctionner à une certaine température. »¹⁰⁸¹

¹⁰⁷⁷ WEST, Anthony R., « Solid Electrolytes and Mixed Ionic-Electronic Conductors: An Applications Overview », in *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 1, n°2, 1991, pp. 157-162.

¹⁰⁷⁸ GERL, Maurice, ISSI, Jean-Paul, *Traité des matériaux. 8. Physique des matériaux*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997, p. 669.

¹⁰⁷⁹ RESNICK, Paul R., « A Short History of Nafion », in *L'actualité chimique*, n°301-302, 2006, p. 144.

¹⁰⁸⁰ TEISSIER, Pierre, *op. cit.*, 2007, p. 253-255.

¹⁰⁸¹ BENSUADE-VINCENT, Bernadette, « Entretien avec Philippe Colombar », in *Sciences : histoire orale*, le 18 février 2003.

Ces études nécessitant des caractérisations structurales fines sont l'occasion d'introduire des instruments nouveaux dans les savoir-faire des équipes, issus de la métallurgie, de la spectroscopie et de la physique du solide, dont l'infrarouge, la microscopie électronique, la RPE – que les électrochimistes de Bellevue utilisent depuis au moins 1968 – et la diffusion X¹⁰⁸². Autre personnage central dans la construction disciplinaire de la chimie du solide, qui traite de l'étude fondamentale des propriétés et de la structure des matériaux en phase solide, Paul Hagenmuller donne une impulsion similaire aux activités de son laboratoire au début des années soixante-dix : d'une part, il pousse ses chercheurs à effectuer des rapprochements significatifs avec la physique pour faire évoluer leurs méthodes ; d'autre part, il instaure un dialogue avec l'industrie, chose qu'il n'avait pas entreprise dans la décennie précédente. Ce choix était alors moins dû à une opposition idéologique de la part de Paul Hagenmuller qu'au contexte faste des Trente Glorieuses : son laboratoire était suffisamment pourvu en moyens financiers pour ne pas avoir à développer de recherches appliquées¹⁰⁸³.

Le ralentissement de la croissance des fonds publics dédiés à la recherche scientifique¹⁰⁸⁴ et la nécessité d'en obtenir en les connectant à l'extérieur de l'espace universitaire à partir de 1968 changent la donne : « nous avons un besoin civique de justifier les crédits que nous demandions par une application dans la vie économique »¹⁰⁸⁵, reconnaît lui-même le chimiste. Ce tournant s'exprime par la participation des équipes aux actions concertées du CNRS, comme la RCP (recherche concertée sur programme) « Propriétés physiques des composés fluorés » (1971-1973) et les ATP (actions thématiques programmées) « Matériaux » (1972) et « Énergie » (1974), et à celles de la DGRST, dont « Composés non métalliques » (1969) et « Physique électronique » (1974). Les travaux se voient conférer dans un même temps une visée plus applicative. Les bronzes de tungstène font en particulier l'objet d'une prise en main en vue de leur utilisation comme catalyseurs d'électrodes pour piles à combustible alcalines à basse température, bien qu'une sorte d'erreur scientifique en soit à l'origine, comme le fait remarquer l'ancien élève de Paul Hagenmuller et professeur émérite à l'Université de Bordeaux Michel Pouchard¹⁰⁸⁶ :

¹⁰⁸² TEISSIER, Pierre, « Le laboratoire de Robert Collongues (1950-2000). Une école de recherche aux débuts de la chimie du solide », in *L'actualité chimique*, n°294, 2006, pp. 50-59.

¹⁰⁸³ TEISSIER, Pierre, *op. cit.*, 2007, p. 282.

¹⁰⁸⁴ MARNOT, Bruno, « Le budget du CNRS de 1969 à 2000. », in *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], n°26, 2010, mis en ligne le 24 février 2013.

¹⁰⁸⁵ ARRIBAT, Hervé, BENSAUDE-VINCENT, Bernadette, « Interview Paul Hagenmuller. 12 June 2001, Paris », in *Materials Science & Engineering* [En ligne], août 2001.

¹⁰⁸⁶ Né en 1938, Michel Pouchard écrit une thèse sous la direction de Paul Hagenmuller qu'il soutient en 1967. Il accomplit toute sa carrière à Bordeaux : il y est respectivement attaché de recherche au CNRS, maître de conférences (1967-1970), professeur (1970-2004) et enfin professeur émérite (depuis 2004). Il est élu membre de l'Académie des sciences dans la section de chimie en 1992.

« Nous avons commencé à travailler sur les piles à combustible au début des années soixante-dix. Nous travaillions sur les composés qu'on appelle les bronzes oxygénés de tungstène. Ce sont des oxydes à base de tungstène qui sont des conducteurs généralement métalliques mais qui peuvent être des solides conducteurs lorsque l'on a un peu de sodium. Nous étudions ces propriétés-là et nous étions intéressés par les propriétés électrochimiques en particulier parce qu'on obtenait ces matériaux par voie électrochimique. On étudiait les bronzes pour des raisons fondamentales mais on se disait qu'il y avait un champ d'application derrière. Un chercheur avait mentionné dans une publication que ces matériaux étaient des catalyseurs pour des électrodes de piles à combustible. À l'époque, c'étaient les piles alcalines qui étaient étudiées. En fait, ce chercheur s'était "planté" tout simplement parce qu'il préparait ses matériaux dans des creusets de platine et qu'il y avait une petite quantité de platine qui était restée dans ces bronzes de tungstène. C'était le platine qui avait finalement la propriété électrocatalytique. C'est donc un peu sur quelque chose de faux que nous nous sommes lancés dans ce domaine. Mais j'ai été séduit par l'idée selon laquelle il était possible d'obtenir du courant électrique en court-circuitant le principe de Carnot. Nous avons continué lentement à travailler sur les électrodes pour piles à combustible travaillant en milieu KOH concentré. »¹⁰⁸⁷

Le laboratoire – devenu une entité propre du CNRS en 1974 – ne renonce pas aux études ayant trait aux piles à combustible ou au stockage de l'hydrogène malgré cet échec rapidement mis en évidence. À la suite du choc pétrolier, il situe d'autant plus son action sur la problématique énergétique. Comme l'indique Pierre Teissier, les équipes axées sur les thèmes « fluor », « hydrogène » et « conductivité ionique », sont fortement soutenues par le Gaz de France, la CGE, la DGRST ou encore le CNRS à partir de cette période et fournissent des résultats probants qui profitent à leur directeur : « en particulier, un hydrure de magnésium pour le stockage chimique et un fluorure double de plomb et de bismuth, $PbSnF_4$, pour les piles à combustible assurent la renommée industrielle de Hagenmuller, bientôt connu comme le "Monsieur hydrogène" français »¹⁰⁸⁸. Le paradigme hydrogénique va encore s'accroître au cours de l'année 1975. Dans le *Progrès scientifique*, et parmi « les nombreux travaux intéressants la transformation, le transport et le stockage de l'énergie », la DGRST¹⁰⁸⁹ constate « surtout » l'importance accordée à l'hydrogène. Elle mentionne d'autre part les piles à combustible

¹⁰⁸⁷ Entretien avec Michel Pouchard, Bordeaux, décembre 2016.

¹⁰⁸⁸ TEISSIER, Pierre, « Paul Hagenmuller. Itinéraire de l'enfant terrible de la chimie du solide française », in *L'actualité chimique*, n°319, 2008, p. 12.

¹⁰⁸⁹ À noter que le conseiller référendaire à la Cour des comptes Roland Morin est nommé au poste de délégué général adjoint de la DGRST le 29 octobre 1974.

« à hydrogène ou à méthanol (pour utiliser l'hydrogène qui serait stocké en dehors des heures de pointe, ou pour la conversion directe d'énergie chimique en énergie électrique), avec ses applications envisageables dans le secteur automobile en concurrence avec d'autres générateurs électrochimiques, tels que les systèmes air-zinc ou sodium-soufre »¹⁰⁹⁰.

Cette vision affirmée, et pour « conserver des chercheurs compétents dans le domaine des piles alcalines »¹⁰⁹¹, la Délégation finance à nouveau l'IFP pour une étude d'abaissement du prix des piles hydrogène-air¹⁰⁹². De façon peut-être plus poétique, le membre de l'Académie des sciences et du conseil d'administration du Palais de la découverte Ivan Psychès va quant à lui jusqu'à déclarer que « l'homme, pour satisfaire sa soif d'énergie, se tourne vers le constituant primordial de l'univers, source d'énergie stellaire : l'hydrogène. »¹⁰⁹³ Ce dernier incite même le musée à acquérir un « banc d'essais didactique à pile à combustible »¹⁰⁹⁴ de l'opération Alstom-Exxon. Yves Bréelle est de son côté invité à donner une conférence intitulée « Situation actuelle et avenir des piles à combustible »¹⁰⁹⁵ à l'Université d'Orsay le 16 avril. Il en prononce une autre sur « les piles à combustible et l'hydrogène » aux « Journées internationales de l'anti-pollution » organisées à Grenoble du 29 septembre au 3 octobre, où il y remarque que « si l'on tient compte de la contrainte pollution, on est tout naturellement conduit vers l'hydrogène »¹⁰⁹⁶. Le département « Évaluation des procédés » de l'IFP – toujours soutenu par la SEFT – publie aussi un rapport sur la « perspective d'avenir de l'hydrogène ». Dans cette étude économique de près de cent cinquante pages, Pierre Leprince et Süleyman Özmen reprennent les arguments classiques selon lesquels l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau pourrait être amené à jouer un rôle important comme vecteur dans la mesure où le développement des centrales nucléaires pose la question de l'utilisation de l'énergie électrique aux heures creuses : « l'hydrogène pourrait à partir de 1985 environ, se substituer au moins partiellement aux combustibles usuels industriels et domestiques – carburants, fuels, gaz de ville, soit directement soit par l'intermédiaire de piles à combustible pour des usages locaux ou comme complètement pour éviter les pointes de consommation »¹⁰⁹⁷, soulignent-ils. Mais en raison des « difficultés de stockage », ce sont d'abord pour eux des « applications fixes » et des « véhicules à

¹⁰⁹⁰ *Le Progrès scientifique*, mars-avril 1975, p. 5.

¹⁰⁹¹ DGRST, « Note à l'intention du Comité Quater 1. Piles et générateurs électrochimiques », le 8 février 1978, p. 2.

¹⁰⁹² Ministère de l'Industrie et de la Recherche, Direction générale de l'Industrie, DIMME, « Note sur la pile à combustible de l'Institut français du pétrole », le 30 mars 1977, p. 1.

¹⁰⁹³ *Revue du Palais de la découverte*, Vol. 3, n°28, mai 1975, p. 16.

¹⁰⁹⁴ *Revue du Palais de la découverte*, Vol. 3, n°28, mai 1975, p. 30.

¹⁰⁹⁵ Yves Bréelle, « Situation actuelle et avenir des piles à combustible (Conférence prononcée à l'Université d'Orsay le 16 avril 1975), octobre 1975.

¹⁰⁹⁶ *Nuisances & Environnement*, « Journées internationales de l'anti-pollution. 3^e salon professionnel national des techniques anti-pollution. Grenoble, 29 septembre-3 octobre 1975 », édition hors-série, p. 265.

¹⁰⁹⁷ IFP, « Perspective d'avenir de l'hydrogène », juillet 1975, p. 2.

faible rayon d'action (autobus, véhicules de livraison, PTT, taxis) » qui seront susceptibles d'utiliser de tels systèmes, les applications plus étendues dans le secteur automobile devant être possibles « dans un avenir plus lointain (au-delà de l'an 2000) »¹⁰⁹⁸. L'adoption d'une vision téléologique similaire à celle de la DRE d'Alsthom démontre l'uniformisation des cadres ontologiques et temporels qui se répand progressivement : on attend des piles à combustible qu'elles fassent les mêmes choses aux mêmes moments.

De telles représentations technologiques finissent par atteindre l'EDF puisque le directeur adjoint à la direction générale Jacques Gallot écrit à Bernard Salé de l'IFP qu'il a « l'impression que des réalisations industrielles peuvent être raisonnablement envisagées dans un délai de quelques années qui ne serait plus "glissant" ». Tout en reconnaissant que « la possibilité de mettre des piles sur le marché dépendra essentiellement des conditions dans lesquelles l'hydrogène pourra être produit et distribué », il admet d'autre part que « c'est là un problème qui concerne Électricité de France puisque la production de ce gaz par électrolyse peut être envisagée pendant certaines heures du fonctionnement des centrales nucléaires ». Enfin, il propose à Bernard Salé, « par l'intermédiaire de "La voiture électronique", de tester dans quelques mois un modèle 5 kW en le montant sur un véhicule électrique de type COB, en circulation urbaine »¹⁰⁹⁹. Ces représentations atteignent aussi la Défense nationale puisque la DRME commande à Matra un document prospectif portant sur « la propulsion de véhicules terrestres militaires par des dispositifs utilisant des piles à combustible ».

Plus précisément, la société est chargée « d'étudier les solutions techniques envisageables pour la réalisation à l'horizon 1985-1990 de véhicules terrestres militaires propulsés par des systèmes électriques alimentés par des piles à combustible, et de les évaluer en termes de coût et de performance dans une forme autorisant toute comparaison avec des véhicules classiques [produits en 1975] pris en référence, ou des véhicules susceptibles de voir le jour à l'horizon considéré »¹¹⁰⁰. Après une période caractérisée par un retrait des Armées sur la thématique, on assiste ainsi à une nouvelle incursion dans un contexte où l'importance de la contribution de la recherche militaire « à l'efficacité permanente »¹¹⁰¹ de la politique de défense est réaffirmée. La volonté d'information de la DRME sur les développements potentiels de la technique à l'échelle de plusieurs décennies s'inscrit, comme dans les années soixante, dans le cadre des fonctions statutaires de l'institution qui investit des domaines divers allant « de la mécanique des fluides aux mathématiques appliquées, en passant

¹⁰⁹⁸ IFP, « Perspective d'avenir de l'hydrogène », juillet 1975, p. 41.

¹⁰⁹⁹ Lettre de Jacques Gallot à Bernard Salé, le 23 décembre 1974, pp. 1-2.

¹¹⁰⁰ Engins Matra, « Mise à jour de l'étude prospective de la propulsion de véhicules terrestres militaires par des dispositifs utilisant des piles à combustible », premier rapport d'étude, lot n°1, janvier-février 1975, p. 4.

¹¹⁰¹ Ministère de la Défense nationale, « Livre blanc sur la Défense nationale, tome II », 1973, p. 105.

par les matériaux, les techniques chimiques, le pilotage et la navigation, la détection, l'acoustique, l'optique, les composants électroniques, les techniques nucléaires, la pharmacologie, les sciences du globe, les télécommunications et l'électrotechnique »¹¹⁰². Elle découle également d'un nécessaire effort de projection des Armées dans le futur, de plus en plus soumises à des besoins d'anticipation qui reposent « non plus sur le court terme, incluant éventuellement le conflit en cours, mais sur du long terme, englobant tous ceux qui pourraient éventuellement se produire dix à quinze ans plus tard »¹¹⁰³. Dans son étude, Matra¹¹⁰⁴ en arrive en tout cas à des conclusions positives qui rejoignent celles de l'IFP et d'Alsthom :

« [...] les seules filières présentant un intérêt pratique à l'heure actuelle ainsi qu'à court et moyen terme sont les suivantes : la filière Alsthom à hydrazine ; la filière Pratt et Whitney hydrogène/air à électrolyte acide ; la filière IFP hydrogène/air à électrolyte basique. D'une façon générale, on peut dire que la puissance massique des piles appartenant à ces filières évoluées se rapproche peu à peu de celles des machines thermiques, alors que leur énergie massique (associée à une certaine quantité de combustible) est déjà très supérieure à celle des batteries d'accumulateur (maximum 40 Wh/kg). En effet, la puissance massique actuelle de 100 W/kg tend progressivement vers 200 W/kg, les coûts de fabrication se rapprochant de 250 F/kW. Il s'agit maintenant d'achever des recherches concernant surtout la tolérance des catalyseurs utilisés dans les piles vis-à-vis de certains incidents possibles tels que manque accidentel de combustible, empoisonnement par certaines substances contenues dans l'air, le raccourcissement du temps de mise en route, etc. Les principaux obstacles qui s'opposent à une large diffusion de ces piles sont actuellement : le prix de l'hydrazine pour la filière Alsthom ; le dispositif de stockage de l'hydrogène et les problèmes de sécurité liés à son emploi pour les filières IFP et Pratt et Whitney. Enfin, il convient de noter que les résultats concrets les plus intéressants ne sont plus publiés, ce qui indique bien que l'on a atteint le stade de la préindustrialisation. »¹¹⁰⁵

¹¹⁰² Ministère de la Défense nationale, « Livre blanc sur la Défense nationale, tome II », 1973, p. 103.

¹¹⁰³ LEFEEZ, Sophie, *L'illusion technologique dans la pensée militaire*, Nuvis, 2017, p. 168.

¹¹⁰⁴ Les recherches de Matra sont suivies par l'EDF. Dans sa revue de presse, Jacques Gallot signale un article du *Nouvel économiste* daté du 9 février 1976 : « depuis quelques semaines, Matra s'intéresse aux piles à combustible et aux recherches de l'Institut français du pétrole. Objectif : développer leurs applications aux domaines militaires (missions "hors atmosphère", sous-marines ou même sur terre). Les retombées vers les applications civiles ne tarderont pas à se manifester. » Source : Jacques Gallot, Relations publiques, « Vendredi 6 février 1976. Revue de presse (édition du matin) », n°27 A, 1976, p. 2.

¹¹⁰⁵ Engins Matra, « Mise à jour de l'étude prospective de la propulsion de véhicules terrestres militaires par des dispositifs utilisant des piles à combustible », premier rapport d'étude, lot n°1, janvier-février 1975, pp. 67-68.

Parallèlement, la Commission des communautés européennes publie dans le Journal officiel des communautés le 23 octobre un appel d'offres portant sur l'énergie, conséquence directe de la mise en œuvre d'un programme de quatre ans doté de 350 millions de francs. Décidé directement par son Conseil des ministres, il attribue une place spéciale à l'action « Production et utilisation de l'hydrogène » puisque cette dernière reçoit le deuxième budget le plus important (79 millions de francs) après « l'énergie solaire » (104 millions de francs), devançant « l'énergie géothermique » (77 millions de francs), « les économies d'énergie » (67 millions de francs) et « l'analyse des systèmes » (23 millions de francs)¹¹⁰⁶. Ces circonstances vont contribuer à décider Hubert Curien à demander à son conseiller scientifique et technique en matière d'énergie à la DGRST Serge Bindel (polytechnicien, promotion 1947) d'organiser en novembre la création d'une action complémentaire « Hydrogène », en partenariat avec la DIGEC (Direction du gaz, de l'électricité et du charbon), « pour encourager les travaux de recherche sur la production, le stockage, le transport et l'utilisation de l'hydrogène »¹¹⁰⁷.

Présidé par le directeur de la DIGEC Maurice Legrand, son comité est alors principalement composé de chercheurs et de personnalités issues ou proches de l'industrie¹¹⁰⁸, dont le directeur à la direction générale de l'EDF Armand Luxo, le chef du Service technique et économique du Gaz Othar Amilakvari, le chargé de mission à la Délégation générale à l'énergie Bernard Bailly du Bois, le directeur des Études et techniques nouvelles du Gaz de France Pierre Gaussens, le chef de département à l'EDF Paul Godin, le chef de service à la Direction des Carburants Alain Pesson et le chef du Département des procédés et directeur du Centre de raffinage et génie chimique à l'IFP Pierre Leprince. On y compte aussi une minorité d'universitaires, tels que le professeur à l'Université de Bordeaux I et directeur du Laboratoire de chimie du solide du CNRS Paul Hagenmuller, le professeur au CNAM et chef du Département « Recherche et Analyse » au CEA Etienne Roth et le maître de recherches au Laboratoire d'électrolyse de Bellevue Guy Bronoël. Enfin, Serge Bindel y représente la DGRST¹¹⁰⁹. En accord avec la DIGEC, trois axes sont retenus des premières discussions : le développement du programme de recherche sur la production d'hydrogène par voie thermochimique,

¹¹⁰⁶ Le conseiller scientifique et technique en matière d'énergie à la DGRST Serge Bindel précise le fonctionnement de ce programme : « Ce programme doit être exécuté sous forme d'actions "indirectes", c'est-à-dire d'actions menées essentiellement dans les laboratoires, publics ou privés, des pays membres, au titre de contrats d'incitations. [...] La gestion du programme est assurée par la Commission et assistée, pour la définition précise des thèmes à retenir, pour le choix des projets et pour leur suivi par des Comités d'experts nationaux. Les représentants français au Comité "économies d'énergie" sont MM. Dumon (Heurtey), Leprince (IFP) et Palvadeau (Agence pour les économies d'énergie). » Source : DGRST, « Communiqué. Appel d'offres communautaire sur les économies d'énergie », le 27 octobre 1975, p. 1.

¹¹⁰⁷ DGRST, « Réunion préparatoire à la création d'un comité "Hydrogène" », le 19 novembre 1975, p. 1.

¹¹⁰⁸ À noter que le chargé de mission à la Direction des études et techniques nouvelles du Gaz de France J. Pottier et le chargé de mission à la DGRST G. Faudot sont les secrétaires scientifiques du comité.

¹¹⁰⁹ DGRST, Division du Fonds de la recherche, « Liste des membres de l'action complémentaire coordonnée Hydrogène », février 1976, p. 1.

le soutien à des opérations de faisabilité concernant la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau et l'incitation à d'autres recherches dans le domaine général de l'hydrogène¹¹¹⁰. Alors que le réseau d'acteurs et d'institutions évoluant autour des piles à combustible s'était considérablement affaibli en 1973, il est ainsi de nouveau consolidé par l'insertion de la technique dans le paradigme hydrogénique.

¹¹¹⁰ DGRST, « Décision. Création d'un comité Hydrogène », le 16 décembre 1975, p. 1.

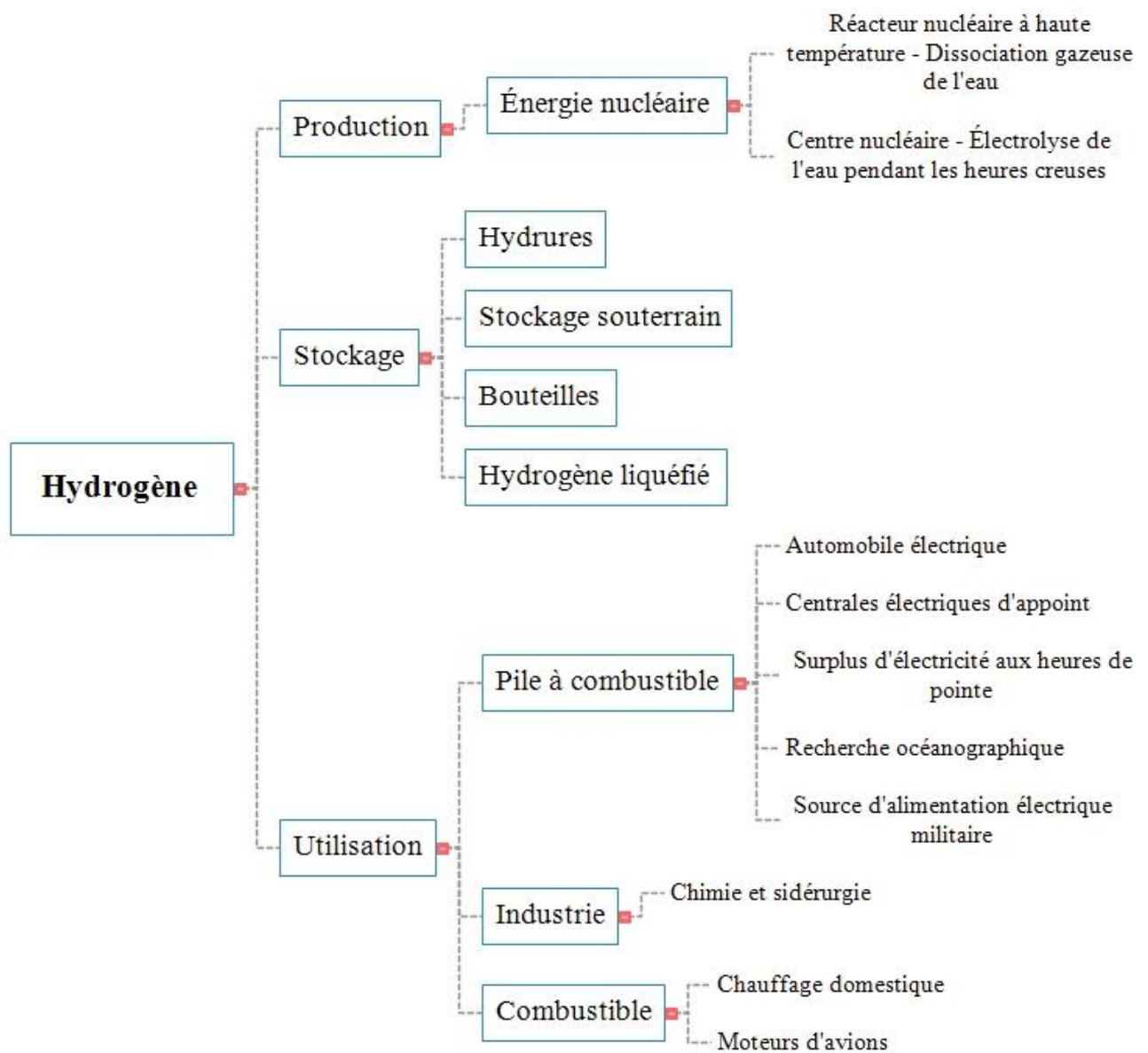


Fig. 14 – Représentation du paradigme hydrogénique formulé au milieu des années soixante-dix

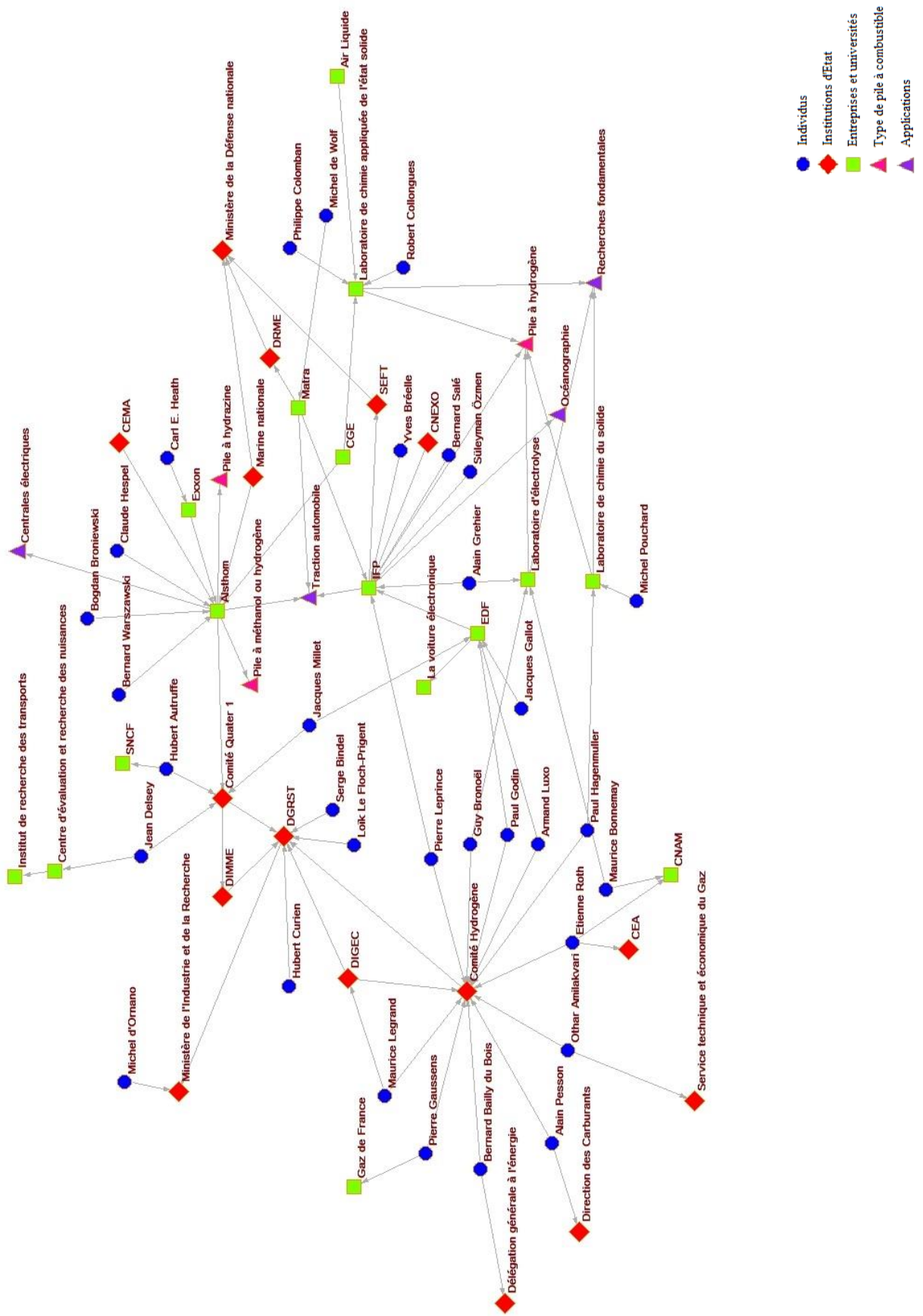


Fig. 15 – Le réseau social autour des piles à combustible en France en 1975

NEUVIÈME CHAPITRE

L'arrêt des recherches : « une affaire d'hommes » (1976-1981)

L'année 1976 marque une transition par rapport aux travaux précédemment impulsés sur les piles à combustible. Des changements s'opèrent au sein du réseau social tournant autour de la technique tout d'abord puisqu'un certain nombre de personnalités liées à sa promotion, son financement et son évaluation institutionnelle quittent leurs fonctions. Le « réservoir de relations »¹¹¹¹ se vide : le physicien et polytechnicien (X 1938, major de promotion) Bernard Grégory¹¹¹² remplace par exemple Hubert Curien à la tête de la DGRST, lui-même nommé à la présidence du CNES, tandis que le colonel René Duffet part à la retraite après treize années passées « au service de l'électrochimie »¹¹¹³ à la DRME. Diminué physiquement, Maurice Bonnemay commence pour sa part à délaisser son poste de directeur du Laboratoire d'électrolyse pour se recentrer sur ses activités d'enseignement au CNAM¹¹¹⁴. Cette période représente aussi une étape de fin pour plusieurs contrats, dont ceux d'Alstom et d'Exxon avec la DGRST, de l'IFP avec la SEFT et de Matra avec la DRME, et le démarrage de nouvelles initiatives telles que l'action complémentaire « Hydrogène ». Ces événements amorcent en réalité le déclin de l'ensemble des recherches restantes. Dans la première partie de ce chapitre, nous tenterons de comprendre les raisons qui poussent la DGRST à ne pas reconduire les travaux qu'elle soutenait jusqu'alors, en particulier ceux d'Alstom et de l'IFP. Dans un deuxième temps, nous analyserons comment les derniers porteurs de projets sont intentionnellement redirigés vers la recherche électrochimique fondamentale et les applications

¹¹¹¹ FONTAINE, Antoine, *De la source à la ressource. Territoires, héritages et coopération autour de la valorisation de l'énergie solaire en Rhône-Alpes*, thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, soutenue le 18 mai 2018, p. 121.

¹¹¹² Né en 1919, prisonnier dans un « Oflag » (camp d'officiers) au cours de la Seconde Guerre mondiale, Bernard Grégory part aux États-Unis à sa sortie de Polytechnique. Sous la direction du professeur Bruno Rossi, il y entame une thèse portant sur l'étude « des particules fondamentales au moyen des rayonnements cosmiques capables de provoquer des interactions de haute énergie ». Revenu en France, il prend la sous-direction du laboratoire de physique de Louis Leprince-Ringuet à Polytechnique. Il travaille à partir de 1955 à la mise en service de l'accélérateur de particules du CERN puis est nommé professeur de physique à l'X en 1958. Il est notamment directeur général du CERN de 1965 à 1970, directeur du laboratoire de physique de Polytechnique à partir de 1971, directeur général du CNRS de 1973 à 1976 avant de prendre le poste de délégué général de la DGRST en 1976. Un poste qu'il occupa jusqu'à son décès l'année suivante. Sur Bernard Grégory dans ses dernières fonctions, Pierre Leprince-Ringuet écrit : « Jusqu'alors, il s'était essentiellement battu pour la science mais dans ce dernier poste, la vie fut très dure car Bernard Grégory cherchait naturellement les meilleures solutions pour le pays, pour la recherche fondamentale ou appliquée dans tous les domaines, mais il ne se heurtait pas seulement aux finances, il avait encore à tenir compte de la politique. Préparer une bonne solution, que l'on considère comme la plus valable, et la voir modifiée ou rejetée pour des raisons politiques parfois douteuses, ce fut très dur pour Grégory. Il s'est probablement usé, malgré son aspect extérieur toujours souriant, calme et rayonnant, dans un travail de plus en plus dur, contraignant, correspondant de moins en moins à son idéal de physicien. » Source : *La jaune et la rouge*, n°330, mai 1978, p. 25.

¹¹¹³ DRME, « Journées d'étude sur les générateurs électrochimiques organisées par la Direction des recherches et moyens d'essais », 10-11 juin 1976, p. 1.

¹¹¹⁴ C'est notamment ce que déclare Guy Bronoël : « Cela dépendait peut-être de son état de santé mais Maurice Bonnemay s'est replié au CNAM où il était professeur. On ne le voyait plus beaucoup. » Source : entretien avec Guy Bronoël, Meudon, octobre 2016.

spéciales. Enfin, l'accent sera mis sur l'importance de l'échec du paradigme hydrogénique et du démantèlement du réseau social dans l'arrêt général des études au début des années quatre-vingt.

9.1 Un « retour en grâce » anodin pour l'Institut français du pétrole

Peu d'événements ayant trait aux piles à combustible sont organisés en 1976, à l'exception de deux journées d'études sur « les générateurs électrochimiques » à la DRME les 10 et 11 juin. Membre du groupe de recherche du CNRS n°4 « Physique des liquides et Électrochimie » associé à l'Université Paris VI Pierre et Marie Curie et rattaché au BIS (Bureau d'information scientifique)¹¹¹⁵ des Armées, le professeur Loïc Viet y ouvre la séance à la place du directeur de la DRME Jacques-Émile Dubois, empêché par une obligation de dernière minute. Il rappelle les raisons d'une telle rencontre. Il s'agit à la fois d'engager la discussion entre « utilisateurs potentiels » et « chercheurs » et de « faire le point sur les recherches menées »¹¹¹⁶ avec des objectifs militaires : amélioration des performances massiques et volumiques des sources d'énergie destinées aux matériels portatifs, discrétions acoustique et infrarouge, augmentation de la fiabilité malgré les contraintes imposées par les nécessités de stockage et les conditions d'environnement. Une demi-journée est spécifiquement dédiée aux piles à combustible¹¹¹⁷. Y interviennent Stanislas Teichner de l'Université de Lyon I – et ancien étudiant de Marcel Prettre – sur « la préparation et l'étude de catalyseurs métal sur supports conducteurs », Claude Lambert d'Alsthom sur « la pile à méthanol-air » et Yves Bréelle de l'IFP sur « la pile à combustible hydrogène-air » et « le reformage du méthanol source d'hydrogène ».

Ce dernier rappelle les caractéristiques des modèles élaborés à Rueil-Malmaison : ils sont constitués d'un circuit d'air avec un ventilateur alimentant la pile sous une pression de quelques millibars et la cartouche d'absorption du CO₂, l'air évacuant l'eau formée, d'un circuit d'hydrogène où le combustible circule en boucle à l'aide d'un système de purge rendu nécessaire du fait de l'emploi d'hydrogène industriel qui contient 0,2 % d'impuretés, d'un circuit d'électrolyte avec un réservoir d'expansion, des pompes de circulation et un radiateur, et d'électrodes dotées d'une couche

¹¹¹⁵ MAREC, Jean-Pierre, *op. cit.*, 2013, p. 27.

¹¹¹⁶ DRME, « Journées d'étude sur les générateurs électrochimiques organisées par la Direction des recherches et moyens d'essais », 10-11 juin 1976, p. 3.

¹¹¹⁷ Présidée par Loïc Viet, la première demi-journée est consacrée aux générateurs électrochimiques à haute densité d'énergie. Interviennent notamment Guy Bronoël sur l'accumulateur au chlore, Charles Déportes de l'École nationale supérieure d'électrochimie et Jean-Maurice Reau du Laboratoire de chimie du solide de Bordeaux sur les électrolytes solides à grande conductivité ionique ou encore Gérard Gerbier de la SAFT sur la pile lithium-eau. Présidée par Maurice Bonnemay, la dernière demi-journée traite des générateurs à anode de zinc. Interviennent Robert Wiart du groupe de recherche du CNRS « Physique des liquides et Électrochimie » associé à l'Université Paris VI Pierre et Marie Curie sur la cinétique de croissance des dépôts électrolytiques de zinc et Raymond Bonnaterre de la SAFT sur les accumulateurs nickel-zinc et air-zinc. Source : DRME, « Journées d'étude sur les générateurs électrochimiques organisées par la Direction des recherches et moyens d'essais », 10-11 juin 1976, p. 1.

conductrice hydrophile, d'une couche catalytique à base d'argent pour la cathode et d'un mélange platine-palladium ou de nickel de Raney pour l'anode et d'une couche hydrofuge poreuse en téflon comme barrière à l'électrolyte. Il profite surtout de l'occasion pour présenter les avancées effectuées par l'IFP sur la technique depuis 1973 : tout en soulignant que la puissance organique des nouveaux prototypes a été « considérablement réduite », leur rendement « accru » et leur mise en marche rendue « automatique »¹¹¹⁸, il signale que six exemplaires de 500 watts sont en cours de construction pour une livraison à la SEFT au début de l'année 1977. Malgré la concurrence des accumulateurs, la bonne marche des études et l'engouement général qui ne s'est toujours pas estompé autour du paradigme hydrogénique donnent à Yves Bréelle le sentiment que la place des piles à combustible dans le système technique français est enfin affirmée et que celles-ci ne vont pas tarder à être diffusées largement. La conférence qu'il donne lors du colloque « L'hydrogène et ses perspectives » de l'AIM (Association des ingénieurs de Montefiore) à Liège peu de temps après en témoigne :

« [Les moteurs thermiques] seront supplantés par la pile à combustible dont les performances actuelles déjà suffisantes pour un grand nombre d'applications vont continuer à progresser. C'est en fait la production massive de l'hydrogène, en tant que relais énergétique de l'énergie nucléaire ou du stockage chimique de l'électricité qui est attendue pour promouvoir la pile à combustible qui représente sans conteste, tant sur le plan économique que sur le plan technique le convertisseur d'énergie le mieux adapté à l'hydrogène. Les dix années qui nous séparent de l'arrivée massive de l'hydrogène seront mises à profit pour achever sa mise au point. »¹¹¹⁹

Il n'est pas le seul à le penser. Son collègue à la division « Applications » Jean Trapy présente des résultats globalement positifs pour une simulation technico-économique en cycle urbain comparant un véhicule muni d'un moteur thermique à une Renault Estafette équipée d'un moteur électrique Bosch et d'une pile de 30 kW¹¹²⁰. Le Département d'analyse de systèmes militaires de Matra livre

¹¹¹⁸ DRME, « Journées d'étude sur les générateurs électrochimiques organisées par la Direction des recherches et moyens d'essais », 10-11 juin 1976, p. 84.

¹¹¹⁹ Yves Bréelle, « 3.4. Les piles et les moteurs à hydrogène », AIM, Colloque *L'hydrogène et ses perspectives*, Liège, 15-18 novembre 1976, p. 15.

¹¹²⁰ Jean Trapy écrit : « Cette comparaison met en évidence une consommation d'environ moitié en faveur du véhicule électrique. De tels écarts sont compréhensibles, si l'on considère qu'en plus d'un rendement réellement meilleur le véhicule électrique trouve en circulation urbaine des conditions qui lui sont le plus favorables, alors qu'il en est exactement le contraire pour le véhicule à moteur thermique. En revanche, ce dernier possède en accélération des performances plus avantageuses. L'autonomie du véhicule électrique sur un parcours de type cycle Europe atteindrait, suivant les moyens de stockage de l'hydrogène, de 370 à 1 000 km ; l'énergie récupérable au freinage est de l'ordre de 8 % de l'énergie totale utilisée par le véhicule. Les résultats de cette étude permettent d'avancer que le véhicule équipé d'un moteur électrique alimenté par une pile à combustible, constitue potentiellement une excellente adaptation à la circulation urbaine, par contre le moteur thermique, plus performant permet une plus grande souplesse d'utilisation du véhicule. »

encore à la SEFT et la DRME cette année-là son rapport technico-économique final sur « l'évaluation des applications de la pile à combustible hydrogène/air à la fourniture d'énergie électrique ». Après un examen détaillé de l'adaptation à plusieurs armes et équipements¹¹²¹, il confirme que ces générateurs « possèdent de gros avantages sur les groupes électrogènes classiques » et n'ont pas « de contrepartie défavorable au point de vue sécurité ni encombrement et poids »¹¹²². L'engouement est cependant plus nuancé dans l'administration. La DIMME (Direction des industries métallurgiques, mécaniques et électriques) note ainsi que les militaires « sont disposés à se satisfaire d'une pile assez chère et lourde, au rendement médiocre » et qu'ils « tiennent principalement à la sûreté de fonctionnement et à la rapidité de mise en action » : « Ils ont l'intention de soutenir l'IFP encore pendant deux ou trois ans et ont bon espoir d'être alors en possession d'un matériel qui leur conviendra et qui pourrait trouver des débouchés civils limités à des cas spéciaux : par exemple l'alimentation de stations de répéteurs PTT situés dans des lieux peu accessibles »¹¹²³.

De même, si le chargé de mission à la Direction des études et techniques nouvelles du Gaz de France et secrétaire scientifique du comité « Hydrogène » Jean Pottier remarque que la « First World Hydrogen Energy Conference » tenue à Miami du 1^{er} au 3 mars 1976 – et faisant suite à « Hydrogen Economy Miami Energy Conference » de 1974 – a réuni quatre cents participants, il sépare ces derniers en deux groupes distincts : d'un côté, ceux qui « s'intéressent de manière concrète à ce que l'on peut faire pour l'hydrogène à court et moyen terme » et qui « représentent souvent des organismes publics ou de gros industriels » ; de l'autre, ceux qui « s'intéressent à un des multiples aspects de l'hydrogène, pris en lui-même, sans souci des contraintes, des délais, des solutions concurrentes ». Il résume surtout les vingt communications portant sur les hydrures, les piles à combustible et les moteurs thermiques en écrivant que l'application de l'hydrogène aux véhicules apparaît « lointaine » et que l'ERDA (Energy Research and Development Administration) américaine émet des « réticences » non négligeables sur le sujet¹¹²⁴.

Source : IFP, « Modèle technico-économique de véhicule automobile. Simulation d'un véhicule électrique au cours d'un cycle urbain », janvier 1976, pp. 12-13.

¹¹²¹ Cet examen comprend : le camion atelier, la station de sondage météorologique SIROCCO, le véhicule porte-radar AMX 13 RATAC, le canon automoteur AMX 30 155 GCT, le système anti-aérien bitube de 20 mm VADAR, le faisceau hertzien QRMH 11 du système RITA, le faisceau hertzien QRTH 41 de la station Écureuil, la station multiplex QRMH 109, la station hertzienne mobile de grande puissance ARIANE, la station radiotéléimprimeur de grande puissance RTTY, le PC ou centre nodal du système RITA. Source : MATRA, « Évaluation des applications de la pile à combustible hydrogène/air à la fourniture d'énergie électrique », Lot n°4, Note Pero n°1230, 1976, pp. 4-5.

¹¹²² MATRA, « Évaluation des applications de la pile à combustible hydrogène/air à la fourniture d'énergie électrique », Lot n°4, Note Pero n°1230, 1976, p. 28.

¹¹²³ Direction générale de l'Industrie, « Note pour le Service des affaires techniques. Pile Alsthom », le 18 décembre 1978, p. 2.

¹¹²⁴ Gaz de France, Direction des études et techniques nouvelles, « Le Premier congrès mondial de l'hydrogène (First World Hydrogen Energy Conference – Miami 1-3 mars 1976 », le 22 mars 1976, pp. 1-3.

Par ailleurs, le comité « Hydrogène » de la DGRST ne prend pas de mesures directes en faveur des piles à combustible, contrairement à ce que pouvait laisser entendre l'annonce de sa politique d'action à la fin de l'année 1975. Ses membres ont d'autres objectifs en tête, comme s'en souvient Guy Bronoël : « Ils ont continué à regarder les problèmes d'hydrogène, à les évaluer. Paul Godin avait assez d'importance et regardait tout cela. C'était un ingénieur et polytechnicien d'EDF. Mais il n'y a rien eu de concret. Les actions qui ont été le plus soutenu à partir de là, c'étaient celles sur les batteries. Sur les relations qu'il pouvait y avoir avec les industriels sur les batteries. »¹¹²⁵ Le comité participe tout de même au renforcement du paradigme hydrogénique. Dès sa création, il considère que « ni le transport, ni le stockage de l'hydrogène ne devraient poser de problèmes difficiles si dans l'avenir il y était fait recours massivement »¹¹²⁶. Trois types de recherches retiennent plus spécifiquement son attention : le stockage par hydrures, en raison des utilisations qui pourraient en découler et des connaissances solides déjà acquises par les laboratoires français ; l'amélioration des rendements énergétiques et la minimisation des coûts d'investissement et de fonctionnement des électrolyseurs, pour « utiliser l'énergie électrique dite “d'heures creuses” » ; le recours à la chaleur nucléaire en vue de la production par voie thermochimique de grandes quantités d'hydrogène à des prix avantageux.

Ce dernier choix est effectué malgré certaines réserves. En effet, la voie thermochimique suppose en 1976 « la disponibilité à moyen terme » de HTR (High Temperature Reactors ou réacteurs à haute température) et la découverte de « cycles de réactions » complexes « susceptibles d'être mis en œuvre avec des rendements thermodynamiques et économiques acceptables, dans des réacteurs chimiques associés aux HTR, à des températures compatibles avec les connaissances technologiques de l'époque (inférieures à 900°C) »¹¹²⁷. Des crédits sont débloqués par la DGRST pour traiter de ces questions. Or ceux-ci vont revenir en priorité aux membres du comité « Hydrogène ». Les études sur la thermochimie, par exemple, sont principalement prises en charge par le CEA et Gaz de France : le premier s'oriente vers une méthode d'approche faisant appel à la connaissance fine des réactions chimiques pour élaborer des cycles complexes, à l'analyse de faisabilité de certaines réactions particulières et à l'étude de certains cycles originaux choisis du fait du faible pouvoir corrosif des produits mis en jeu. Le second se penche sur la recherche systématique par ordinateur pour pallier les risques d'omission de cycles¹¹²⁸. Des études complémentaires sont conduites par Pechiney Ugine

¹¹²⁵ Entretien avec Guy Bronoël, Meudon, octobre 2016.

¹¹²⁶ Lettre de Maurice Legrand à Claude Fréjacques, le 15 octobre 1980, p. 2.

¹¹²⁷ DGRST, Comité « Hydrogène », « Bilan d'activités 1975-1979 », 1980, pp. 2-3.

¹¹²⁸ Dans un rapport à destination du comité « Hydrogène », Jean Pottier fait état de l'avancée des travaux du Gaz de France en la matière : « La réévaluation des perspectives à long terme dans le domaine de l'énergie et, en particulier, du rôle potentiel de l'hydrogène, a conduit à placer sur un plan plus systématique l'étude de la voie thermochimique ; il était

Kuhlmann et la CGE sur la partie électrochimique de cycles au soufre et par le Laboratoire de chimie du solide de Paul Hagenmuller sur l'action du SO₂ sur l'eau, la dissociation thermique du chlorure ferrique FeCl₃ et la séparation d'hydrogène gazeux par membranes.

Sur le thème de l'électrolyse, des groupes d'industriels sont tout d'abord présélectionnés (Société de recherche technique et industrielle, le Creusot-Loire, Alsthom et CEM) pour appliquer une approche « système » et en démontrer la faisabilité industrielle. Ces études donnent à Alsthom l'occasion de réutiliser leurs dispositifs développés pour les piles à combustible dans d'autres applications industrielles, dans le cadre d'un montage regroupant plusieurs entreprises (Alsthom-Atlantique, CGEE-Alsthom, la SAFT, Neyrtec) autour des ACB (Ateliers et chantiers de Bretagne). D'autres laboratoires privés et publics sont bientôt financés par la DGRST pour répondre à des problématiques précises : la diminution de la chute ohmique dans les cellules, par l'emploi de diaphragmes – métalliques (CEA-Centre d'études nucléaires de Grenoble), fibreux (Université de Nantes), à structure organique (Institut national de recherche chimique appliquée-SORAPEC) – performants et stables dans les conditions de fonctionnement et par la mise au point de systèmes intégrés électrodes/séparateurs (SORAPEC), d'électrodes activées (CEA- Centre d'études nucléaires de Grenoble-Laboratoires de Marcoussis) ou à faible polarisation (Laboratoire de chimie du solide de Bordeaux-Institut national polytechnique de Grenoble) ; la meilleure connaissance des matériaux de structure des électrolyseurs (GDF-Creusot-Loire) ; la mise au point d'électrolytes solides originaux (CEA-Centre d'études nucléaires de Fontenay-aux-Roses) ; la recherche sur l'électrolyse en milieu de sels fondus (École centrale des arts et manufactures) ; ou encore l'amélioration des connaissances concernant l'électrolyse de l'eau à haute température, avec des travaux ciblés sur la stabilité de la zircone yttrée (Institut national polytechnique de Lorraine-Institut national polytechnique de Grenoble), les paramètres cinétiques des cellules (Institut national polytechnique de Grenoble-École nationale supérieure d'électrochimie et d'électrometallurgie de Grenoble) et l'approche d'une structure de cellule compacte intégrant une électrode de nickel dans l'électrolyte solide de zircone (CEA-Centre d'études nucléaires de Grenoble).

en effet important d'apprécier les avantages de cette voie et d'orienter les travaux sur les cycles les plus prometteurs. Parmi les actions définies pour l'ensemble du programme en 1975, on a poursuivi les études d'appui relatives aux matériaux et au génie chimique destinées à préciser les connaissances générales disponibles pour l'évaluation et la mise en œuvre d'installations industrielles, mais la priorité a été donnée à deux études fondamentales : les études thermodynamiques générales destinées à évaluer les irréversibilités de diverses natures rencontrées dans la voie thermo-chimique et à définir des guides ou critères pour la sélection des cycles ou des réactions composantes ; la recherche de nouveaux cycles, qui doit être envisagée de manière systématique, avec l'aide d'un ordinateur du fait de la multiplicité des réactions de la chimie et doit tenir compte des critères dégagés par les études théoriques et s'inspirer des travaux connus sur différents cycles. » Source : Gaz de France, « La production d'hydrogène par thermo-chimie. Le programme du Gaz de France exposé par M. Pottier », le 9 avril 1976, pp. 1-2.

De plus, un dernier volet des crédits attribués concerne des études de base sur la photoélectrolyse de l'eau – ou électrolyse assistée par lumière – portant essentiellement sur la photosensibilisation par le biais de photosensibilisateurs solubles (CNRS Lille) et l'emploi d'électrodes semi-conductrices catalysées à base d'oxyde de titane réduit (Thomson-CSF), d'oxyde de titane implanté (École centrale de Lyon-Université Claude Bernard de Lyon) ou d'hématine n dopée (CEA-Centre d'études nucléaires de Saclay). Enfin, les recherches engagées sur le stockage de l'hydrogène par hydrures permettent de procéder à un balayage des techniques et des composés : les composés métalliques, et en particulier les ferro-titanes industriels ou de synthèse (CEA-Centre d'études nucléaires de Grenoble), les composés à base zirconium (CEA-Centre d'études nucléaires de Saclay), ceux à base de nickel-lanthane (Laboratoire d'électrolyse de Bellevue), d'aluminium, de magnésium (IFP, Laboratoire de chimie du solide de Bordeaux¹¹²⁹, Université de Dijon) et les oxydes de tungstène et de molybdène présentant une structure « bronzes » (Centre de recherche sur les solides à organisation cristalline imparfaite d'Orléans), sont étudiés, de même que les composés moléculaires organiques macrocycliques (École nationale supérieure d'électrochimie et d'électrometallurgie de Grenoble-Université scientifique et médicale de Grenoble) et les cinétiques d'hydruration et de deshydruration (CEA-Centre d'études nucléaires de Grenoble)¹¹³⁰.

Si le comité « Hydrogène » ne prend pas en charge de travaux sur les piles à combustible, c'est aussi parce que la politique de la DGRST sur le sujet va évoluer à la fin de l'année 1976. Deux phénomènes interconnectés au sein du réseau social y contribuent fortement. En premier lieu, Alsthom ne remplit pas sa part du contrat, à savoir la démonstration exigée au printemps précédent qu'un générateur comportant six éléments ayant chacun une surface active d'un dm² au moins atteigne pendant une durée de 150 heures en fonctionnement continu des résultats définis en termes de puissance et de débit de courant. En effet, la société ne donne « à l'échéance aucun signe de vie aux experts »¹¹³¹ : « on n'arrive pas à savoir où en est l'état d'aboutissement du projet »¹¹³², annonce la DIMME qui ne peut conclure qu'à son « insuccès partiel »¹¹³³. Ce silence a deux raisons d'être principales : d'une

¹¹²⁹ Au sujet des travaux sur l'électrolyse à Bordeaux, Michel Pouchard déclare : « Au départ, nous avons voulu étudier nos matériaux par électrochimie, puisque nous faisons beaucoup de matériaux. Nous l'avons tout d'abord fait pour caractériser la réaction inverse de type électrolyseur. Le problème de l'électrode à hydrogène était moins pénalisant que le problème de l'électrode à oxygène. C'est là que nous avons une perte de potentiel beaucoup trop grande à cause de la polarisation de l'électrode. C'était donc le problème qu'il fallait résoudre. Nous nous sommes lancés là-dessus mais avec nos moyens. C'est-à-dire que nous n'avions pas d'électrochimiste avec nous. Et puis nous étions un groupe de chimistes du solide. » Source : entretien avec Michel Pouchard, Bordeaux, décembre 2016.

¹¹³⁰ DGRST, Comité « Hydrogène », « Bilan d'activités 1975-1979 », 1980, pp. 5-12.

¹¹³¹ Direction générale de l'Industrie, « Note pour le Service des affaires techniques. Pile Alsthom », le 18 décembre 1978, p. 2.

¹¹³² Ministère de l'Industrie et de la recherche, Direction générale de l'Industrie, DIMME, « Note sur la pile à combustible de l'Institut français du pétrole », le 30 mars 1977, p. 2.

¹¹³³ DIMME, « Société générale de constructions mécaniques et électriques Alsthom et Cie », 1978, p. 1.

part, la pile de Bernard Warszawski n'a pas atteint les critères requis ; d'autre part, Exxon se retire du partenariat. Conséquence tardive du choc pétrolier de 1973, l'entreprise américaine cherche officiellement à recentrer ses moyens sur l'accroissement de la production de brut¹¹³⁴. Une déception d'envergure pour Bogdan Broniewski :

« Après tant d'efforts pour aboutir à un contrat de collaboration terriblement compliqué, après que mes collaborateurs aient mis le meilleur d'eux-mêmes pour faire réussir cette collaboration, après avoir littéralement choyé le personnel d'Exxon, voilà ce qui nous arrivait ! [...] Les financements d'Exxon étant maintenant coupés, l'existence de l'équipe "pile à combustible" devenait désespérée. »¹¹³⁵

Second point : les difficultés rencontrées par Alsthom sont à l'origine d'un « retour en grâce de l'IFP »¹¹³⁶ auprès de la DGRST. Pendant que l'industriel français est occupé à replacer la majorité de son personnel dédié aux piles à combustible dans d'autres laboratoires, c'est-à-dire quelque soixante personnes (une quarantaine sur la pile à méthanol/hydrogène-air et une douzaine sur la pile à hydrazine), l'Institut est perçu par la DGRST comme le seul et unique organisme à avoir réalisé des modèles en état de marche et à avoir respecté ses engagements. Il va profiter de ce nouveau statut privilégié pour tenter d'imposer sa vision à la commission « Piles et générateurs ». Dès février 1977, Yves Bréelle, Jacques Chéron, Paul Degobert et Alain Grehier remettent un rapport encourageant sur le « prix de revient fabrication » de la pile hydrogène-air à destination des véhicules électriques, consolidant par là-même leur position. En étudiant avec la RNUR (Régie nationale des usines Renault) l'incidence de différents facteurs tels que la densité de puissance, la dimension des électrodes et le type d'assemblage sur le prix, ils estiment que la pénétration du marché semble accessible sous certaines conditions, notamment l'augmentation « de la puissance massique des blocs électrochimiques par amélioration de la densité de puissance » et la limitation « du coût matière et du coût main d'œuvre »¹¹³⁷. De surcroît, l'équipe montre à la Délégation qu'elle s'est déjà inquiétée de ces questions. Par exemple, après avoir observé que le support en métal nickelé des électrodes entraînait une baisse des performances de la cathode dans le temps, une résistance transversale plus élevée et des difficultés technologiques pour une association en série, elle opte pour l'emploi de supports en feuilles de nickel fritté ou électroformés. Simultanément, elle modifie ses techniques de dépôts des catalyseurs pour en réduire la quantité à utiliser, en particulier au niveau de la cathode

¹¹³⁴ BRONIEWSKI, Bogdan, *op. cit.*, 2014, p. 136.

¹¹³⁵ BRONIEWSKI, Bogdan, *op. cit.*, 2014, p. 137.

¹¹³⁶ Ministère de l'Industrie et de la recherche, Direction générale de l'Industrie, DIMME, « Note sur la pile à combustible de l'Institut français du pétrole », le 30 mars 1977, p. 2.

¹¹³⁷ IFP, « Prix de revient fabrication de la pile hydrogène-air », février 1977, p. 1.

dont le taux d'argent est divisé de quatre à huit, et s'efforce d'optimiser les performances intrinsèques des électrodes, les cinétiques de réaction et de réduire les coûts de fabrication. Elle change encore sa technique d'association des électrodes, qui passe d'un mode parallèle avec chambre à gaz commune aux deux électrodes à un montage en série où la tension s'élève systématiquement au passage de chaque élément.

Ces efforts convainquent la commission « Piles et générateurs » de la DGRST – mise en place temporairement en l'attente d'une décision qui justifierait l'établissement d'un véritable comité ou d'une action concertée¹¹³⁸ – que l'IFP est désormais une voix à écouter. Pressée par le CCRDE (Comité consultatif de la recherche et du développement dans le domaine de l'énergie) qui recommande de ne pas cesser de soutenir les travaux sur les piles à combustible¹¹³⁹, elle lui demande de fournir une note étayée de suggestions en vue de restructurer le programme de recherche national. Dans ce document, l'Institut affirme la nécessité de poursuite des activités, justifiée en vertu du principe même de la pile à combustible « qui en fait théoriquement le meilleur convertisseur d'énergie concevable » et de ses « perspectives de débouchés » grandissantes sur le marché. La prudence est toutefois de mise : « cette activité », précise-t-on, « doit rester limitée à des travaux de base sans effort prématuré de développement, la démarche adoptée devant permettre le moment venu, en vue d'un marché bien déterminé, de déclencher avec le maximum d'efficacité les actions industrielles nécessaires »¹¹⁴⁰.

Cette prise de position découle du comportement atypique adopté par l'IFP vis-à-vis du collectif de pensée. Alors que deux styles opposés avaient émergé en son sein au début des années soixante-dix,

¹¹³⁸ La succession réelle des comités et commissions prenant en charge l'évaluation et le financement des piles à combustible n'est pas évidente à établir après l'arrêt de l'action concertée « Électrotechnique nouvelle » en 1972. Celle-ci est remplacée par une action concertée « Électrotechnique générale » ne se préoccupant plus des piles à combustible. Il semble que pendant un temps, Maurice Magnien anime une petite commission non officielle à quelques membres et une autre officielle, rattachée à la fois à la DGRST et à la DIMELEC. Puis c'est au tour du comité Quater 1 de la DIMME d'évaluer le seul dossier restant sur le sujet à partir de 1974, celui d'Alsthom. L'organisation de la commission « Piles et générateurs » évoquée ici, parfois aussi nommée « Electrochimie », paraît être une organisation de transition temporaire. Mais rien n'est spécifié explicitement dans les archives que nous avons rassemblées à ce sujet. Loïk Le Floch-Prigent reste, de toute manière, le seul décideur sur la question des piles à combustible à la DGRST, les différents comités et commissions ne lui prodiguant que des conseils et recommandations.

¹¹³⁹ LE CCRDE émet plusieurs recommandations pour un budget de « 60 millions de francs sur 10 ans pour la filière hydrogène » : en termes de recherche fondamentale, le CCRDE souhaite « poursuivre l'effort entrepris sur les piles à haute température », « accentuer celui relatif aux piles hydrogène-air basique et méthanol-air ». La recherche appliquée devrait quant à elle « s'orienter vers la réalisation de piles expérimentales en particulier à hydrogène ». Il est également demandé de coordonner « dès à présent » au niveau national les projets « de l'EDF, du Gaz de France, du CEA, de l'IFP et des industries automobile et pétrolière » dans le but de « permettre un débouché en 1985 », et de créer au niveau européen « un groupe de taille équivalente à celle du groupe américain Pratt et Whitney (1 000 personnes) ». Source : CCRDE, « Piles à combustible », mars 1977, p. 3.

¹¹⁴⁰ IFP, « Suggestions en vue d'une restructuration du programme de recherches national dans le domaine des piles à combustibles », le 2 mars 1977, p. 3.

l'un tourné vers la réalisation technologique, porté par des entreprises industrielles telles qu'Alstom, et l'autre dirigé vers les études fondamentales, soutenu par le milieu académique, l'IFP se situe encore en 1977 à cheval entre les deux en maintenant un équilibre subtil entre l'équipe technique de Yves Bréelle et l'équipe de recherches électrochimiques de Odile Bloch. Même s'il reste très engagé dans la construction matérielle des piles à combustible, seul moyen pour lui de tirer les enseignements directs des études fondamentales, Yves Bréelle refuse d'adopter le même plan de travail qu'Alstom, c'est-à-dire de « mettre la charrue avant les bœufs »¹¹⁴¹. Pour l'IFP, un programme national doit donc d'abord porter sur la recherche fondamentale, avec notamment l'étude des catalyseurs (sans métaux précieux ou à très faible teneur pour éviter le phénomène de polarisation irréversible de la pile à hydrogène en milieu basique, catalyseurs actifs en milieu acide pour l'emploi d'hydrogène impur, catalyseurs activant le méthanol), des piles à haute température et du fonctionnement des différents types d'électrodes (en particulier leur tenue dans le temps). Mais il doit comporter dans un même temps une solide partie de pré-développement, allant de l'étude des interactions « performances-fiabilités-procédés de fabrication » à la réalisation de systèmes complets, « dont l'expérience a amplement démontré la nécessité à la fois pour évaluer correctement l'avancement des connaissances et les possibilités d'application, et pour révéler les problèmes de fond »¹¹⁴².

De fait, et au vu de l'état des connaissances de l'époque, l'IFP propose de faire principalement porter les efforts de réalisation de prototypes sur la pile hydrogène-air en permettant la poursuite des programmes exécutés en partenariat avec la SEFT et avec la RNUR, qui constituent « un tronc commun de recherche pour l'ensemble des applications de ce type de pile ». De telles prescriptions n'ont rien d'étonnant : Alstom se trouvant dans une situation plus qu'incertaine, l'Institut détient désormais le monopole du discours d'expertise légitime sur les réalisations techniques. Ce qui lui permet de signaler par la même occasion que « tant qu'un effort de développement ne se justifiera pas, le volume global des moyens affectés actuellement en France aux piles à combustibles, devrait être suffisant »¹¹⁴³ : la recherche fondamentale étant assurée par le CNRS et les laboratoires universitaires, les équipes sont déjà « en place pour l'essentiel du programme ». Quant aux études

¹¹⁴¹ Entretien téléphonique avec Yves Bréelle, Belfort, avril 2018.

¹¹⁴² IFP, « Suggestions en vue d'une restructuration du programme de recherches national dans le domaine des piles à combustibles », le 2 mars 1977, p. 3.

¹¹⁴³ L'IFP recommande tout de même une répartition des moyens de la manière suivante : pour les recherches fondamentales et pour un budget total de huit à dix millions de francs, le financement de trois chercheurs et de trois techniciens par an sur les catalyseurs et les électrodes pour pile H₂-air basique, de trois chercheurs et de trois techniciens par an sur la pile H₂-air acide, de quatre chercheurs et de six techniciens par an sur la pile à haute température, de trois chercheurs et de trois techniciens par an sur la pile méthanol-air ; pour la réalisation de piles et pour un budget de six à sept millions de francs, le financement de huit ingénieurs et de seize techniciens ; pour la fabrication de prototypes et de petites séries et pour un budget total de cinq à six millions de francs, le financement de quatre ingénieurs et de seize techniciens. Source : IFP, « Suggestions en vue d'une restructuration du programme de recherches national dans le domaine des piles à combustibles », le 2 mars 1977, p. 4.

relatives à la construction de prototypes, l'IFP se désigne pour « remplir cette mission », de manière à les centraliser et assurer la synthèse des connaissances, « compte tenu de l'expérience qu'il a acquise dans le domaine ». Enfin, l'Institut reconnaît que « la coordination de ces travaux est indispensable pour éviter le gaspillage des efforts et assurer une politique de recherche cohérente »¹¹⁴⁴ et qu'il est de la responsabilité de la DGRST de la gérer. Le 18 mars, la commission « Piles et générateurs » se réunit et avalise la majeure partie de l'analyse reçue. Ses membres, qui comptent notamment Hubert Autruffe de la SNCF, Jacques Millet de l'EDF et Guy Bronoël du Laboratoire d'électrolyse du CNRS¹¹⁴⁵ confirment la solidité des recherches fondamentales effectuées dans le pays mais appellent à plus de moyens :

« [...] une dizaine de chercheurs du CNRS font des travaux de haute théorie sur les piles froides (presque exclusivement des piles à hydrogène) ; une demi-douzaine d'autres s'intéressent aux piles chaudes et sont très orientés sur des aspects qui touchent également à l'électrolyse. Des recherches technologiques sur l'électrolyse de l'eau sont menées ailleurs, notamment à l'EDF. Il y a chez Bronoël cinq personnes qui travaillent sur les piles basiques, ce qui est trop peu ; un chercheur va attaquer le méthanol-air, alors qu'il en faudrait au moins trois. Il y a aussi en pré-développement un générateur d'hydrogène à partir du méthanol. »¹¹⁴⁶

Si certains militent donc encore en faveur de la recherche sur les piles à combustible, Loïk Le Floch-Prigent, pour sa part, ne croit plus en leur capacité industrielle : « Sur les piles à combustible, je me dis : “ce n'est pas industriel. On ne peut rien faire avec.” C'est moi qui dit ça, c'est clair. Ce n'est pas la peine de chercher un responsable. Ce n'est pas mon délégué général qui me dit : “ça suffit.” C'est moi qui dis au délégué général : “on arrête.” »¹¹⁴⁷ Il estime particulièrement que celles-ci ne sont pas encore arrivées à maturité¹¹⁴⁸. Les modèles de 500 watts fonctionnant à l'hydrogène, à l'air

¹¹⁴⁴ IFP, « Suggestions en vue d'une restructuration du programme de recherches national dans le domaine des piles à combustibles », le 2 mars 1977, pp. 3-5.

¹¹⁴⁵ En 1977, la commission « Piles et générateurs » de la DGRST est composée de : Hubert Autruffe (SNCF), Guy Bronoël (Laboratoire d'électrolyse du CNRS), Jean Delsey (Institut de recherche des transports), Charles Desportes (École nationale supérieure d'électrochimie), M. Croizet (SEFT), Jean Lambert (DIMME), M. Lancien (SNCF), Jacques Millet (EDF), M. Perret (DICA), Loïk Le Floch-Prigent (DGRST) et Mlle Lieure (DGRST). Source : DGRST, « Procès-verbal de la réunion “Piles” », le 16 septembre 1977, p. 1.

¹¹⁴⁶ Ministère de l'Industrie et de la recherche, Direction générale de l'Industrie, DIMME, « Note sur la pile à combustible de l'Institut français du pétrole », le 30 mars 1977, p. 3.

¹¹⁴⁷ Entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

¹¹⁴⁸ Il lui apparaît notamment, comme à d'autres membres de la commission « qu'il est trop tard pour lancer un effort sur la pile à hydrogène en milieu acide à laquelle Pratt et Whitney a consacré déjà des sommes gigantesques et pour laquelle il y a maintenant trop de retard en France, même pour la recherche pure ». Il conseille donc de maintenir une « veille passive sur ce qui se fait » et d'acquiescer « une licence de fabrication le moment venu ». Source : Ministère de l'Industrie

et à l'hydroxyde de potassium (KOH), livrés à la SEFT par l'IFP, lui donnent en partie raison : « malgré de sérieux efforts », les exemplaires pèsent encore près de 130 kg en ordre de marche¹¹⁴⁹ et détiennent une puissance inférieure (60 à 70 milliwatts/cm²) à ce qui était initialement prévu (90 milliwatts/cm²)¹¹⁵⁰. Après avoir progressivement délaissé le projet d'Alstom, Loïk Le Floch-Prigent va ainsi rediriger les recherches de l'IFP dans ce qu'il considère être une voie de garage : il incite l'Institut à poursuivre ses activités au même niveau d'intensité, soit trois millions de francs par an, mais toujours sur ses propres fonds et en partenariat avec des « utilisateurs potentiels »¹¹⁵¹ comme le CNET et le CNEXO, c'est-à-dire des institutions « qui ont de l'argent pour faire des choses à l'unité »¹¹⁵².

La situation interne à la DGRST facilite la marge de manœuvre de Loïk Le Floch-Prigent sur le sujet. D'une part, le Fonds de développement de la recherche scientifique et technique, plus communément appelé « Fonds de la recherche » est réaménagé au cours de l'année 1977 pour faire face à la « pesanteur sociologique » des institutions et aux évolutions des activités scientifiques nationales : création de nouveaux organismes parfois directement issus des actions concertées, diversification des actions, augmentation des besoins de recherche des administrations, dissémination des procédures contractuelles, initiatives dispersées... Les actions concertées sont donc recentrées vers leur objectif premier, à savoir la prise en charge de thèmes scientifiques et techniques possédant « un caractère pluridisciplinaire ou pluriorganisme et que les établissements publics de recherche ne seraient pas en mesure de traiter avec l'ampleur ou l'efficacité souhaitées »¹¹⁵³. D'autre part, le décès soudain de Bernard Grégory en décembre puis la nomination de Pierre Aigrain au poste de secrétaire d'État auprès du Premier Ministre chargé de la Recherche le 6 avril 1978 en remplacement de Jacques Sourdille provoquent un certain nombre de réajustements. Si Bernard Grégory pouvait jouer le rôle de conseiller technique auprès de Jacques Sourdille, plus homme politique que véritable scientifique selon le physicien Jacques Friedel¹¹⁵⁴, une telle chose apparaît moins pertinente avec Pierre Aigrain.

et de la recherche, Direction générale de l'Industrie, DIMME, « Note sur la pile à combustible de l'Institut français du pétrole », le 30 mars 1977, p. 3.

¹¹⁴⁹ IFP, branche raffinage et pétrochimie, Centre d'études et de développement industriels, « Pile 500 W version militarisée n°2. Description », décembre 1977, p. 23.

¹¹⁵⁰ DGRST, « Procès-verbal de la réunion "Piles" », le 16 septembre 1977, p. 1.

¹¹⁵¹ Ministère de l'Industrie et de la recherche, Direction générale de l'Industrie, DIMME, « Note sur la pile à combustible de l'Institut français du pétrole », le 30 mars 1977, p. 3.

¹¹⁵² Entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

¹¹⁵³ DGRST, « Les aménagements de procédure du Fonds de la recherche », février 1977, p. 6.

¹¹⁵⁴ Ancien résistant, Jacques Sourdille est directeur d'enquête à l'IRSEM puis maître de conférences en médecine à l'Université de Dakar et à Paris VII. Pourtant, le président des « Douze sages » en 1978, Jacques Friedel, écrit à son sujet : « [...] un secrétariat d'État à la recherche avait été créé auprès du Premier Ministre. Avec Sourdille, ce secrétariat était plus politique que technique, et Bernard Grégory, alors à la tête de la DGRST, continuait à régler les affaires. Sourdille avait d'ailleurs des ambitions limitées. Je me souviens d'un déjeuner où la question était : que peut-on faire en quelques

Dans un jeu de chassé-croisé où le politique remplace le scientifique et inversement, le poste de délégué général de la DGRST est ainsi supprimé au profit d'un poste de directeur à vocation administrative dont le conseiller référendaire à la Cour des comptes Roland Morin – déjà délégué général adjoint depuis octobre 1974 – prend la charge. Sans supérieur direct doté d'un profil scientifique adapté à l'évaluation de la qualité de son travail et de la pertinence de ses décisions, Loïk Le Floch-Prigent se retrouve en fin de compte seul maître du pôle technique de l'institution et l'élément central du réseau social évoluant dans les domaines de l'électrochimie et de l'électrotechnique¹¹⁵⁵.

Cette latitude d'action lui donne l'occasion de sponsoriser des sujets d'étude qui méritent selon lui plus d'attention que les piles à combustible. Au sein de la commission « Piles et générateurs électrochimiques » nouvellement créée¹¹⁵⁶, il soutient le perfectionnement d'autres types d'appareils : l'accumulateur sodium-soufre ; l'accumulateur nickel-zinc ; l'accumulateur au plomb, dans le but « d'accroître la puissance sans nuire à la longévité » ; les accumulateurs nickel-cadmium et nickel-fer ; les piles air-zinc ; et les piles au lithium, dont « l'enjeu est à long terme important »¹¹⁵⁷. Plusieurs entreprises et laboratoires vont profiter de ce changement pour tenter de se positionner et venir remplacer le collectif de pensée évoluant autour des piles à combustible. La SORAPEC (Société de recherches et d'applications électrochimiques), fondée en 1974 et dirigée par Denis Doniat, est par exemple retenue une première fois pour des projets portant sur « la mise au point d'un procédé de fabrication de micro-piles utilisant le couple Zn-MnO₂ (zinc-oxyde de manganèse) » (580 000 francs, douze mois) et sur l'étude des « accumulateurs air-métal (mise au point d'électrodes à air et d'électrodes à base de zinc, de fer et d'hydrures métalliques) » (400 000 francs, douze mois). Yvon Lazennec, Georges Feuillade et Raymond Vic de la CGE – ces deux derniers s'étant reconvertis depuis la fin des études sur les piles à combustible au sein de la société – se lancent également dans des travaux sur « l'accumulateur Na/S (sodium-soufre) » (deux millions de francs, vingt-quatre mois), « les électrodes de batteries au plomb » (600 000 francs, douze mois) et « les électrodes de zinc pour accumulateur nickel-zinc » (401 000 francs, douze mois). Le Laboratoire de chimie

mois et qui ne coûte pas cher ? On était loin du déjeuner avec Curien et d'Ornano où l'on discutait de la création des allocations de recherche ». Source : FRIEDEL, Jacques, *Graine de mandarin*, Éditions Odile Jacob, 1994, p. 257.

¹¹⁵⁵ Ce dernier témoigne : « [...] de 1975 à 1981, pendant six ans, c'est moi qui suis le pôle technique de fait de la maison DGRST. [...] Morin a renforcé officiellement le pouvoir que j'avais. Morin et Aigrain m'ont donné un titre et m'ont demandé de changer de bureau. » Source : entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

¹¹⁵⁶ En mars 1978, cette commission est composée de : Guy Bronoël (CNRS), M. Daniel (SEFT), Jean Delsey (IRT), le colonel Grandin de l'Épervier (Direction des recherches, études et techniques d'armement), M. Hillion (DICA), Jean Lambert (DIMME), J. Lancien (SNCF), Jacques Millet (EDF), Loïk Le Floch-Prigent, M. Rousset et Mme Bouchet (DGRST). Source : DGRST, commission « Piles et générateurs électrochimiques », « Compte-rendu de la réunion du mercredi 15 mars 1978 (DGRST) », 1978, p. 1.

¹¹⁵⁷ Ministère de l'Industrie et de la recherche, Direction générale de l'Industrie, DIMME, « Note sur la pile à combustible de l'Institut français du pétrole », le 30 mars 1977, p. 2.

minérale de l'Université de Nantes dirigé par le professeur Jean Rouxel¹¹⁵⁸ dépose de son côté un dossier pour développer de « nouveaux matériaux de cathodes à stockage de réactifs » (299 532 francs, vingt-quatre mois)¹¹⁵⁹. Enfin, Pierre Lenfant de la SAFT demande un million de francs (douze mois) pour une étude fondamentale et appliquée des couples à anodes de lithium et cathodes solides ou liquides en milieu électrolytique non aqueux.

Une caractéristique regroupe ces travaux : au contraire des piles à combustible, ils détiennent tous un potentiel d'application industrielle à court et moyen terme. Il s'agit ici pour Loïk Le Floch-Prigent de la condition essentielle d'attribution des financements : « Mon souci à la DGRST, c'est : lorsque je découvre quelque chose, en quoi est-ce que je vais pouvoir l'industrialiser ? C'est ça qui me conduit à partir sur le lithium en considérant que les piles à combustible, ce sera pour demain. » Et c'est bien aussi parce qu'il est « silencieux sur la liaison avec un industriel » qu'il refuse dans un premier temps d'agréer le projet fait par Josik Portier du Laboratoire de chimie du solide de Bordeaux concernant l'étude et la réalisation d'éléments galvaniques en couches minces fonctionnant à température ambiante. Au cours des réunions de la commission, Loïk Le Floch-Prigent réaffirme à plusieurs reprises les caractéristiques attendues des projets pouvant d'être financés : il doit s'agir de programmes se proposant de résoudre non pas « de stricts problèmes de composants » mais bien « les difficultés auxquelles se heurte l'assemblage d'électrodes et d'électrolytes ». Ces travaux doivent de plus être obligatoirement conduits avec un industriel susceptible de jouer le rôle d'un « garde-fou », « d'assumer en aval l'industrialisation ultérieure des résultats et de faire prendre en compte, dans le cours de la recherche, les contraintes qui y sont liées »¹¹⁶⁰.

9.2 Le repositionnement des études vers la recherche électrochimique fondamentale et les applications spéciales

La DGRST n'est pas la seule institution à connaître de profonds changements au cours des années 1977-1978. La démission de Maurice Bonnemay, déjà diminué physiquement, est fortement appuyée par la Délégation qui considère « qu'il a fait son temps et qu'il radote »¹¹⁶¹. Celle-ci a des répercussions importantes sur le Laboratoire d'électrolyse du CNRS. Rappelons que les recherches

¹¹⁵⁸ Jean Rouxel soutient sa thèse, dirigée par Paul Hagenmuller, en 1961. Élu à l'Académie des sciences en 1988, il est titulaire de la chaire de chimie des solides au Collège de France en 1997-1998. En 1997, il est également décoré de la médaille d'or du CNRS.

¹¹⁵⁹ DGRST, commission « Piles et générateurs électrochimiques », « Compte-rendu de la réunion du mercredi 15 mars 1978 (DGRST) », 1978, pp. 1-6.

¹¹⁶⁰ DGRST, comité « Piles et générateurs électrochimiques », « Compte-rendu de la réunion du 24 avril 1978 à la DGRST », 1978, pp. 4-5.

¹¹⁶¹ Entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

sur les piles à combustible avaient engendré de grandes disparités entre les équipes, si bien que Bellevue avait déjà entrepris de se réorganiser à partir de 1975 autour de quatre groupes : « interface électrodes métalliques/électrolyte » animé alternativement par Antoinette Hamelin et Jean Clavillier, « interaction rayonnement lumineux – interface électrode solide/électrolyte » dirigé par Max Costa, « interphase semi-conducteurs minéraux/électrolyte » conduit par Eugène Levart, et « énergétique électrochimique et électrocatalyse » mené par Guy Bronoël¹¹⁶². Il s'agissait alors de réorienter progressivement l'activité des chercheurs tout en dissolvant les équipes les plus fournies autour des piles à combustible : celles de Guy Bronoël, de Eugène Levart et de Claude Lamy. Or cette démarche n'a que partiellement fonctionné en 1977, comme l'indique le directoire : « depuis la vogue des piles à combustibles, il y a une dizaine d'années, ce laboratoire, au demeurant ancien, n'a jamais bien retrouvé son harmonie interne »¹¹⁶³.

Le remplacement de Maurice Bonnemay cristallise les tensions qui prédominent : d'un côté les théoriciens réunis autour de Jean Clavillier cherchent à repositionner le laboratoire sur des questions d'études fondamentales, de l'autre l'équipe de Guy Bronoël tente de nouer des liens plus directs avec les milieux industriels dans une visée applicative. L'équipe de Guy Bronoël constitue d'ailleurs un groupe à part dans le laboratoire. Elle est par exemple la seule à multiplier à la fois les contrats extérieurs – une caractéristique que Bellevue qualifie même de « tradition » pour cette équipe – et les participations aux ATP (actions thématiques programmées) du CNRS¹¹⁶⁴. Cette distinction se donne aussi à voir dans les rapports d'activité : quand Jean Clavillier souhaite produire des connaissances « reposant sur des lois et des théories généralisables à l'ensemble des interfaces métal-électrolyte », voire apporter « une contribution à la physique des surfaces métalliques »¹¹⁶⁵, Guy Bronoël préfère « résoudre les problèmes qui constituent des verrous au développement de systèmes ou procédés électrochimiques importants du point de vue des économies d'énergie » en maintenant « un contact permanent avec les groupes industriels »¹¹⁶⁶. Ce qui fait dire au comité de direction que la rupture entre les deux entités est si consommée et les problèmes « tels » que tant qu'un remplaçant digne de

¹¹⁶² CNRS, « Rapport d'activité du Laboratoire d'électrolyse du CNRS », le 8 octobre 1976, p. 4.

¹¹⁶³ CNRS, Laboratoire d'électrolyse, directoire, « Laboratoire d'électrolyse. Bellevue », le 19 janvier 1977, p. 1.

¹¹⁶⁴ Introduites à partir de 1969, les ATP (actions thématiques programmées) sont apparentées aux RCP (recherches coopératives sur programme) créées en 1963 au CNRS et aux AC (actions concertées) de la DGRST. Selon Brunot Marnot, leur différence réside dans le fait qu'elles sont à la fois caractérisées par leur rapprochement aux orientations générales de l'économie française et par leur tendance fondamentaliste. Source : MARNOT, Bruno, « Introduction au rapport d'activité du CNRS de 1969 », in *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], n°10, 2004, mis en ligne le 06 novembre 2006.

¹¹⁶⁵ CNRS, « Rapport d'activité du Laboratoire d'électrolyse du CNRS », le 8 octobre 1976, p. 12.

¹¹⁶⁶ CNRS, « Rapport d'activité du Laboratoire d'électrolyse du CNRS », le 8 octobre 1976, p. 56.

ce nom n'est pas trouvé, il apparaît « prématuré d'exposer des projets ou des plans concernant l'avenir du laboratoire »¹¹⁶⁷.

Justement, Bellevue peine dans sa recherche d'un nouveau directeur. La « vaste prospection nationale » n'aboutit pas. C'est donc hors du pays que l'on va aller chercher la perle rare, en la personne du professeur à l'Université de Bristol et rédacteur en chef du *Journal of Electroanalytical Chemistry* Roger Parsons qui accepte le poste pour une période de quatre ans¹¹⁶⁸. Ce dernier fait l'unanimité parmi les membres du personnel, du comité de direction et de la section du CNRS. On loue « son excellente réputation scientifique » et « ses qualités humaines », susceptibles de « redonner un certain enthousiasme » aux équipes. Une page se tourne : en même temps que le Laboratoire d'électrolyse est renommé Laboratoire d'électrochimie interfaciale pour se conformer aux orientations fondamentales qu'on lui destine, il est proposé à Guy Bronoël et son groupe « beaucoup plus proche des réalisations concrètes de générateurs » de « migrer » à Grenoble pour y établir un nouveau pôle. Un regroupement encouragé, selon Guy Bronoël, par le directeur du CNRS Jean Cantacuzène, lui-même appuyé et conseillé par Loïk Le Floch-Prigent de la DGRST et Jacques Millet de l'EDF¹¹⁶⁹. C'est que les trois institutions ont tout à gagner dans la création de ce pôle : pour le CNRS, elle doit permettre « de monter une excellente structure se consacrant à l'énergétique électrochimique » faisant défaut à « la panoplie des activités électrochimiques en France (électrochimie analytique, électrochimie moléculaire, électrochimie interfaciale) »¹¹⁷⁰, tandis que la DGRST et l'EDF y voient la possibilité d'un renforcement du dialogue avec les industriels qui pourront disposer « d'un savoir théorique directement assimilable »¹¹⁷¹. Si pour la biologiste et membre du bureau du Comité de sauvegarde des sites de Meudon Paulette Gayral ce type de bouleversement découle indirectement des événements de mai 1968 et n'est pas un phénomène isolé à cette période¹¹⁷², Guy Bronoël considère qu'il s'agit de l'acte scellant le sort du laboratoire :

¹¹⁶⁷ CNRS, « Rapport d'activité du Laboratoire d'électrolyse du CNRS », le 8 octobre 1976, p. 67.

¹¹⁶⁸ Ce poste de directeur sera plus tard occupé par Max Costa.

¹¹⁶⁹ Correspondance épistolaire entretenue avec Guy Bronoël, décembre 2016.

¹¹⁷⁰ CNRS, Laboratoire d'électrolyse, directoire, « Laboratoire d'électrolyse. Bellevue », le 19 janvier 1977, pp. 1-2.

¹¹⁷¹ CALLON, Michel, op. cit., 1988, p. 203.

¹¹⁷² Dans le bulletin du Comité de sauvegarde des sites de Meudon, Paulette Gayral écrit notamment en 2007 : « [...] la vague de contestation de mai 1968 [est] porteuse des nombreux et profonds changements qu'on verra s'égrener au fil des années 70 : ce seront des éclatements d'équipes qui, victimes de leur succès, avaient atteint un volume critique générateur de conflits internes, des transferts d'équipes vers d'autres groupes en vue de les rendre plus opérationnelles, parfois des dissolutions prononcées par le Directeur général après avis des Directeurs scientifiques et du Conseil national de la Recherche, le plus souvent en raison de leur inadéquation aux orientations des nouvelles politiques de la recherche mises en œuvre au niveau gouvernemental, et plus rarement, en raison d'un certain enlisement des travaux. » Source : Comité de sauvegarde des sites de Meudon, bulletins n°123 et 124, n°2 et 3, 2007, p. 15.

« J'étais à Bellevue et à partir de 1977, il y a eu une crise énorme. Des problèmes de personnel, en réalité. Et on m'a demandé de quitter le laboratoire et de fonder un nouveau groupe de recherche sur l'électrochimie à Grenoble. Et donc de 1977 à 1980, j'étais à Grenoble. À la fois, j'étais professeur à l'Institut polytechnique et je devais mettre en place ce nouveau groupe. Ce qui s'est passé, mais c'est souvent ce qu'il se passe, c'est que toute une partie de l'équipe m'a suivie et l'autre partie, qui travaillait en région parisienne, ne pouvait pas suivre. On a fait des promesses mirifiques en disant : "on va faire ce qu'il faut pour les faire muter", etc. Et rien n'a été fait. Donc tout ça s'est délité. [...] Le départ d'autres chercheurs, comme Claude Lamy à Poitiers, et enfin la démission de Bonnemay conduisit à la mort progressive du laboratoire. »¹¹⁷³

Bellevue ramené à la recherche fondamentale, les études concernant le développement technologique de piles à combustible sont majoritairement écartées. Une tendance qui s'observe dans l'ensemble des laboratoires français à cette époque. Comme l'a montré Vololona Rabeharisoa, on assiste à partir de 1976-1977 à un « déplacement »¹¹⁷⁴ des publications scientifiques concernant les piles à combustible vers la *recherche électrochimique* alors qu'elles auparavant plus concentrées sur leurs *aspects techniques* (caractérisation d'éléments, techniques nécessaires à leur réalisation, etc.). Cette dynamique se double dans un même temps du renforcement de l'orientation vers des applications *spéciales* (océanographie, secteur spatial, applications militaires), financées par l'administration publique, et non plus *diffusables à grande échelle* (production massive d'électricité, véhicule électrique à destination du grand public), portées par le secteur industriel, pour les entreprises et organismes encore engagés dans la réalisation de modèles.

C'est le cas pour l'IFP, qui suit les recommandations de la DGRST et établit un contact avec les « utilisateurs potentiels » de ses piles à combustible. En plus d'un contrat qu'il obtient en 1977 avec le CEA et financé par la CEE (Communauté économique européenne) visant à évaluer les possibilités techniques et économiques de l'utilisation d'hydrogène et de méthanol pour la traction automobile¹¹⁷⁵, l'Institut est convié dès le 14 juin à participer à Paris à la première réunion du GRETO (Groupe de réflexion sur la technologie océanique) rattaché au CNEXO (Centre national pour

¹¹⁷³ Entretien avec Guy Bronoël, Meudon, octobre 2016.

¹¹⁷⁴ RABEHARISOA, Vololona, « A Special Mediation Between Science and Technology: When Inventors Publish Scientific Articles in Fuel Cell Research », in GRUPP, Hariolf (éd.), *Dynamics of Science-Based Innovation*, Springer-Verlag, 1992, p. 67.

¹¹⁷⁵ *Revue de l'énergie*, n°314, avril 1979, p. 342.

l'exploitation des océans)¹¹⁷⁶. Celui-ci a pour objectif de mettre en relation les différents acteurs impliqués dans le développement et l'usage de techniques océanographiques et d'identifier « les équipements qui correspondent à « un besoin à court et moyen terme et qu'il conviendrait de promouvoir ». Il s'agit en clair de redéfinir « une politique en matière de technologie marine » pour rassembler les différentes forces nées pour partie des actions concertées de la DGRST dans les années soixante. Le domaine est en effet toujours investi par de nombreuses institutions, d'autant plus qu'il est dopé par la demande en technologie sous-marine civile de l'offshore pétrolier (pour l'assistance aux forages, les travaux sur le fond, l'inspection et la maintenance). Le CEA a notamment plusieurs projets en cours, comme le projet « Hydra » qui doit permettre avec le CNEXO l'étude et la mise au point d'un analyseur de polluants dans l'eau de mer, la réalisation avec le CERTSM (Centre d'études et de recherches techniques des sous-marins) d'un bras télémanipulateur à retour d'effort, ou encore le projet « Pégase » qui consiste en une étude préliminaire d'un véhicule sous-marin visant à « recouvrir les pipes de cailloux ». Le CERTSM planche pour sa part sur deux engins subaquatiques : le ERIC 10, capable de descendre en plongée à 600 mètres et muni d'un câble électro-porteur, d'un bras télémanipulateur et d'une caméra de télévision ; et le sous-marin « crache-plongeurs » rattaché au navire *Marcel Le Bihan*, intervenant jusqu'à 300 mètres, doté de batteries cadmium-nickel, d'un moteur à courant continu et d'une commande électronique¹¹⁷⁷.

Ancien résistant, pionnier de l'exploration sous-marine et fondateur de l'École des nageurs de combat, le directeur général adjoint du CNEXO Claude Riffaud liste les sujets d'intérêt lors de la réunion : les « véhicules et outils sous-marins », les « nodules », le « stockage de produits dangereux en mer » (les déchets nucléaires), les « systèmes d'intervention sous-marine », « l'énergie des mers » (en particulier thermique), le « laser », la « pollution » (les moyens de lutte et l'instrumentation), la « pose de canalisations très profondes » et le « positionnement sous-marin »¹¹⁷⁸. Mais c'est le thème des systèmes d'intervention sous-marine et de leurs accessoires qui retient en premier lieu l'attention. Il constitue le premier sujet traité par les membres du GRETO lors de leur deuxième rassemblement¹¹⁷⁹ : « la tendance est sans doute au développement des sous-marins "porte-

¹¹⁷⁶ Siègent lors de cette première réunion : M. Balligand du CEA, M. Cavaillès du CERTSM (Centre d'études et de recherches techniques des sous-marins), MM. Riffaud, Dreyer, Girard et Marchand du CNEXO, M. Le Faudeux du CESMA et M. Willm de l'IFP. Source : CNEXO, « Réunion n°1 du GRETO (Groupe de réflexion sur la technologie océanique) tenue à Paris le 14/6/1977 », le 17 juillet 1977, p. 1.

¹¹⁷⁷ Sur la recherche océanographique et le développement de sous-marins en France, nous renvoyons à : JARRY, Jean, *L'aventure des bathyscaphes. Marins, ingénieurs et savants au plus profond des mers*, Éditions du Gerfaut, 2003.

¹¹⁷⁸ CNEXO, « Réunion n°1 du GRETO (Groupe de réflexion sur la technologie océanique) tenue à Paris le 14/6/1977 », le 17 juillet 1977, pp. 1-3.

¹¹⁷⁹ Participent à cette deuxième réunion : M. Balligand du CEA, M. Cavaillès du CERTSM, M. Custeaud de la DCAN (Direction des constructions et armes navales), M. de Vault de la COMEX (Compagnie maritime d'expertise), M. Gonord de DORIS, M. Le Faudeux du CESMA, M. Willm de l'IFP, et MM. Dreyer, Marchand, Girard et Riffaud du CNEXO. Source : : CNEXO, « Réunion n°2 du GRETO (Groupe de réflexion sur la technologie océanique) tenue à Paris le 12/9/1977 », le 3 novembre 1977, p. 1.

plongeurs’’ » y annonce-t-on, « car les tâches nécessitant une grande mobilité (inspection de conduites...) vont se développer rapidement à moyen terme ». Dans ce cadre, les besoins techniques sont relevés et la question des sources d'énergie apparaît immédiatement : « les petits sous-marins actuels ne peuvent intervenir que pour de courtes missions (3 à 4h). L'idéal serait d'au moins doubler la durée d'intervention au fond. » Ce sont les piles à combustible qui semblent séduire le plus parmi les solutions envisagées, à côté des piles au lithium et des batteries classiques qui « n'ont plus beaucoup de progrès à faire » : « Alsthom va mariniser sa pile (hydrazine-hydrogène) sur des sous-marins de Vickers. La Marine américaine a installé trois piles de 20 kW sur le Deep Quest. Elles permettent un gain de trois en énergie spécifique mais se pose le problème de la faible durée de vie des électrodes (pour Alsthom) ; la chaleur des piles à combustible est par ailleurs un sous-produit intéressant »¹¹⁸⁰. De fait, au moment même où Yves Bréelle et Bernard Salé présentent une communication sur les applications de la pile hydrogène-air à la 10^{ème} Conférence mondiale de l'énergie à Istanbul, en concentrant principalement leur propos sur les possibilités de la technique dans les champs des « groupes électrogènes », du « véhicule électrique » et de la « production massive d'électricité »¹¹⁸¹, c'est bien plutôt dans une application spéciale de l'océanographie qu'on va leur demander de s'investir.

Au vu de ses résultats jugés « encourageants », l'IFP réussit ainsi à s'associer à la COMEX (Compagnie maritime d'expertise) et au CNEXO au début de l'année 1978 pour étudier la sous-marisation de piles hydrogène-air à électrolyte basique et concurrencer la UTC (United Technologies Corporation, anciennement United Aircraft, société propriétaire de Pratt & Whitney) qui vient d'équiper le sous-marin américain Deep Quest. Contrairement aux piles à combustible de l'UTC, qui dérivent de la technique employée pour la navette spatiale Enterprise et qui utilisent « une matrice emprisonnant l'électrolyte entre deux électrodes », celles de l'Institut se distinguent essentiellement « par l'emploi d'une solution électrolytique “libre” et commune à tous les éléments d'un même bloc et par une alimentation en air à une pression proche de la pression atmosphérique ». Un « thème d'exercice » est choisi : il s'agit de remplacer, dans un sous-marin « crache plongeur » de 12,5 tonnes SM 358 commercialisé par la COMEX, les batteries au plomb placées dans les deux conteneurs cylindriques ou « pods » situés à la partie inférieure du sous-marin, respectivement « par la pile à combustible » pour l'un des pods et « par les stockages sous forme comprimée des réactifs

¹¹⁸⁰ CNEXO, « Réunion n°2 du GRETO (Groupe de réflexion sur la technologie océanique) tenue à Paris le 12/9/1977 », le 3 novembre 1977, pp. 3-5.

¹¹⁸¹ IFP, « Les applications de la pile hydrogène-air. Communication à la 10^{ème} Conférence mondiale de l'énergie. Istanbul, 19-24 septembre 1977 », mars 1977, pp. 7-12.

hydrogène et oxygène » pour l'autre¹¹⁸². Tout ceci « en vue de quadrupler le stockage énergétique (200 kWh au lieu de 50 kWh), d'accroître la puissance disponible (20 kW au lieu de 15) et de doubler la capacité de chauffage thermique (10 kW au lieu de 5) »¹¹⁸³. La première phase du projet consiste à concevoir et mettre au point à Rueil-Malmaison les dix blocs électrochimiques, connectés électriquement en série pour donner une tension d'au moins 120 volts, tout en répondant aux exigences spécifiques du cahier des charges. La réalisation technique s'avère cependant compliquée pour Yves Bréelle qui spécule sur les conséquences d'une éventuelle défaillance de ses appareils : « C'était une expérience qui devait être réalisée avec des personnes. C'était une angoisse pour moi. On avait donc pris tant de précautions que la pile ne fonctionnait jamais »¹¹⁸⁴.

Alors que l'IFP s'investit dans l'océanographie, d'autres entreprises sont encore sollicitées pour des études relatives aux piles à combustible à destination d'applications spéciales. Le CNES demande en particulier à Matra – à qui il avait déjà confié de premières investigations concernant la réalisation d'un satellite français d'observation optique en 1974¹¹⁸⁵ – la rédaction d'un rapport d'étude sur les systèmes avioniques et d'alimentation électrique du VHA (véhicule habitable Ariane), c'est-à-dire de la navette Hermès¹¹⁸⁶. L'idée étant pour le CNES, après le lancement du programme de lanceur lourd

¹¹⁸² La pile élémentaire est composée de cellules comprenant trois compartiments séparés par deux électrodes poreuses : un compartiment O₂ dans lequel circule de l'air à pression atmosphérique, un compartiment H₂ dans lequel circule de l'hydrogène à pression atmosphérique, un compartiment KOH (hydroxyde de potassium) dans lequel circule l'électrolyte. L'électrolyte circule dans un circuit fermé comprenant un réservoir de potasse, le compartiment KOH et une pompe de circulation. L'hydrogène circule en circuit fermé comprenant un ventilateur, le compartiment H₂ et un séparateur liquide/gaz. De plus, un détendeur permet l'alimentation en hydrogène et un brûleur catalytique brûle environ 1 % du débit total d'hydrogène pour éviter l'enrichissement du circuit en imbrûlés. L'oxygène circule dans un circuit fermé comprenant un ventilateur, le compartiment O₂, un séparateur liquide/gaz et l'enceinte du pod. La vapeur d'eau contenue dans le gaz se condense sur les parois du pod et est envoyée dans la vessie de stockage par une pompe. L'appauvrissement de l'atmosphère du pod en oxygène, contrôlé par un capteur de pression partielle, est compensée par une injection d'oxygène à l'aide d'une électrovanne. Le raccordement électrique est défini par 5 x 2 blocs (deux en parallèle – cinq en série) et chaque ensemble de deux blocs possède un réservoir d'électrolyte, une pompe de circulation et une pompe de vidange du séparateur. Chacun des cinq réservoirs d'électrolyte est refroidi par un échangeur. Les échangeurs sont placés en série et l'isolement électrique entre eux est obtenu en utilisant un fluide de refroidissement isolant et des liaisons en tube souple isolant. Les compartiments H₂ des blocs sont placés en parallèle entre deux tubes collecteurs et un ventilateur commun assure la circulation générale d'hydrogène. Les compartiments O₂ des blocs sont également placés en parallèle ; un côté est ouvert sur l'enceinte du pod ; un tube collecteur de reprise et un circulateur assurent la circulation de l'air. L'eau produite par la réaction électrochimique n'est pas rejetée à la mer mais stockée dans un réservoir placé près du réservoir d'oxygène pour ne pas modifier l'équilibre du sous-marin. Le stockage de l'eau est fait dans un réservoir souple en néoprène, lui-même placé dans un conteneur résistant qui contient en plus une batterie au plomb de secours (24 volts) et les circuits électriques de contrôle et de protection. Du point de vue électrique, la pile débite sur un réseau fournissant une tension variable entre 160 et 120 volts selon la puissance demandée. Ce réseau alimente directement les moteurs des propulseurs du sous-marin, ceux des centrales hydrauliques ou encore les résistances de chauffage. Source : IFP-COMEX Industries, « Étude de faisabilité d'une source d'énergie pour sous-marin léger utilisant une pile à combustible hydrogène-air », 2^{ème} version, vers 1978, pp. 9-11.

¹¹⁸³ IFP, « Les piles à combustible comme source d'énergie sous-marine », le 2 avril 1982, pp. 1-4.

¹¹⁸⁴ Entretien téléphonique avec Yves Bréelle, Belfort, avril 2018.

¹¹⁸⁵ BONDIOU-CLERGERIE, Anne, TORTORA, Jean-Jacques, « L'industrie spatiale européenne », in *Annales des Mines – Réalités industrielles*, Vol. 2, 2012, pp. 66-74.

¹¹⁸⁶ KRIDGE, J., RUSSO, A., SEBESTA, L., *A History of the European Space Agency, 1958-1987 (Volume II. The Story of ESA, 1973-1987)*, ESA Publications Division, 2000, p. 641.

Ariane en 1973 et la fondation de l'ESA (European Space Agency) en 1975¹¹⁸⁷, de se doter d'un accès humain indépendant à l'espace : à partir d'un lancement sur Ariane V, la navette doit pouvoir réaliser des missions d'une durée d'une semaine, comprenant à la fois l'arrimage avec une station orbitale, le transfert de fret, le transfert de ladite station sur une orbite plus élevée et le retour de l'équipage sur terre. Dans son document, qui s'insère dans une vaste analyse conduite par la SNIAS (Société nationale industrielle aérospatiale) sur la conception générale du véhicule habitable, Matra estime ainsi que « l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement du VHA » doit être fournie « par des piles à combustible hydrogène/oxygène »¹¹⁸⁸ à basse température semblables à celles présentes sur le « space shuttle » américain. L'entreprise prévient cependant que le laps de temps d'environ quinze minutes nécessaire à l'appareil pour atteindre sa température normale de fonctionnement (80°C), et donc sa puissance électrique nominale, impose de sérieuses contraintes, de même que les possibilités de dégradation et de panne, à savoir : la durée de fonctionnement qui « joue un rôle irréversible sur les caractéristiques des composants de chaque cellule élémentaire et entraîne des phénomènes d'avalanche conduisant à des performances hors spécification ou à des pannes complètes » ; la réduction d'efficacité « causée par des impuretés ou des diffusions parasites des ergols d'alimentation » et se traduisant par « une réduction de la force électromotrice de chaque cellule » ; enfin, bien qu'il ne constitue pas en lui-même une cause de dégradation, le problème des démarrages successifs qui peut enclencher en cas de mise en marche avortée une production d'eau difficilement évacuable « car la température permettant sa vaporisation et son extraction du circuit hydrogène n'est pas atteinte »¹¹⁸⁹.

Visant à assurer la sécurité du système, Matra imagine trois configurations possibles : a) une configuration qui repose sur deux piles en parallèle, pouvant fonctionner en même temps ou séparément, ainsi que sur une batterie de secours ; b) un système où la batterie de secours est remplacée par une troisième pile à combustible ; c) une configuration jugée moins intéressante et dans laquelle une batterie tampon vient compléter trois piles, dimensionnées pour la plus contraignante des conditions de puissance moyenne, pour fournir la puissance crête. A la réception de cette première étude qui met au jour que « ni la France, ni l'Europe ne maîtrisent » le développement de piles pour des performances au moins équivalentes aux modèles américains, le CNES en commande une autre plus détaillée à l'IFP, portant spécialement sur les clauses techniques

¹¹⁸⁷ GAILLARD, Florence, « La construction symbolique de l'espace européen », in *Hermès, La Revue*, Vol. 2, n°34, 2002, pp. 105-119.

¹¹⁸⁸ Matra Espace, « Étude du système avionique et de l'alimentation électrique du véhicule habitable Ariane », le 24 octobre 1978, p. 45.

¹¹⁸⁹ Matra Espace, « Étude du système avionique et de l'alimentation électrique du véhicule habitable Ariane », le 24 octobre 1978, pp. 50-51.

du « bloc de pile à combustible hydrogène/oxygène » destiné à équiper la navette Hermès. Pour un montant de 85 000 francs, l'Institut est chargé de fournir dans un premier temps « une évaluation critique des différents types de piles hydrogène-oxygène envisageables en examinant pour chacun d'eux leurs avantages et inconvénients respectifs, les difficultés qu'ils soulèvent en tentant d'estimer leur fiabilité et les risques qu'ils présentent »¹¹⁹⁰. À l'issue de cette étape permettant la sélection d'une filière, il doit ensuite présenter un programme chiffré pour concevoir et construire la pile à usage spatial.

Si ce sont désormais uniquement les applications spéciales qui concentrent les recherches sur les piles à combustible, et en dehors des incitations répétées émises par Loïk Le Floch-Prigent et la DGRST qui les poussent en dehors des canaux industriels, c'est aussi que les applications diffusables à grande échelle semblent attirer de moins en moins ceux qui pourraient les mettre en œuvre. La tentative de résurgence d'Alsthom – devenue Alsthom Atlantique – est significative à cet égard. Après sa déconvenue, Bogdan Broniewski quitte la France et s'engage auprès d'Occidental Petroleum où il devient le conseiller spécial de son directeur Armand Hammer. Dès son arrivée, et aidé par le président de la branche chimie de la société qui vient lui-même de quitter Exxon, il va tenter de passer un nouvel accord international pour continuer à travailler sur les piles à combustible¹¹⁹¹. Il convainc en effet l'entreprise américaine de s'intéresser à la technique pour une application « à l'industrie de la soude et du chlore » : il s'agit d'utiliser, comme électrolyte dans les piles, la mixture des bains d'électrolyse de NaCl (chlorure de sodium) constituée d'une solution de NaCl résiduel et de NaOH (hydroxyde de sodium) et de séparer ces deux produits « d'un façon moins coûteuse »¹¹⁹² que ce qui se fait à cette période, la production de courant à partir d'hydrogène ne devant être qu'un sous-produit de l'opération. Un programme de recherches est donc décidé après de premiers pourparlers

¹¹⁹⁰ L'attention est portée plus particulièrement sur « le fonctionnement en condition d'apesanteur, la nécessité de récupérer l'eau, et les possibilités d'une mise en condition rapide de la pile ». Les principaux paramètres étudiés sont : « la nature de l'électrolyte (acide ou basique) et son système de retenue (matrice, membrane échangeuse d'ions, électrolyte libre), le mode d'association des éléments (mise en parallèle, mise en série, disposition mixte) lié à la tension d'utilisation requise, le mode de collecte de courant (frontale ou latérale), le type d'électrode (multicouche, à double porosité), la valeur de la pression d'alimentation, la valeur de la température de fonctionnement, les différents types de séparateur capables d'assurer une bonne répartition des fluides, les dispositifs d'évacuation thermiques (conduits et fluides réfrigérants) permettant le maintien en température, les matériaux d'assemblage (liés à la nature de l'électrolyte), les modes d'assemblage (cadres, scellement des électrodes, etc.), les dispositifs de contrôle (mesure de la tension élémentaire, de la température de fonctionnement, du maintien en concentration de l'électrolyte, etc.). » Source : CNES-IFP, « Convention entre le Centre national d'études spatiales et l'Institut français du pétrole. Bloc de pile à combustible hydrogène/oxygène destiné à équiper le véhicule spatial habité Hermès », 6 septembre 1979, pp. 1-7.

¹¹⁹¹ Bogdan Broniewski organise ainsi une rencontre entre Armand Hammer et Bernard Warszawski : « Malgré l'emploi du temps très chargé de Hammer, j'ai pu arranger sa rencontre avec Bernard. Il s'est donc rendu avenue de Wagram, où Bernard a bien préparé sa présentation. L'entretien entre Hammer et Bernard fut très amical. Juifs tous les deux, ils se comprenaient à merveille. Hammer l'interrogea sur le sort de sa famille pendant la guerre, sur ses projets éventuels concernant Israël, etc. Ce bon contact présageait favorablement de la collaboration future. » Source : BRONIEWSKI, Bogdan, *op. cit.*, 2014, pp. 138-139.

¹¹⁹² Archives Peugeot, M. Perrin Pelletier, « Compte rendu réunion du 25 mai 1978 entre Alsthom Atlantique (MM. Gabriel, Coursimault, Leiffen) et A. Peugeot (M. Debaene) », le 25 mai 1978, p. 2.

infructueux : pour un budget de « quarante à cinquante millions de francs », celui-ci doit porter sur une durée de cinq ans et correspond à l'emploi de trente-neuf personnes, dont neuf ingénieurs, devant mettre au point « une pile à hydrogène à structure mince » semblable aux modèles déjà réalisés par Bernard Warszawski. Mais une étude de faisabilité couvrant une période de dix-huit mois doit d'abord permettre à Occidental Petroleum d'évaluer le projet et de se retirer « purement et simplement » s'il ne lui convient pas. D'ailleurs, la société ne prend en charge que la moitié des 8,7 millions de francs dévolus aux douze premiers mois du contrat.

La Direction générale de l'Industrie, qui suit de près cette « histoire à épisodes », reste ainsi prudente dans son analyse : « la société américaine a pris de grandes précautions », écrit-elle à la DIMME, « elle ne prend en charge que la moitié des travaux exécutés pendant les douze premiers mois, c'est-à-dire pendant la phase la plus aléatoire ; elle se borne à rembourser les dépenses, strictement définies, pendant le reste du programme »¹¹⁹³. Or Armand Hammer va rapidement faire jouer son droit de retrait, considérant qu'il a affaire à « un tonneau des Danaïdes »¹¹⁹⁴. Bogdan Broniewski, qui craint de perdre sa place en persévérant sur ce dossier, abandonne définitivement l'idée. La direction d'Alsthom tente alors de son côté de persuader Peugeot de ne pas faire de même. Le constructeur automobile, qui avait suivi l'affaire de loin en attendant sa résolution, n'est pas contre la poursuite des recherches. En revanche, il refuse de porter à lui seul la charge de leur financement. Mais les contacts que prend Alsthom avec Pechiney, Ugine Khulman, EDF en France, l'électricien ASEA (Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget) en Suède et Brown, Boveri & Cie en Suisse, pour trouver un remplaçant à Occidental Petroleum, n'aboutissent pas « de façon satisfaisante »¹¹⁹⁵. Dans ses conditions, Peugeot met un terme au partenariat « de façon élégante » en mettant « en sommeil »¹¹⁹⁶ la société qu'elle avait créée en 1970 avec Alsthom – Alsthom et Cie – pour gérer les études et la répartition des brevets.

Par ailleurs, la position de l'EDF renseigne sur les autres types de raisons barrant la technique dans le secteur industriel. L'électricien national n'est ainsi pas fermement opposé aux piles à combustible comme le souligne son directeur adjoint à la direction générale Jacques Gallot dans une lettre qu'il adresse au chef du département « Systèmes énergétiques » en octobre 1979 : il précise bien que l'EDF ne perçoit pas le véhicule « propulsé par un système hydrogène-électrolytique/pile à combustible »

¹¹⁹³ Direction générale de l'Industrie, « Note pour le Service des affaires techniques. Pile Alsthom », le 18 décembre 1978, pp. 2-3.

¹¹⁹⁴ Entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

¹¹⁹⁵ Archives Peugeot, lettre de H. Cueff à MM. Lazare et Guerreau, « Coopération AP-Alsthom dans le domaine des piles », le 29 novembre 1979, p. 2.

¹¹⁹⁶ Archives Peugeot, M. Perrin Pelletier, « Compte rendu réunion du 25 mai 1978 entre Alsthom Atlantique (MM. Gabriel, Coursimault, Leiffen) et A. Peugeot (M. Debaene) », le 25 mai 1978, p. 2.

comme « un concurrent potentiel du véhicule électrique ». Au contraire, il écrit que « les promoteurs du véhicule électrique admettent tous que ce dernier n'aura son plein développement que lorsque l'on disposera d'un générateur électrique du type pile à combustible avec des puissances et des énergies massives qui ne seront probablement jamais atteintes avec des accumulateurs, même dans les filières les plus prometteuses ». Il ajoute à cela que « le distributeur d'électricité doit s'intéresser à des applications utilisant de l'hydrogène électrolytique, surtout dans le contexte du programme nucléaire d'EDF ». Néanmoins, Jacques Gallot note « qu'aucune expérimentation significative de véhicules équipés de piles à combustible, n'a été réalisée ni en Europe, ni aux États-Unis » et « qu'aucune communication n'a été faite à ce sujet au Symposium Véhicules électriques à Philadelphie en octobre 1978 »¹¹⁹⁷.

Les constats généraux qu'il établit dans la suite de son argumentation peuvent être résumés en quelques lignes : a) L'intérêt d'EDF pour la filière est en grande partie corrélé aux décisions des constructeurs automobiles et l'électricien n'imagine pas la supporter sans leur soutien. Et dans le cadre du développement du véhicule électrique, ces derniers estiment que l'industrialisation des piles à combustible rencontre trop de difficultés sur de trop nombreux points (durée de vie, coût, et dans certains cas puissance insuffisante au démarrage et nécessité d'utilisation de batteries tampons) ; b) Le paradigme hydrogénique ne s'est pas encore concrétisé et ne représente qu'un ensemble de discours. Le stockage et la distribution de l'hydrogène sont donc un frein non négligeable à la diffusion des générateurs électrochimiques qui fonctionnent grâce à lui. Au seuil des années quatre-vingt, seuls l'électricité et les hydrocarbures disposent d'un réseau de distribution couvrant l'ensemble du territoire français. Cette caractéristique est déjà à la source de l'abandon récent des études sur les systèmes air-zinc malgré ses avantages : la mise en place d'un réseau de distribution et de retraitement de l'électrolyte a été un échec. Bien que l'hydrogène ne nécessite que la distribution du produit à l'utilisateur, le risque de se retrouver dans une situation similaire existe ; c) d'autres pays prennent en charge des recherches sur l'hydrogène, en particulier la République fédérale d'Allemagne qui vient de financer un programme sur les alternatives au pétrole dans la traction automobile à hauteur de cent cinquante millions de deutschemarks. Il est donc préférable d'attendre les résultats d'une telle initiative avant de se lancer dans des projets équivalents en France. C'est là l'opinion attentiste que dénonçait déjà Derek P. Gregory de l'Institute of Gas Technology en conclusion de la « Hydrogen Economy Miami Energy Conference » en 1974¹¹⁹⁸.

¹¹⁹⁷ Lettre de Jacques Gallot à Paul Godin, le 11 octobre 1979, pp. 1-2.

¹¹⁹⁸ Voir chapitre précédent.

Ces conclusions générales sont partagées par Maurice Magnien dans une lettre à l'intention de Marcel Boiteux. S'il admet que les « avantages potentiels » des piles à combustible sont « considérables sur le plan du rendement et sur le plan de l'environnement », il estime qu'il n'y a pas matière à enclencher de nouvelles études : la technique n'est pour lui qu'un « vieil ours présenté pour la énième fois dans diverses instances françaises ». Et pour appuyer son raisonnement, il fait usage du même mode d'argumentation que Jacques Gallot en prenant comme exemple non pas la République fédérale d'Allemagne mais les États-Unis : Pratt & Whitney y est alimenté en crédits gouvernementaux et dispose de nombreux contrats d'études. Dans ces conditions, le directeur des études et recherches de l'EDF pose la question à son directeur général : « Pourquoi ne pas attendre les résultats de cette R.D, étant entendu qu'il n'y a rien de nouveau sous le soleil français ? »¹¹⁹⁹

9.3 Le démantèlement du réseau social

Jacques Gallot n'a pas tort lorsqu'il indique que le paradigme hydrogénique, qui doit porter les piles à combustible, bat de l'aile. Le CEA et Carboxyque Française fondent bien un département « Hydrogénie »¹²⁰⁰ et collaborent sur un projet de « moteur alimenté par hydrures »¹²⁰¹ mais il s'agit des seules nouvelles initiatives relatives à l'hydrogène en 1979. Pour le comité « Hydrogène » de la DGRST, qui a octroyé pendant quatre ans soixante-et-une aides à la recherche pour un montant de 27,7 millions de francs, l'heure est plutôt au bilan de son activité. Et celui-ci est globalement négatif. C'est en premier lieu l'espoir de pouvoir recouvrir à la chaleur nucléaire pour produire directement par voie thermochimique de grandes quantités d'hydrogène à des coûts intéressants – justifiant pourtant la dévolution de neuf contrats et de 14 millions de francs aux recherches dans ce domaine – qui s'évanouit : « les difficultés techniques, les perspectives d'avenir des réacteurs à haute température et les comparaisons avec la production électrolytique ont amené dès 1977 à recommander l'abandon de ces recherches, la limitation à une veille technique au sein des grands organismes, animateurs de ce projet et le report de l'effort national sur la filière électrolyse », annonce le directeur de la DIGEC (Direction du gaz, de l'électricité et du charbon) et président du comité Maurice Legrand.

On pense cependant que cette dernière filière présente également des « limites », malgré les trente-six contrats passés pour un total de 10,8 millions de francs et la constitution de deux groupes industriels soutenus par la DGRST, EDF et GDF pour disposer de prototypes industriels de 1 MW en

¹¹⁹⁹ Lettre de la Direction des études et recherches à Marcel Boiteux, le 12 décembre 1979, p. 2.

¹²⁰⁰ Lettre du département « Génie de l'hydrogène » de Carboxyque française à la direction du secteur « Énergie » de la DGRST, le 28 août 1979, p. 1.

¹²⁰¹ Lettre du directeur du marketing et du développement de Carboxyque française G. Benchimol à M. Halfon de la direction du secteur « Énergie » de la DGRST, le 23 mars 1979, p. 1.

1981 : « en admettant, ce qui est peu vraisemblable, que la totalité de l'énergie électrique d'heures creuses soit consacrée à la production d'hydrogène, la production totale d'hydrogène ne dépasserait guère en 1990 20 % de notre consommation actuelle et ne pourrait guère que tripler au cours de la décennie suivante »¹²⁰². Enfin, les actions de recherche sur le stockage par hydrures de type FeTi (ferro-titane), LaNi₅ (lanthane-nickel), Zr-Ni (zirconium-nickel) et Mg (magnésium), représentant onze contrats et deux millions de francs, ont à peine donné quelque « satisfaction »¹²⁰³. En conséquence, le comité se borne, à partir de 1979, à suivre l'exécution des derniers contrats passés avant d'arrêter définitivement son action faute de crédits renouvelés. Maurice Legrand est en fait sceptique sur les chances de développement rapide et massif des techniques de l'hydrogène, comme en témoigne une lettre qu'il rédige à l'intention du nouveau délégué général Claude Fréjacques¹²⁰⁴ à la fin de l'année 1980 :

« L'optimisme initial pour l'hydrogène, vecteur énergétique idéal, fait maintenant place à l'appréciation d'une mise en place progressive et assez lente de l'hydrogène, qui aurait en première étape un rôle d'intermédiaire industriel. Parallèlement, le contexte énergétique va contribuer à un renouveau du charbon, dont la gazéification peut, à différents stades, utiliser ou produire de l'hydrogène. Cette perspective complète celles liées à l'électrolyse. Ce n'est qu'à plus long terme que les avantages de l'hydrogène en matière de distribution et d'utilisation donneront la possibilité de développer certains créneaux comme les transports automobiles, les transports aériens, l'électricité de pointe. »¹²⁰⁵

Dans la lignée de ces propos, les membres de la commission « Piles et générateurs électrochimiques » font de l'échec de consolidation du paradigme la cause de l'impossibilité d'utilisation de l'hydrogène

¹²⁰² DGRST, comité « Hydrogène », Maurice Legrand, projet de lettre au délégué général, le 8 septembre 1980, pp. 2-3.

¹²⁰³ Les contrats restants sont répartis de la manière suivante : cinq contrats pour la photoélectrolyse pour un montant de 900 000 francs Source : DGRST, comité « Hydrogène », « Bilan d'activités 1975-1979 », 1980, p. 6-14.

¹²⁰⁴ Claude Fréjacques remplace Roland Morin à la tête de la DGRST le 1^{er} avril 1980. Né en 1924, Claude Fréjacques passe par Polytechnique (promotion 43) avant de devenir docteur ès sciences en chimie physique. Il commence sa carrière en tant qu'ingénieur des Poudres en 1946, puis devient chef de service au Laboratoire central des Poudres en 1954. Il est détaché au CEA en 1957 pour y exercer successivement les fonctions de chef des services de séparation isotopique et de chef du département de physicochimie. Parallèlement, et de 1955 à 1969, il maître de conférences à l'X. En 1971, il prend la charge de la division chimie du CEA, préside le Comité consultatif de la recherche scientifique et technique de 1975 à 1977 et à partir de cette date le Bureau national de métrologie. Entre 1959 et 1967, il est également membre du Comité national du CNRS. À partir de 1975, il prend part aux travaux préparatoires des VII^{ème} et VIII^{ème} Plans. Enfin, il est administrateur de l'ANVAR (Agence nationale pour la valorisation de la recherche) entre 1969 et 1979 et administrateur de l'Institut national de recherche chimique appliquée à partir de 1970. Ces responsabilités font que pour Loïk Le Floch-Prigent, Claude Fréjacques est « un faux délégué » parce qu'il est « ailleurs ». Sources : *Le Progrès scientifique*, n°205, mars-avril 1980, p. 3 ; entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

¹²⁰⁵ DGRST, comité « Hydrogène », Maurice Legrand, projet de lettre au délégué général, le 8 septembre 1980, p. 4.

dans les secteurs industriels tels que l'automobile. Il leur apparaît en effet que l'absence de réseau de distribution de l'élément chimique vient « bloquer »¹²⁰⁶ les piles à combustible de la filière, d'autant plus que les autres pays, au moins européens, ne se sont pas véritablement engagés dans la voie. Par ailleurs, Loïk Le Floch-Prigent souligne que l'abaissement du coût de la purification de l'hydrogène reste un « problème technologico-économique »¹²⁰⁷ majeur. On retrouve là toute l'importance de la *cohérence des ensembles* au sein des structures d'un système technique, dont traite Bertrand Gille : si le choc pétrolier avait permis une remise en cause générale du modèle énergétique national, produit des « distorsions » et laissé une « marge de liberté d'évolution »¹²⁰⁸ à laquelle les promoteurs de l'utilisation des piles à combustible s'étaient rattachés, la faillite de la production et de la distribution généralisées de l'hydrogène empêche désormais les liens qui devraient s'établir entre les trois techniques pour un fonctionnement optimal. Et à la DGRST, on présente les mêmes propositions que Maurice Magnien pour remédier au problème éventuel du retard futur en matière de recherche, si jamais l'hydrogène devenait un vecteur incontournable, à savoir « l'acquisition de la technologie US-Pratt et Whitney par négociation d'une licence »¹²⁰⁹.

Sans perspectives industrielles, et alors que les acteurs restants de la recherche technologique sur les piles à combustible se sont déjà repliés sur des travaux d'applications spéciales financées par différentes institutions publiques, ce dernier marché va progressivement se fermer à partir de 1979. Tout d'abord, le contrat de l'IFP avec la SEFT n'est pas renouvelé¹²¹⁰. Mais la cause de ce revirement est moins à trouver dans une défaillance de la technique ou dans un manque de débouchés que dans la configuration du réseau social, comme le souligne Jacques Chéron : « Il y a eu un changement de général au-dessus de Michel Gastarriet qui a regardé le sujet et qui a vu le mot hydrogène. Et il a dit : “Comment ? Cette pile à combustible, ça marche à l'hydrogène ? C'est beaucoup trop dangereux ; je ne veux pas en entendre parler.” Cela a été un niet catégorique. Donc la SEFT a été obligée d'arrêter de nous financer. »¹²¹¹ Ce que perd l'IFP, la SAFT et la SORAPEC vont le gagner en obtenant des financements militaires pour des études portant sur les accumulateurs. La SORAPEC passe ainsi deux contrats avec la SEFT et la DRET (Direction des recherches, études et techniques

¹²⁰⁶ DGRST, commission « Piles et générateurs électrochimiques », « Prospective dans les domaines des générateurs électrochimiques », non daté (vers 1980), p. 8.

¹²⁰⁷ DGRST, commission « Piles et générateurs électrochimiques », « Compte-rendu de la réunion du 12 janvier 1979 », 1979, p. 2.

¹²⁰⁸ GILLE, Bertrand, *op. cit.*, 1979, p. 10.

¹²⁰⁹ DGRST, commission « Piles et générateurs électrochimiques », « Prospective dans les domaines des générateurs électrochimiques », non daté (vers 1980), p. 7.

¹²¹⁰ DGRST, commission « Piles et générateurs électrochimiques », « Compte-rendu de la réunion du 12 janvier 1979 », 1979, p. 1.

¹²¹¹ Entretien avec Jacques Chéron, Paris, février 2018.

d'armement) – venue remplacer la DRME par décret le 17 mai 1977¹²¹² –, respectivement pour 500 000 et 200 000 francs¹²¹³, tandis que la SAFT se rapproche de la DRET pour remplacer ses solutions nickel-cadmium par des générateurs à hydrures¹²¹⁴.

D'autre part, les contrats passés avec le CNES touchent à leur fin. L'IFP et Matra rédigent leurs rapports finaux pour une livraison au début de l'année 1980¹²¹⁵. Ceux-ci n'auront pas de suite directe puisque le projet de navette Hermès est rapidement mis en suspens par l'agence spatiale, en attendant sa reprise au sein de l'ESA¹²¹⁶. Ne disposant plus que de l'accord avec le CNEXO et la COMEX pour la réalisation de piles à combustible à destination de leurs sous-marins, l'IFP va tenter d'attirer d'autres partenaires pour assurer la pérennité de ses recherches. D'autant plus qu'à Rueil-Malmaison, on estime avoir atteint « l'objectif technique en ce qui concerne la pile de première génération » et que c'est désormais à l'industrie de « prendre le relais du développement et de l'industrialisation »¹²¹⁷. Yves Bréelle, Jacques Chéron, Pierre Eyzat et leurs collègues multiplient les contacts : avec l'industriel PUK (issu de la fusion entre Pechiney et Ugine Kuhlmann en 1971) pour valoriser sa production d'hydrogène provenant de la fabrication de chlore dans ses usines de Fos et de Jarry¹²¹⁸ ; avec Elf¹²¹⁹, la SAFT¹²²⁰, la DCAN (Direction technique des constructions navales)¹²²¹, le CENG (Centre d'études nucléaires de Grenoble), le CNRS (en la personne de Guy Bronoël)¹²²² et InterSub¹²²³ pour une application de leurs piles aux systèmes offshore et sous-marin ; avec Camping Gaz International¹²²⁴ et Plastimo¹²²⁵ pour une application au secteur des loisirs (caravanes, nautisme,

¹²¹² WEBER, Jean-Marc, *op. cit.*, 2008, p. 20.

¹²¹³ DGRST, commission « Piles et générateurs électrochimiques », « Compte-rendu de la réunion du mercredi 15 mars 1978 (DGRST) », 1978, p. 1.

¹²¹⁴ DGRST, commission « Piles et générateurs électrochimiques », « Compte-rendu de la réunion du 24 avril 1978 à la DGRST », 1978, p. 5.

¹²¹⁵ IFP, « Véhicule habitable Ariane. Proposition technique de programme pour la mise au point d'un bloc de pile à combustible H₂/O₂. Contrat CNES-IFP n°79 CNES 3026 », mars 1980.

¹²¹⁶ Ce projet est en effet poussé par le CNES au sein de l'ESA. Il fait partie d'un programme spatial européen approuvé en 1987 à La Hague. Source : KRIDGE, J., RUSSO, A., SEBESTA, L., *op. cit.*, 2000, p. 179.

¹²¹⁷ Lettre de Bernard Salé à Loïk Le Floch-Prigent, le 8 janvier 1979, p. 1.

¹²¹⁸ IFP, Division Applications, Recherches avancées, « Compte-rendu de la réunion PUK-IFP du 16 janvier 1979 », 1979, p. 1.

¹²¹⁹ IFP, Techniques d'applications énergétiques, « Réunion Gosselin-Bréelle du 5/02/79 », le 17 avril 1979, p. 1.

¹²²⁰ IFP, Techniques d'applications énergétiques, « Compte-rendu de la réunion SAFT-IFP du 19/03/79 », le 20 avril 1979, p. 1.

¹²²¹ Ministère de la Défense, Délégation générale pour l'armement, Direction technique des constructions navales, lettre de l'ingénieur général de l'armement Pinchon à M. Jamard de la SAFT, le 29 mai 1979, p. 1.

¹²²² IFP, Techniques d'applications énergétiques, « Compte-rendu de la réunion CENG-SAFT-CNRS-IFP du 2 mars 1979 », le 26 mars 1979, p. 1.

¹²²³ InterSub, lettre du directeur général d'InterSub Yves Durand à Yves Bréelle, le 6 mars 1979, p. 1.

¹²²⁴ IFP, Techniques d'applications énergétiques, « Applications des piles à combustible aux loisirs. Entretien du 24/04/79 avec M. B. FenoGlio, Camping Gaz International », le 26 avril 1979, pp. 2-3.

¹²²⁵ IFP, Techniques d'applications énergétiques, « Compte-rendu de la réunion Plastimo-IFP du 7 mai 1979 », le 20 juillet 1979, pp. 1-2.

navigation de plaisance) ; avec la SAF (Soudure autogène française)¹²²⁶, la CGG (Compagnie générale de géophysique)¹²²⁷ et le CRDO (Centre de recherches pour la Défense à Ottawa)¹²²⁸ pour la fourniture de groupes électrogènes à piles à hydrogène ou méthanol ; ou encore avec l'IUT de Dakar¹²²⁹ pour coupler des générateurs solaires à des piles H₂-air. Mais ils reçoivent majoritairement des réponses négatives. Par exemple, la DCAN et le CERTSM disent avoir « une très médiocre opinion des possibilités offertes par les piles à combustible depuis l'expérience malheureuse des piles hydrazine-eau oxygénée de l'Alstom, qui a coûté environ 22 MF à la Marine avec un résultat jusqu'ici totalement négatif. »¹²³⁰ Bien qu'il souhaite « voir réussir » le développement entrepris par l'IFP avec la COMEX et le CNEXO, le directeur général d'InterSub Yves Durand refuse de son côté de s'engager financièrement de nouvelles recherches « pour des raisons de priorités budgétaires »¹²³¹.

L'IFP trouve finalement des partenaires mais pour des études à court terme uniquement. Il obtient un nouveau contrat avec la CEE pour traiter de « l'incidence économique des piles à hydrogène ». Rappelons que la CEE avait créé un programme de recherche et développement dans le secteur énergétique, approuvé par le Conseil le 22 août 1975, pour répondre à la crise des prix du pétrole. Un sous-programme avait été spécifiquement consacré à l'hydrogène, avec une répartition en trois projets : sa production thermochimique (projet A) ; sa production électrolytique (projet B) ; son transport, son stockage et son utilisation (projet C). Alors qu'en 1979 les programmes prennent fin, on passe en revue, comme au sein du comité « Hydrogène » de la DGRST, les résultats acquis pour en tirer les conséquences. La CEE charge donc l'IFP de rendre compte de l'état d'avancement des piles à combustible aux États-Unis et en Europe – en particulier en Allemagne fédérale où les sociétés AEG-Telefunken, Robert Bosch, Daimler Benz, Varta Batterie et Siemens réalisent (ou ont réalisé)

¹²²⁶ IFP, Techniques d'applications énergétiques, « Compte-rendu de la réunion SAF-IFP du 14 mai 1979 », le 20 juillet 1979, p. 1.

¹²²⁷ IFP, Techniques d'applications énergétiques, « Compte-rendu de la réunion CGG-IFP du 18/4/79 », le 19 avril 1979, p. 1.

¹²²⁸ Ces pourparlers sont encadrés par la DRET et se situent dans le cadre des échanges inter-armées entre la France et le Canada. Participent à une visite des installations de l'IFP en mai 1979 : le colonel Grandin de l'Épervier de la DRET, le directeur de l'Energy Conversion Division du CRDO E. J. Casey, le conseiller Recherches pour la Défense de l'Ambassade du Canada à Paris Adrien Léger, l'ingénieur du CDRO détaché à Grenoble au sein du laboratoire du professeur Desportes M. Johnson. Source : IFP, Techniques d'applications énergétiques, « Compte-rendu de visite à l'IFP le 25 mai 1979 », le 31 mai 1979, pp. 1-3.

¹²²⁹ IFP, Techniques d'applications énergétiques, « Compte-rendu de visite à l'IFP, le 10 mai 1979 de Monsieur Kergreis, directeur de l'IUT de Dakar », le 21 mai 1979, p. 1.

¹²³⁰ IFP, Techniques d'applications énergétiques, « Réunion DCAN-SAFT-IFP du 4 avril 1979 », le 13 avril 1979, p. 1.

¹²³¹ InterSub, lettre du directeur général d'InterSub Yves Durand à Yves Bréelle, le 6 mars 1979, p. 3.

des travaux poussés¹²³² – et de procéder à l’analyse de ses utilisations récentes et potentielles¹²³³, avant l’organisation du séminaire européen « Hydrogen as an Energy Vector » à Bruxelles en février 1980¹²³⁴. Dans un même temps, l’intérêt suscité par le « niveau de performances suffisamment élevé et reproductible »¹²³⁵ des piles à combustible amène TREGIE (Transports, recherches, études, groupement d’intérêt économique), lié à Renault, et la SAFT à s’associer à l’équipe d’Yves Bréelle dans le but de lancer une opération d’industrialisation. Mais celle-ci ne dépasse pas le stade de l’étude de marché. Là encore, les justifications rejoignent celles de l’EDF et de la DGRST sur le paradigme hydrogénique : c’est moins la technique en elle-même que les coûts de l’hydrogène et de sa distribution perçus comme « relativement dissuasif pour les applications traction » qui rebutent Renault. De fait, le constructeur automobile attend « une prise de position des pouvoirs publics »¹²³⁶ sur la filière pour s’engager plus en avant.

Or nous l’avons mentionné précédemment, les membres de la commission « Piles et générateurs électrochimiques » siégeant au 103 rue de l’Université sont justement plus que mitigés sur la suite à donner aux travaux. En particulier parce qu’ils ne voient pas l’hydrogène se diffuser massivement et qu’ils se sont réorientés vers le financement des accumulateurs. C’est même désormais par cette dernière voie que l’on attend de faire des progrès notables en électrochimie qui auraient des retombées postérieures sur les recherches concernant la technique. Le directeur du Laboratoire de chimie du solide de l’Université de Bordeaux Paul Hagemmüller est clair à ce sujet dans le *Courrier du CNRS* : il envisage « de nombreuses applications » pour les hydrures composites et leur couplage avec « une pile à combustibles branchée sur un moteur électrique »¹²³⁷. Lorsque Bernard Salé envoie, sur demande de Loïk Le Floch-Prigent¹²³⁸, un ensemble de propositions finales pour des études de six

¹²³² Dans le cadre du contrat, l’IFP rédige en particulier un état des travaux effectués en Allemagne fédérale et rend visite à AEG-Telefunken, Robert Bosch, Daimler Benz, Varta Batterie et Siemens. AEG-Telefunken poursuit le développement de piles H₂/air à électrolyte acide pour la réalisation d’une pile de 1,5 kW à usage militaire. Saimler Benz étudie, grâce à un contrat de la CEE, l’extension de l’utilisation des hydrures métalliques. Robert Bosch vient de cesser ses activités de recherche fondamentale sur les catalyseurs organiques en milieu acide. Varta Batterie AG a cessé sa collaboration avec Siemens en 1973 dans le domaine des piles H₂/O₂ à électrolyte basique. Siemens maintient une équipe de développement de quinze personnes pour la réalisation de piles basiques H₂/O₂ de 7 kW avec notamment pour objectif la réalisation de groupes de secours. Source : IFP, « Etat des travaux sur les piles à combustible en Allemagne fédérale. Compte-rendu des visites de AEG-Telefunken, Robert Bosch, Daimler Benz, Varta Batterie et Siemens effectuées les 27, 29 et 30 août et le 17 septembre 1979 », octobre 1979, p. 1.

¹²³³ CEE Énergie, Direction générale Recherche, science et éducation, « Incidence économique des piles à hydrogène », Contrat IFP-CEE n°601 78 E.H.F. Rapport final », 1980, p. 3.

¹²³⁴ Commission of the European Communities, « Status seminar. Hydrogen as an Energy Vector », on 12-14 February 1980 in Brussels, preprints of the papers, Energy R&D programme 1975-1979, Results of the Sub-programme on Hydrogen, 1980.

¹²³⁵ SAFT, « Étude de marché des piles à H₂ de conception IFP. Une initiative de TREGIE, IFP et SAFT », janvier 1979, p. 2.

¹²³⁶ IFP, projet de lettre de Claude Lancelle de TREGIE à Bernard Salé de l’IFP, le 5 mars 1980, p. 1.

¹²³⁷ *Le Courrier du CNRS*, n°31, janvier 1979, p. 16.

¹²³⁸ Lettre de Bernard Salé à Loïk Le Floch-Prigent, le 8 janvier 1979, p. 1.

ans et d'un coût total de l'ordre de 22 millions de francs¹²³⁹ à la commission au début du mois de janvier 1979, Guy Bronoël juge ainsi le programme « bien bâti » mais déclare que « cela ne justifie pas pour autant que la DGRST accroisse son soutien » à l'IFP. Son collègue de la DHYCA (Direction des hydrocarbures) M. Berthier se montre lui aussi « réservé sur l'utilité d'une poursuite des travaux » tandis que Loïk Le Floch-Prigent souligne que même dans l'éventualité où l'industrialisation de la pile à hydrogène s'avérerait possible, « il ne pourrait être de la responsabilité de la DGRST de financer seule 50 % du coût de l'ensemble »¹²⁴⁰ d'un projet. Avant de prendre une décision définitive sur le sort de la technique, la commission consent cependant à constituer un groupe de travail sur « l'hydrogène et le transport routier », réunissant : des représentants des laboratoires ayant participé à des études sur les piles à combustible (CGE, IFP, SORAPEC), des experts ayant déjà effectués des études technico-économiques sur la distribution de l'hydrogène (Mlle Meyer de l'IFP, M. Gelin du CEA), des représentants de la DGRST (MM. Dahan, Vollmer, Mahl et Bronoël), des spécialistes des véhicules (Jean Delsey de l'IRT, Claude Lancelle de TREGIE), des représentants d'organismes impliqués dans la production et la distribution de l'hydrogène (M. Potier de GDF, MM. Dominique Saumon et Aureille de l'EDF), et des spécialistes de la distribution des carburants dans les stations-services (Elf et Air Liquide)¹²⁴¹.

La commission élargit également l'étude de marché faite en partenariat avec TREGIE et la SAFT pour la porter sur l'abaissement du prix de revient de la technique « à un niveau inférieur à 300 F/kW en fabrication de série »¹²⁴². Ce financement va en fait être le dernier qu'accorde la DGRST sur les piles à combustible. Outre la perte de confiance en la filière, la politique française en matière de science et technique est plus généralement sur le point d'être restructurée. Pierre Aigrain vient en effet de demander à la DGRST et aux Douze Sages du CCRST (Comité consultatif de la recherche

¹²³⁹ Ces propositions, qui font l'objet d'un rapport complet intitulé « Proposition de programme de recherche sur les piles à combustible » et remis en 1980 sont résumées par Yves Bréelle, Jacques Chéron, Paul Degobert et Alain Grehier dans la *Revue de l'Institut français du pétrole* en 1981 : l'objectif des piles à combustible étant pour eux la traction automobile électrique, ils souhaitent atteindre « un prix de cession de 100 à 200 F/kW ». Pour ce faire, ils préconisent de modifier la densité de puissance des générateurs pour la porter à « une valeur voisine de 200 mW/cm² » et de la maintenir à ce niveau pendant une durée de vie « d'au moins 3 000 heures ». Ils estiment également que doivent être poursuivies une activité de recherche dans le domaine de la catalyse en milieu compatible avec l'élimination du CO₂ et des recherches visant à réduire le coût des générateurs d'hydrogène alimentés en combustible liquide. Les efforts généraux doivent ainsi porter selon eux, au sein d'un programme national coordonné, sur l'accroissement des performances (température, pression, concentration de l'électrolyte, amélioration des électrodes), la réduction des coûts matières (support en nickel, catalyseur en nickel de Raney), l'amélioration de la conception (emploi d'une matrice, modification du mode d'assemblage, procédé de montage des électrodes, principe d'association des éléments, géométrie interne et externe des éléments et des blocs) et l'amélioration des conditions de vieillissement. Source : *Revue de l'Institut français du pétrole*, vol. 36, n°4, juillet-août 1981, pp. 485-503.

¹²⁴⁰ DGRST, commission « Piles et générateurs électrochimiques », « Compte-rendu de la réunion du 12 janvier 1979 », 1979, pp. 2-3.

¹²⁴¹ TREGIE, « Hydrogène et transport routier. Groupe de travail DGRST. État des travaux au 1.6.1981 », 1981, pp. 1-2.

¹²⁴² Le rapport final de cette étude est rendu en mai 1981. Source : TREGIE, « Abaissement du prix de revient des piles à H₂ à un niveau inférieur à 300 F/kW en fabrication de série. Aide DGRST n°78.7.291 », mai 1981.

scientifique et technique) l'élaboration d'un rapport de synthèse sur « l'état des sciences et des techniques françaises »¹²⁴³, lui-même issu d'un ensemble d'analyses sectorielles. Il est donc nécessaire de faire des choix, aussi bien dans les grands domaines de la connaissance que dans l'attribution d'objectifs prioritaires à la recherche technologique. En matière de techniques nouvelles, les deux institutions font de l'énergie solaire et de la fusion thermonucléaire contrôlée les deux secteurs à approfondir tandis que « l'avenir des piles à combustible pour la propulsion des véhicules » leur apparaît « fort incertain malgré les recherches effectuées »¹²⁴⁴. Ce qui conforte surtout Loïk Le Floch-Prigent dans ce choix, c'est que pour lui ni les constructeurs automobiles ni l'EDF n'ont la volonté d'être des porteurs de projets dans ce dernier domaine :

« Nous avons déjà du mal à faire des accumulateurs. Et *a fortiori* des piles à combustible. Et dans la mesure où les seuls qui auraient pu tirer ça c'étaient EDF ou les constructeurs automobiles... Les constructeurs automobiles français ne voulaient pas en entendre parler [...] Personne n'en veut de tout ça. [Peugeot est partenaire d'Alstom] tant qu'on est là pour financer et tant qu'on a un espoir de voir le génie [Bernard Warszawski] accoucher de quelque chose. Mais dès qu'on a compris que le génie n'en était pas forcément un, à ce moment-là tout le monde disparaît. Ce sont Xavier Karcher à l'époque chez Peugeot et chez Renault le directeur des recherches Yves Georges. Il est hors de question qu'ils bougent. Et EDF continue à osciller. Ils n'ont jamais pris position à l'intérieur de la boutique sur ce qu'ils veulent faire. »¹²⁴⁵

Nous pouvons résumer les différents témoignages précédents de la manière suivante : a) Peugeot et Renault ne sont pas défavorables aux recherches sur les piles à combustible mais attendent de l'État qu'il oriente la politique énergétique nationale ; b) EDF n'est pas non plus contre les recherches mais ne souhaite pas s'engager dans la voie tant que les constructeurs automobiles ne se seront pas eux-mêmes engagés ; c) même si elle a de sérieux doutes sur les possibilités d'industrialisation de la

¹²⁴³ Au sujet de ce rapport, Pierre Aigrain écrit : « La France dispose d'un important potentiel de recherche scientifique et technique qui joue un rôle décisif dans son développement économique et social. Pour évaluer à leur juste mesure les perspectives à moyen et long terme introduites dans les différents secteurs d'activité par l'effort national de Recherche et de Développement, il s'avère indispensable de connaître précisément ses atouts et ses faiblesses, tant sur le plan intérieur que sur le plan international. C'est ainsi que le Gouvernement a décidé de doter notre pays d'un dispositif d'évaluation permanente de la recherche française : le rapport qui vous est aujourd'hui adressé constitue une première étape, encore imparfaite, dans l'élaboration d'un tel dispositif. Il présente sous une forme synthétique les principales conclusions qui résultent d'analyses sectorielles plus complètes menées par la Délégation générale à la recherche scientifique et technique et soumises à l'examen du Comité consultatif de la recherche scientifique et technique. Je souhaite qu'il soit à la fois un instrument d'information et de décision pour tous ceux qui mesurent l'importance de la Recherche dans les enjeux économiques et sociaux que notre pays est appelé à affronter dans les prochaines années. » Source : *Le Progrès scientifique*, n°199-200, mars-juin 1979, p. 3.

¹²⁴⁴ *Le Progrès scientifique*, n°199-200, mars-juin 1979, p. 21.

¹²⁴⁵ Entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

technique, la DGRST n'est pas complètement contre la poursuite des études. L'institution publique attend en revanche des constructeurs automobiles et de l'EDF qu'ils s'engagent pour orienter la politique énergétique nationale. L'ensemble de ces comportements et le résultat qui en découle, c'est-à-dire l'absence d'engagement de la part de tous les acteurs, peut être modélisé comme une configuration relationnelle équivalente à un équilibre de Nash¹²⁴⁶. En effet, il n'existe pas ici de position unilatérale profitable pour l'un des acteurs : leurs intérêts étant liés, aucun ne peut prendre à son compte la décision de s'engager définitivement dans les recherches sur les piles à combustible sous peine de perdre non seulement le jeu économique mais aussi la place qui lui revient dans le système technique national. Soit tous s'engagent en même temps dans les recherches, soit aucun ne le fait. Ainsi, l'EDF, la DGRST et les constructeurs automobiles optent, chacun de leur côté, pour une stratégie d'attente face au développement éventuel de la technique, ce qui est la meilleure stratégie à adopter *au regard* de la stratégie d'attente adoptée par les autres, les trois entités se renvoyant la responsabilité du premier pas à accomplir. Il s'agit bien ici des effets d'un processus socio-relationnel. Car comme le rappelle Loïk Le Floch-Prigent, les recherches sur les piles à combustible reposent avant tout sur une structure d'interactions entre des acteurs pris dans un réseau d'interconnaissance fort :

« C'est une affaire d'hommes. L'industrie, c'est une affaire d'hommes. Il y a de l'irrationnel dans l'industrie et il y a de l'irrationnel dans la recherche. Je sens, je ne sens pas. J'ai de l'intuition, je n'ai pas d'intuition. J'ai envie de faire ça avec machin, je n'ai pas envie de faire ça avec truc. Celui-là, je ne l'aime pas. Bon ben je ne l'aime pas et pouf on divorce. Que nous soyons encore dans une vision d'un processus parfaitement rationnel et de relations qui tombent sous le sens de la technique est une stupidité. Ce n'est pas comme ça que ça se passe. Et ce n'est pas comme ça que ça s'est passé. Si jamais on a bien travaillé, Michel Desécures et moi, sur ce dossier, c'est qu'on était copains. Et si jamais on a travaillé avec Maurice Magnien et Hubert Autruffe, c'est qu'on allait boire des coups ensemble. C'est ça la réalité. »¹²⁴⁷

Or au début des années quatre-vingt, ce qui restait du collectif de pensée évoluant autour des piles à combustible et du réseau social qui l'abritait va finir d'être démantelé. Tout d'abord au sein du milieu académique. Maurice Bonnemay, déjà évincé du Laboratoire d'électrolyse deux ans plus tôt, demande au directeur du CNAM Francis Cambou la permission de prendre sa retraite définitive en

¹²⁴⁶ MOULIN, Hervé, *Théorie des jeux pour l'économie et la politique*, Hermann, 1981, pp. 58-84.

¹²⁴⁷ Entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

septembre 1980¹²⁴⁸. Dans la foulée, Guy Bronoël quitte son poste au Laboratoire d'électrocatalyse et énergétique électrochimique à Grenoble, déçu du traitement réservé par la direction du CNRS à une partie de ses anciens collègues de Bellevue qu'il espérait accueillir :

« En 1980 quand j'ai vu ça j'ai dit : "bon c'est très bien. Continuez comme ça, moi je vais faire autre chose." Et c'est là que j'ai été contacté par le PDG de Renault Bernard Hanon, qui m'a demandé d'être un de ses conseillers pour les affaires d'électrochimie chez Renault. [...] J'étais conseiller scientifique à la direction des recherches de Renault et en même temps chargé de tout ce qui était les nouvelles batteries, les possibilités pour le véhicule électrique. »¹²⁴⁹

Après son départ, le CNRS n'engage pas de politique forte en matière de piles à combustible, comme le recommandait pourtant la DGRST. « Personne » ne réinvestit un domaine que l'institution publique considère désormais relever de « la recherche fondamentale »¹²⁵⁰. La dissolution du réseau se poursuit dans un même temps dans le milieu industriel. Bernard Warszawski est redirigé vers des études de production de matériaux électrosensibles chez Alsthom Atlantique¹²⁵¹ si bien que lorsque l'ancien élève de l'École polytechnique et ingénieur en chef des Mines Jean-Pierre Hauet prend la direction des Laboratoires de Marcoussis en 1984, il n'y a plus « aucune recherche sur les piles à combustible »¹²⁵². De son côté, Guy Bronoël prend chez Renault la charge du dossier relatif au partenariat avec la SAFT et l'IFP et recommande l'arrêt des études, qui ne sont pour lui « pas défendables »¹²⁵³. Celles-ci sont de toute façon jugées globalement négatives et comme reposant sur des éléments encore trop incertains ou indépendants de la volonté du constructeur automobile. Les deux auteurs d'un rapport pour TREGIE, Olivier Breting et Igor Lafaurie, notent ainsi que « des

¹²⁴⁸ En septembre 1979, Maurice Bonnemay écrit à Francis Cambou : « Monsieur le Directeur, j'atteindrai le 31 décembre 1979 l'âge de soixante-cinq ans. J'aurai alors accompli au service de l'État une carrière approchant quarante ans. Les règlements ne permettraient de prolonger mon activité jusqu'à soixante-huit ans mais j'ai l'intention de me retirer à la fin de l'année scolaire 1979-1980, c'est-à-dire le 30 septembre 1980. J'établirai par ailleurs un rapport sur mon activité, je n'insiste donc pas sur ce point. Je dirai seulement que j'ai beaucoup apprécié mon séjour au CNAM et que je conserverai de cette partie de mon existence un excellent souvenir. Si les dispositions administratives le permettent, mon accession à l'honorariat constituerait une satisfaction pour moi en me permettant de conserver une relation avec un milieu que j'apprécie. » Source : Archives du CNAM, lettre de Maurice Bonnemay à Francis Cambou, le 14 septembre 1979, p. 1.

¹²⁴⁹ Entretien avec Guy Bronoël, Meudon, octobre 2016.

¹²⁵⁰ Loïk Le Floch-Prigent explique ainsi son point de vue sur la question : « Le problème que j'avais, c'était : est-ce que nous avons fait suffisamment de recherches pour arriver à ce que ceci soit industrialisable ? La réponse étant non, j'ai dit, à mes basques, moi sur la mission que j'ai pour le pays, je ne suis pas là pour financer la recherche fondamentale. Ça c'est le directeur du CNRS, mais moi je ne fais pas ça. Or à l'époque il n'y avait personne. » Source : entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

¹²⁵¹ Cette réorientation le mène, à la fin des années quatre-vingt, à inventer des procédés permettant la fabrication de matériaux pour afficheurs électrochimiques en couleur, tels que le Polyvision.

¹²⁵² Correspondance épistolaire électronique entretenue avec Jean-Pierre Hauet, janvier 2015.

¹²⁵³ Guy Bronoël indique : « [...] sous mon impulsion, j'ai dit que les piles à combustible, pour l'instant, n'étaient pas défendables. » Source : entretien avec Guy Bronoël, Meudon, octobre 2016.

moyens restent à mettre en œuvre pour réduire poids, prix et volume de la pile ». Ils reprennent aussi les arguments de leur collègue Claude Lancelle sur le rôle de l'État sur le sujet : les choix technologiques ne leur appartiennent pas ; ils reviennent « aux questions politiques » d'orientation énergétique nationale¹²⁵⁴. Sans nouveau financement, face à des résultats « très insuffisants » et des perspectives à moyen terme « peu encourageantes »¹²⁵⁵, l'IFP abandonne à son tour¹²⁵⁶ quelques mois après l'élection présidentielle qui voit François Mitterrand arriver au pouvoir. Un changement politique qui n'est d'ailleurs pas étranger au repositionnement de l'Institut selon Yves Bréelle :

« Nous n'étions plus que les seuls, puis nous n'avions plus de financements. Les piles coûtaient très cher parce qu'il fallait à la fois mener des recherches fondamentales pour améliorer les électrodes, etc., et mettre sur pied l'équivalent d'une petite usine de fabrication. [...] En 1981, je suis allé à l'usine SIMCA parce qu'ils développaient là-bas des piles à hautes températures. Ils voulaient arrêter et nous passer le relais. Quand je suis rentré, Jean-Claude Balaceanu et Bernard Salé m'ont dit qu'ils avaient discuté en mon absence et qu'ils avaient décidé d'arrêter les piles parce que ça coûtait trop cher et que nous n'avions plus de financements extérieurs. Il y avait en fait d'autres raisons mais j'ai su cela ensuite [...]. C'était l'année où Mitterrand est arrivé au pouvoir et le conseil d'administration de l'IFP reprochait à Jean-Claude Balaceanu de s'occuper des piles. Il se sentait fragile. Il était DG et non pas PDG. Il avait effectué sa formation à l'INSIC (École nationale supérieure des industries chimiques) à Nancy et il n'avait pas la protection qu'a quelqu'un qui sort de l'X. C'est donc comme cela que nous avons arrêté les piles. Je suis revenu à mes premiers amours qui étaient les moteurs. »¹²⁵⁷

En dernier lieu, la DGRST se réorganise en 1981. Loïc Le Floch-Prigent quitte ses fonctions pour prendre la tête du cabinet du nouveau ministre de l'Industrie Pierre Dreyfus. Il est remplacé pour partie par le polytechnicien (X 1969) Michel Dahan, lui-même conseiller technique du ministre de l'Industrie. Le comité « Piles et générateurs électrochimiques » disparaît même pour faire place à un

¹²⁵⁴ TREGIE, « Abaissement du prix de revient des piles à H2 à un niveau inférieur à 300 F/kW en fabrication de série. Aide DGRST n078.7.291 », mai 1981, p. 14.

¹²⁵⁵ DGRST, Comité « Générateurs électrochimiques », « Compte-rendu de la réunion du 27 avril 1981 », le 15 mai 1981, p. 9.

¹²⁵⁶ Jacques Chéron explique comment il a appris la nouvelle : « La raison, c'est qu'un beau jour en réunion, alors il y avait des bruits, mais la direction nous a dit : "bon on arrête les travaux sur les piles à combustible à l'IFP." Ils ont dit que personne ne nous finançait ou ne nous aidait. Et qu'il n'y a aucune raison que ce soit l'IFP seul qui paie ça. » Source : entretien avec Jacques Chéron, Paris, avril 2018.

¹²⁵⁷ Entretien téléphonique avec Yves Bréelle, Belfort, mai 2018. Nous n'avons pas trouvé d'éléments relatifs au développement de recherches concernant les piles à combustible chez SIMCA. Toutefois, nous pouvons émettre l'hypothèse que l'industriel met un terme à ses recherches lorsqu'il est racheté par Peugeot et renommé Talbot à la fin des années soixante-dix, Peugeot ayant lui-même abandonné ses propres recherches à ce moment-là.

autre comité cette fois nommé « Générateurs électrochimiques ». Présidé par Jacques Millet de la Direction des études et recherches de l'EDF, il est majoritairement composé de nouveaux membres¹²⁵⁸ : Michel Armand du Laboratoire d'énergétique électrochimique de l'École nationale supérieure d'électrochimie de Grenoble, Jacques Badoz du Laboratoire de chimie analytique des milieux réactionnels liquides de l'ESPCI Paris, Henri Coriou du département de chimie appliquée et études analytiques du CEA, Jean Lambert de la DIMME, Claude Lamy du Laboratoire de chimie I, électrochimie et interactions de l'Université de Poitiers, Jean Mahenc du Laboratoire de chimie physique et électrochimie de l'Université de Toulouse II, Michel Pouchard du Laboratoire de chimie du solide de l'Université de Bordeaux, M. Robert de l'École supérieure d'électricité et du Laboratoire de Génie électrique des Universités de Paris VI et de Paris XI, Bernard Trémillon du Laboratoire d'électrochimie analytique et appliquée de l'ENSCP, Guy Robert du Laboratoire d'électrochimie des solides de l'Université de Franche-Comté, le colonel Grandin de l'Épervier de la DRET, M. Daniel de la SEFT, M. Thiret de la DHYCA, M. Tantot du Secrétariat général de la Défense nationale et du Bureau des Affaires scientifiques et technologiques, et Henri Leribaux de l'ESA¹²⁵⁹.

De nouveaux sujets d'étude sont proposés ; électrolytes à sels fondus organiques et inorganiques fonctionnant à basse température, polymères semi-conducteurs, systèmes « tout solide » utilisables à température ordinaire pour la microélectronique, dispositifs électrochimiques pour visualisation, électrochromes, membranes résistantes aux corrosions chimiques et électrochimiques en milieu agressifs (acide sulfurique, soude, sels fondus oxydants)¹²⁶⁰. Quant aux travaux sur les piles à combustible, ils sont écartés rapidement, décrits comme « très insuffisants » et comme dotés de perspectives à moyen terme « peu encourageantes ». Ce sentiment est partagé dans d'autres espaces : entouré des physiciens Hubert Reeves et Jean Teillac, le conseiller scientifique à la DGRST Jacques Halfon déclare notamment dans l'émission « L'avenir du futur » sur Télévision Française 1 qu'il ne pense pas « que l'hydrogène va remplacer le pétrole », ou alors en « 2050 »¹²⁶¹. Ce rejet, qui a aussi lieu au même moment aux États-Unis¹²⁶², doit cependant être nuancé : il est moins absolu

¹²⁵⁸ DGRST, « Générateurs électrochimiques. Comité 1981 », 1981, pp. 1-2.

¹²⁵⁹ Participent également au comité en 1981 : M. Chauvin du CEA, M. Lancien de la SNCF, M. Sarrazin de la DRET et M. Bibault du SGN. Source : DGRST, Comité « Générateurs électrochimiques », « Compte-rendu de la réunion du 9 juin 1981 », le 1^{er} juillet 1981, p. 1.

¹²⁶⁰ DGRST, Fonds de la recherche, « Appel d'offres 1981 "Générateurs électrochimiques" », 1981, pp. 2-3.

¹²⁶¹ INA, « Quelle énergie pour sauver le monde », Télévision Française 1, L'avenir du futur, le 15 décembre 1980.

¹²⁶² Les services de la mission scientifique de l'Ambassade de France aux États-Unis écrivent en effet dans une note datée du 8 octobre 1981 : « Au cours des années soixante, beaucoup d'espoirs avaient été fondés sur les piles à combustibles. Grâce à la publicité faite sur ces systèmes utilisés avec succès dans les programmes spatiaux, de nombreux groupes ont étudié ce mode de production d'électricité théoriquement très intéressant. Au cours des années soixante-dix, les divers projets ont été tour à tour abandonnés par suite de multiples problèmes techniques associés à la mise au point de piles utilisables dans des conditions économiques acceptables et pendant des durées suffisantes. Aujourd'hui l'idée d'utiliser une pile à combustible pour la traction électrique est pratiquement abandonnée. Seul un petit groupe de chercheurs à Los Alamos Scientific Lab. (Los Alamos, New Mexico) financé par le DOE a encore un projet dans ce sens. Le système étudié

qu'encore relié à la stratégie d'attente mise en œuvre. Jacques Millet renvoie en effet la prise en charge de projets potentiels aux derniers « industriels concernés », c'est-à-dire Renault et EDF, et aux « responsables de la politique énergétique » : ce sont bien à eux de « prendre le relais », la DGRST ne se déterminant qu'en fonction de leur « position »¹²⁶³. Le comité n'a toutefois pas l'occasion de se prononcer beaucoup plus la question car la Délégation est démantelée en décembre. Plus exactement, elle est « aspirée »¹²⁶⁴ par le récent ministère de la Recherche et de l'Industrie dirigé par Jean-Pierre Chevènement¹²⁶⁵. Les recherches sur les piles à combustible vont ainsi s'arrêter peu à peu, dépossédées du coordinateur principal qui assurait la mobilisation du réseau d'acteurs et du collectif de pensée. C'est ce que concède Loïk Le Floch-Prigent :

« C'est très lié aux hommes. Dans ces domaines-là, ce n'est pas la peine de considérer qu'il y a des complots. Il n'y a pas de complot. Simplement il y a des types qui y croient ou qui n'y croient pas. Et à un moment, Michel Desécures et moi pensons qu'il faut absolument aller regarder dans ce secteur. C'est pour ça qu'on le fait. Et à un moment, moi je n'y crois plus. C'est directement lié aux hommes. Mais ce ne sont pas des complots. Simplement, moi il faut que je pousse des dossiers. Si je n'y crois plus, je ne les pousse plus. Et si je ne les pousse plus, il n'y a plus personne. C'est tout. »¹²⁶⁶

Après l'achèvement des prototypes de l'IFP à destination des sous-marins, Jacques Chéron voyage par exemple à Toulon en 1982 pour les remettre au CNEXO et à la COMEX¹²⁶⁷. Les deux institutions ne donnent pas suite. Le désistement du CNRS, absorbé par d'autres sujets « plus à la mode »¹²⁶⁸ va

est une pile hydrogène-air travaillant en milieu acide H_3PO_4 qui est testée sur une voiture de golf. Dans la pratique, les chercheurs de Los Alamos préconisent l'utilisation d'hydrogène produit par "reforming" du méthanol de manière à pouvoir stocker un combustible liquide. Il est clair que cette solution implique la présence à bord du véhicule d'un convertisseur catalytique permettant de produire l'hydrogène à partir du méthanol, ce qui représente une addition importante à la complexité au poids et au coût du véhicule. À l'exception de ces recherches, les travaux consacrés aux piles à combustibles sont aujourd'hui limités presque exclusivement à des unités de forte puissance pour utilisation statique dans le domaine de la production d'électricité aux heures de pointe. La société United Technology construit une pile pour la ville de New York et quelques laboratoires universitaires ou fédéraux (Argonne National Laboratory, Institute of Gas Technology) étudient les modèles de la "seconde génération" utilisant pour électrolyte des sels fondus à haute température. Il est clair que cette solution ne retient plus guère l'attention pour la propulsion automobile. » Source : Ambassade de France aux États-Unis, Services de la mission scientifique, « L'automobile électrique aux États-Unis : les projets, les problèmes », le 8 octobre 1981, p. 11.

¹²⁶³ DGRST, comité « Générateurs électrochimique », « Compte-rendu de la réunion du 27 avril 1981 », le 15 mai 1981, p. 9.

¹²⁶⁴ Entretien avec Jean-Pierre Chevènement, Paris, octobre 2017.

¹²⁶⁵ En même temps qu'il instaure le ministère de la Recherche et de la Technologie, le décret n°81-1056 du 1^{er} décembre 1981 abroge les précédents décrets relatifs à la coordination de la politique de recherche scientifique et technique, en particulier le décret n°78-659 du 23 juin 1978. De fait, la DGRST disparaît. Source : Journal officiel, le 2 décembre 1981, p. 3279.

¹²⁶⁶ Entretien avec Loïk Le Floch-Prigent, Paris, mai 2018.

¹²⁶⁷ IFP, « Les piles à combustible comme source d'énergie sous-marine », le 2 avril 1982, p. 3.

¹²⁶⁸ L'ancien directeur de l'unité de recherche associée au CNRS « Électrochimie et chimie physique » de l'Université de Strasbourg 1 Louis Pasteur et ancien directeur des relations avec l'enseignement supérieur au CNRS Maurice Gross

également impliquer une « traversée du désert »¹²⁶⁹ pour la technique au sein du milieu académique tout au long des années quatre-vingt¹²⁷⁰, persévérant même au-delà¹²⁷¹. Les constructeurs automobiles, pour leur part, se redirigent vers les systèmes à accumulateurs¹²⁷². La persistance de ce désintérêt se donne particulièrement à voir dans la faible prise de brevets impliquant un industriel ou un centre de recherches français, comme le montrent Robert Belot et Fabienne Picard : entre 1977 et 1999, celle-ci se limite à peine à quelques unités par an¹²⁷³.

L'arrêt des recherches sur les piles à combustible peut finalement être compris comme la résultante d'une articulation entre plusieurs phénomènes. Premièrement, les prototypes réalisés n'ont pas atteint le niveau de perfectionnement requis pour des applications diffusables à grande échelle, et en particulier pour la traction électrique automobile qui reste l'objectif principal. Dans un même temps, le paradigme hydrogénique, qui avait émergé et s'était solidifié entre 1974 et 1975, s'estompe : la production d'hydrogène par voie nucléaire, son stockage et sa distribution ne représentent plus une configuration énergétique d'avenir. C'est donc toute la chaîne logique devant supporter le développement des piles à hydrogène qui est remise en cause. Un dernier facteur est à trouver dans la forme du réseau social portant la technique. D'une part, celui-ci repose sur un socle institutionnel presque unique, la DGRST, qui permet la mobilisation du collectif de pensée scientifique et la

témoigne ainsi dans la *Revue pour l'histoire du CNRS* : « A l'époque, le CNRS mettait beaucoup d'application aveugle à détruire un champ scientifique dans lequel la France avait été un leader mondial, celui des piles à combustible et, plus généralement, de l'électrochimie. Il y avait alors une quinzaine de laboratoires d'électrochimie en France, dont certains très connus. Un laboratoire pour lequel nous avons la plus grande admiration était le laboratoire d'électrochimie interfaciale de Meudon, dirigé par le professeur Bonnemay. En Europe, le plus proche de cette importance était à Moscou. C'était l'un des laboratoires phares dans le monde dans les années soixante, destiné à la recherche sur les piles à combustibles. Le général de Gaulle était lui-même allé le visiter. Nous étions au début de l'aventure spatiale avec l'Angleterre, les États-Unis et la France. Cette entreprise de désintérêt ou d'incompréhension, dont j'ignore la motivation, poursuivait son œuvre au moment où je dirigeais mon laboratoire. [...] Je ne pense pas qu'il y avait une volonté de ne pas soutenir mais il y avait des thématiques plus à la mode. » Source : *Revue pour l'histoire du CNRS*, n°15, 2006, p. 12.

¹²⁶⁹ C'est notamment ce que déclare Michel Pouchard, du Laboratoire de physique du solide de Bordeaux : « C'est vrai qu'il y a eu une traversée du désert énorme. Les gens n'y croyaient pas. » Source : entretien avec Michel Pouchard, Bordeaux, décembre 2016.

¹²⁷⁰ Guy Bronoël indique : « On n'a pratiquement plus rien entendu entre les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix. [...] Et ensuite c'est revenu en quatre-vingt-dix, de nouveau sous l'impulsion d'Areva. » Source : entretien avec Guy Bronoël, Meudon, octobre 2016.

¹²⁷¹ Quelques études corrélées ou partiellement corrélées subsistent : notons par exemple que Gérard Giraud soutient en 1983 une thèse de doctorat en économie à l'EHESS (École des hautes études en sciences sociales), sous la direction du professeur Victor Rouquet la Garrigue, intitulée « L'hydrogène vecteur d'énergie ». Il y écrit que si « les véhicules à pile à hydrogène seront particulièrement appréciés dans les zones urbaines où leurs qualités de silence, de non pollution et d'économie seront mises en valeur », il indique aussi que « le développement de la pile à combustible a besoin d'autres débouchés que ceux de la traction » (p. 104). Alain Wattiaux soutient de son côté en 1985 une thèse dirigée par le professeur Paul Hagenmuller sur « l'étude du comportement électrocatalytique relatif au dégagement de l'oxygène des pérovskites non-stoechiométriques $La_{1-x}Sr_xFe_{1-z}Co_zO_{3-y}$ ». Denis Doniat, Claude Lamy et Michel Pouchard font notamment partie du jury lors de sa soutenance. Sources : GIRAUD, Gérard, *L'hydrogène vecteur d'énergie*, thèse de doctorat de troisième cycle, EHESS, 1983 ; WATTIAUX, Alain, *Etude du comportement électrocatalytique relatif au dégagement de l'oxygène des pérovskites non-stoechiométriques $La_{1-x}Sr_xFe_{1-z}Co_zO_{3-y}$* , thèse de doctorat ès sciences présentée à l'Université de Bordeaux I, 1985.

¹²⁷² NICOLON, Alexandre, *Le véhicule électrique, mythe ou réalité ?*, Éditions de la Maison de la MSH, 1984, pp. 43-51.

¹²⁷³ BELOT, Robert, PICARD, Fabienne, *op. cit.*, 2014, pp. 525-532.

connexion entre les laboratoires, les entreprises et les organismes publics concernés par les études et leurs débouchés. D'autre part, un individu prend une place prépondérante en son sein : Loïk Le Floch-Prigent. C'est autour du conseiller spécial, selon ses décisions, que s'organisent les recherches. Lorsqu'il détermine qu'elles n'ont pas le potentiel industriel adéquat, rien ne l'empêche donc de les écarter de l'attribution des financements dont il a la charge, au profit de celles concernant les accumulateurs, et de les rediriger vers la recherche électrochimique et des secteurs d'applications spéciales telles que l'océanographie. Ce choix est d'autant plus motivé par la dynamique d'interaction maintenue entre la Délégation, les constructeurs automobiles et l'EDF : les stratégies déployées par les trois entités tendent à créer une situation d'équilibre où chacun attend de l'autre qu'il s'engage le premier, conduisant par là même à un désengagement général de la filière de réalisation technique. Avec la dissolution de la DGRST en 1981, c'est enfin toute la structure du réseau – déjà affaiblie par les départs consécutifs de plusieurs des acteurs principaux qui la composaient – qui s'effondre.

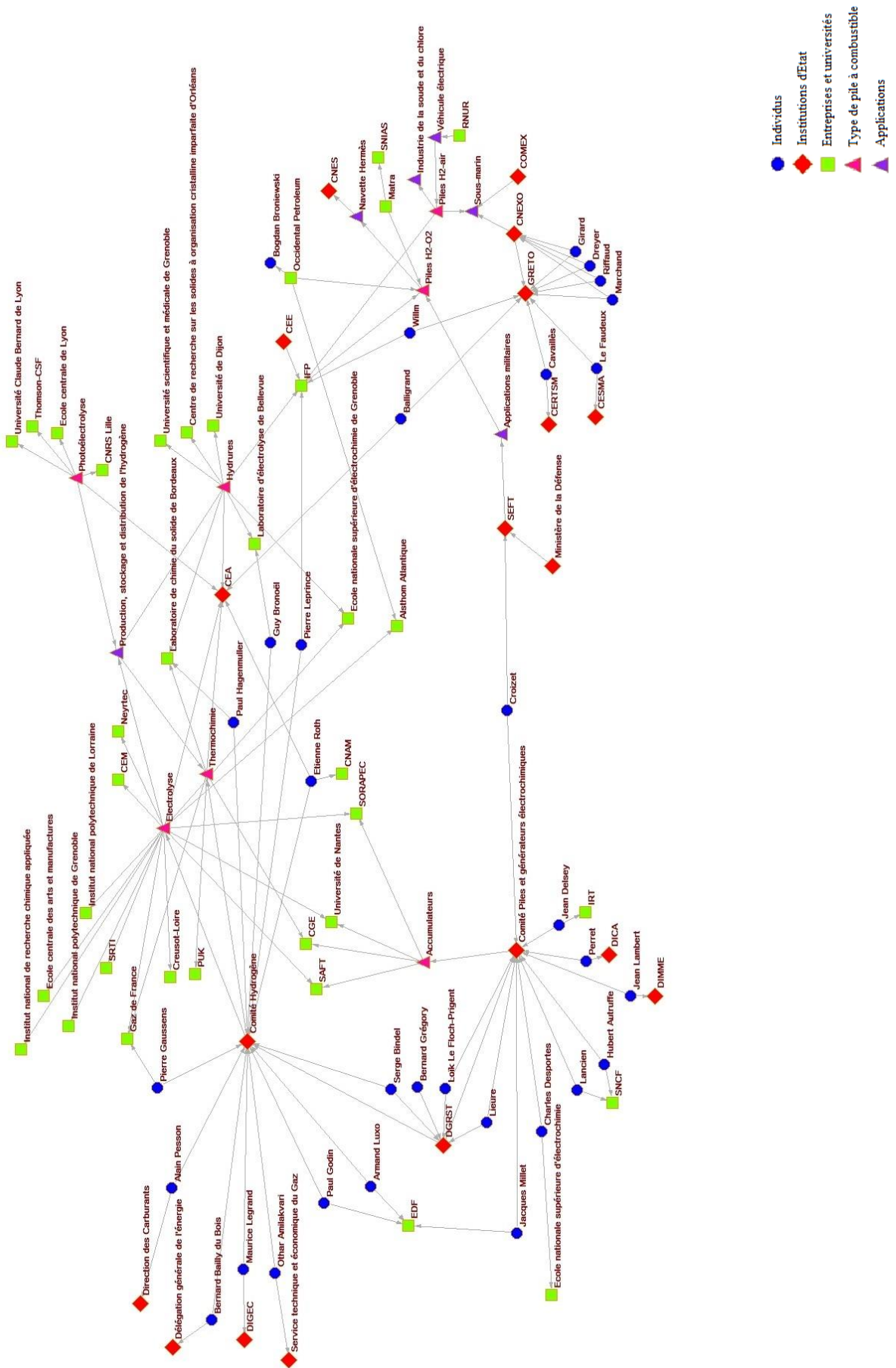


Fig. 16 – Le réseau social autour des piles à combustible en France en 1977-1978

CONCLUSION

Après avoir restitué cette histoire de la recherche sur les piles à combustible en France des années soixante à quatre-vingt, en entrant au maximum dans le détail de son développement, il est désormais temps d'en faire la synthèse. Dans la conclusion de notre thèse, nous reviendrons donc tout d'abord sur les conditions socio-historiques de possibilité d'émergence de la recherche. Nous analyserons ensuite le fonctionnement de cette dernière tout au long des années soixante et soixante-dix. En nous penchant sur les archives des années quatre-vingt-dix issues de notre corpus de sources, nous émettrons enfin une proposition pour un éventuel prolongement de ce travail.

I. Une technique, une politique, des phénomènes structurels

L'émergence de la recherche sur les piles à combustible en France à la fin des années cinquante relève d'un certain nombre de conditions socio-historiques. En premier lieu, à partir des années trente, Francis T. Bacon fait passer les piles à combustible du statut d'expérience scientifique à celui d'objet technique. Cette évolution doit beaucoup à une approche originale du problème que l'Anglais tire de sa position d'ingénieur. Ses caractéristiques sociales lui permettent en effet de fonder son travail sur la pratique technique plutôt que sur la théorie scientifique. Les progrès notables qu'il en tire le placent dans une posture de défi symbolique par rapport à l'ordre dominant. En signifiant sa distance au métier de chimiste, il opère un renversement de valeur : il s'oppose à l'idée que les piles à combustible doivent être étudiées par le biais des filières classiques et propose d'améliorer ces générateurs grâce à un talent technique associé au savoir-faire de l'ingénieur. Mais Francis T. Bacon n'est pas seulement un technicien, c'est aussi un véritable entrepreneur. De fait, pour faire avancer ses objectifs professionnels, il noue stratégiquement des liens entre science, économie et politique : il attribue des applications à ses recherches, renforce ses équipes et obtient l'appui d'organismes et d'institutions étatiques. C'est donc spécialement sous la direction de l'État que se font ses avancées. Dans les années cinquante, ses appareils finissent par attirer l'attention aux États-Unis, où l'on tente d'expérimenter de nouveaux moyens de production et d'utilisation de l'énergie. Néanmoins, c'est surtout dans le cadre de la conquête spatiale que les piles à combustible vont être développées : la NASA sélectionne la technique pour générer l'électricité des capsules Gemini et Apollo.

Pendant ce temps en France, le milieu scientifique se transforme. L'élite scientifique se reconstitue notamment autour d'une nouvelle génération de chercheurs après la Seconde Guerre mondiale. On assiste également à l'émergence de nouveaux domaines d'études, à l'apparition d'instruments inédits dans les laboratoires et à l'introduction de nouvelles approches théoriques et pratiques. De nouvelles

formes d'organisation du travail sont encore mises en œuvre, alors que sont fondées des institutions, telles que le CEA (Commissariat à l'énergie atomique) et l'IFP (Institut français du pétrole), et que se créent des alliances entre académiciens, militaires, politiques et industriels. Dans les années cinquante, un complexe du retard sur les États-Unis se rend visible dans les discours en même temps que la politique scientifique publique se réorganise difficilement. Avec l'arrivée de Charles de Gaulle à la présidence de la République, cette politique acquiert une autre dimension : un CIRST (Comité interministériel de la recherche scientifique et technique), un CCRST (Comité consultatif de la recherche scientifique et technique) et une DGRST (Délégation générale à la recherche scientifique et technique) sont établis. En particulier, le rôle de la DGRST est d'orienter l'activité de recherche scientifique fondamentale et appliquée du pays dans certains domaines d'intérêts ayant des lacunes, par le biais d'actions concertées telles que la biologie moléculaire, l'exploitation des océans ou encore la conversion des énergies.

À côté de cette dynamique politique, d'autres phénomènes structurels sont à la source de l'intérêt pour les piles à combustible en France. D'une part, l'électrochimie voit sa position évoluer dans l'espace académique après 1945, notamment grâce aux travaux de René Audubert et de Maurice Bonnemay au CNAM (Conservatoire national des Arts et Métiers), de Marcel Prettre à l'IRC (Institut de recherches sur la catalyse), des équipes de l'IFP et de Jean-Eugène Germain à la Faculté des sciences de Lille. D'autre part, la conversion des énergies s'impose comme un champ d'études prioritaire. Alors que le système énergétique national se trouve dans une situation précaire après la guerre et qu'est créée l'EDF (Électricité de France), les techniques de conversion visent à exploiter toutes les ressources énergétiques possibles. Enfin, une place nouvelle est accordée à la recherche scientifique au sein des Armées. En pleine Guerre froide, un espace d'interactions entre universitaires, industriels et militaires se met en place, porté par des organismes tels que le CASDN (Comité d'action scientifique de la Défense nationale).

II. Réaliser des prototypes, maîtriser les phénomènes électrochimiques

Les éléments précédemment exposés s'activent et convergent vers ce qu'on nomme encore les « piles à gaz » à la fin des années cinquante. Bien que la technique soit connue de longue date en France et qu'elle ait déjà fait l'objet de recherches, c'est plutôt à partir des travaux de Francis T. Bacon qu'on l'envisage. À cette période, plusieurs entreprises et laboratoires, comme l'EDF, le Gaz de France, l'IFP et le Laboratoire d'électrolyse du CNRS dirigé par Maurice Bonnemay, commencent à se positionner sur la thématique. Mais c'est surtout le CASDN, motivé par le complexe du retard scientifique et technique sur les États-Unis, qui va impulser les premières études d'envergure en

organisant des réunions auxquelles participent des représentants d'institutions intéressées. Au cours de celles-ci, Maurice Bonnemay prend en main l'orientation des recherches et les dirige vers la catalyse et les électrodes au sein d'une approche systémique. On le retrouve également au sein de l'action concertée « Conversion des énergies » de la DGRST, où il met en place le même mode opératoire. Le début des recherches sur les piles à combustible est ainsi structuré socialement : un réseau social, composé par les relations entre les institutions, les entreprises, les laboratoires et les individus qui y sont rattachés, et un collectif de pensée scientifique reposant sur les réunions ayant lieu à la DGRST et au CASDN, se créent autour de la technique. Comme en Angleterre et aux États-Unis, c'est ainsi à l'État que revient la charge de soutenir la recherche. Une répartition et une synchronisation des efforts s'opèrent grâce à l'attribution de contrats. Ce mode d'organisation transforme la vie des laboratoires financés, où de nombreux techniciens et ingénieurs sont embauchés pour mettre en œuvre des moyens d'essais. Effet de l'imitation de la posture prise par Francis T. Bacon, il s'agit pour ces derniers de maîtriser les phénomènes électrochimiques en les pliant à la réalisation de modèles de piles plutôt que de viser à la construction de grands ensembles théoriques explicatifs.

Dans ce contexte, Maurice Bonnemay occupe une place prépondérante au sein du collectif de pensée. Il s'impose comme le spécialiste français des piles à combustible. Ce statut lui permet d'acquérir une renommée internationale, de mettre au point une méthode nouvelle d'étude des électrodes poreuses à triple contact et d'obtenir des fonds du CNRS. À partir de 1964, les recherches évoluent : les différents laboratoires ne séparent plus leurs types de piles à combustible (à hydrogène, méthanol, carbonates fondus, etc.) des cadres de fonctionnement et d'usage dans lesquels ils ont vocation à s'insérer : traction maritime, ferroviaire et automobile, groupes électrogènes, production industrielle d'électricité, etc. Les voies de recherche sont désormais définies selon ces perspectives. Cette tendance se donne particulièrement à voir à l'occasion d'une exposition consacrée à la technique au Palais de la découverte à la fin de l'année 1965. Tous les organismes financés par la DGRST y présentent leurs modèles et les applications qu'ils en attendent. Cette exposition doit aussi permettre à la DGRST de choisir les types de piles à combustible qu'elle va continuer à soutenir.

En 1966, le comité « Conversion des énergies » est remplacé par un comité « Électrotechnique nouvelle ». Celui-ci n'est plus principalement composé d'universitaires, comme c'était auparavant le cas, mais d'industriels et d'individus proches de l'industrie. Ce nouveau collectif de pensée hybride, présidé par le directeur adjoint de l'EDF Maurice Magnien, prend un ensemble de décisions capitales : alors que l'électricien national investit dans ses centrales nucléaires pour la fourniture industrielle d'électricité, il écarte les piles à combustible de cette voie spécifique pour leur

attribuer un seul objectif, c'est-à-dire la traction électrique, encourage une voie de recherche – la maîtrise des phénomènes électrochimiques plutôt que l'accroissement des connaissances à leur sujet – et diminue le montant des crédits qu'il accorde à ses contractants. Dans ces circonstances, les laboratoires cherchent de nouvelles sources de financement : Alsthom passe par exemple des accords avec la SNCF, Peugeot et le ministère de la Défense, et l'IFP avec la CSF (Compagnie générale de télégraphie sans fil), Renault et le Carbone Lorraine. Les prototypes sont ainsi multipliés tandis que les efforts se dispersent. L'orientation des recherches reste cependant soumise aux dispositions étrangères, en particulier américaines, vis-à-vis de la technique. Or, aux États-Unis, les piles à combustible pâtiennent notamment de la concurrence en provenance de l'amélioration des accumulateurs électriques et du moteur thermique. Ces éléments incitent finalement le ministère de la Défense à retirer son soutien. La DGRST et son délégué général Pierre Aigrain font de même en 1969 lorsqu'ils évaluent que les prototypes de l'ONIA (Office national industriel de l'azote), de la CGE (Compagnie générale d'électricité) et de l'IFP qu'elle a financés n'ont pas atteint un stade de développement suffisant. Cet arbitrage est de plus renforcé par les conclusions présentées par certains détracteurs agissant au sein du réseau social que porte l'institution publique, en particulier l'électrochimiste grenoblois Jean-Claude Sohm. Celui-ci estime que l'expérimentation fondamentale sur les piles à combustible a été abandonnée trop tôt au profit d'une phase de développement à vocation industrielle.

III. L'importance de la politique énergétique dans l'orientation des recherches

Lorsque Jean-Claude Sohm prend la tête de la commission « Électrochimie » du comité « Électrotechnique nouvelle » à la DGRST à la suite de ces événements, le style de pensée du collectif se fracture. Deux courants émergent, opposant le monde universitaire au secteur privé. D'un côté, le directeur des recherches d'Alsthom Bogdan Broniewski milite pour le renforcement de la voie de développement technique des piles méthanol-air. Pour lui, ce n'est que de cette manière que la technique deviendra valide sur le plan commercial. De l'autre, Jean-Claude Sohm souhaite réinvestir le domaine des recherches scientifiques fondamentales et soutenir le financement d'autres types de générateurs. En concluant un accord en 1971 avec l'entreprise américaine Exxon et Peugeot pour l'équipement de véhicules électriques, Bogdan Broniewski parvient finalement à convaincre la DGRST d'adhérer à son projet. Par ailleurs, d'autres organismes poursuivent leurs études dans des proportions moindres. Il s'agit de l'IFP, du Gaz de France et du Laboratoire d'électrolyse du CNRS, bien que ce dernier ait vocation à renouveler ses programmes. À cette même période, les piles à combustible comme solution au problème du véhicule électrique sont surtout concurrencées par la logique promotionnelle de l'EDF. Prenant le virage du tout électrique et étendant son influence sur

la politique énergétique française, l'électricien national rassemble un nombre important d'acteurs publics et industriels autour des accumulateurs. Dans ce contexte, la DGRST doute de la pertinence des systèmes d'Alstom, d'autant plus que la société réoriente les objectifs applicatifs de ses piles à combustible et ne fait toujours pas montre de réels progrès trois ans après le début de son contrat. Mais compte tenu de la première crise pétrolière et de la valeur du partenariat avec Exxon, la DGRST décide de réaffirmer son soutien.

En 1974, les piles à combustible connaissent un regain d'intérêt dans le cadre de l'accroissement des problématiques énergétiques et environnementales. Les recherches sur la technique sont incluses au sein d'un nouveau paradigme tourné vers la production d'hydrogène par voie nucléaire : le Premier ministre Pierre Messmer vient de lancer un plan de construction de multiples centrales et l'hydrogène issu du processus électrolytique ou de la décomposition thermique de la vapeur d'eau apparaît comme une solution à l'utilisation de l'énergie produite en heures creuses. Cependant, si l'IFP obtient bien un contrat avec Renault et que la coopération entre Alstom, Exxon et Peugeot se poursuit, les acteurs de la recherche sur les piles à combustible vont plutôt recevoir des financements publics pour des applications spéciales : l'IFP et Matra se lient avec les Armées pour la fabrication de générateurs portatifs et des études de traction électrique, avec le CNEXO (Centre national d'exploitation des océans) pour le développement d'applications sous-marines, de même qu'Alstom avec le CEMA (Centre d'études marines avancées). Dans un même temps, la diversité des piles à combustible disparaît pour ne faire plus place qu'à un seul modèle : la pile à hydrogène. Tandis qu'est fondé un comité « Hydrogène » à la DGRST, cette tendance se retrouve aussi dans l'espace académique : le Laboratoire d'Électrolyse de Maurice Bonnemay et le Laboratoire de chimie du solide de Paul Hagenmuller se positionnent par exemple sur cette thématique.

À la fin des années soixante-dix pourtant, les recherches sur les piles à combustible vont être abandonnées. Plusieurs raisons en sont à la source. Il faut tout d'abord noter que la pile d'Alstom à destination du véhicule électrique est un échec et qu'Exxon se retire du partenariat. Dans ces circonstances, l'attention de la DGRST se reporte sur l'IFP, qui a délivré des modèles en état de fonctionnement à la Défense. Mais Loïk Le Floch-Prigent, responsable de l'électrochimie et de l'électrotechnique pour la Délégation, ne croit plus en la technique et préfère financer des études sur d'autres types de générateurs et batteries. Il redirige alors l'IFP vers des contrats dans des secteurs secondaires. L'IFP se met plus spécifiquement en relation avec le CNES (Centre national d'études spatiales) dans le secteur spatial et avec la COMEX (Compagnie maritime d'expertise) dans le domaine océanographique. Dans un même temps, les activités universitaires sont réorientées vers la recherche électrochimique fondamentale. Au Laboratoire d'électrolyse du CNRS, cette situation se

double de la problématique du remplacement de Maurice Bonnemay et a pour conséquence l'éclatement des équipes. D'autre part, le paradigme hydrogénique s'affaiblit. Les modèles selon lesquels l'hydrogène devait être produit en masse n'apparaissent plus porteurs et c'est donc l'ensemble de la structure politico-technique soutenant le développement des piles à combustible qui est remis en question. A ces phénomènes s'ajoute une dynamique d'interaction particulière entre l'EDF, la DGRST et les constructeurs automobiles : si aucun n'est totalement réticent au développement des piles à combustible, tous déploient des stratégies d'attente qui provoquent un désengagement général de la filière. Enfin, le réseau social évoluant autour de la technique est dissous : déjà appauvri par les départs en retraite et les changements de poste de plusieurs des acteurs qui le constituait, tels que Maurice Bonnemay et Bogdan Broniewski, il finit de se disparaître en 1981 lorsque la DGRST – qui représente le cœur de la mobilisation du collectif de pensée et l'organe principal de distribution des financements – se fond dans le nouveau ministère de la Recherche et de l'Industrie.

Que retenir de cette analyse ? Le premier point à souligner est le trait faussement contingent du processus menant à l'instigation des recherches sur les piles à combustible en France à la fin des années cinquante, lorsque celui-ci est entendu comme un ensemble de conjonctures fortuites¹²⁷⁴. En effet, si la possibilité de l'apparition des recherches repose sur le croisement de nombreux événements historiques, de dynamiques structurelles, ou encore de décisions prises par une multiplicité d'acteurs dans des espaces sociaux hétérogènes, elle ne relève toutefois pas réellement du hasard ou de l'accident. Celle-ci s'inscrit bien plutôt dans des temporalités précises et des séries de facteurs interdépendants : il s'agit de l'accroissement du rôle de l'État dans l'orientation des sciences après la Seconde Guerre mondiale dans les pays occidentaux, du renforcement des relations entre les espaces académique, militaire et industriel dans le contexte de la Guerre froide, de la technicisation de la science dans les laboratoires¹²⁷⁵, etc. En ce sens, la construction des recherches sur les piles à combustible en France ne se différencie pas foncièrement – *mutatis mutandis* – de l'émergence d'autres objets d'étude à peu près à la même époque. Que l'on considère les recherches sur l'atome, sur l'électronique, ou même dans le domaine spatial¹²⁷⁶, on retrouve des caractéristiques communes en amont de leur développement. Rendre compte de tels mouvements ne signifie pas pour autant départir les individus opérant en leur sein de la spécificité de leurs expériences et jugements personnels. Ils importent également dans l'enchaînement des faits. Mais il est nécessaire de les

¹²⁷⁴ ERMAKOFF, Ivan, « Contingence historique et contiguïté des possibles », in *Tracés. Revue de Sciences humaines* [En ligne], n°24, 2013, mis en ligne le 01 janvier 2017.

¹²⁷⁵ PESTRE, Dominique, « Dix thèses sur les sciences, la recherche scientifique et le monde social, 1945-2010 », in *Le Mouvement Social*, vol. 233, n°4, 2010, pp. 13-29.

¹²⁷⁶ EDGERTON, David, « L'État entrepreneur de science », in BONNEUIL, Christophe, PESTRE, Dominique (dir.), *Histoire des sciences et des savoirs. 3. Le siècle des technosciences*, Éditions du Seuil, 2015, pp. 67-84.

ramener à des trajectoires sociales et des positions professionnelles. Comprendre les transformations techniques effectués par Francis T. Bacon sur les piles à combustible implique ainsi de mentionner sa formation d'ingénieur.

Pour véritablement saisir la manière dont se construit et se développe une science, une invention ou une innovation, il faut donc s'attacher à les restaurer dans toute leur complexité sociale, politique, historique, culturelle et économique. De là découle le second point que nous souhaitons aborder. Nous avons vu que les recherches sur les piles à combustible dépendent en France d'une organisation sociale : c'est un collectif de pensée, lui-même enchâssé dans un réseau social, qui décide de leur orientation. La composition de ces structures sociales collectives est capitale dans la dynamique des études : quand le collectif de pensée comporte une majorité d'universitaires, les recherches vont être poursuivies dans une voie. En revanche, quand il s'hybride pour accueillir plus d'industriels ou quand il se reforme autour d'autres acteurs, elles vont être poursuivies dans d'autres domaines selon un style de pensée différent. Le collectif de pensée est aussi dépendant de son implication dans le réseau social : il repose sur un socle institutionnel qui lui donne sa forme, opère dans la mesure des moyens qui lui sont délégués, est traversé de pressions émises par des acteurs présents dans le réseau, etc. De surcroît, la stabilité du réseau social est essentielle aux recherches : quand le réseau cesse d'exister, les recherches disparaissent à leur tour. Quelles conséquences en tirer pour la caractérisation de la relation science-technique-société ? Un élément en particulier : les techniques nouvelles, les innovations ou les inventions ne sont pas des artefacts autonomes réalisés obscurément dans des laboratoires tenus à l'écart du monde social. Elles reposent au contraire sur des groupes sociaux. Dans cette mesure, la structure de ces mêmes groupes – leur composition, leur stabilité, leur pérennité, les relations qu'ils tissent – jouent un rôle de premier plan dans leur développement et leur diffusion. Leur échec, s'il advient, n'est pas seulement un échec scientifique ou technique, c'est également un échec de relations sociales.

Enfin, un dernier point à considérer concerne les propriétés sociales de la technique. Car si cette dernière n'est pas fondée à l'extérieur du monde social, elle n'est pas non plus constituée en dehors de ses qualités politiques¹²⁷⁷. Pour le dire autrement, elle possède une ontologie propre que lui attribuent les groupes sociaux lorsqu'ils la créent et la font évoluer. Or les changements qui interviennent dans les groupes sociaux dont la structure est instable transforment ces propriétés. Les piles à combustible ont ainsi d'abord vocation à s'insérer dans de nombreux cadres de fonctionnement et d'usage dans la première moitié des années soixante en France, parmi lesquels la traction électrique

¹²⁷⁷ WINNER, Langdon, « Do Artifacts Have Politics? », in *Daedalus*, Vol. 109, n°1, 180, pp. 121-136.

automobile, ferroviaire et maritime, les générateurs électriques pour balises, la radioélectricité, la production industrielle de courant, etc. Puis quand se reforme le collectif de pensée en 1966, elles sont redirigées vers des applications plus ciblées, notamment la traction électrique automobile et ferroviaire. Au milieu des années soixante-dix, leur ontologie est encore en mouvement sous l'influence d'un nouveau paradigme hydrogénique : les piles à combustible sont désormais une solution à la crise pétrolière et aux problématiques environnementales. Quelques temps plus tard, le collectif de pensée les restreint finalement à des applications spéciales militaires ou sous-marines. Ces différentes fonctions sociales accordées ne viennent pas se poser sans effet sur la technique ; elles entrent jusque dans les plis de sa conception et de son design. C'est tout l'objet des nombreuses études entreprises sur la réduction du poids des piles à combustible pour les faire tenir dans une automobile ou de l'abandon de la pile au méthanol au profit de la pile à hydrogène quand on prévoit de produire massivement de l'hydrogène issu des centrales nucléaires. Les techniques, les innovations et les inventions n'ont donc pas la même signification pour tous les groupes ou des individus qui s'en saisissent. Aussi sont-elles soumises à des réinterprétations et des redéfinitions constantes qui sont autant d'expressions de l'identité et des intérêts de ces acteurs sociaux.

IV. Le redémarrage des études au début des années quatre-vingt-dix : quel réseau social pour quelles recherches ?

Nous l'avons vu, peu de recherches sur les piles à combustible subsistent en France au début des années quatre-vingt. Elles vont être réenclenchées près d'une décennie plus tard, non pas directement par l'État lui-même mais par le biais de son adaptation aux politiques européennes. Comment se traduit ce phénomène ? À la fin des années soixante-dix, les piles à combustible ne sont pas seulement abandonnées sur le territoire national en raison de leurs performances faibles et de leurs coûts élevés ; elles découragent même jusqu'aux autorités européennes qui refusent de les considérer sérieusement pour le développement d'applications civiles, les cantonnant de fait à d'éventuelles applications militaires et spatiales¹²⁷⁸. Cependant, cette situation ne va pas perdurer. Le programme européen Eurêka voit le jour en 1985 pour promouvoir l'innovation technologique, en particulier dans le domaine de l'énergie. Si la majeure partie de son budget est consacré à l'énergie nucléaire, d'autres techniques sont également concernées. C'est dans ce contexte que la Commission de Bruxelles organise une série de réunions, notamment à Ravello en Italie, pour tenter de mettre en œuvre de

¹²⁷⁸ MARKANTONATOS, Panagiotis, « Fuel Cell R&D within the European Framework Programmes », in AVADIKYAN, Arman, COHENDET, Patrick, HERAUD, Jean-Alain, *The Economic Dynamics of Fuel Cell Technologies*, Springer, 2003, pp. 207-232.

nouvelles études sur les piles à combustible¹²⁷⁹. En France, il faut attendre le 11 juin 1987 pour qu'une réunion d'information soit organisée autour de l'AFME (Agence française pour la maîtrise de l'énergie) suite à ces rencontres. Des représentants du CNET (Centre national d'étude des télécommunications), du CNES (Centre national d'études spatiales), de la DRET (Direction des recherches, études et techniques d'armement) et de la DGA (Direction générale de l'armement) y participent. Ces événements vont contribuer à l'élaboration de projets quelques années plus tard sous l'impulsion de l'État. En 1990, Hubert Curien, désormais ministre de la Recherche et de la Technologie, lance un programme pluriannuel de recherche sur les véhicules automobiles propres et économes en énergie, en collaboration avec les ministères chargés de l'industrie et de l'équipement. Une partie du programme, confiée par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, ex-AFME) à un partenariat entre Peugeot, la Régie nationale des usines Renault et le CEA (Commissariat à l'énergie atomique), est alors orientée vers les véhicules électriques équipés de piles à combustible.

Plus précisément, ces études, financées à hauteur de quarante-cinq millions de francs¹²⁸⁰, sont pilotées par un comité de direction présidé par Jean-Pierre Lisse de la Direction des recherches et affaires scientifiques de Peugeot et par un comité de projet dirigé par Thierry Alleau¹²⁸¹ du Centre d'études nucléaires de Grenoble. Elles doivent mener en cinq ans à la mise au point d'une pile H₂-air dotée d'un électrolyte acide polymère, alimentée en hydrogène ou en hydrogène issu du reformage du méthanol et fonctionnant à une température inférieure à 100°C¹²⁸². Ce choix correspond à une volonté de résolution de problématiques socio-techniques inhérentes à la conception d'un véhicule automobile de la part de Peugeot : la filière, dit-on, présente un « très bon potentiel pour une application embarquée » puisqu'elle dispose d'une « puissance volumique importante » et ne nécessite qu'un « temps de démarrage court »¹²⁸³. Les recherches sont de plus conduites avec des sociétés ayant conservé une activité dans le domaine depuis la fin des années soixante-dix, telles que la SORAPEC (Société de recherches et d'applications électrochimiques) de Denis Doniat et qu'a rejointe entretemps Guy Bronoël. Mais le ministère souhaitant que participent des équipes

¹²⁷⁹ MILLET, Jacques, « Histoire abrégée des piles à combustible en France », in *Bulletin d'histoire de l'électricité*, n°27, 1996, pp. 175-178.

¹²⁸⁰ PSA-Peugeot-Citroën, Direction des recherches et affaires scientifiques, « Pile à combustible pour véhicule électrique », le 7 mars 1994, p. 1.

¹²⁸¹ Thierry Alleau est diplômé de l'École supérieure d'électricité et entre au CEA en 1964. Il est aujourd'hui président d'honneur de l'APHYPAC (Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible).

¹²⁸² Lettre du directeur adjoint du PIRSEM Pierre Ch. Gravelle à la section 13 du Comité national du CNRS, le 19 novembre 1990, p. 3.

¹²⁸³ PSA-Peugeot-Citroën, Direction des recherches et affaires scientifiques, « Programme Pile à combustible pour véhicule électrique », le 7 mars 1994, p. 1.

universitaires et du CNRS sur « les aspects les plus fondamentaux »¹²⁸⁴ des recherches, d'autres acteurs font bientôt leur apparition dans le réseau social du programme. Le réservoir de relations constitué au temps de la DGRST dans les domaines de l'électrotechnique et de l'électrochimie est en partie réactivé. Claude Lamy du Laboratoire de Chimie 1 Electrochimie et interactions de l'Université de Poitiers présente par exemple un plan d'études. Si elles restent en retrait, d'autres institutions historiques manifestent aussi leur « intérêt », parmi lesquelles la DRET et le CNES¹²⁸⁵. Plus marginalement, le sénateur Pierre Laffitte consulte aussi le directeur général honoraire de l'IFP Jean-Claude Balaceanu pour rédiger son rapport sur « l'intérêt du véhicule électrique au regard de la protection de l'environnement » demandé par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques en 1993¹²⁸⁶. D'anciennes figures ne sont en revanche pas rappelées. En atteste un échange en juin 1991 entre le directeur adjoint du PIRSEM (Programme interdisciplinaire de recherches sur les sciences de l'énergie et les matières premières)¹²⁸⁷ Pierre Ch. Gravelle et le professeur à l'Institut de physique et chimie des matériaux de l'Université de Nantes Jean Rouxel. Alors que ce dernier avait fait part au directeur du Département de l'énergie du ministère de la Recherche et de la Technologie Maurice Claverie de son étonnement de ne « pas avoir été consulté au sujet des recherches concernant les piles à combustible », Pierre Ch. Gravelle lui répond dans une lettre :

« Ce n'est pas par ignorance des travaux sur les conducteurs protoniques dans votre laboratoire (que j'ai eu l'occasion de connaître dans, au moins, deux circonstances antérieures) que je ne vous ai pas adressé [la circulaire concernant l'appel à projet sur les piles à combustible], pas plus qu'à d'autres chimistes du solide. C'est parce que l'objectif essentiel de la recherche confiée au CNRS est l'amélioration des catalyseurs d'électrode. Me souvenant des déboires du premier programme sur les piles à combustible, j'ai, de

¹²⁸⁴ Lettre du directeur adjoint du PIRSEM Pierre Ch. Gravelle à la section 13 du Comité national du CNRS, le 19 novembre 1990, p. 1.

¹²⁸⁵ PSA-Peugeot-Citroën, Direction des recherches et affaires scientifiques, « Pile à combustible pour véhicule électrique », le 7 mars 1994, p. 2.

¹²⁸⁶ Dans ce rapport, Pierre Laffitte écrit au sujet des piles à combustible qu'elles « sont aussi à considérer parmi les solutions pour le développement du véhicule électrique, à côté des filières de batteries NiCd (nickel-cadmium), NiMH (nickel-hydrure métallique), zinc-air et lithium (LiAl-FeS₂) : « [Les piles à combustible] ne nécessitent pas une longue recharge électrique mais le remplissage du "carburant" et éventuellement le changement rapide d'une électrode usée, ce qui pose le problème d'un nouveau circuit de distribution. Deux systèmes pourraient déboucher à moyen terme : avec membrane polymérique échangeuse d'ions ; aluminium-air. Les travaux en cours départageront ces candidats d'ici quelques années et en premier lieu pour les autobus et les camions. L'industrie européenne n'est pas absente ». Source : Pierre Laffitte, « Rapport sur l'intérêt du véhicule électrique au regard de la protection de l'environnement », Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, n°680 (Assemblée nationale), n°70 (Sénat), annexe au procès-verbal de la séance du 2 novembre 1993 au Sénat, première session ordinaire de 1993-1994, p. 25.

¹²⁸⁷ Programme du CNRS, le PIRSEM remplace en 1982 le PIRDES (Programme interdisciplinaire de recherche pour le développement de l'énergie solaire), lui-même fondé en 1975.

plus, souhaité que les projets consistent surtout en un transfert des acquis récents de la catalyse hétérogène vers les électrochimistes et non en une recherche nouvelle. »¹²⁸⁸

Après leur réorientation vers les théories de la physique des solides dans les années soixante-dix, les recherches sur les piles à combustible sont cette fois redirigées vers l'amélioration technique des catalyseurs d'électrode au moyen d'un transfert des connaissances acquises dans le domaine de la catalyse hétérogène. Au sein du réseau social, un nouveau collectif de pensée est né. Et composé en grande majorité d'individus et d'institutions n'ayant pas participé aux programmes antérieurs lancés par la DGRST¹²⁸⁹, il développe un nouveau style de pensée. Un prolongement logique de notre travail pourrait ainsi se situer autour de l'analyse de cette singularité.

¹²⁸⁸ Lettre de Pierre Ch. Gravelle à Jean Rouxel, le 25 juin 1991, p. 1.

¹²⁸⁹ En 1993, les acteurs collaborant au projet sont : Jacques Rozière du Laboratoire des agrégats moléculaires et des matériaux inorganiques de Montpellier ; Pierre Gallezot de l'Institut de recherche sur la catalyse du CNRS à Villeurbanne ; M. Savy du LCEMI du CNRS de Meudon ; M. O. Delcourt du Laboratoire de physico-chimie des rayonnements de l'Université Paris-Sud ; Sylvie Escribano du Centre d'études nucléaires de Grenoble ; Yves Piffard de l'Institut des matériaux de l'Université de Nantes ; Ginette Leclercq du Laboratoire de catalyse hétérogène et homogène du CNRS à Villeneuve d'Ascq ; J. M. Latour du Centre d'études nucléaires de Grenoble ; R. Durand du CREMGP de l'ENSEEG à Grenoble ; R. Guillard du Laboratoire de synthèse et d'électrosynthèse organométallique de l'Université de Dijon ; P. Aldebert du Centre d'études nucléaires de Grenoble ; Guy Bronoël de la SORAPEC ; Sylvain Miachon du Centre d'études nucléaires de Grenoble ; Claude Lamy du Laboratoire de Chimie 1 Électrochimie et interactions de l'Université de Poitiers ; C. Poinsignon du Laboratoire d'ionique et d'électrochimie du solide de Grenoble ; M. L'Her de l'URA CNRS 322 de l'Université de Bretagne occidentale ; Frédéric Novel-Cattin de la Direction des recherches de Renault à Rueil-Malmaison ; Michel Grégoire du Centre d'études nucléaires à Cadarache ; Thierry Alleau du Centre d'études nucléaires de Grenoble ; J. C. Griesemann de la Direction des recherches de Renault à Rueil-Malmaison ; L. Mangane du Centre d'études nucléaires de Saclay ; Jean-Pierre Lisse de la Direction des recherches et affaires scientifiques de Peugeot à Velizy-Villacoublay. Source : PAC-VPE, « Liste des équipes collaborant au projet VPE "Piles à combustibles" ». Réunion le 2 décembre 1993 à Meudon à partir de 9h30 », 1993, pp. 1-2.

LISTE DES FIGURES

<i>Fig. 1 – Schéma de fonctionnement d'une pile H₂-O₂ à membrane échangeuse de protons.....</i>	<i>11</i>
<i>Fig. 2 – Les principaux types de piles à combustible étudiés.....</i>	<i>12</i>
<i>Fig. 3 – Nombre de contrats passés par le gouvernement américain avec des entreprises et des universités entre 1951 et 1965.....</i>	<i>38</i>
<i>Fig. 4 – Tableau du prix comparatif des mélanges combustible + comburant pour un potentiel en énergie donné.....</i>	<i>118</i>
<i>Fig. 5 – Les différentes études financées par le comité « Conversion des énergies » en 1961.....</i>	<i>119</i>
<i>Fig. 6 – Reproduction du tableau fourni au Comité « Conversion des énergies » par Pierre Aigrain lors de la séance du 8 janvier 1960.....</i>	<i>132</i>
<i>Fig. 7 – Le réseau social autour des piles à combustible en France en 1962.....</i>	<i>133</i>
<i>Fig. 8 – Nombre de publications scientifiques traitant des piles à combustible de 1960 à 1965....</i>	<i>143</i>
<i>Fig. 9 – Analyse factorielle des correspondances entre les différents laboratoires et les thèmes de leurs publications entre 1960 et 1965.....</i>	<i>143</i>
<i>Fig. 10 – Le réseau social autour des piles à combustible en France en 1965.....</i>	<i>164</i>
<i>Fig. 11 – Répartition des crédits proposée par la commission « Piles à combustible » en 1966 ...</i>	<i>170</i>
<i>Fig. 12 – Le réseau social autour des piles à combustible en France en 1967.....</i>	<i>205</i>
<i>Fig. 13 – Le réseau social autour des piles à combustible en France en 1973.....</i>	<i>247</i>
<i>Fig. 14 – Représentation du paradigme hydrogénique formulé au milieu des années soixante-dix</i>	<i>276</i>
<i>Fig. 15 – Le réseau social autour des piles à combustible en France en 1975.....</i>	<i>277</i>
<i>Fig. 16 – Le réseau social autour des piles à combustible en France en 1977-1978.....</i>	<i>317</i>

BIBLIOGRAPHIE

Épistémologie, histoire et sociologie des sciences et des techniques

AKRICH, Madeleine, « La construction d'un système socio-technique. Esquisse pour une anthropologie des techniques », in *Anthropologie et sociétés*, Vol 2, n°13, 1989, pp. 31- 51.

BACHELARD, Gaston, *Le nouvel esprit scientifique*, Les classiques des sciences sociales, 1968 (1938).

BARNES, Barry, *Interests and the Growth of Knowledge*, Routledge and Kegan Paul, 1977.

BELL, Genevieve, DOURISH, Paul, « Yesterday's Tomorrows: Notes on Ubiquitous Computing's Dominant Vision », in *Personal and Ubiquitous Computing*, Vol. 11, n°2, 2007, pp. 133-143.

BENSAUDE-VINCENT, Bernadette, *Les vertiges de la technoscience. Façonner le monde atome par atome*, Éditions La découverte, 2009.

BIJKER, Wiebe E., *Of Bicycles, Bakelites, and Bulbs. Toward a Theory of Sociotechnical Change*, The MIT Press, 1995.

BOURDIEU, Pierre, « Le champ scientifique », in *Actes de la recherche en sciences sociales*, Vol. 2, n°2-3, 1976, pp. 88-104.

BOURDIEU, Pierre, *Science de la science et réflexivité*, Raisons d'agir, 2001.

CRANE-HERVE, Diana, LECUYER, Bernard-Pierre, « La diffusion des innovations scientifiques », in *Revue française de sociologie*, Vol. 10, n°2, 1969, pp. 166-185.

CROMBIE, Alistair C., *Styles of Scientific Thinking in the European Tradition: The History of Argument and Explanation Especially in the Mathematical and Biomedical Sciences and Arts*, Duckworth, 1994.

DAUMAS, Maurice, *Histoire générale des techniques, tome IV*, Presses universitaires de France, 1978.

DEFRANCE, Corinne, KWASCHIK, Anne, *La guerre froide et l'internationalisation des sciences*, CNRS Éditions, 2016.

EDGERTON, David, « L'État entrepreneur de science », in BONNEUIL, Christophe, PESTRE, Dominique (dir.), *Histoire des sciences et des savoirs. 3. Le siècle des technosciences*, Éditions du Seuil, 2015, pp. 67-84.

- EDGERTON, D.E.H., HORROCKS, S.M., « British Industrial Research and Development Before 1945 », in *Economic History Review*, Vol. 47, n°2, 1994, pp. 213-238.
- EHRHARDT, Caroline, « *How Mathematicians Remember?* », in *Cahiers de l'UNESCO*, 2012, pp. 103-120.
- FLECK, Ludwik, *Genèse et développement d'un fait scientifique*, Flammarion, 2008.
- FLICHY, Patrick, « La question de la technique dans les recherches sur la communication », in *Sociologie de la communication*, Vol. 1, n°1, 1997, pp. 51-62.
- FLICHY, Patrick, *L'innovation technique : récents développements en sciences sociale : vers une nouvelle théorie de l'innovation*, La découverte, 1995.
- FOCSANEANU, Lazar, « Le Droit international de la recherche scientifique et technique », in *Annuaire français de droit international*, Vol. 12, n°1, 1966, pp. 377-408.
- FREEMAN, Linton C., *The Development of Social Network Analysis. A Study in the Sociology of Science*, Empirical Press, 2004.
- FRERY, Frédéric. « “Où en est l'innovation aujourd'hui ?” », in *Entreprendre & Innover*, Vol. 18, n°2, 2013, pp. 82-87.
- GALISON, Peter, « The Many Faces of Big Science », in GALISON, Peter, HEVLY, Bruce (éd.), *Big Science: The Growth of Large-Scale Research*, Stanford University Press, 1992, pp. 1-20.
- GEELS, Frank, SCHOT, Johan, « Typology of Sociotechnical Transition Pathways », in *Research Policy*, n°36, 2007, pp. 399-417.
- GIERYN, Thomas, « Boundary-Work and the Demarcation of Science from Non-Science: Strains and Interests in Professional Ideologies of Scientists », in *American Sociological Review*, Vol. 48, n°6, 1983, pp. 781-795.
- GILLE, Bertrand, « La notion de “système technique” : essai d'épistémologie technique », in *Culture technique*, n°1, 1979, pp. 8-18.
- GUCHET, Xavier, « Les technosciences : essai de définition », in *Philonsorbonne*, n°5, 2001, pp. 83-95.
- HACKING, Ian, « Styles of Scientific Thinking or Reasoning: A New Analytical Tool for Historians and Philosophers of the Sciences », in GAVROGLU, Kostas, CHRISTIANIDIS, Jean, NICOLAIDIS, Efthymios (éd.), *Trends in the Historiography of Science*, Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 151, Springer-Dordrecht, 1994, pp. 31-48.

- HALSBURY, The Earl of, « The work of the National Research Development Corporation », in *Journal of the Royal Society of Arts*, Vol. 100, n°4875, 1952, pp. 510-526.
- HARTER, Hélène, « NSF, la recherche *made in USA* », in *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], n°23, 2008, mis en ligne le 3 janvier 2011.
- HENDRICKSON, Kenneth E., *The Encyclopedia of the Industrial Revolution in World History, Volume 3*, The Rowman & Littlefield Publishing Group, Inc., 2015.
- HORROCKS, Sally M., « Enthusiasm Constrained? British Industrial R&D and the Transition from War to Peace, 1942–51 », in *Business History*, Vol.41, n°3, 1999, pp. 42-63.
- HORROCKS, Sally M., « The Royal Society, its Fellows and Industrial R&D in the Mid Twentieth Century », in *Notes and Records of the Royal Society of London*, Vol. 64, Sup. 1, pp. S.31-S42.
- HOTTOIS, Gilbert, « La technoscience : de l'origine du mot à ses usages actuels », in *Recherche en soins infirmiers*, Vol. 3, n°86, 2006, pp. 24-32.
- HUNDLEY, Richard O., *Past Revolutions, Future Transformations. What can the history of revolutions in military affairs tell us about transforming the U.S. military?*, National Defense Research Institute, Rand, 1999.
- KEITH, S. T., « Inventions, Patens and Commercial Development from Governmentally Financed Research in Great Britain: The Origins of the National Research Development Corporation », in *Minerva*, Vol. 10, n°1, 1981, pp. 92-122.
- KHUN, Thomas S., *La structure des révolutions scientifiques*, Flammarion, 2008 (1962).
- MERTON, Robert K., *The sociology of Science*, Chicago University Press, 1973.
- POLANYI, Michael, *The Republic of Science. Its Political and Economic Theory*, Minerva, 1962, pp. 54-73.
- RAND, Myron J., *Industrial Research Laboratories of the United States Including Consulting Research Laboratories*, Bulletin of the National Research Council, 1950 (9^{ème} édition augmentée).
- REGIS, Ed, *The Hindenburg Disaster and the Birth of Pathological Technology*, Basic Books, 2015.
- SOPPELSA, Jacques, « La stratégie américaine et le complexe militaro-industriel (1945-1983) », in *Revue française d'études américaines*, n°21/22, 1984, pp. 363-373.
- SOREL, Jean-Jacques, « Le retard technologique de l'Europe », in *Esprit, Nouvelle série*, Vol. 11, n°365, 1967, pp. 755-775.
- THARGARD, Paul, « Collaborative Knowledge », in *Noûs*, n°31, 1997, pp. 241-262.

THIEBAULT, Jean-Louis, « “Complexe militaro-industriel” : notion critique ou théorique ? », in *Cahiers Internationaux de Sociologie*, Vol. 75, 1983, pp. 215-237.

WINNER, Langdon, « Do Artifacts Have Politics? », in *Daedalus*, Vol. 109, n°1, 180, pp. 121-136.

WISSELGREN, Per, *The Social Scientific Gaze. The Social Question and the Rise of Academic Social Science in Sweden*, Routledge, 2017 (2015).

Histoire des sciences physiques et chimiques

BARUCH, Pierre, BANTIGNY, Ludivine, « Pierre Aigrain et le Laboratoire de physique des solides de l'École normale supérieure Genèse et développements des semi-conducteurs : 1948-1965 », in *Bulletin de la Société Française de Physique*, 136, 2002, pp. 4-11.

BIANCO, Pierre, *De la pile de Volta à la conquête de l'espace. Deux siècles d'électrochimie (1799-1999)*, Publications de l'Université de Provence, 1998.

BLONDEL-MEGRELIS, Marika, « La catalyse côté français », in *La catalyse en France : une aventure*, 2007, publié par la SFC à l'occasion du 13ème Congrès International sur la catalyse, Paris, Juillet 2004, pp. 1-30.

DESMOND, Kevin, *Innovators in Battery Technology. Profiles of 95 Influential Electrochemists*, McFarland & Company, Inc., Publishers, 2016.

FOX, Robert, GOODAY, Graeme, *Physics in Oxford, 1839-1939. Laboratories, Learning and College Life*, Oxford University Press, 2005.

FRIEDEL, Jacques, *Graine de mandarin*, Éditions Odile Jacob, 1994.

GUERON, Jules, MAGAT, Michel, « A History of Physical Chemistry in France », in *Annual Review of Physical Chemistry*, Vol. 22, 1971, pp. 1-25.

HODDESON, Lillian, « The Discovery of the Point-Contact Transistor », in *Historical Studies in the Physical Sciences*, Vol. 12, n°1, 1981, pp. 41-76.

KOUNELIS, Catherine, « Georges Champetier (1905-1980) », in LESTEL, Laurence (dir.), *Itinéraires de chimistes. 1857-2007, 150 ans de chimie en France avec les présidents de la SFC*, EDP Sciences, 2007, pp. 67-72.

LATOURE, Bruno, « Joliot : L'Histoire et la Physique mêlées », in SERRES, Michel, *Éléments d'Histoire des sciences*, Paris, Bordas, 1989, pp. 493-513.

- MEDARD, Louis, TACHOIRE, Henri, *Histoire de la thermochimie. Prélude à la thermodynamique chimique*, Presses universitaires de Provence, 1994.
- PLUNKETT, Roy J., « The History of Polytetrafluoroethylene: Discovery and Development », in KIRSHENBAUM, Gerald S., *High Performance Polymers: Their Origin and Development*, Proceedings of the Symposium on the History of High Performance Polymers at the American Chemical Society Meeting held in New York, April 15–18, 1986, pp. 261-266.
- POTIER, Pierre, « La création de l'institut de chimie des substances naturelles à Gif-sur-Yvette par M. M. Janot », in *Revue d'histoire de la pharmacie*, Vol. 84, n°312, 1996, pp. 459-463.
- PROVOST, Sylvie, « Audubert, René (1892-1957). Chargé de cours (1946-1956) puis Professeur d'Électrochimie (1956-1957) », in *Histoire biographique de l'enseignement*, Vol. 19, n°1, 1994, pp. 132-138.
- PROVOST, Sylvie, « Le train pour l'évasion de Paul Langevin (2 au 5 mai 1944) », in *Rails et histoire*, 2015 (2000).
- RESNICK, Paul R., « A Short History of Nafion », in *L'actualité chimique*, n°301-302, 2006, pp. 144-147.
- SAWERYSYN, Jean-Pierre, *et al.*, « Jean-Eugène Germain (1922-2002). Période lilloise (1954-1966) », in BOIVIN, Jean-Claude, *et al.*, *Histoire de la chimie à la Faculté des sciences et à l'Université des sciences et technologies de Lille de 1950 à 1986*, Association de solidarité des anciens, Université de Lille 1, 2012, pp. 1-46.
- STRADINS, Janis, « Alexander N. Frumkin and the Electrochemistry of the 20th Century », in *Electrochimica Acta*, Vol. 42, n°5, 1997, pp. 731-736.
- TEISSIER, Pierre, « Bonnemay Maurice (1914-1992). Chaire d'électrochimie du Cnam », in *Cahiers d'histoire du Cnam*, Vol. 4, 2015, pp. 41-56.
- TEISSIER, Pierre, « Le laboratoire de Robert Collongues (1950-2000). Une école de recherche aux débuts de la chimie du solide », in *L'actualité chimique*, n°294, 2006, pp. 50-59.
- TEISSIER, Pierre, *L'émergence de la chimie du solide en France (1950-2000). De la formation d'une communauté à sa dispersion*, thèse soutenue à l'Université de Paris X-Nanterre le 12 décembre 2007.
- TEISSIER, Pierre, « Paul Hagenmuller. Itinéraire de l'enfant terrible de la chimie du solide française », in *L'actualité chimique*, n°319, 2008, pp. 3-15.
- TRAVERS, Christine, « Jean-Claude Balaceanu (1923-2004) », in LESTEL, Laurence (dir.), *Itinéraires de chimistes. 1857-2007, 150 ans de chimie en France avec les présidents de la SFC*, EDP Sciences, 2007, pp. 23-25.

TREMILLON, Bernard, « L'évolution de l'électrochimie. De la pile de Volta aux nanotechnologies », in *L'actualité chimique*, n°327-328, 2009, pp. 13-16.

VOILLEQUIN, Baptiste, *Contribution à l'histoire de la catalyse en France (1944-2004) : dynamiques disciplinaires et régimes de production de savoir*, thèse de doctorat soutenue à Paris X, 2008.

Histoire des sciences et des techniques en France

ACOT, Pascal, « Le colloque international du CNRS sur l'écologie (Paris, 20-25 février 1950) », in DEBRU, Claude, *et al.* (éd.), *Les sciences biologiques et médicales en France, 1920-1950*, 1994, pp. 233-240.

BELOT, Robert, *L'atome et la France. Aux origines de la technoscience française*, Odile Jacob, 2015.

BERGOUNIOUX, Michel, « Le Service technique des télécommunications de l'air », in BERGOUNIOUX, Michel (éd.), *L'électronique*, CHEAr/DHAr, 2003, pp. 15-24.

BOUCHARD, Julie, *Comment le retard vient aux Français, Analyse d'un discours sur la recherche, l'innovation et la compétitivité, 1940-1970*, Presses Universitaires du Septentrion, 2008.

CACALY, Serge, « Jacques-Émile Dubois, l'homme-frontière », in *Documentaliste-Sciences de l'Information*, Vol. 42, n°2, 2005, pp. 132-134.

CARLIER, Claude, « La France face à trois révolutions technologiques : le moteur à réaction, le missile balistique et la bombe atomique », in *Guerres mondiales et conflits contemporains*, Vol. 2, n°238, 2010, pp. 65-80.

CHARBONNIER, Georges, *Entretiens avec Pierre Aigrain sur l'homme de science dans la société contemporaine*, Presses universitaires de France, 1966.

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

CHEVASSUS-AU-LOUIS, Nicolas, *Savants sous l'Occupation. Enquête sur la vie scientifique française entre 1940 et 1944*, Éditions du Seuil, 2004.

CREMIEUX-BRILHAC, Jean-Louis, « La politique de la recherche sous la IV^{ème} République », Conférence avec Jean-Louis Crémieux-Brilhac au séminaire du professeur Antoine Prost, Centre Malher, Paris I, le 26 juin 1986.

DOSSO, Diane, « Les scientifiques français réfugiés en Amérique et la France Libre », in *Matériaux pour l'histoire de notre temps*, Vol. 60, n°1, 2000, pp. 34-40.

DUCLERT, Vincent, « Pierre Mendès France et la recherche. L'avenir d'une politique », in *Matériaux pour l'histoire de notre temps*, Vol. 63, n°1, 2001, pp. 119-131.

GALVEZ-BEHAR, Gabriel, « Louis Pasteur, entrepreneur. Pour une histoire économique des mondes savants », 2016, <halshs-01267638v4>, pp. 1-47.

GIDEL, Henry, *Marie Curie*, Flammarion, 2008.

GILPIN, Robert, *France in the Age of the Scientific State*, Princeton University Press, 1968.

GUIBERT, Roger, « Le Service de la recherche de la SNCF vu par Roger Guibert », *Revue d'histoire des chemins de fer* [En ligne], n°39, 2008, mis en ligne le 01 juin 2011.

GUTHLEBEN, Denis, *Histoire du CNRS de 1939 à nos jours. Une ambition nationale pour la science*, Armand Colin, 2013 (2009).

JACQ, François, « Aux sources de la politique de la science : mythe ou réalités ? (1945-1970) », in *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], n°6, 2002, mis en ligne le 5 juillet 2007.

JACQ, François, « Le laboratoire au cœur de la reconstruction des sciences en France, 1945-1965. Formes d'organisation et conceptions de la science », in *Les cahiers du Centre de Recherches historiques* [En ligne], n°36, 2005, mis en ligne le 1^{er} juin 2011.

JACQ, François, *Pratiques scientifiques, formes d'organisation et représentations politique de la science dans la France de l'après-guerre. La « politique de la science » comme énoncé collectif (1944-1962)*, thèse de doctorat, Paris, Ecole des mines, 1996.

JACQ, François, « Quel devenir pour les systèmes de recherche issus de la Seconde Guerre mondiale et de la guerre froide ? », in *Annales des Mines*, février 1998, pp. 1-6.

JARRIGE, François, « “Mettre le soleil en bouteille” : les appareils de Mouchot et l'imaginaire solaire au début de la Troisième République », in *Romantisme*, Vol. 4, n°150, 2010, pp. 85-96.

JARRY, Jean, *L'aventure des bathyscaphes. Marins, ingénieurs et savants au plus profond des mers*, Éditions du Gerfaut, 2003.

KROPFINGER, Gwanaël, *Henri Longchambon (1896-1969)*, mémoire de Maîtrise dirigé par François Caron, présenté à l'Université de Paris IV- Sorbonne en juin 1997.

- LEFEEZ, Sophie, *L'illusion technologique dans la pensée militaire*, Nuvis, 2017.
- MAREC, Jean-Pierre, *Un demi-siècle d'aéronautique en France. Centres et moyens d'essais, Tome I*, Les cahiers COMAERO, 2013.
- MARNOT, Bruno, « Le budget du CNRS de 1969 à 2000. », in *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], n°26, 2010, mis en ligne le 24 février 2013.
- MEDARD, Frédéric, « Le Sahara, enjeu scientifique et technologique », in JAUFRET, Jean-Charles, VAÏSSE, Maurice (dir.), *Militaires et guérilla dans la guerre d'Algérie*, Actes du colloque de Montpellier des 5 et 6 mai 2000 organisé par le Centre d'études d'histoire de la Défense et l'UMR n°5609, Société, Idéologies, Défense, du CNRS, pp. 237-252.
- MENAHÉM, Georges, « La direction de l'effort scientifique français par l'armée », in *Réseaux*, Vol. 4, n°17, 1986, pp. 45-75.
- MONGIN, Dominique, « Aux origines du programme atomique militaire français », in *Matériaux pour l'histoire de notre temps*, Vol. 31, n°1, 1993, pp. 13-21.
- MONGIN, Dominique, « Le rôle des militaires dans le choix de l'arme atomique avant 1958 », in FORCADE, Olivier, DUHAMEL, Eric, VIAL, Philippe (dir.), *Militaires en République, 1870-1962. Les officiers, le pouvoir et la vie publique en France*, Publications de la Sorbonne, 1999, pp. 89-100.
- MOUNIER-KHUN, Pierre, « Calculateurs électroniques et nouveaux systèmes d'armes : interactions Armées/Recherche/Industrie (1946-1959) », in VAÏSSE, Maurice (dir.), *La IVe République et les problèmes d'armement*, Centre d'études d'histoire de la Défense - ADDIM, 1998, pp. 376-405.
- PESTRE, Dominique, « Dix thèses sur les sciences, la recherche scientifique et le monde social, 1945-2010 », in *Le Mouvement Social*, vol. 233, n°4, 2010, pp. 13-29.
- PESTRE, Dominique, « Les missiles balistiques et la création de la DMA », in *Les origines de la Délégation générale pour l'armement*, Comité pour l'histoire de l'armement, 2002, pp. 163-173.
- PESTRE, Dominique, « Les physiciens dans les sociétés occidentales de l'après-guerre. Une mutation des pratiques techniques et des comportements sociaux et culturels », in *Revue d'histoire moderne et contemporaine*, Vol. 39, 1992, pp. 56-72.
- PESTRE, Dominique, « Repenser les variantes du complexe militaire-industriel-universitaire », in DAHAN, Amy, PESTRE, Dominique, *Les sciences pour la guerre, 1940-1960*, Éditions de l'EHESS, 2004, pp. 195-221.
- PESTRE, Dominique, « Scientists in Time of War: World War II, the Cold War, and Science in the United States and France », in *French Politics, Culture & Society*, Vol. 24, n°1, 2006, pp. 27-39.

- PESTRE, Dominique, JACQ, François, « Une recomposition de la recherche académique et industrielle en France dans l'après-guerre, 1945-1970 : nouvelles pratiques, formes d'organisation et conceptions politiques », in *Sociologie du travail*, Vol. 38, n°3, 1996, pp. 263-277.
- PICARD, Jean-François, « La création du CNRS », in *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], n°1, 1999, mis en ligne le 06 décembre 2006.
- PICARD, Jean-François, *La république des savants. La recherche française et le CNRS*, Flammarion, 1990.
- PICARD, Jean-François, « L'organisation de la science en France depuis 1870 : un tour des recherches actuelles », in *French Historical Studies*, Vol. 17, n°1, 1991, pp. 249-268.
- PIGANIOL, Pierre, « L'essor des recherches spatiales en France. Quelques souvenirs », in L'Essor des Recherches Spatiales en France : Première rencontre de l'I. F. H. E, « Des Premières Expériences Scientifiques aux Premiers Satellites », Conference held October 24-25, 2000, in Paris. Edited by Brigitte Schürmann. European Space Agency, ESA SP-472, 2001, pp. 21-29.
- PIGANIOL, Pierre, « L'exemple de la DGRST », in *Cahiers de la Fondation Charles de Gaulle*, n°12, 2003, pp. 117-142.
- PINAULT, Michel, *Frédéric Joliot-Curie*, Éditions Odile Jacob, 2000.
- PROST, Antoine, « Les réformes du CNRS (1959-1966) », in *Cahiers pour l'histoire du CNRS. 1939-1989*, n°9, 1990, pp. 1-28.
- PROST, Antoine, « Les origines des politiques de la recherche en France (1939-1958) », in *Cahiers pour l'histoire du CNRS 1939-1989*, n°1, 1988 (reprint), pp. 1-18.
- RAMUNNI, Girolamo, « La création d'un département d'ingénierie au CNRS », in *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], n°13, 2005, mis en ligne le 03 novembre 2007.
- RAMMUNI, Girolamo, « « La réorganisation du Centre national de la recherche scientifique », 7 septembre 1944 », in *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], n°3, 2000, mis en ligne le 20 juin 2007.
- RASMUSSEN, Anne, « Les corps d'ingénieurs militaires et les débuts de la Délégation ministérielle pour l'armement (1961-1968) » in VAÏSSE, Maurice (dir.), *Armement et Ve République, Fin des années 1950-fin des années 1960*, CNRS éditions, 2002, pp. 13-24.
- RIZZO, Jean-Louis, « Pierre Mendès France et la recherche scientifique et technique », in *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], n°6, 2002, mis en ligne le 05 juillet 2007.

SALOMON, Jean-Jacques, « Hubert Curien (1924-2005). Stateman of Science », in *Hermès*, n°42, 2005, pp. 209-213.

SINGER, Claude, « La science française à la dérive. Itinéraires de scientifiques collaborationnistes sous l'occupation allemande », in FUSSMAN, Gérard, *Croyance, raison et déraison*, Odile Jacob, 2006, pp. 291-302.

TEYSSIER, Arnaud, HAUTEFEUILLE, Roland, « Recherche scientifique et politique militaire dans la France d'après-guerre : ambitions et frustrations (1945-1958) », in *Revue historique des armées*, n°2, 1989, pp. 1-16.

VARNOTEAUX, Philippe, « Au cœur de la modernisation des armées, il y a 50 ans le CASDN », in *Armées d'aujourd'hui*, n°231, 1998, pp. 72-74.

WEBER, Jean-Marc, *Un demi-siècle d'aéronautique en France. Études et recherches, Tome I*, Centre des hautes études de l'armement, 2008.

Histoire et sociologie de l'énergie et de l'environnement

BANAL, Michel, « Histoire de l'énergie marémotrice en France », in *La Houille blanche*, n°3, 1997, pp. 14-15.

BARJOT, Dominique, « Reconstruire la France après la Seconde Guerre mondiale : les débuts d'Électricité de France (1946-1953) », in *Entreprises et histoire*, Vol. 1, n°70, 2013, pp. 54-75.

BARTHE, Yannick, « Les qualités politiques des technologies. Irréversibilité et réversibilité dans la gestion des déchets nucléaires », in *Tracés. Revue de Sciences humaines* [en ligne], n°16, 2009, mis en ligne le 20 mai 2011.

BELTRAN, Alain, « La politique énergétique de la France au XXe siècle : une construction historique », in *Annales des Mines*, août 1998, pp. 6-10.

BONNEFILLE, René, « Les réalisations d'Électricité de France concernant l'énergie éolienne », in *La Houille blanche*, n°1, 1975, pp. 45-66.

BONNEFILLE, René, « Les réalisations d'Électricité de France concernant l'énergie marémotrice », in *La Houille blanche*, n°2, 1976, pp. 87-143.

BOUVIER, Yves, *Connexions électriques. Technologies, hommes et marchés dans les relations entre la Compagnie générale d'électricité et l'État, 1898-1992*, P.I.E. Peter Lang, 2014.

BOUVIER, Yves, « La recherche, interface privilégiée entre la Compagnie générale d'électricité et l'État (années 1950-années 1990), in FRIDENSON, Patrick, GRISET, Pascal (dir.), *Entreprises de haute technologie, État et souveraineté depuis 1945*, Comité pour l'histoire économique et financière de la France, 2013, pp. 65-78.

CHARVOLIN, Florian, *L'invention de l'environnement en France. Chronique anthropologique d'une institutionnalisation*, Éditions La découverte, 2003.

CHATEAURAYNAUD, Francis, « Sociologie argumentative et dynamique des controverses : l'exemple de l'argument climatique dans la relance de l'énergie nucléaire en Europe », in *A contrario*, Vol. 2, n°16, pp. 131-150.

CHATEAURAYNAUD, Francis, « Trajectoires argumentatives et constellations discursives. Exploration socio-informatique des futurs depuis le nanomonde », in *Réseaux*, Vol. 6, n°188, 2014, pp. 121-158.

CHATEAURAYNAUD, Francis, DEBAZ, Josquin, « Scénariser les possibles énergétiques. Les gaz de schiste dans la matrice des futurs », in *Mouvements*, Vol. 3, n°75, pp. 53-69.

CIPOLLA, Carlo Maria, « Sources d'énergie et histoire de l'humanité », in *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*, Vol. 16, n°3, 1961, 521-534.

COUTROT, Aline, « La création du Commissariat à l'énergie atomique », in *Revue française de science politique*, Vol. 31, n°2, 1981, pp. 343-371.

DEBEIR, Jean-Claude, DELEAGE, Jean-Paul, LEMERY, Daniel, *Une histoire de l'énergie*, Flammarion, 2013.

FONTAINE, Antoine, *De la source à la ressource. Territoires, héritages et coopération autour de la valorisation de l'énergie solaire en Rhône-Alpes*, thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes, soutenue le 18 mai 2018.

GIBRAT, Robert, « L'énergie des marées », in *L'Astronomie*, Vol. 69, 1955, pp. 449-469.

GUILLAUMAT-TAILLIET, François, « La France et l'énergie nucléaire : réflexions sur des choix », in *Revue de l'OFCE*, n°19, 1987, pp. 189-227.

LASCOUMES, Pierre, *L'éco-pouvoir : environnements et politiques*, La découverte, 1994.

LE RENARD, Claire, « Les débuts du programme électronucléaire français (1945-1974) : de l'exploratoire à l'industriel », in *Hérodote*, Vol. 2, n°165, 2017, pp. 53-66.

- MARREC, Anaël, « Politiques des forces naturelles et imaginaires de l'énergie pendant l'entre-deux-guerres, *Pour mémoire. Revue des ministères de l'Environnement, de l'Énergie et de la mer, du Logement et de l'Habitat durable*, n°18, 2016, pp. 83-103.
- MCGUIRE, Patrick, GRANOVETTER, Mark et SCHWARTZ, Michael, « Thomas Edison and the social construction of the early electricity industry in America », in SWEDBERG Richard (éd.), *Explorations in Economic Sociology*, Russell Sage Press, New York, 1993, pp. 213-248 ; GRANOVETTER, Mark, MCGUIRE, Patrick, « The making of an industry: electricity in the United States », in CALLON Michel (éd.), *The laws of the markets*, Oxford: Blackwell, 1998, pp. 147-173.
- MESSMER, Pierre, « Un Premier ministre dans le premier choc pétrolier », in *Mémoires de l'Académie nationale de Metz*, A175, Ser7, 1994, pp. 31-39.
- MORSEL, Henri (dir.), *Histoire de l'électricité en France, Tome troisième, 1946-1987*, Fayard, 1996.
- NICOLON, Alexandre, *Le véhicule électrique*, monographie réalisée dans le cadre d'une ATP – CNRS, « Recherche sur la recherche – Étude de cas d'innovation », décembre 1974.
- NICOLON, Alexandre, *Le véhicule électrique, mythe ou réalité ?*, Éditions de la Maison de la MSH, 1984.
- POUJADE, Robert, « Le premier ministère de l'Environnement (1971-1974). L'invention d'un possible », in *Vingtième Siècle. Revue d'histoire*, Vol. 1, n° 113, 2012, pp 51-54.
- PUISEUX, Louis, « Les bifurcations de la politique énergétique française depuis la guerre », in *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, 37e année, n°4, 1982, pp. 609-620.
- ROME, Adam, *The Bulldozer in the Countryside: Suburban Sprawl and the Rise of American Environmentalism*, Cambridge University Press, 2001.
- TEISSIER, Pierre, « Fours et maisons solaires de Mont-Louis-Odeillo. Interstices, intersciences et internationalismes de la recherche contemporaine. », in BOISTEL, Guy et LE GARS, Stéphane (dir.), *Dans le champ solaire. Cartographie d'un objet scientifique*, Hermann, 2015, pp. 181- 219.
- TEISSIER, Pierre, « Le solaire passif à l'ombre de la politique énergétique française. 1945-1986, in *Annales historiques de l'électricité*, Vol. 1, n°11, 2013, pp. 11-25.
- TOMAIN, Joseph P., « The Dominant Model of United States Energy Policy », in *Faculty Articles and Other Publications*, University of Cincinnati College of Law Scholarship and Publications, Paper 130, 1990, pp. 355-392.
- VARASCHIN, Denis, « Légendes d'un siècle : cent ans de politique hydroélectrique française », in *Annales des Mines*, août 1998, pp. 27-33.

VIETOR, Richard H. K., *Energy Policy in America since 1945. A study of business-government relations*, Cambridge University Press, 1984.

Histoire de la conquête spatiale

BLAMONT, Jacques, « Origines et principes de la politique spatiale de la France », in *Rayonnement du CNRS*, n°48, 2008, pp. 24-32.

BONDIOU-CLERGERIE, Anne, TORTORA, Jean-Jacques, « L'industrie spatiale européenne », in *Annales des Mines – Réalités industrielles*, Vol. 2, 2012, pp. 66-74.

COMPTON, William D., *Where No Man Has Gone Before. A History of Apollo Lunar Exploration Missions*, NASA SP-4214, 1989.

DUBOST, Thomas, « Exploration spatiale et imaginaire populaire américain, 1957-2009 », in *Bulletin de l'Institut Pierre Renouvin*, Vol. 1, n°31, 2010, pp. 31-45.

HACKER, Barton C., GRIMWOOD, James M., *On the Shoulders of Titans. A History of Project Gemini*, NASA SP-4203, 1977.

KRIDGE, J., RUSSO, A., SEBESTA, L., *A History of the European Space Agency, 1958-1987 (Volume II. The Story of ESA, 1973-1987)*, ESA Publications Division, 2000.

LAMY, Jérôme, « Grandeur scientifique et politiques de l'espace : la création et le transfert du CNES (1958-1974) », in *Revue d'histoire moderne et contemporaine*, Vol. 1, n°58, 2011, pp. 156-177.

MCDUGALL, Walter A., *The Heavens and the Earth: A Political History of the Space Age*, Basic Books, Inc., Publishers, 1985.

MOULIN, Hervé, « Les recherches spatiales au temps des comités. Environnement international et contexte national à la fin des années 60 », in *L'Essor des Recherches Spatiales en France: Première rencontre de l'I. F. H. E.*, « Des Premières Expériences Scientifiques aux Premiers Satellites », Conference held October 24-25, 2000, in Paris. Edited by Brigitte Schürmann. European Space Agency, ESA SP-472, 2001, pp. 13-19.

NEAL, Homer A., SMITH, Tobin L. et MCCORMICK, Jennifer B., *Beyond Sputnik, U.S. Science Policy in the Twenty-First Century*, The University of Michigan Press, 2011 (2008).

PASCO, Xavier, *La politique spatiale des États-Unis, 1958-1995. Technologie, intérêt national et débat public*, Éditions L'Harmattan, 1997.

PENEZ, Jérôme, « L'essor de la politique spatiale française (1959-1964) », in *Vingtième siècle, revue d'histoire*, Vol. 50, n°1, 1996, pp. 132-136.

ROSHOLT, Robert L., *An Administrative History of NASA, 1958-1963*, NASA SP-4101, 1966.

TROCHON, Jean-Marc, « Les États-Unis à la conquête de la Lune », in *Vingtième Siècle. Revue d'histoire*, n° 57, 1998, pp. 3-18.

VARNOTEAUX, Philippe, « La naissance de la politique spatiale française », in *Vingtième Siècle. Revue d'histoire*, Vol. 1, n°77, 2003, pp.59-68.

VARNOTEAUX, Philippe, « La part du CNRS dans les débuts de la conquête de l'espace (1945-1965) », in *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], n°6, 2002, mis en ligne le 05 juillet 2007.

Histoire et sociologie de la recherche sur les piles à combustible

ANDÚJAR, J. M., SEGURA, F., « Fuel Cells: History and Updating. A Walk along Two Centuries », in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, 2009, pp. 2309-2322.

APPLEBY, A.J., « From William Grove to Today: Fuel Cells and the Future », in *Journal of Power Sources*, n°29, 1990, pp. 3-11.

AUSTIN, Leonard G., *Fuel Cells: A Review of Government Sponsored Research, 1950-1964*, NASA SP-120, 1967.

AUTRUFFE, Hubert, « Évolution des recherches sur les piles à combustible », in *Revue générale des chemins de fer*, 91^{ème} année, janvier 1972.

BACON, Francis T., « Fuel Cells, Past, Present and Future », in *Electrochimica Acta*, Vol. 14, 1969, pp. 569-585.

BACON, Francis T., « The Fuel Cell: Some Thoughts and Recollections », in *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 126, n°1, 1979, pp. 7C-17C.

BELOT, Robert, PICARD, Fabienne, « The Three Ages of Fuel Cell Research in France: A Socio-Technical System's Resistance to Change », in *Fuel Cells*, Vol. 14, n°3, 2014, pp. 525-532.

BENTO, Nuno, « Le défi du déploiement des nouveaux réseaux énergétiques : quel rôle pour l'État ? », in *Vie & sciences de l'entreprise*, Vol. 1, n°190, 2012, pp. 71-94.

BENTO, Nuno, ANGELIER, Jean-Pierre, « La transition vers l'hydrogène est-elle bloquée par un verrouillage technologique au profit des énergies fossiles ? », *Cahier de recherche LEPII*, n°27, 2009, pp. 1-21.

- CALLON, Michel, « L'agonie d'un laboratoire », in CALLON, Michel (dir.), *La science et ses réseaux. Genèse et circulation des faits scientifiques*, Éditions La découverte, 1989, pp. 173-214.
- CALLON, Michel, « L'État face à l'innovation technique : le cas du véhicule électrique », in *Revue française de science politique*, Vol. 29, n°3, 1979, pp. 426-447.
- CALLON, Michel, *Production des technologies nouvelles et appropriation du long terme. Le cas de deux actions concertées : conversion des énergies et électrotechnique nouvelle, Le véhicule électrique*, point nodal 1, Cordes, 1978.
- CALLON, Michel, CHAPUIS, C. *La production des marchés*, CORDES, 1978.
- CHAPUIS, C., *La transformation d'un projet scientifique en affaire d'Etat. De la pile à combustible au véhicule électrique : l'Aide au développement*, CORDES, mars 1978.
- CHEN, Eric, « History », in HOOGERS, Gregor (éd.), *Fuel Cell Technology Handbook*, CRC Press, 2003, pp. 2/1-2/40.
- EISLER, Matthew N., « A Modern 'Philosopher Stone': Techno-Analogy and the Bacon Cell », in *Technology and Culture*, Vol. 50, n°2, 2009, pp. 345-365.
- GIRAUD, Gérard, *L'hydrogène vecteur d'énergie*, thèse de doctorat de troisième cycle, EHES, 1983.
- GUTH, Ulrich, « Hans-Heinrich Möbius and the Development of Electrochemistry with Solid Electrolytes », in SCHOLZ, Fritz (éd.), *Electrochemistry in a Divided World*, Springer International Publishing, 2015, pp. 431-443.
- MARKANTONATOS, Panagiotis, « Fuel Cell R&D within the European Framework Programmes », in AVADIKYAN, Arman, COHENDET, Patrick, HERAUD, Jean-Alain, *The Economic Dynamics of Fuel Cell Technologies*, Springer, 2003, pp. 207-232.
- MILLET, Jacques, « Histoire abrégée des piles à combustible en France », in *Bulletin d'histoire de l'électricité*, n°27, 1996, pp. 175-178.
- MÖBIUS, Hans-Heinrich, « On the History of Solid Electrolyte Fuel Cells », in *Journal of Solid State Electrochemistry*, n°1, 1997, pp. 2-16.
- PERRY, M. L., FULLER, T. F., « A Historical Perspective of Fuel Cell Technology in the 20th Century », in *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 149, n°7, 2002, pp. S59-S67.
- PICARD, Fabienne, REY, Bénédicte, « Diffusion socio-technique de la pile à combustible en France. Éléments d'appréciation à partir du regard des chercheurs », in ZELEM, Marie-Christine, BESLAY,

Christophe, *Sociologie de l'énergie. Gouvernance et pratiques sociales*, CNRS Éditions, 2015, pp. 205-212.

RABEHARISOA, Vololona, « A Special Mediation Between Science and Technology: When Inventors Publish Scientific Articles in Fuel Cell Research », in GRUPP, Hariolf (éd.), *Dynamics of Science-Based Innovation*, Springer-Verlag, 1992, pp. 45-72.

SCHAFFER, Gerrit Jan, *Fuel Cells for the future. A contribution to technology forecasting from a technology dynamics perspective*, thèse de doctorat, Université de Twente, 1998.

SIMONCINI, Nicolas, *et al.*, « Social Aspects of H2 Supply Chains – Hydrogen Technologies Genesis and Development. The Case of Myrte Plateform », in AZZARO-PANTEL, Catherine, *Hydrogen Supply Chain: Design, Deployment and Operation*, Elsevier, 2018, pp. 293-307.

TEISSIER, Pierre, « From the Birth of the Fuel Cells to the Utopia of the Hydrogen World », in BENSAUDE-VINCENT, Bernadette, *et al.* (éd.), *Research Objects in Their Technological Setting*, Routledge, 2017, p. 70-86.

WILLIAMS, K.R., « Francis Thomas Bacon, 21 December 1904-24 May 1992 », in *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, Vol. 39, 1994, pp. 2-18.

Historiographie et histoire contemporaine

BERSTEIN, Serge, *La France de l'expansion, 1. La République gaullienne (1958-1969)*, Éditions du Seuil, 1989.

BLOCH, Marc, *Les caractères originaux de l'histoire rurale française*, Armand Colin, 1931.

BRAUN, Helmut, BRUGMEIER, Klaus, « Understanding Why Airships lost the sky to aeroplanes », Communication paper, Annual Conference of the Economic History Society, University of Durham, 26-28 march 2010, pp. 80-85.

BRONIEWSKI, Bogdan, *Une vie dans le siècle. Tome 2. L'aventure américaine*, Éditions Le Manuscrit, 2014.

BURRIN, Philippe, *La France à l'heure allemande, 1940-1944*, Éditions du Seuil, 1995.

BUTON, François, MARIOT, Nicolas, entrée « Socio-histoire » du Dictionnaire des idées, 2^{ème} volume de la collection des « Notionnaires » de l'Encyclopédie Universalis, 2006, pp. 731-733.

CHATRIOT, Alain, *Pierre Mendès France. Pour une République moderne*, Armand Colin, 2015.

- COMMISSION EUROPÉENNE, *La commission européenne 1928-1972. Histoire et mémoires d'une institution*, Office des publications de l'Union européenne, 2014.
- DEBRE, Michel, *Gouverner, Mémoires, Tome III, 1958-1962*, Albin Michel, 1988.
- DE GAULLE, Charles, *Mémoires de guerre, L'appel, 1940-1942*, Plon, 1954.
- DE GAULLE, Charles, *Mémoires d'Espoir, Tome I, Le Renouveau, 1958-1962*, Éditions Plon, 1970.
- DESCHAMPS, Florence, *L'historien, l'archiviste et le magnétophone. De la constitution de la source orale à son exploitation*, Institut de la gestion publique et du développement économique, 2005 (en ligne).
- DIENEL, Hans-Liudger, SCHIEFELBUSCH, Martin, « German Commercial Air Transport until 1945 », in *Revue belge de philologie et d'histoire*, n°78, 2000, pp. 945-967.
- GAILLARD, Florence, « La construction symbolique de l'espace européen », in *Hermès, La Revue*, Vol. 2, n°34, 2002, pp. 105-119.
- HAGUE, D. C., et al., *Public Policy and Private Interests. The Institutions of Compromise*, The MacMillan Press Ltd., 1975.
- JOUHAUD, Christian, SHAPIRA, Nicolas, RIBARD, Dinah, *Histoire, Littérature, Témoignage - Écrire les malheurs du temps*, Gallimard, 2009.
- KASPI, André, *Les Américains, 2. Les États-Unis de 1945 à nos jours*, Éditions du Seuil, 1986.
- KUISEL, Richard F., « L'américan way of life et les missions françaises de productivité », in *Vingtième siècle, revue d'histoire*, Vol. 17, n°1, 1988, pp. 21-38.
- LACE, William W., *The Hindenburg Disaster of 1937*, Chelsea House, 2008.
- LACOUTURE, Jean, *Pierre Mendès France*, Éditions du Seuil, 2002 (1981).
- LES ANNALES, « Tentons l'expérience », in *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*, 44e année, N. 6, 1989, pp. 1317-1323.
- MOYER, Robert C., « 'When That Great Ship Went Down': Modern Maritime Disasters and Collective Memory », in *The International Journal of Maritime History*, Vol. 26, n°4, 2014, pp. 734-751.
- NOIRIEL, Gérard, « Journal de terrain, journal de recherche et auto-analyse. Entretien avec Florence Weber », in *Genèses*, Vol. 2, 1990, pp.138-147.
- NOIRIEL, Gérard, *Introduction à la socio-histoire*. La Découverte, 2008.

ODOM, William E., DUJARRIC, Robert, *America's Inadvertent Empire*, Yale University Press, 2004.

OFFENSTADT, Nicolas, entrée « Socio-histoire », in DELACROIX, Christian, DOSSE, François, GARCIA, Patrick, OFFENSTADT, Nicolas (dir.), *Historiographies. Concepts et débats*, Gallimard, 2010.

POLLACK, Michaël, *L'Expérience concentrationnaire, essai sur le maintien de l'identité sociale*, Métailié, 2000.

RIOUX, Jean-Pierre, *La France de la Quatrième République, 1. L'ardeur de la nécessité (1944-1952)*, Éditions du Seuil, 2000, (1980).

RIOUX, Jean-Pierre, *La France de la IVe République, 2. L'expansion et l'impuissance, 1952-1958*, Éditions du Seuil, 2000 (1983).

RUDELLE, Odile, « De Gaulle et la République », in BERSTEIN, Serge, RUDELLE, Odile, *Le modèle républicain*, Presses universitaires de France, 1992, pp. 383-406.

VAÏSSE, Maurice, *La grandeur : politique étrangère du général de Gaulle*, Fayard, 1998.

WEISS, Gus W., « The Farewell Dossier », in *Studies in Intelligence*, Vol. 39, n°5, 1996, pp. 121-126.

Sociologie générale

BEAUD, Stéphane, WEBER, Florence, *Guide de l'enquête de terrain*, La découverte, 2010.

BOCHER, Héloïse, *et al.*, « Réseaux et pouvoir. Logiques de l'informel », in *Hypothèses*, Vol. 1, n°14, 2011, p. 235-246.

DOUGLAS, Mary, *Comment pensent les institutions*, La découverte, 2004 (1986).

FORSE, Michel, « Définir et analyser les réseaux sociaux. Les enjeux de l'analyse structurale », in *Informations sociales*, Vol. 3, n°147, 2008, pp. 10-19.

GOFFMAN, Erving, *Asiles. Études sur la condition sociale des malades mentaux*, Éditions de Minuit, 1968.

GUSFIELD, Joseph, *La Culture des problèmes publics. L'alcool au volant : la production d'un ordre symbolique*, Économica, 2009 [1981].

HALBWACHS, Maurice, *La mémoire collective*, Les classiques des sciences sociales, 2001 (1950).

KATZ, Elihu, LAZARSFELD, Paul, *Personal Influence. The Part played by People in the Flow of Mass Communications*, Transaction Publishers, 2009 (1955).

LAVABRE, Marie-Claire, « La “mémoire collective” entre sociologie de la mémoire et sociologie des souvenirs ? », <halshs-01337854>, 2016, pp. 1-13.

MARTUCCELLI, Danilo, « Les deux voies de la notion d'épreuve en sociologie », in *Sociologie*, vol. 6, n°1, 2015, pp. 43-60.

MOREL, Christian, *Les décisions absurdes : sociologie des erreurs radicales et persistantes*, Gallimard, 2002.

ROGERS, Everett M., *Diffusion of innovations*, The Free Press, 1983 (1963).

ROSA, Hartmut, *Accélération. Une critique sociale du temps*, La découverte, 2010.

STAR, S. L., GRIESEMER, J., « Institutional ecology, 'translations' and boundary objects: amateurs and professionals on Berkeley's museum of vertebrate zoology », in *Social Studies of Science*, n°19, 1989, pp. 387-420.

TROMPETTE, Pascale, VINCK, Dominique, « Retour sur la notion d'objet-frontière », in *Revue d'anthropologie des connaissances*, Vol. 3, no°1, 2009, pp. 5-27.

Sciences humaines et sociales (divers)

BARTHES, Roland, *Mythologies*, éditions du Seuil, 1957.

DESCOLA, Philippe, *Par-delà la nature et la culture*, Gallimard, 2005.

DE TOCQUEVILLE, Alexis, *De la démocratie en Amérique II*, Les classiques des sciences sociales, 2002 (1840).

ERMAKOFF, Ivan, « Contingence historique et contiguïté des possibles », in *Tracés. Revue de Sciences humaines* [En ligne], n°24, 2013, mis en ligne le 01 janvier 2017.

FOUCAULT, Michel, *Surveiller et punir*, Gallimard, 2003 (1975).

JORION, Paul, *Comment la vérité et la réalité furent inventées*, Gallimard, 2009.

MERLEAU-PONTY, Maurice, *Éloge de la philosophie et autres essais*, Les classiques des sciences sociales, 2011 (1953).

MOULIN, Hervé, *Théorie des jeux pour l'économie et la politique*, Hermann, 1981.

NYE, Joseph N., « Soft Power », in *Foreign Policy*, n°80, 1990, pp. 153-171.

PIERSON, Paul, « Path Dependence, and the Study of Politics », in *American Political Science Review*, Vol. 94, n°2, 2000, pp. 251-267.

SEMIONOV, Nikolai, « La science et l'avenir humain », in *La Pensée : revue du rationalisme moderne*, n°98, 1961, pp. 3-14.

Sciences physiques et chimiques, sciences de l'ingénieur

AUDUBERT, René, *Actions de la lumière sur les suspensions*, thèse présentée à la Faculté des sciences de l'Université de Paris, pour obtenir le grade de docteur ès sciences physiques, 1922.

BEZAUDUN, Jean, *Contribution à l'étude des propriétés de catalyseurs au nickel dans leur emploi comme électrode à hydrogène dans une pile à combustible*, Thèse soutenue à l'Université de Lyon, 1964.

BOCKRIS, John O'M., REDDY, Amulya K.N, *Modern Electrochemistry, Volume 2*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000.

BONNEMAY, Maurice, *Recherches photochimiques sur l'acide azoxydrique et ses sels*, thèse présentée à la Faculté des sciences de l'Université de Paris, 1943.

BRONOËL, Guy, *Étude de la cinétique des phénomènes d'adsorption et de transfert de charges par perturbation de la structure cristalline des électrodes*, thèse de doctorat ès Sciences, décembre 1971.

DU MONCEL, Th., *Exposé des applications de l'électricité, Tome premier*, Eugène Lacroix, 1872.

EYRAUD, Paul, *Contribution à l'étude dynamique des adsorbats*, Thèse soutenue à l'Université de Lyon, 1963.

GERL, Maurice, ISSI, Jean-Paul, *Traité des matériaux. 8. Physique des matériaux*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 1997.

HLADIK, Jean, *Les piles électriques*, Collection « Que sais-je ? », Presses universitaires de France, 1965.

LEVART, Eugène, SCHUHMANN, Daniel, « Impédance opérationnelle et impédance classique dans l'analyse des mesures électrochimiques en régime transitoire », in *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, Vol. 21, n°1, 1971, pp. 129-136.

LUCESOLI, Daniel Bernardo, *Contribution à l'étude et la mise au point d'électrodes pour piles hydrogène-air*, thèse de docteur-ingénieur dirigée par Pierre Laffitte et présentée le 26 janvier 1971 à la Faculté des sciences de l'Université de Paris.

MAYE, Pierre, *Générateurs électrochimiques*, Dunod, 2010.

PLANTE, Gaston, *Recherches sur l'électricité*, Gauthier-Villars, 1883.

POINCARÉ, Henri, BLONDIN, J., *Cours de physique mathématique. Thermodynamique*, Gauthier-Villars, 1908.

PRETTRE, Marcel, *Recherches expérimentales sur l'oxydation et l'inflammation des mélanges gazeux combustibles*, thèse présentée à la Faculté des sciences de Paris, 1931.

SALLENAVE, H., « Essai de pluie provoquée », in *Revue forestière française*, n°3, 1968, pp. 170-184.

SERRA, Louis, « La pluie provoquée. Techniques opératoires et contrôle des résultats », in *Cahiers de l'ORSTOM*, vol. XV, n°3, 1978, pp. 281-307.

SERRES, L., *Cours de physique à l'usage des candidats aux Écoles nationales d'arts et métiers*, Ch. Béranger, 1901.

URBAIN, Georges, *L'énergétique des réactions chimiques. Leçons professées à la Sorbonne*, Libraire Octave Doin, 1925.

WATTIAUX, Alain, *Etude du comportement électrocatalytique relatif au dégagement de l'oxygène des pérovskites non-stoechiométriques $La_{1-x}Sr_xFe_{1-z}Co_zO_{3-y}$* , thèse de doctorat ès sciences présentée à l'Université de Bordeaux I, 1985.

WEST, Anthony R., « Solid Electrolytes and Mixed Ionic-Electronic Conductors: An Applications Overview », in *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 1, n°2, 1991, pp. 157-162.

Recherches sur les piles à combustible et l'hydrogène

AUCLAIR, Jean-Michel, « La technologie des piles à combustible », in *Annales des Mines*, Tome XI, 1964.

BACON, Francis T., « Research into the Properties of the Hydrogen/Oxygen Fuel Cell », in *BEAMA Journal*, n°61, 1954, pp. 6-12.

BACON, Francis T., « Research into the Properties of the Hydrogen-Oxygen Cell », in *The Engineer*, 13 août 1954, pp. 226-228.

BACON, Francis T., « The Development and Practical Application of Fuel Cells: Keynote Adress », in *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 10, n°7/8, 1985, pp. 423-430.

BACON, Francis T., « The Fuel Cell: Power Source for the Future », in *The New Scientist*, Vol. 6, n°145, 27 août 1959, pp. 271-274.

BACON, Francis T., FORREST, J.S., « High-Pressure Hydrogen-Oxygen Fuel Cell », in *The Engineer*, Vol. 202, n°5243, 20 juillet 1956, pp. 93-94.

BACON, Francis T., FRY, T.M., « The Development and Practical Applications of Fuel Cells », in *Proceedings of the Royal Society A*, Vol. 334, 1973, pp. 427-452.

BAGOTSKY, Vladimir S., *Fuel Cells, Problems and Solutions*, Wiley, 2012.

BECHERIF, Mohamed, *et al.*, « Hydrogen Energy Storage: New Techno-Economic Emergence Solution Analysis », in *Energy Procedia*, Vol. 74, 2015, pp. 371-380.

BONNEMAY, Maurice, BRONOËL, Guy, LEVART, Eugène, « Applications de la radiographie à l'étude du fonctionnement des électrodes poreuses – II Étude expérimentale des phénomènes électrochimiques et interfaciaux dans les électrodes monotubulaires à triple contact », in *Electrochimica Acta*, Vol. 9, 1964, p. 727-739.

BONNEMAY, Maurice, BRONOËL, Guy, LEVART, Eugène, « Conception et étude électrochimique d'un modèle élémentaire d'électrode poreuse à triple contact », in *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*, note présentée par Georges Champetier, novembre 1963, p. 3394.

BONNEMAY, Maurice, BRONOËL, Guy, LEVART, Eugène, « Étude fondamentale des électrodes de puissance pour piles à combustible », in *Revue générale de l'électricité*, Tome 74, janvier 1965.

BONNEMAY, Maurice, BRONOËL, Guy, LEVART, Eugène, PILLA, Arthur A., POIRIER D'ANGE D'ORSAY, Emmanuel, « Application de l'impulsion galvano-statique à la détermination des paramètres électrochimiques d'une électrode à gaz » in *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*, mai 1964, p. 6139.

BONNEMAY, Maurice, BRONOËL, Guy, LEVART, Eugène, PILLA, Arthur A., POIRIER D'ANGE D'ORSAY, Emmanuel, « Comportement d'un système électrochimique à champ non uniforme en régime transitoire », in *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*, mai 1964, p. 4256.

BREELLE, Yves, BLOCH, Odile, DEGOBERT, Paul, PRIGENT, Michel, *Principes, technologie, applications des piles à combustible*, Technip, 1972.

BREELLE, Yves, DEGOBERT, Paul, « Perspectives d'applications des piles à combustible dissous », in *Annales des Mines*, Tome XI, 1964.

COHN, Ernst M., « An Introduction to Fuel Cells », NASA, janvier 1969.

COHN, Ernst M., « Nasa's Fuel-Cell Program », in YOUNG, George J., LINDEN, Henry R. (éd.), *Fuel Cell Systems*, American Chemical Society, 1969, pp. 1-8.

CROWE, Bernard J., *Fuel Cells. A Survey*, NASA SP-5115, 1973.

CROWE, Bernard J., *Fuel Cells. A Survey*, NASA SP-5115, 1975.

DAVTYAN, Oganés K., *The Problem of Direct Conversion of the Chemical Energy of Fuels into Electrical Energy*, Moscow: Publishing House of the URSS Academy of Sciences, 1947.

EBERLE, Ulrich, FELDERHOFF, Michael, SCHÜTH, Ferdi, « Chemical and Physical Solutions for Hydrogen Storage », in *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 48, 2009, pp. 6608-6630.

EDWARDS, Peter P. *et al.*, « Hydrogen and Fuel Cells: Towards a Sustainable Energy Future », in *Energy Policy*, Vol. 36, 2008, pp. 4356-4362.

EIKERLING, Michael, KULIKOVSKY, Andrei, *Polymer Electrolyte Fuel Cells. Physical Principles of Materials and Operation*, CRC Press, 2015.

FABRE, Jean, « Perspectives de développement comparé des piles à combustible et de la magnétohydrodynamique dans la production industrielle d'énergie électrique », in DGRST, *Les piles à combustible*, Publications de l'Institut français du pétrole, 1965.

GRUBB, Willard T., NIEDRACH, Leonard W., « Batteries with Solid Ion-Exchange Membrane Electrolytes: II. Low-Temperature Hydrogen-Oxygen Fuel Cells », in *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 107, n°2, 1960, pp. 131-135.

GUILLAUME, Jean-Pierre, « Quelques applications militaires des piles à combustible », in DGRST, *Les piles à combustible*, Publications de l'Institut français du pétrole, 1965.

HAUSER, Victor Emerald Jr., *A study of a Carbon Anode Polarization in Fused Carbonate Fuel Cells*, Thèse soutenue à l'Oregon State University, 1964.

HEINZE, E.P.A, « The Erren Hydrogen Engine », in *Engineering*, Nov. 1932, pp. 607-608.

HLADIK, Jean, CABY, Frédéric, MORAND, Geneviève, « Influence du pO₂ sur le potentiel d'oxydation de diverses électrodes dans l'eutectique LiClKCl », in *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*, mai 1964, p. 3296.

KENDALL, Kevin, KENDALL, Michaela, *High-Temperature Solid Oxide Fuel Cells for the 21st Century. Fundamentals, Design and Applications*, Elsevier, 2016.

KERN, Gilbert, BLOCH, Odile, « Sur une électrode de référence utilisable dans les hydroxydes fondus », in *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*, mai 1964, p. 5431.

- KETELAAR, J.A.A., « History », in BLOMEN, Leo J.M.J, MUGERWA, Michael N. (éd.), *Fuel Cell Systems*, Springer, 1993, pp. 28-31.
- KORDESCH, Karl V., *et al.*, « The Safe and Economic Revival of Alkaline Hydrogen/air Fuel Cells with Circulating Electrolytes, Recommended for Vehicles Using Battery Hybrid », in *ECS Transactions*, Vol. 11, n°32, 2008.
- LEHMANN, Gérard, « Piles à combustible et thermodynamique », in *Annales des Mines*, Tome XI, 1964.
- MARECHAL, André, « Préface », in DGRST, *Les piles à combustible*, Publications de l'Institut français du pétrole, 1965.
- MAYEUR, Jean-Pierre, « Perspectives d'applications des piles à combustible », in *Annales des Mines*, Tome XI, 1964.
- RIDEAL, E.K., EVANS, U.R., « The Problem of the Fuel Cell », in *Transactions of the Faraday Society*, Vol. 17, pp. 466-482.
- ROLIN, Maurice, LEHMANN, Gérard, « Pile à combustible utilisant l'oxyde de carbone », in *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des sciences*, mai 1964, p. 3851.
- SALE, Bernard, BREEELLE, Yves, « Les nouveaux systèmes de propulsion envisageables pour les véhicules urbains », in *La revue de l'Institut français du pétrole*, Vol. XXIX, n°6, novembre-décembre 1974.
- SCHMID, Alfred, « Die Diffusionselektrode », in *Helv. Chim. Acta*, Vol. 7, 1924, pp. 370-373.
- SOURIAU, Daniel, « Les applications des piles à combustible à haute température », in DGRST, *Les piles à combustible*, Publications de l'Institut français du pétrole, 1965.
- TAMARU, Setsurō, KAMADA, Minoru, « Brennstoffketten, deren Arbeitstemperatur unterhalb 600°C liegt », in *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, Vol. 41, n°2, 1935, pp. 93-96.
- US NAVAL RESEARCH LABORATORY, *Direct Energy Conversion. Literature Abstracts*, December 1963.
- VIC, Raymond, « Pile oxygène-hydrogène compactée », communication effectuée lors du congrès du CNES le 20 novembre 1967, pp. 1-2.
- YVON, Jacques, « Introduction », in *Annales des Mines*, Tome XI, 1964.

INDEX DES NOMS PROPRES ET DES NOMS COMMUNS

- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, 14, 326
- Agence française pour la maîtrise de l'énergie, 14, 326
- Aigrain Pierre, 8, 66, 71, 77, 96, 97, 100, 103, 104, 105, 106, 109, 110, 132, 166, 173, 174, 193, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 207, 208, 211, 212, 213, 216, 220, 221, 229, 241, 289, 290, 308, 309, 321
- Air Liquide, 62, 166, 191, 268, 308
- Alain Peyrefitte, 166, 168
- Alleau Thierry, 326, 328
- Allis Chalmers, 36, 41, 42, 43, 183, 184, 199, 217, 231
- Alsthom, 7, 13, 15, 20, 115, 127, 128, 138, 142, 147, 159, 165, 166, 168, 169, 170, 172, 174, 175, 176, 177, 180, 188, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 203, 207, 208, 209, 211, 212, 213, 214, 215, 217, 218, 219, 220, 221, 226, 233, 238, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 252, 253, 254, 255, 258, 260, 261, 262, 263, 264, 267, 271, 273, 278, 279, 281, 283, 284, 285, 286, 287, 289, 296, 299, 300, 306, 309, 311, 321, 322
- Ameil Xavier, 119, 130
- American Chemical Society, 31, 34, 41, 115, 153, 334, 352
- Amirauté, 27, 30, 32
- Anglo-Iranian Oil Company, 33
- Assemblée nationale, 13, 54, 84, 110, 111, 115, 135, 145, 189, 216
- Auclair Jean-Michel, 130, 150, 153, 165
- Audubert René, 73, 74, 75, 97, 122, 142, 319
- Autruffe Hubert, 137, 175, 180, 191, 196, 201, 202, 207, 221, 222, 241, 242, 245, 248, 255, 261, 263, 264, 288, 310
- Bacon Francis T., 10, 14, 19, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 36, 37, 43, 46, 95, 105, 125, 230, 318, 319, 324
- Bagotsky Vladimir S., 24, 43
- Balaceanu Jean-Claude, 76, 99, 100, 102, 103, 116, 117, 119, 125, 126, 158, 159, 165, 166, 168, 169, 172, 173, 182, 191, 230, 312
- Bergé Pierre, 162
- Bergeron Paul, 87, 88, 90
- Besson Jean, 125, 139, 141, 144, 153, 169, 172, 179, 207
- Bezaudun Jean, 129
- Bindel Serge, 274
- Biro Paul, 130, 169, 207
- Blancard Jean, 248
- Bloch Odile, 98, 106, 126, 136, 153, 155, 156, 169, 182, 195, 207, 210, 228, 229, 287
- Boiteux Marcel, 14, 154, 236, 237, 238, 301, 302
- Bonnefille René, 80, 207, 222
- Bonnemay Maurice, 71, 73, 74, 97, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 106, 108, 114, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 128, 132, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 144, 145, 150, 153, 156, 162, 165, 166, 168, 169, 170, 171, 172, 179, 181, 188, 191, 194, 195, 207, 211, 212, 213, 222, 223, 224, 225, 226, 228, 239, 265, 267, 278, 279, 291, 292, 294, 310, 311, 315, 319, 320, 322, 323
- Bouthors Pierre, 255
- Bréelle Yves, 14, 16, 96, 125, 126, 127, 150, 153, 156, 158, 159, 165, 182, 183, 187, 195, 199, 200, 210, 211, 227, 228, 229, 230, 239, 240, 251, 252, 253, 255, 257, 271, 279, 280, 285, 287, 296, 297, 305, 306, 307, 308, 312
- Brenet Jean, 139, 141, 181, 209, 265
- British Petroleum, 35
- British Ropes, 35
- Broniewski Bogdan, 7, 16, 127, 138, 165, 166, 168, 169, 172, 175, 176, 191, 193, 194, 195, 198, 207, 209, 213, 214, 215, 217, 218, 219, 221, 241, 262, 263, 285, 299, 300, 321, 323
- Bronoël Guy, 16, 122, 123, 124, 136, 137, 138, 139, 141, 142, 153, 156, 179, 181, 224, 225, 226, 239, 262, 263, 264, 265, 267, 274, 278, 279, 282, 288, 290, 292, 293, 294, 305, 308, 311, 315, 326, 328
- Brouillet Philippe, 153, 165, 180
- Bush Vannevar, 44, 59
- Busson André, 191, 198, 202
- Buvet René, 165, 180
- Cambou Francis, 310, 311
- Carbone Lorraine, 7, 115, 121, 157, 165, 169, 178, 198, 202, 207, 211, 227, 321
- Carboxyque française, 302
- Central Electric Authority, 33
- Central Electricity Generating Board, 35

Central Intelligence Agency, 14, 39, 179
 Centre d'études des projectiles auto-propulsés, 51, 89
 Centre d'études et recherches de Charbonnages de France, 48, 92, 99, 100, 102, 105, 107, 114
 Centre d'études marines avancées, 177, 220, 258, 322
 Centre national d'étude des télécommunications, 48, 87, 89, 90, 92, 99, 100, 116, 192, 289, 326
 Centre national d'études spatiales, 14, 91, 113, 178, 179, 241, 278, 297, 298, 299, 305, 322, 326, 327, 342
 Centre national de la recherche scientifique, 8, 9, 13, 16, 20, 35, 47, 48, 50, 52, 55, 62, 63, 67, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 81, 85, 86, 87, 88, 90, 91, 92, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 106, 107, 111, 113, 114, 121, 122, 123, 124, 129, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 144, 145, 151, 156, 162, 165, 166, 169, 170, 175, 179, 181, 188, 191, 207, 211, 212, 214, 222, 224, 225, 226, 232, 241, 250, 265, 266, 267, 269, 270, 274, 278, 279, 284, 287, 288, 290, 291, 292, 293, 303, 305, 307, 311, 315, 319, 320, 321, 322, 326, 327, 328
 Centre national pour l'exploitation des océans, 14, 203, 256, 289, 294, 295, 296, 305, 314, 322
 Chalvon Roger, 175, 219, 220
 Champetier Georges, 73, 98, 111, 136
 Charbonnier Georges, 8, 193
 Chemla Marius, 228
 Chéron Jacques, 16, 226, 227, 230, 240, 251, 259, 285, 304, 305, 308, 312, 314
 Chevènement Jean-Pierre, 16, 314
 Chevrier Charles, 236
 Citroën, 163
 Cladé Jacques, 222
 Claverie Maurice, 327
 Clavillier Jean, 292
 Cohen Robert, 40, 42
 Cohn Ernst M., 40, 41, 42, 200
 Collongues Robert, 267, 268, 269
 Comité consultatif de la recherche scientifique et technique, 65, 66, 68, 69, 80, 91, 104, 109, 111, 113, 134, 154, 308, 319
 Comité d'action scientifique de la Défense nationale, 87, 88, 90, 91, 94, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 105, 106, 107, 108, 111, 112, 113, 114, 116, 118, 120, 123, 145, 151, 160, 185, 319
 Comité interministériel de la recherche scientifique et technique, 65, 66, 319
 Commissariat à l'énergie atomique, 14, 49, 51, 52, 54, 64, 71, 83, 92, 112, 162, 163, 168, 191, 208, 250, 251, 252, 254, 274, 282, 283, 284, 286, 294, 295, 302, 303, 305, 308, 313, 319, 326, 328
 Commission européenne, 14, 248
 Communauté économique européenne, 14, 258, 294, 306, 307
 Compagnie européenne d'étude, de développement et d'exploitation de véhicules électroniques, 233, 236, 237
 Compagnie française Thomson-Houston, 112, 115, 127, 142, 147, 151, 153, 159, 160, 165, 173, 174
 Compagnie générale d'électricité, 107, 112, 114, 115, 120, 121, 125, 130, 136, 142, 145, 146, 147, 148, 150, 157, 162, 165, 166, 168, 169, 170, 172, 173, 174, 175, 184, 185, 186, 188, 190, 191, 192, 198, 199, 201, 202, 204, 207, 208, 210, 211, 212, 214, 217, 229, 237, 243, 245, 263, 268, 270, 283, 290, 308, 321
 Compagnie générale de télégraphie sans fil, 7, 86, 112, 115, 119, 130, 142, 154, 161, 177, 178, 202, 208, 284, 321
 Compagnie industrielle des piles électriques, 106, 115, 121, 131, 142, 157, 169, 170, 175, 178, 188, 192, 198, 202, 203, 204, 211, 212, 227, 237
 Compagnie maritime d'expertise, 295, 296, 305, 314, 322, 382
 Conseil supérieur de la recherche scientifique et du progrès technique, 54, 58, 63, 65, 66
 Conservatoire national des arts et métiers, 13, 52, 71, 73, 74, 75, 98, 117, 122, 136, 139, 165, 166, 169, 171, 175, 188, 201, 224, 226, 265, 274, 278, 310, 311, 319
 Coriou Henri, 313
 Costa Max, 265, 292, 293
 Coty René, 64
 Cousteau Jacques-Yves, 71, 137
 Crémieux-Brilhac Jean-Louis, 55, 65, 336
 Curien Hubert, 241, 243, 244, 245, 248, 274, 278, 290, 326
 Dangauthier Marcel, 243
 Dautry Raoul, 49
 Davtyan Organes K., 32
 De Closets François, 196

De Gaulle Charles, 47, 48, 49, 54, 55, 57, 64, 65, 66, 78, 84, 85, 89, 90, 91, 122, 233, 315, 319

De L'Estoile Hugues, 110

De Wolf Michel, 257

Debré Michel, 66, 68, 107

Degobert Paul, 150, 153, 159, 182, 184, 210, 229, 285, 308

Dejou Alexis, 166, 236, 237, 255

Délégation générale à la recherche scientifique et technique, 8, 13, 16, 18, 19, 20, 47, 65, 66, 68, 69, 70, 72, 80, 94, 99, 104, 105, 106, 108, 109, 110, 113, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 126, 128, 129, 130, 131, 132, 134, 135, 136, 137, 141, 142, 143, 145, 147, 152, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 175, 178, 179, 181, 182, 183, 185, 190, 191, 192, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 227, 228, 230, 232, 233, 238, 241, 243, 244, 245, 248, 260, 261, 262, 263, 264, 267, 269, 270, 271, 274, 275, 278, 282, 283, 284, 285, 286, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 299, 302, 303, 304, 305, 306, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 316, 319, 320, 321, 322, 327, 328

Délégation ministérielle pour l'armement, 85, 89, 110, 111, 114

Delsey Jean, 263, 264, 288, 290, 308

Delsol Robert, 116, 117, 119

Department of Scientific and Industrial Research, 25, 30, 59

Desécures Michel, 165, 191, 198, 203, 208, 209, 212, 213, 216, 221, 222, 241, 242, 264, 310, 314

Desportes Charles, 212, 250, 288

Direct Energy Conversion Operation, 42

Direction de la construction mécanique et électrique et de l'électronique, 221, 238, 244, 245, 246, 263, 286

Direction des études et fabrications d'armement, 51, 86, 89, 90, 99

Direction des industries métallurgiques, mécaniques et électriques, 262, 263, 271, 281, 284, 285, 286, 288, 289, 290, 300, 313

Direction des recherches et moyens d'essais, 85, 110, 113, 114, 120, 134, 141, 151, 160, 162, 165, 166, 168, 177, 188, 191, 199, 208, 210, 272, 278, 279, 280, 281, 304

Direction des recherches, études et techniques d'armement, 304, 306, 313, 326, 327

Domenjoud Paul, 217, 219

Doniat Denis, 141, 179, 290, 315, 326

Dreyfus Pierre, 216, 312

Dubar Jacques, 165, 175, 191, 195, 198, 199, 200, 202, 203, 209

Dubois Jacques-Émile, 168, 279

Dubois Pierre, 165, 184, 190, 199, 207, 211

Duffet René, 100, 165, 168, 169, 172, 191, 207, 210, 278

Dugas Claude, 77, 130

Dumesnil Georges, 109, 165, 166, 215

École normale supérieure, 50, 66, 77, 90, 99, 180

École polytechnique, 52, 64, 65, 87, 89, 92, 99, 111, 115, 125, 148, 213, 218, 222, 250, 274, 278, 282, 311, 312

Eisenhower Dwight D., 38, 39, 45, 59

Electric Power Research Institute, 231, 264

Electrical Research Association, 29, 30, 31, 32, 45, 96

Électricité de France, 13, 14, 17, 20, 48, 71, 78, 79, 80, 81, 92, 95, 96, 99, 100, 102, 106, 115, 142, 154, 161, 162, 165, 166, 168, 171, 173, 181, 191, 207, 208, 211, 222, 232, 234, 235, 236, 237, 238, 240, 241, 243, 244, 245, 246, 250, 251, 255, 265, 268, 272, 273, 274, 282, 286, 288, 290, 293, 300, 301, 302, 307, 308, 309, 313, 314, 316, 319, 320, 321, 323

Energy Conversion Limited, 35

Esso, 36, 43, 103, 183, 198, 217, 218, 219, 220, 238, 241, 242

Exxon, 219, 233, 241, 244, 258, 261, 262, 263, 264, 278, 285, 299, 321, 322

Eyraud Paul, 129

Eyzat Pierre, 305

Fabre Jean, 161

Faculté des sciences de l'Université de Lille Lille, 75, 76, 119, 129, 180, 319

Faculté des sciences de l'Université de Paris, 66, 74, 75, 94, 98, 101, 109, 116, 120, 131, 165, 166, 168, 169, 188, 191, 207, 228

Feuillade Georges, 130, 153, 290

Ford, 36, 147, 183, 184, 187, 199, 217, 268

Fréjacques Claude, 282, 303

Friedel Jacques, 166, 225, 226, 289, 290

Frumkine Alexander N., 266, 267

Gagarine Youri, 40

Gallot Jacques, 229, 235, 236, 272, 273, 300, 301, 302
 Gastarriet Michel, 230, 304
 Gaussens Pierre, 274
 Gautier François, 218
 Gaz de France, 14, 20, 92, 98, 100, 103, 107, 114, 115, 116, 117, 120, 131, 142, 153, 157, 165, 166, 169, 172, 173, 175, 216, 217, 230, 231, 237, 249, 252, 270, 274, 281, 282, 283, 286, 302, 308, 319, 321
 General Motors, 7, 36, 184, 185, 186, 217
 Georges Yves, 239, 309
 Germain Jean, 71, 77, 104, 116, 117, 119, 129, 180, 195, 224, 319
 Gibrat Robert, 80, 250
 Giraud André, 109, 125
 Glasser Georges, 174, 196, 219, 220
 Godin Paul, 274, 282, 301
 Gomis Jean-Paul, 257
 Gossot Michel, 146, 165, 166, 168, 169, 173, 174, 186, 191, 192, 198, 208, 210, 211
 Grandin de l'Épervier (colonel), 290, 306, 313
 Gravelle Pierre Ch., 326, 327, 328
 Grégory Bernard, 278, 289
 Grehier Alain, 227, 240, 265, 267, 285, 308
 Grellet Guy, 222
 Grove William Robert, 10, 24, 25, 26, 94
 Grubb Willard T., 37
 Gruber Bernard, 41
 Guérin Jean Maurice, 87, 90, 91, 98, 99, 100, 103, 107, 111, 112, 188, 224
 Guest, Keen & Nettlefolds, 35
 Guibert Roger, 174, 175
 Guillaumat Pierre, 52, 64, 113, 115
 Guillaume Jean-Pierre, 160
 Hagenmuller Paul, 267, 269, 270, 274, 283, 291, 307, 315, 322
 Halfon Jacques, 302, 313
 Hamelin Antoinette, 265, 292
 Hammer Armand, 299, 300
 Hauet Jean-Pierre, 16, 311
 Heath Carl E., 241, 260, 262, 263
 Hespel Claude, 258
 Hladik Jean, 101, 102, 136
 Hulot Nicolas, 7
 Hydro-Québec, 173, 174, 244
 Ihrig Harry K., 42
 Imelik Boris, 76, 129
 Institut de recherches sur la catalyse, 76, 114, 139, 319
 Institut français du pétrole, 7, 13, 14, 16, 20, 48, 75, 76, 92, 96, 98, 99, 100, 102, 103, 105, 114, 115, 119, 121, 123, 125, 126, 136, 141, 142, 145, 150, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 165, 166, 169, 170, 172, 173, 175, 177, 178, 182, 183, 191, 192, 195, 198, 199, 202, 204, 207, 210, 211, 212, 214, 220, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 241, 242, 243, 251, 252, 253, 256, 257, 258, 263, 267, 271, 272, 273, 274, 278, 279, 280, 281, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 304, 305, 306, 307, 308, 311, 312, 314, 319, 321, 322
 Institute of Gas Technology, 43, 183, 184, 199, 256, 301, 314
 Jacquinet Louis, 65, 68
 Jacquinet Pierre, 139
 Janot Maurice-Marie, 63
 Jarret Jean et Jacques, 233, 237
 Jarrot André, 240
 Joliot-Curie Frédéric, 43, 48, 68, 73, 87
 Julg André, 226
 Kamada Minoru, 24
 Karcher Xavier, 309
 Kennedy John F., 38, 40, 41, 154
 Kordesch Karl V., 36, 43, 200
 Laboratoire central des industries électriques, 92, 163, 191, 202, 203, 204, 209, 213, 222, 226, 227
 Laboratoire d'électrolyse du CNRS, 16, 20, 49, 74, 97, 98, 101, 102, 106, 114, 121, 123, 124, 126, 135, 136, 137, 139, 141, 142, 144, 145, 156, 166, 170, 175, 179, 181, 191, 207, 211, 212, 213, 214, 222, 224, 225, 226, 227, 262, 265, 266, 267, 269, 274, 278, 282, 284, 288, 291, 292, 293, 294, 310, 311, 315, 319, 321, 322, 328
 Laboratoire de chimie du solide de l'Université de Bordeaux, 16, 267, 274, 279, 283, 284, 291, 307, 313, 322
 Laboratoire de recherches balistiques et aérodynamiques, 51, 89, 90
 Laboratoires de Marcoussis, 16, 207, 212, 283, 311
 Lambert Claude, 279
 Lambert Jean, 288, 290, 313
 Lamy Claude, 16, 71, 265, 292, 294, 313, 315, 327, 328
 Lancelle Claude, 253, 307, 308, 312
 Langevin Paul, 73

Laroche Jean, 107, 131, 165, 166, 168, 169, 172, 181, 191, 207, 211
 Laugier Henri, 48, 52, 53, 62, 65
 Laval Pierre, 48
 Layton Christopher, 248, 253
 Le Floch-Prigent Loïk, 16, 213, 216, 219, 220, 245, 246, 254, 255, 263, 264, 265, 286, 288, 289, 290, 291, 293, 299, 300, 303, 304, 305, 307, 309, 310, 311, 312, 314, 316, 322
Le Monde, 7, 240
 Lederer Edgar, 63, 71
 Legrand Maurice, 274, 282, 302, 303
 Lehmann Gérard, 107, 125, 136, 150
 Lelong Pierre, 64, 65, 109
 Lenfant Pierre, 291
 Lengart Pierre, 225
 Leprince Pierre, 271, 274, 278
 Leribaux Henri, 313
 Letort Maurice, 66, 71, 100, 102, 104, 105, 109, 116, 117, 119
 Levart Eugène, 136, 137, 138, 153, 179, 181, 224, 265, 266, 292
 Lichnerowicz André, 52, 54, 55, 64, 65, 66, 109
 Longchambon Henri, 52, 54, 55, 59, 60, 65, 68
 Lucesoli Daniel Bernardo, 228
 Luxo Armand, 274
 Magnien Maurice, 165, 168, 169, 170, 171, 172, 177, 180, 181, 188, 191, 196, 197, 198, 203, 208, 209, 211, 213, 214, 222, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 248, 255, 263, 286, 301, 304, 310, 320
 Malavard Lucien, 110, 166, 168
 Malégarie Henri, 237
 Malraux André, 64
 Manned Spacecraft Center, 40
 Maréchal André, 109, 113, 145, 154, 155, 156, 165, 166, 173, 174, 175, 191, 192, 195, 196, 199
 Marine nationale, 86, 87, 91, 99, 100, 126, 146, 153, 173, 174, 201, 220, 258, 296, 306
 Marshall of Cambridge Electronics, 34
 Martin Camille, 175, 176
 Mascarello Jean, 251
 Matra, 14, 256, 257, 272, 273, 278, 280, 297, 298, 305, 322
 Mayeur Jean-Pierre, 148, 149, 151
 McBrayer H. Eugene, 218
 McDonnell Aircraft Corporation, 40
 Mendès France Pierre, 47, 54, 55, 57, 64, 66, 85
 Messmer Pierre, 249, 322
 Millet Jacques, 165, 241, 243, 244, 250, 263, 264, 288, 290, 293, 313, 314, 326
 Ministère des Armées, 13, 14, 18, 19, 20, 51, 64, 66, 69, 72, 84, 86, 87, 88, 90, 92, 94, 97, 99, 100, 101, 102, 103, 107, 110, 111, 112, 114, 116, 120, 151, 160, 173, 177, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 201, 203, 204, 207, 217, 229, 272, 273, 279, 305, 306, 313, 319, 321, 322
 Ministry of Fuel and Power, 30, 32, 35, 96
 Ministry of Supply, 30
 Mitterrand François, 189, 312
 Monod Jacques, 55, 71, 166, 216
 Monsanto, 36, 41, 46, 184, 185, 198, 199
 Moos Anthony, 33, 36
 Morand Geneviève, 101, 120, 131, 136
 Morrison Herb, 259
 Moureu Henri, 51
 Mueller George E., 42
 National Air and Space Agency, 14, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 154, 179, 199, 200, 201, 231, 268, 318
 National Research Development Corporation, 33, 34, 35, 45
 Navarre René, 76
 Néel Louis, 62
 Niedrach Leonard W., 37, 200
 Nixon Richard, 230
 Occidental Petroleum, 299, 300
 Office de radiodiffusion-télévision française, 7, 162, 193, 196, 197, 251
 Office national d'études et de recherches aéronautiques, 48, 86, 89, 91, 92, 99, 100, 101, 103, 105, 112, 114
 Office national industriel de l'azote, 103, 105, 106, 114, 123, 131, 151, 156, 162, 165, 166, 168, 169, 170, 172, 175, 191, 192, 198, 202, 204, 207, 211, 321
 Olmer Philippe, 71, 104, 116, 119, 150, 156, 165, 166, 168, 179, 181, 198
 Ortoli François, 203, 220
 Özmen Süleyman, 271
 Palewski Gaston, 110, 135, 145, 153, 156
 Patterson Moos, 34, 35, 105
 Pechiney, 62, 115, 127, 147, 159, 215, 282, 300, 305
 Pechberty Jean, 201
 Perrin Francis, 73, 98

Peugeot-PSA, 7, 13, 176, 177, 218, 219, 220, 232, 241, 243, 258, 299, 300, 309, 312, 321, 322, 326, 327, 328
 Psychès Ivan, 271
 Picard Fernand, 166, 186
 Piganiol Pierre, 55, 64, 66, 67, 68, 69, 91, 92, 104, 109, 113, 115
 Pilla Arthur A., 136, 139, 141, 142, 153
 Planté Gaston, 94
 Poincaré Henri, 94
 Poirier d'Ange d'Orsay Emmanuel, 136, 141, 142
 Pompidou Georges, 65, 166
 Ponte Maurice, 55, 66, 83, 84, 104, 109
 Portier Josik, 291
 Pottier Jean, 274, 281, 282
 Pouchard Michel, 16, 269, 270, 284, 313, 315
 Poujade Robert, 233, 234, 250
 Pratt & Whitney, 35, 36, 42, 46, 147, 183, 184, 186, 198, 199, 211, 231, 243, 263, 273, 286, 288, 296, 302, 304
 Prettre Marcel, 55, 71, 75, 76, 100, 101, 102, 103, 114, 116, 117, 119, 128, 139, 140, 279, 319
 Programme spatial Apollo, 35, 39, 40, 41, 42, 184, 185, 198, 201, 204, 268, 318
 Programme spatial Gemini, 40, 41, 42, 148, 154, 198, 199, 268, 318
 Programme spatial Hermès, 241, 297, 298, 299, 305, 339
Progrès scientifique, 113, 152, 167, 175, 185, 223, 249, 252, 270, 271, 303, 309
 Quintin Marguerite, 74
 Rambach Jean-Louis, 192
 Rapkine Louis, 48
 Reagan Ronald, 37, 119
 Reeves Hubert, 313
 Remenieras Gaston, 71, 95, 96, 99, 100, 102, 104, 106, 116, 119, 132
 Renault, 7, 14, 126, 163, 166, 177, 178, 186, 187, 202, 232, 234, 237, 239, 250, 253, 255, 280, 285, 287, 307, 309, 311, 314, 321, 322, 326, 328
 Rhône-Poulenc, 62, 195
 Ricateau Pierre, 166, 168, 191, 208
 Riffaud Claude, 294, 295
 Robin Albert, 238, 255
 Rockwell International, 231
 Rolin Maurice, 136
 Roosevelt Franklin D., 44, 162
 Rose Adolphe-Jean, 154, 155
 Roth Etienne, 274
 Rougé Francis, 177, 218, 219, 220
 Rouxel Jean, 291, 327, 328
 Royal Aircraft Establishment, 30
 Royon Jean, 165, 169, 175
 Sabonnadière Jean-Claude, 222
 Sadron Charles, 55, 65, 71, 74, 121
 Safran, 7
 Saint-Gobain, 62, 66, 115, 127, 147, 159
 Salé Bernard, 165, 195, 229, 253, 272, 296, 305, 307, 312
 Saulgeot Louis, 238, 240
 Schönbein Christian Friedrich, 10, 24
 Schumann Maurice, 189, 196
Science & Avenir, 197, 229, 259
Science & Vie, 65, 168, 197, 238, 251
 Section d'étude et fabrication des télécommunications, 100, 229, 230, 271, 278, 280, 281, 287, 288, 289, 290, 304, 313
 Sénat, 13, 84, 215, 240
 Shell, 35, 253, 254
 Siemens, 173, 202, 211, 253, 254, 306, 307
 Société de recherches et d'applications électrochimiques, 283, 290, 304, 308, 326, 328
 Société des accumulateurs fixes et de traction, 106, 257, 279, 283, 291, 304, 305, 306, 307, 308, 311
 Société des ingénieurs de l'automobile, 135, 228
 Société nationale d'étude et de construction de moteurs d'aviation, 51
 Société nationale des chemins de fer français, 14, 162, 174, 175, 176, 191, 201, 207, 216, 217, 221, 241, 288, 290, 313, 321
 Sohm Jean-Claude, 180, 197, 198, 203, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 221, 224, 239, 241, 242, 321
 Sourdille Jacques, 289
 Souriau Daniel, 107, 131, 157, 165, 166, 175, 230
 Tamaru Setsurō, 24
 Teichner Stanislas, 76, 279
 Teilhol, 237, 240
 Teissier Georges, 48, 52
 Texas Instruments, 36, 183, 184, 185, 199
 Transports, recherches, études, groupement d'intérêt économique, 253, 307, 308, 311, 312
 Trapy Jean, 280
 Trombe Félix, 65, 71, 83, 88, 119
 Ugine Khulman, 300
 Ugine-Carbone, 115, 121, 157

Union Carbide Corporation, 35, 36
Union européenne, 10, 248, 346
United Aircraft Corporation, 35, 45, 231, 296
United States Navy, 36, 231
Universal Wanding, 34, 35
Urbain Georges, 73, 95
US Naval Research Laboratory, 353
US Signal Corporation, 36
Valensi Jacques, 168, 181, 191
Varta, 173, 211, 306, 307
Vérillon Maurice, 215, 216
Verret Pierre, 249
Vic Raymond, 165, 178, 179, 227, 290
Viet Loïk, 279
Warszawski Bernard, 127, 128, 147, 169,
176, 192, 194, 198, 207, 213, 215, 220,
243, 258, 260, 261, 262, 263, 285, 299,
300, 309, 311
Wattiaux Alain, 315
Weil Louis, 71, 104, 106, 116, 119, 166, 168
Westinghouse Electric Corporation, 36, 43,
185, 186, 199, 217, 250
Wonder, 165, 180, 237
Yvon Jacques, 71, 104, 116, 119, 145, 166

GLOSSAIRE

Accumulateur : dispositif technique qui emmagasine l'énergie électrique issue d'une réaction chimique et qui peut la restituer sous forme de courant.

Adsorption : phénomène physique par lequel des atomes ou des molécules en provenance d'un liquide ou d'un gaz se fixent sur un solide.

Anode : électrode négative.

Carburant/combustible : substance chimique permettant de créer une réaction de combustion grâce à une énergie d'activation.

Catalyse : modification de la vitesse d'une réaction chimique par le biais d'une substance ne subissant elle-même aucune altération.

Catalyse hétérogène : réaction catalytique définie par des réactifs et un catalyseur n'évoluant pas dans une même phase (liquide, solide, gazeuse). Lorsque les réactifs et le catalyseur évoluent dans une même phase, on parle alors de catalyse homogène.

Catalyseur : substance, espèce chimique permettant de modifier la vitesse d'une réaction chimique mais qui n'apparaît pas dans l'équation de cette réaction.

Cathode : électrode positive.

Chute ohmique (voir *Polarisation*) : dans une pile à combustible, la chute ohmique représente la chute de tension due à la résistance interne des cellules et directement proportionnelle au courant électrique.

Cinétique : étude de l'évolution du temps et de la vitesse des réactions chimiques.

Chimie quantique : application de la mécanique quantique à l'étude des problèmes chimiques.

Comburant : substance chimique permettant de créer et d'entretenir une réaction de combustion d'un combustible.

Électrocatalyse : catalyse hétérogène, par le matériau d'électrode, des réactions de transfert de charge électronique ou protonique se produisant à l'interface entre une électrode, conducteur électronique, et un électrolyte, conducteur ionique.

Électrochimie : étude des relations entre des phénomènes chimiques et des courants électriques ainsi que des transformations qui en résultent.

Électrode : conducteur électrique captant ou libérant un courant électrique, un flux électronique passant dans un fluide ou dans le vide.

Électrolyse : décomposition chimique de substances sous l'effet d'un courant électrique. Dans le cas de l'électrolyse de l'eau, l'hydrogène et l'oxygène contenus dans H₂O sont ainsi dissociés.

Électrolyte : substance qui, à l'état liquide ou en solution dans un liquide, possède la propriété de conduire le courant électrique et de se dissocier en ions sous l'effet de ce courant.

Électrotechnique : étude des applications techniques de l'électricité.

Décarbonatation : élimination du CO₂ d'une substance ou d'un matériau.

Oxydation : réaction au cours de laquelle un réactif perd un ou plusieurs électrons.

Réduction : réaction au cours de laquelle un atome gagne un ou plusieurs électrons.

Magnétohydrodynamique (MHD) : étude des mouvements des fluides conducteurs de l'électricité dans les champs magnétiques. En termes d'application technique, les générateurs MHD sont étudiés pour générer de l'électricité à partir de l'énergie cinétique d'un fluide conducteur.

Milieu acide : espèce chimique capable de céder un proton.

Milieu basique : espèce chimique capable de capter un proton.

Physique du solide : étude fondamentale des matériaux solides depuis l'échelle atomique.

Physique quantique : désigne les domaines de la physique utilisant les lois de la mécanique quantique.

Polarisation : il existe une différence entre la tension théorique d'une pile à combustible et la tension réelle d'une pile à combustible. Lorsque les bornes d'une pile à combustible sont reliées à une charge traversée par un courant d'intensité i , la tension aux bornes de la pile diminue par rapport à la tension théorique sous l'effet de phénomènes de polarisation. On distingue : la polarisation d'activation due au transfert de charges à l'interface électrode/électrolyte ; la polarisation ohmique résultant de la résistance électrique des éléments de la pile et en particulier de l'électrolyte ; la polarisation de concentration qui dépend de la concentration de l'électrolyte autour des électrodes.

Résonance paramagnétique électronique (RPE) : méthode de mesure physique spectroscopique reposant sur l'interaction entre un champ magnétique et un moment magnétique d'origine électronique. Elle permet d'obtenir des informations sur les propriétés physique ou physico-chimiques des composés (propriétés électroniques des conducteurs et des isolants, propriétés magnétiques, etc.).

Solution Redox : dans une pile Redox, le comburant et le combustible sont préalablement transformés par le biais d'une réaction chimique intermédiaire en produits plus réactifs, généralement liquides, pour être utilisés par la suite.

Supraconductivité : propriété de certains matériaux qui conduisent le courant électrique sans résistance et sans perte en générant des champs magnétiques. Les matériaux supraconducteurs permettent de transporter des intensités électriques très importantes.

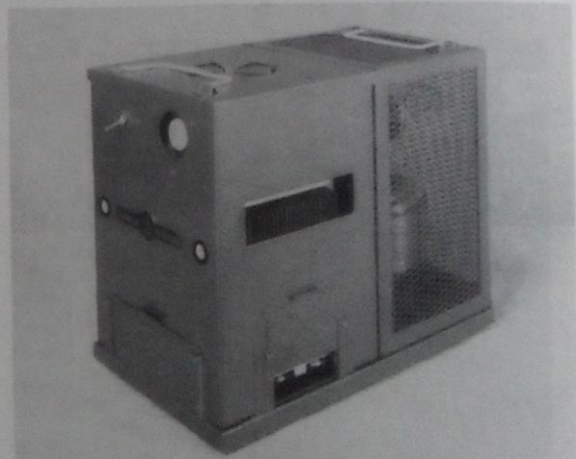
ANNEXES

PILES A COMBUSTIBLES

TH.N. 902 Pile à membrane H² air
PUISSANCE MOYENNE: 50W



TH.N. 901 Pile à membrane H²O²
PUISSANCE MOYENNE: 70W

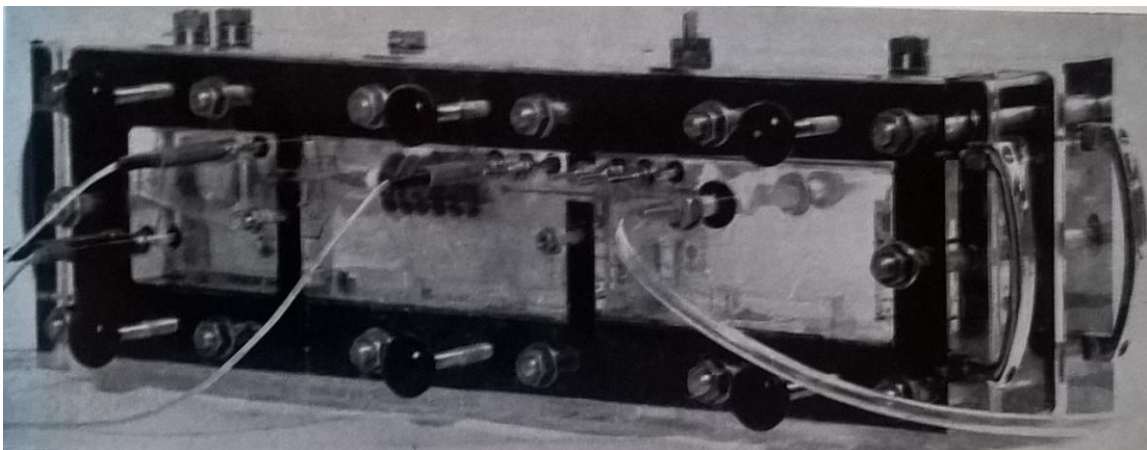
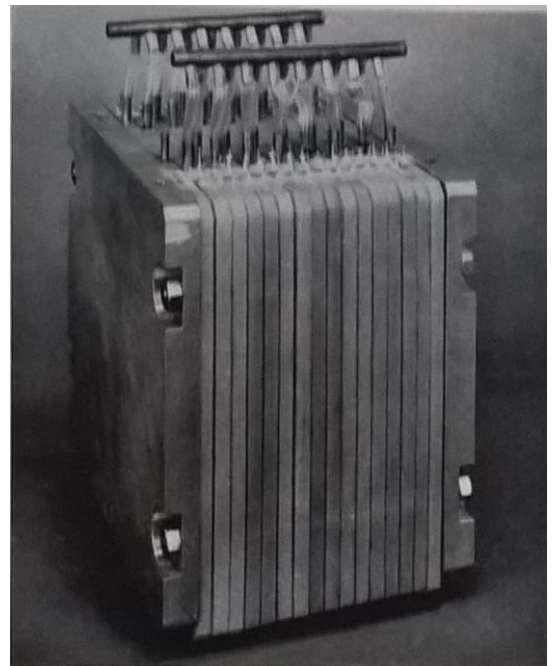
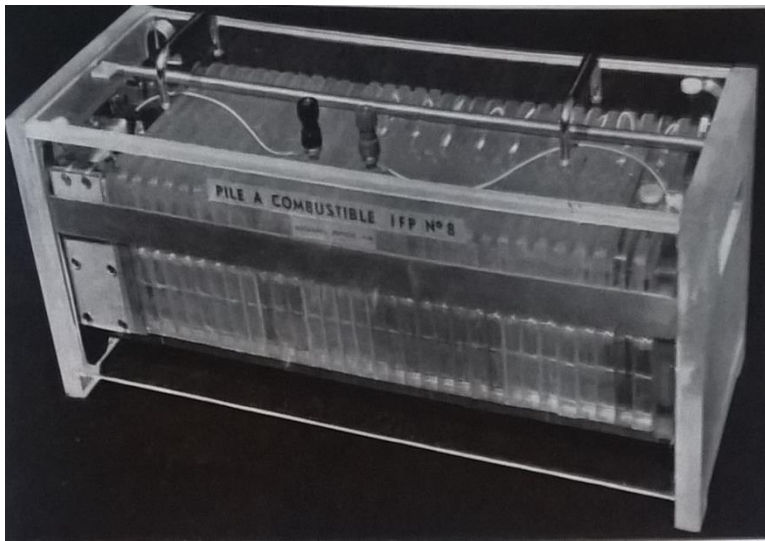
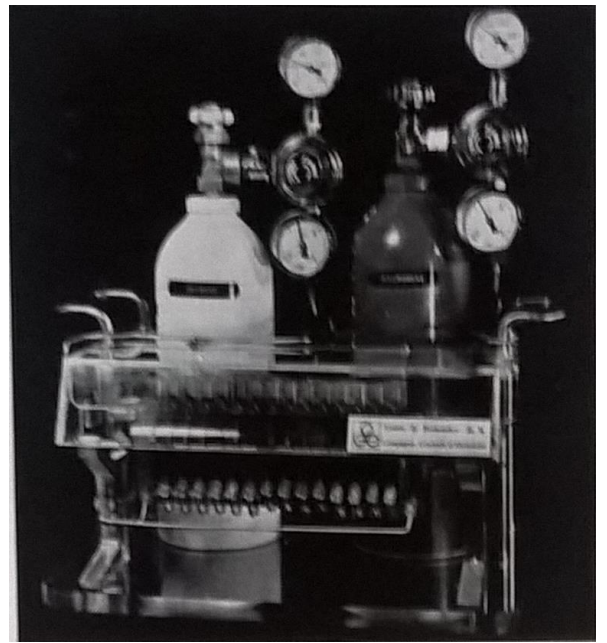
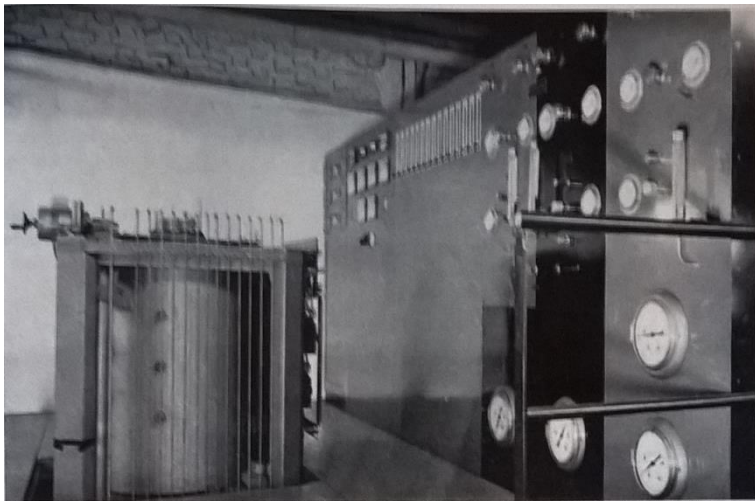


COMPAGNIE FRANÇAISE THOMSON-HOUSTON PARIS

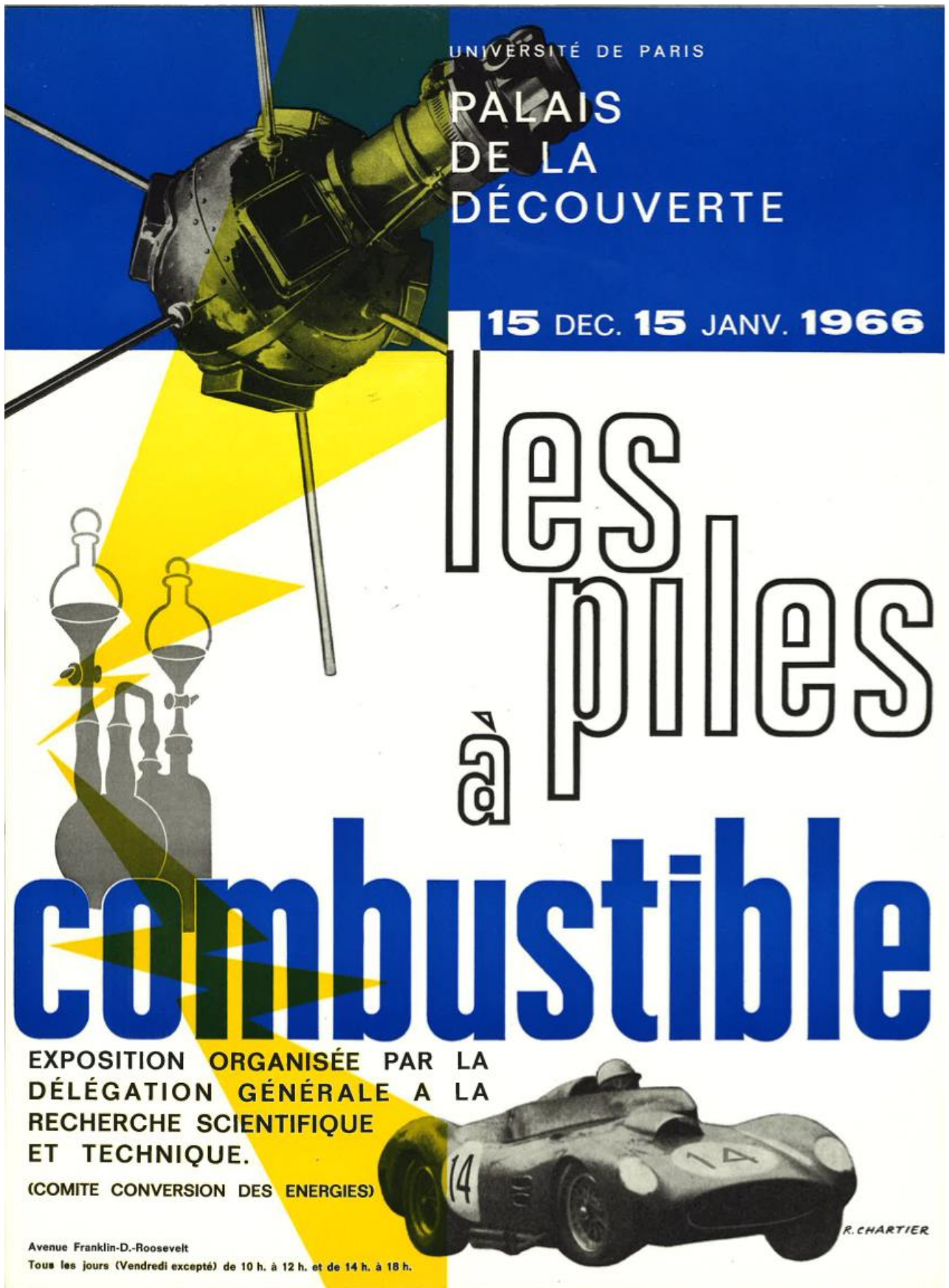
DÉPARTEMENT DES TECHNIQUES NUCLÉAIRES 51 BD DE LA RÉPUBLIQUE CHATOU (880) TÉL. 966-30-70

ENTROPIE

Annexe 1 - Publicité parue dans la revue Entropie en mai 1965 (Source : Entropie, 1965).



Annexe 2 - De gauche à droite et de haut en bas : piles à combustible du Gaz de France, de la CGE, de l'IFP, de la Compagnie française Thomson-Houston et du Laboratoire d'électrolyse du CNRS réalisées en 1965 (Source : Le progrès scientifique, 1965).



Annexe 3 - Affiche de l'exposition « Piles à combustible » ayant lieu au Palais de la découverte du 15 décembre 1965 au 15 janvier 1966 (Source : Palais de la découverte, 1965)



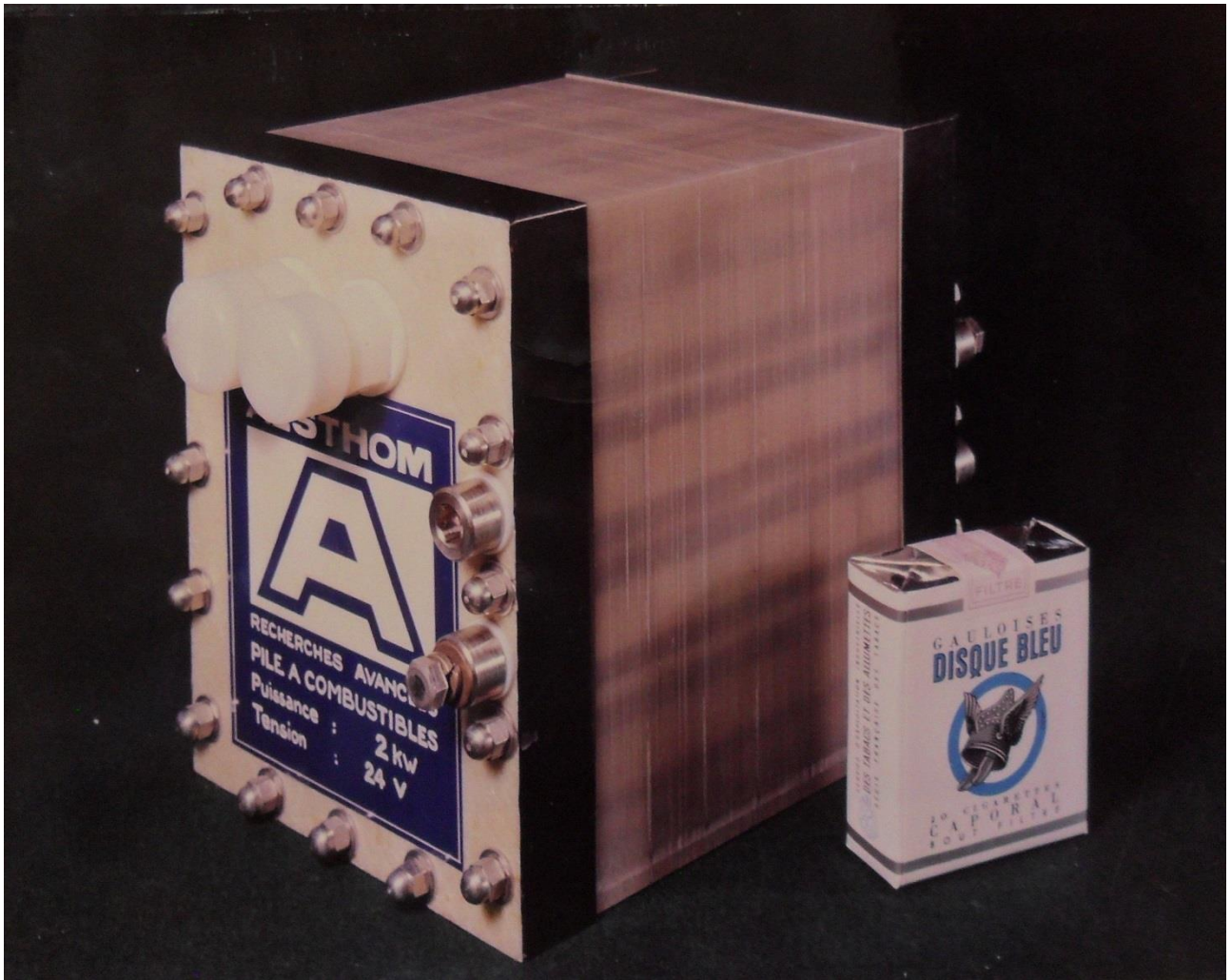
*Annexe 4 - Démonstration d'éléments de piles sur le stand d'EDF lors de l'exposition « Piles à combustible » ayant lieu au Palais de la découverte du 15 décembre 1965 au 15 janvier 1966
(Source : DGRST, 1966)*



Annexe 5 - Sur le stand d'EDF lors de l'exposition « Piles à combustible » ayant lieu au Palais de la découverte du 15 décembre 1965 au 15 janvier 1966 (Source : DGRST, 1966)



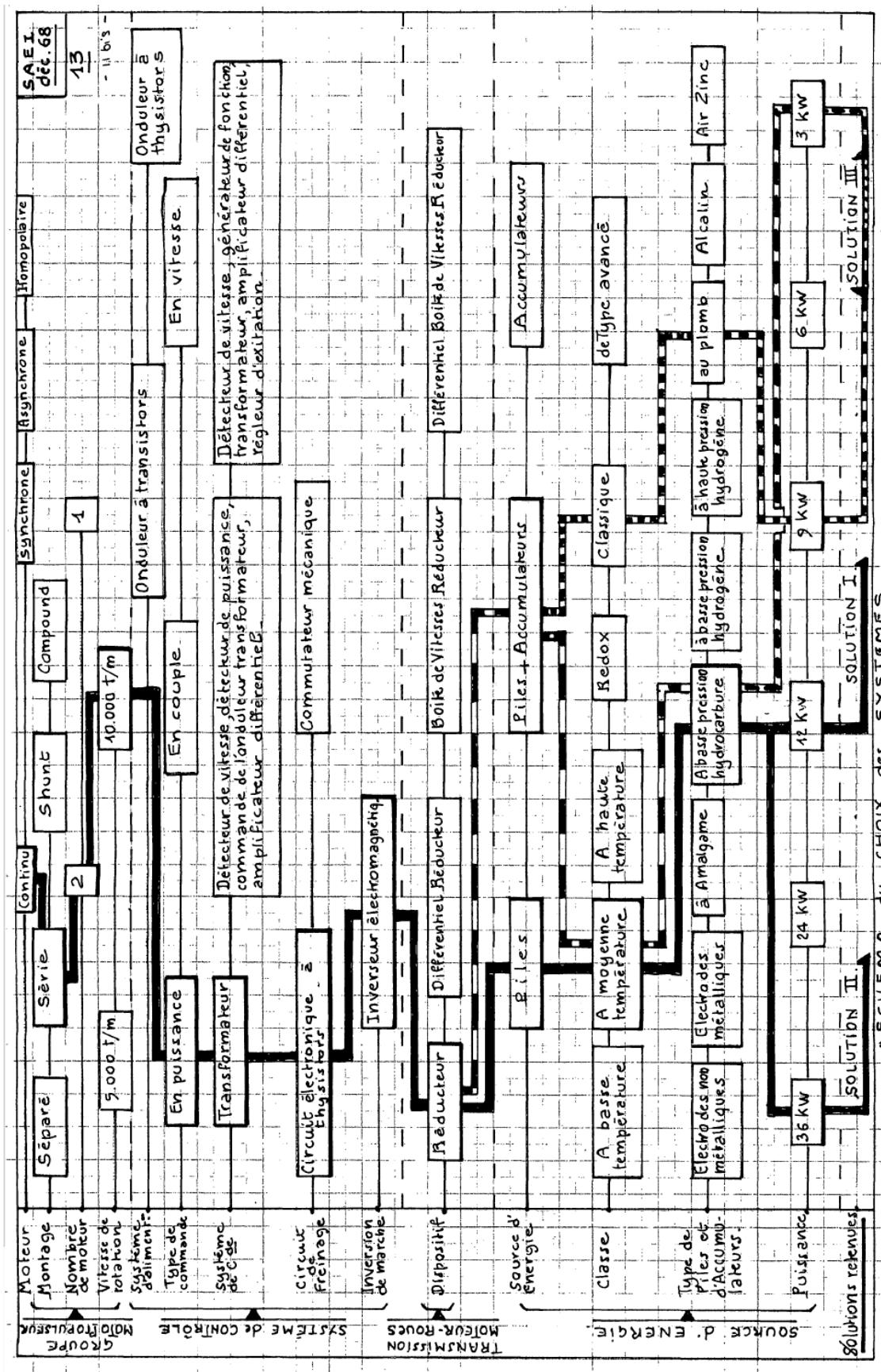
Annexe 7 - Locomotive utilisée pour les tests expérimentaux d'Alsthom (Source : Alsthom, 1966)



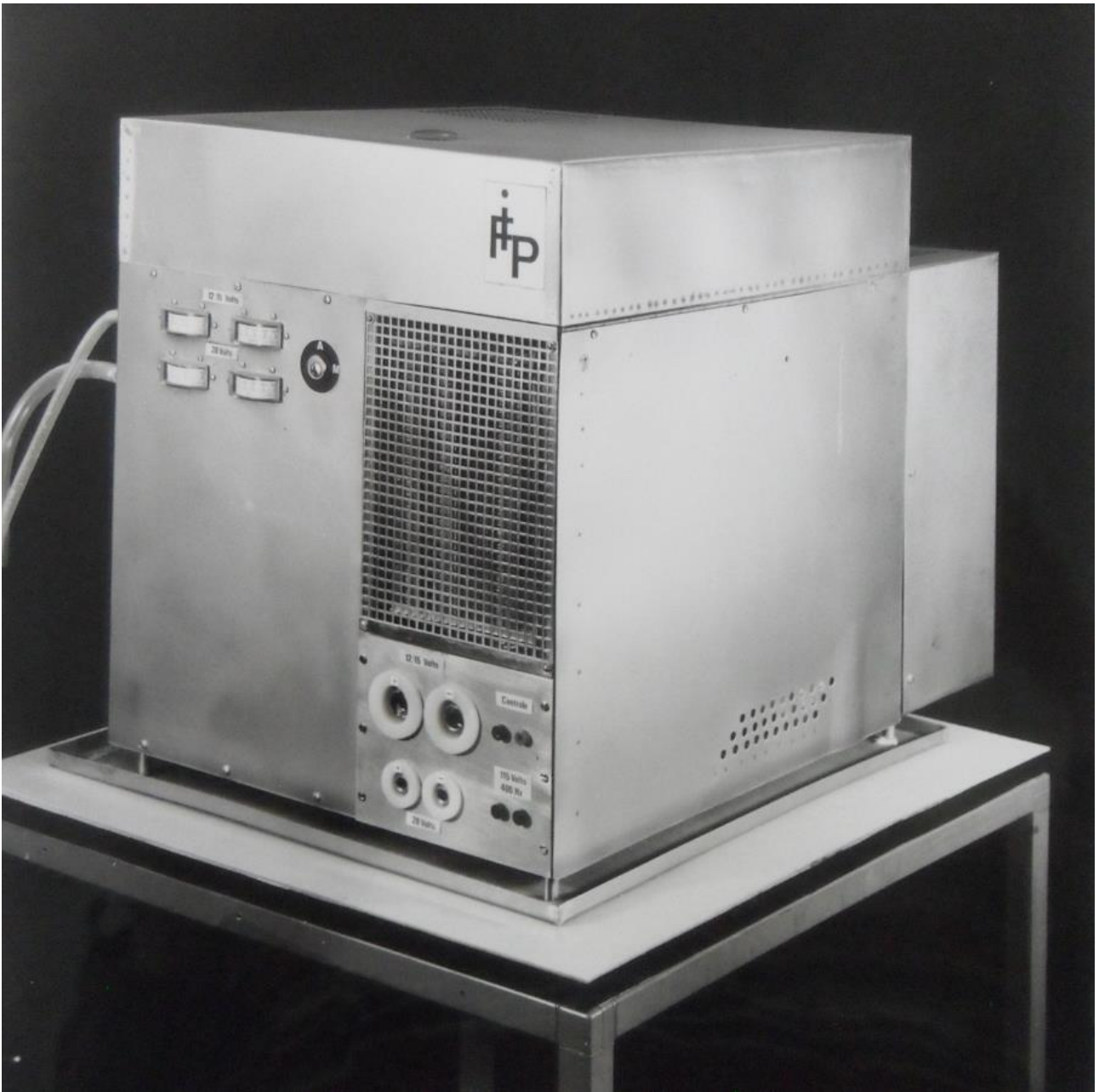
Annexe 9 – Une batterie électrochimique filtre-presse d’Alsthom, comprenant 180 éléments (séparateurs, électrodes et diaphragmes) répartis en 6 blocs de 30 éléments (Source : Alsthom, 1967)



Annexe 10 – Le directeur des recherches d’Alsthom Bogdan Broniewski tenant dans ses mains une pile à combustible (Source : INA/ORFT, 1968)



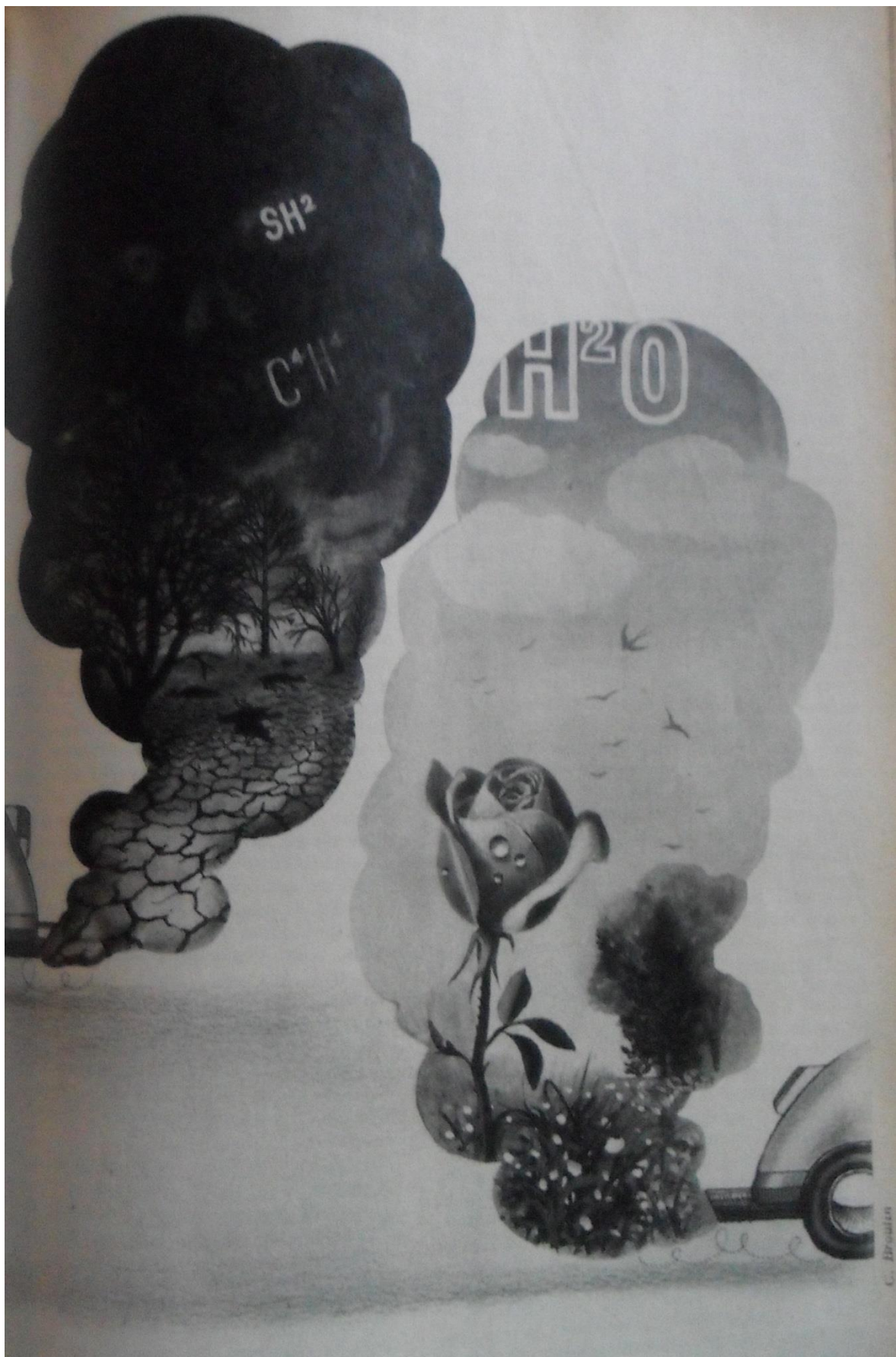
Annexe 11 – Schéma du choix des systèmes envisagés pour le véhicule urbain en 1969 (Source : ministère de l'Équipement et du Logement, 1969)



*Annexe 12 – La pile à combustible hydrogène-air réalisée par l'IFP pour la SEFT en 1973
(Source : lettre de Bernard Salé à Jacques Gallot, 1975)*



*Annexe 13 – La pile à combustible hydrogène-air réalisée par l'IFP pour la SEFT en 1973, modèle
militarisé (Source : IFP, vers 1975)*



Annexe 14 – Les représentations de l'hydrogène dans la presse parascientifique (Source : Science & Vie, 1972)

SCIENCE & VIE

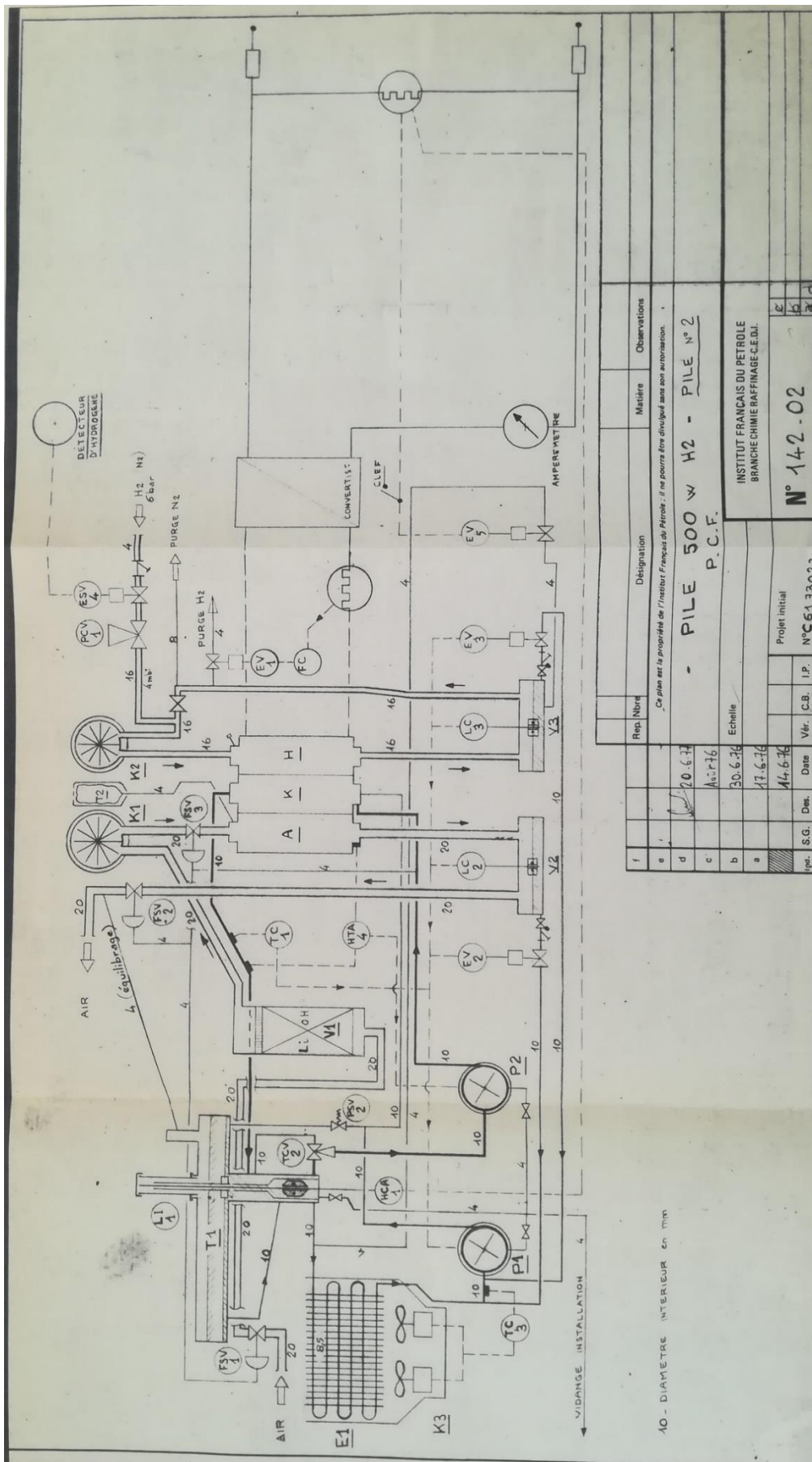
*Notre enquête
alimentation vérité
n° 5 : les légumes*

*Notre
village
solaire*

*Téléphonez-lui :
l'ordinateur vous
répond sur votre TV*



Annexe 15 – La couverture du magazine Sciences & Vie en mars 1974 (Source : Science & Vie, 1974)



Rep. Nbre	Designation	Matiere	Observations
f			
g			
d			
c			
b			
a			
Proj. initial			
Ver.			
C.B.			
I.P.			
Des.			
Date			
17.6.76			
30.6.76			
14.7.76			
20.6.77			

Ce plan est la propriété de l'Institut Français du Pétrole; il ne pourra être divulgué sans son autorisation.

- PILE 500 W H2 - PILE N° 2
P.C.F.

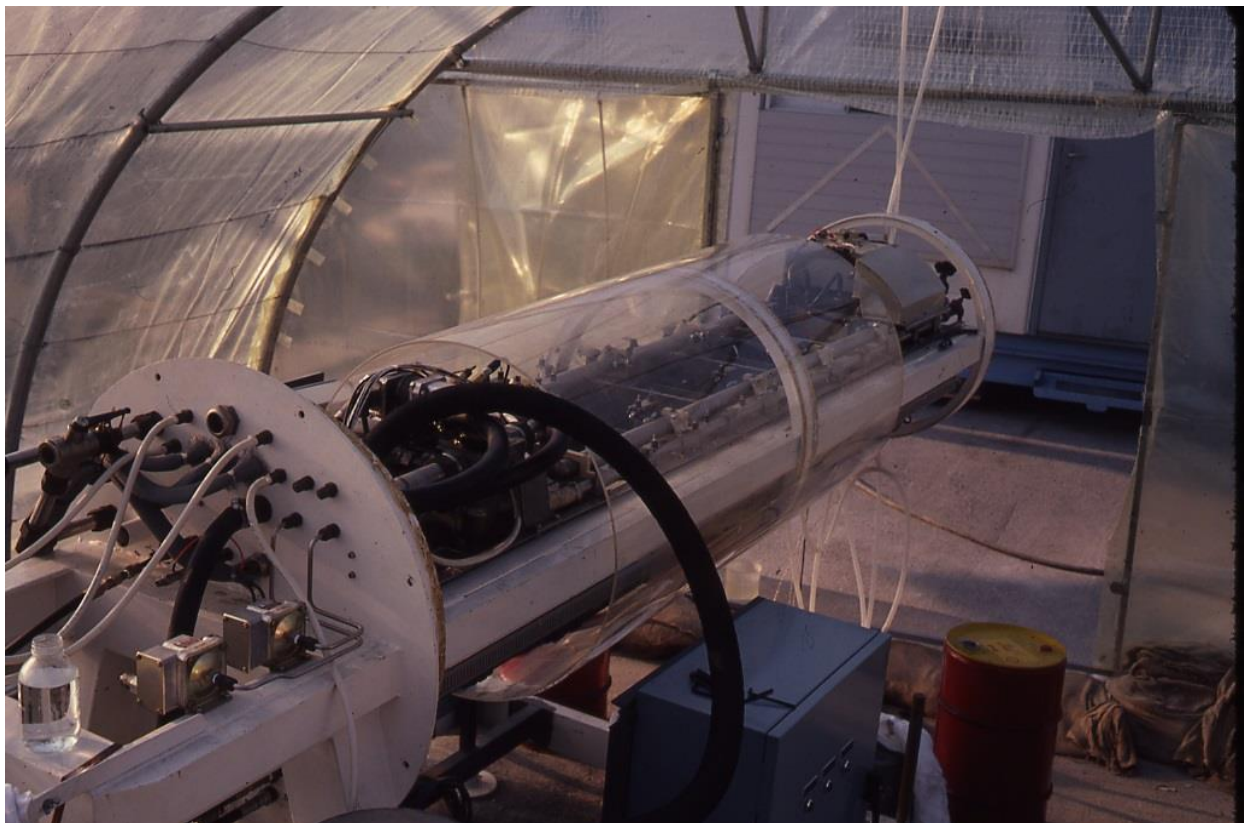
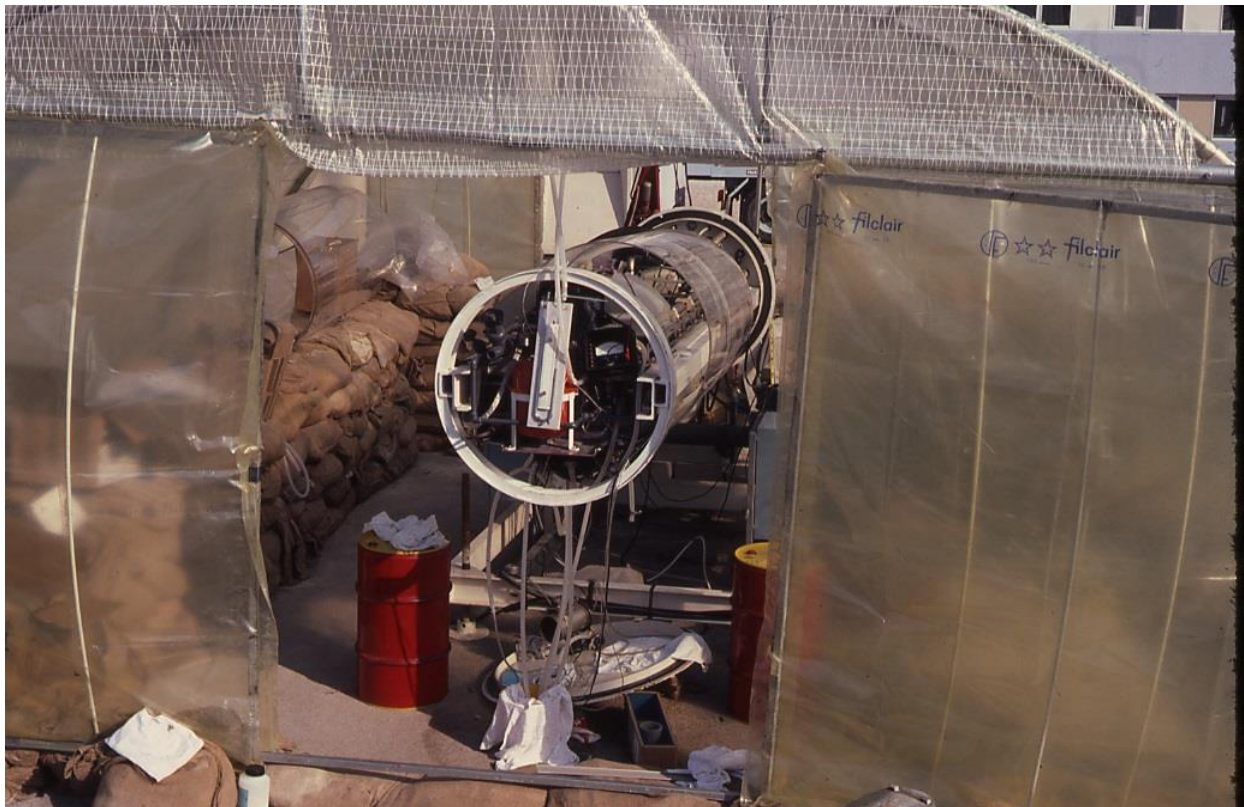
Institut Français du Pétrole
BRANCHE CHIMIE RAFFINAGE S.E.D.I.

N° 142-02

Projet initial
N° C61 73023

10 - DIAMETRE INTERIEUR EN MM

Annexe 16 – Plan de la pile hydrogène-air de 500 W fournie à la SEFT par l'IFP en 1977 (Source : IFP, 1977)



Annexe 17 – Photographies de la pile à hydrogène de l'IFP livrée à la COMEX et au CNEXO à Toulon en 1982 (Auteur : Jacques Chéron, 1982)

RÉSUMÉ

Les piles à combustible, dont le principe de fonctionnement est connu depuis le milieu du XIX^{ème} siècle, permettent de produire simultanément de l'électricité, de l'eau et de la chaleur à partir de combustibles et comburants tels que l'hydrogène et l'oxygène. À la fin des années cinquante, ces générateurs électrochimiques connaissent des perfectionnements majeurs, notamment grâce aux travaux de l'Anglais Francis T. Bacon, et sont utilisés aux États-Unis par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) au sein de ses programmes spatiaux. En France, des études sont mises en place au même moment dans des laboratoires publics et privés, tels que ceux d'Alsthom, de l'Institut français du pétrole et du CNRS (Centre national de la recherche scientifique), sous l'égide des Armées et de la DGRST (Délégation générale à la recherche scientifique et technique), organisme d'État chargé de la politique de la recherche. Jusqu'au début des années quatre-vingt, des millions de francs sont ainsi investis et des centaines de chercheurs, ingénieurs et techniciens sont mobilisés pour améliorer la technique, travailler à son adaptation aux automobiles électriques, aux trains, aux sous-marins, à la construction de centrales de production industrielle d'électricité ou encore à la fourniture de solutions militaires. Alors que de nos jours les piles à combustible apparaissent en France comme des options majeures pour la transition énergétique, c'est tout l'objet de cette thèse que de retracer, restituer et analyser cette partie de leur histoire grâce à une enquête de terrain fondée sur la récolte d'archives et la réalisation d'entretiens avec des acteurs ayant participé aux recherches. Nous mettrons tout d'abord au jour les conditions socio-historiques et les dynamiques structurelles qui font que les piles à combustible deviennent un thème d'intérêt en France à la fin des années cinquante. Nous montrerons ensuite comment les études sont organisées puis réorientées dans les années soixante et soixante-dix en fonction de l'évolution du collectif de pensée et du réseau social créés autour de la technique. Enfin, nous examinerons l'ensemble des raisons politiques, économiques, scientifiques et sociales pour lesquelles ces travaux sont presque tous abandonnés au début des années quatre-vingt.

Mots-clés : pile à combustible – électrochimie – hydrogène – histoire des sciences et des techniques – épistémologie

Fuel cells, which operation principle is known since the middle of the 19th century, allow to produce electricity, water and heat simultaneously from fuels and combustives like hydrogen and oxygen. At the end of the 50s, these electrochemical generators are perfected, particularly thanks to the work of Francis T. Bacon in England, and are used in the USA by NASA (National Aeronautics and Space Administration) for space programs. In France at the same period, private and public laboratories as Alsthom, the IFP (French Petroleum Institute) and the CNRS (French National Center for Scientific Research) start their own studies under the supervision of the Ministry of Defense and the DGRST (General Commission for Scientific and Technical Research), a national institution in charge of scientific research policy. Until the beginning of the 80s, millions are thus invested and hundreds of researchers, engineers and technicians are mobilized to improve fuel cells, work on their adaptation to electrical cars, trains, submarines, on the construction of fuel cell power plants or specific military equipment. Now that in France fuel cells are considered as major options for energy transition, the objective of this dissertation paper is to analyze this period of their history thanks to a field investigation based on numerous archives and interviews with stakeholders who contributed to researches. We will first expose socio-historical conditions and structural dynamics which make fuel cells become a theme of national interest at the end of the 50s. We will then show how studies are organized and reoriented in the 60s and 70s according to the evolution of the thought collective and the social network created around fuel cells. Finally, we will examine all political, economic, scientific and social reasons which led to drop almost all fuel cell researches in the country at the beginning of the 80s.

Keywords: fuel cell – electrochemistry – hydrogen – history of science and technology – epistemology