

Le développement des recherches sur les piles à combustible en France à la fin des années cinquante : analyse de la construction historique d'un engouement technologique

The Development of Fuel Cell Research in France at the End of the 1950s: Analysis of the Historical Construction of a Technological Enthusiasm

Nicolas Simoncini¹

¹ Femto-St RECITS, FR CNRS 3539 FC Lab, MSHE Claude Ledoux, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, France, nicolas.simoncini@utbm.fr

RÉSUMÉ. Notre article analyse les raisons et les modalités du développement des recherches sur les piles à combustible en France à la fin des années cinquante. À partir de l'étude de documents d'archives, nous montrons que plusieurs facteurs concourent à leur essor : l'évolution de la technique et la rupture avec les études entreprises en Europe du XIX^{ème} siècle aux années trente, entraînée par l'ingénieur anglais Francis T. Bacon ; l'accroissement des préoccupations énergétiques et d'un complexe du retard sur l'étranger après la Seconde Guerre mondiale ; l'intensification du rôle de l'État dans l'orientation des sciences. D'autre part, l'institutionnalisation de la relation entre les milieux militaires, académiques et industriels participe à l'établissement d'un collectif de pensée et d'un réseau social qui conditionnent la forme des recherches.

ABSTRACT. Using archival research, this paper analyzes the causes and conditions that led to the development of fuel cells in France at the end of the 1950s. There were many contributing factors: the break with the research previously conducted in Europe from the 19th Century to the 1930s, led by the English engineer Francis T. Bacon; the rise of energy self-sufficiency concerns following the Second World War; fears of losing a strategic scientific and technological advantage over other nations; and the increasing role of the French state in the orientation of science and technology. The institutionalization of the relation between the military, academic and industrial sectors also created a thought collective and a social network which shaped fuel cell research.

MOTS-CLÉS. Pile à combustible, hydrogène, électrochimie, catalyse, électrode, réseau social, collectif de pensée.

KEYWORDS. Fuel cell, hydrogen, electrochemistry, catalysis, electrode, social network, thought collective.

1. Introduction

Les piles à combustible, qui permettent de convertir avec un rendement élevé l'énergie chimique en énergie électrique et en énergie thermique, apparaissent dans plusieurs pays comme des options majeures pour la transition énergétique : silencieuses et ne rejetant que de l'eau, elles constituent des alternatives à la fois en tant que convertisseurs énergétiques [EDW 08] et modes de restitution des énergies renouvelables stockées sous forme d'hydrogène [EBE 09]. En France, l'Aphypac (Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible), qui compte 122 membres, recense ainsi près de 70 projets relatifs à l'hydrogène et aux piles à combustible actuellement en cours sur tout le territoire¹. Cet engouement récent est à mettre en perspective : ces générateurs électrochimiques suscitaient déjà un intérêt national à partir de la fin des années cinquante. À cette période en effet, qui marque par ailleurs le début de l'utilisation de piles à combustible au sein des programmes spatiaux américains

¹ <http://afhypac.org/documentation/carte-projets/carte-projets/>

Gemini et Apollo [TEI 17], de nombreuses études sont entreprises dans des laboratoires publics et privés 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 centaines de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens sont mobilisés pour améliorer la technique, travailler à son adaptation à des automobiles électriques, des trains, des sous-marins, à la construction de centrales de production industrielle d'électricité ou encore à la fourniture d'équipements militaires.

De premières analyses ont documenté ces travaux durant les années soixante, de même que les suivants [BEL 14, CAL 79]. Cependant, peu a été écrit sur les raisons de leur développement et sur ceux qui les ont précédés. Dans cet article², nous proposons ainsi de revenir sur le parcours des recherches françaises sur les piles à combustible, de leur émergence au XIX^{ème} siècle à leur intensification à la fin des années cinquante. Comment celles-ci ont-elles évolué dans cet intervalle de temps ? Quels acteurs se sont investis dans les recherches ? Quelles sont les spécificités des études dans le domaine ? Que doivent-elles aux contextes scientifiques, techniques, sociaux, politiques et économiques au sein desquels elles prennent place ? Enfin, pour quelles raisons la technique devient-elle un thème d'intérêt national à partir de 1959 ? Pour tenter de répondre à ces questions, nous prendrons appui sur une enquête de terrain réalisée entre 2015 et 2018, fondée sur le recueil de près de dix mille pages d'archives. Seront ici mobilisés des documents issus de plusieurs fonds, en particulier ceux du ministère des Armées à Vincennes, de la DGRST aux Archives nationales de Pierrefitte-sur-Seine, du CNRS (Centre national de la recherche scientifique) à Gif-sur-Yvette, et de la Bibliothèque nationale de France).

2. De premières recherches disparates en Europe

La découverte du principe de fonctionnement des piles à combustible remonte à 1838-1839, c'est-à-dire aux travaux fondateurs du chimiste allemand Christian Friedrich Schönbein et du juriste anglais William Grove [AND 09]. Ceux-ci sont poursuivis dès la seconde moitié du XIX^{ème} siècle, non pas au sein d'un champ de recherches unifié mais bien plutôt dans les laboratoires de petites équipes disparates de chimistes et physiciens européens. Citons par exemple les études de Lord Rayleigh en 1882 sur l'amélioration de l'efficacité des électrodes de platine, les tentatives d'élaboration d'une pile à combustible par Charles R.A. Wright et C. Thompson en 1889 et l'approfondissement théorique du rôle des composants par Friedrich W. Ostwald en 1893. En 1889, Ludwig Mond et Carl Langer donnent également à la technique son nom (« fuel cells » en langue anglaise) et sa forme actuelle : des cellules connectées et intercalées entre des plaques bipolaires. En visant la conversion directe du charbon en électricité, William W. Jacques est quant à lui le premier à réaliser en 1896 une pile de 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 (CO₂) qui ne l'empêche pas d'imaginer des applications nombreuses et variées telles que des moyens de transport maritimes et terrestres silencieux, et l'assainissement de l'air de la ville de Londres. Fritz Haber et Ludwik Bruner remarquent néanmoins en 1904 que le modèle de William W. 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 rapidement pour en faire une technique avantageuse [CHE 03].

² Ce texte est issu de recherches menées dans le cadre d'une thèse en Épistémologie, histoire des sciences et des techniques, intitulée « Histoire de la recherche sur les piles à combustible en France des années soixante aux années quatre-vingt », conduite à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard et soutenue en 2018. Cette thèse a reçu le soutien du ministère des Armées.

À la même période en France, ce que l'on nomme encore « la pile à gaz de Grove » fait l'objet d'attention. Le Comte du Moncel en traite dans son Exposé des applications de l'électricité en 1872 [DUM 72], tout comme Gaston Planté dans ses Recherches sur l'électricité en 1883 [PLA 83]. Henri Poincaré, pour sa part, en fait mention dans ses cours de thermodynamique professés à ses étudiants de la Faculté des sciences de Paris lors du premier semestre de l'année scolaire 1888-1889 [POI 08]. Surtout, Louis Paul Cailletet et Emmanuel Collardeau soumettent leurs recherches sur l'influence de la pression sur les électrodes à l'Académie des sciences en 1894³. Mais le sujet dépasse les simples cercles scientifiques nationaux puisque plusieurs journaux font état des progrès concernant les piles à combustible, tels que La science populaire en 1881⁴, Le Génie civil en 1889⁵, le Journal officiel de la République française en 1894⁶ et L'ingénieur civil en 1895⁷. Pour Le Monde illustré en 1895, les résultats obtenus par Cailletet et Collardeau doivent même « être accueillis avec la plus grande ferveur par les électriciens » à l'heure où « pour la traction et l'éclairage électriques, le besoin est urgent d'accumulateurs élevés »⁸.

Jusqu'à la fin des années trente, on trouve régulièrement des références à la technique au sein du pays. La pile à gaz est ainsi devenue un thème à connaître pour les candidats aux Écoles nationales d'arts et métiers en 1901 [SER 01]. Georges Urbain détaille de son côté le principe des « piles réversibles » dans ses cours donnés à la Sorbonne dans les années vingt [URB 25]. L'ingénieur civil Berthier publie aussi en 1929 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 spécifiquement vers « la pile à charbon, la pile à gaz et la pile à hydrocarbures »⁹. Enfin, 1937 marque peut-être l'ouverture du problème de la pile de Grove au grand public puisque celle-ci est exposée au Palais de la découverte scientifique de l'exposition internationale de Paris¹⁰. Peu de travaux d'envergure académique subsistent en revanche. Citons tout de même ceux de Charles Féry sur une « pile à dépoliarisation par l'air » en 1921¹¹, ceux du directeur du Laboratoire d'électrochimie de l'École pratique des hautes études Claude Marie sur la « pile à gaz ammoniac-oxygène »¹² en 1931 et ceux de l'ingénieur roumain Vasilescu Karpen présentés par le physicien Aimé Cotton à l'Académie

³ Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, « Recherches sur la condensation des gaz de l'électrolyse par les corps poreux et en particulier des métaux de la famille du platine. Applications à la pile à gaz. Accumulateurs électriques sous pression ; par MM. L. Cailletet et E. Collardeau », Tome cent dix-neuvième, juillet-décembre 1894, Gauthier-Villars et fils, 1894, p. 830.

⁴ *La science populaire*, deuxième année, n°91, le 10 novembre 1881, p. 1445.

⁵ *Le Génie civil : revue générale des industries françaises et étrangères*, neuvième année, Tome XV, n°21, le 21 septembre 1889, p. 479.

⁶ *Journal officiel de la République française*, vingt-sixième année, n°313, le 18 novembre 1894, p. 5564.

⁷ *L'Ingénieur civil. Journal d'application et de vulgarisation des découvertes les plus récentes*, quatrième année, n°72, le 1er avril 1895, p. 1536.

⁸ *Le Monde illustré*, trente-neuvième année, n°1971, le 5 janvier 1895, p. 6.

⁹ *La Croix*, n°14107, le 27 février 1929, p. 4.

¹⁰ *Le Génie civil : revue générale des industries françaises et étrangères*, cinquante-septième année, Tome CXI, n°15, n°2878, le 9 octobre 1937 p. 305.

¹¹ Académie des sciences, « Pile à dépoliarisation par l'air. Note de M. Ch. Féry, présentée par M. d'Arsonval », séance du lundi 7 février 1921, p. 317.

¹² *Le Génie civil : revue générale des industries françaises et étrangères*, Tome C, n°1, le 1^{er} février 1932, p. 23.

des sciences en 1939¹³. Ces expérimentations apparaissent relativement marginales en comparaison d'autres effectuées ailleurs en Europe : tandis que Emil Baur et ses collègues testent en Suisse la conversion du charbon en électricité et les oxydes solides, le physicien allemand Walter Schottky et le scientifique arménien Oganés K. Davtyan du Moscow G.M. Krzizhanovsky Power Institute of the Russian Academy s'appliquent à améliorer la stabilité des électrolytes [HAU 64, MOB 97, BAG 12]. Pour comprendre de quelle manière les études connaissent une impulsion nouvelle à la fin des années cinquante, il faut donc décentrer le regard et se tourner vers l'analyse du parcours de la technique à l'étranger.

3. Francis T. Bacon : un talent technique associé au savoir-faire de l'ingénieur

L'ingénieur anglais Francis T. Bacon apporte le premier des perfectionnements majeurs aux piles à combustible. Sa démarche va même s'imposer comme un modèle de référence international. Descendant direct de Sir Nicholas Bacon et fils d'un ingénieur en électricité ayant travaillé à la Eastern Telegraph Company, Francis T. Bacon 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 diplômé en sciences mécaniques. Il obtient ensuite un emploi à la C.A. Parsons and Co. Ltd., une entreprise spécialisée en ingénierie 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, ce qui lui donne l'occasion de côtoyer des scientifiques et ingénieurs distingués. Francis T. Bacon apprend le principe de fonctionnement de la pile à combustible via deux articles parus dans la revue *Engineering* en 1932 [BAC 85], puis approfondit ses connaissances par la lecture de l'ouvrage *The principles of Applied Electrochemistry* (1924) de Arthur J. Allmand et Harold J.T. Ellingham, et d'une étude publiée par Emil Baur et Jakob Tobler en 1933. Débouté une première fois par son employeur lorsqu'il tente de le convaincre du potentiel de la pile hydrogène-oxygène en 1937, Francis T. Bacon persévère en menant ses propres expériences pratiques, suivant les conseils de Sir Frank Smith, alors à la tête du Government's Department of Scientific and Industrial Research et qu'il rencontre chez Parsons [WIL 94].

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, au cours de laquelle 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 lui apparaissent « beaucoup plus prometteurs que les autres types » [BAC 69]. Dès le départ, Francis T. Bacon souhaite non pas participer à l'amélioration des connaissances théoriques au sujet de la pile à combustible mais amener la sienne, accolée à un électrolyseur, « à un stade suffisamment avancé pour qu'elle soit envisagée pour des applications commerciales » [BAC 79]. Pour ce faire, il adopte une approche originale qu'il tire de sa position d'ingénieur, différente de celle d'un « pur chimiste »¹⁴. 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 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.

¹³ Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, « La pile à gaz ; mécanisme de l'électrolyse de l'eau ; polarisation des piles. Note de M. Vasilescu Karpen, présentée par M. Aimé Cotton », tome deux cent-neuvième, juillet-décembre 1939, p. 988.

¹⁴ *The Engineer*, le 13 août 1954, p. 226.

Après l'obtention d'un poste provisoire au King's College, sous la direction du professeur Allmand, puis sa mobilisation au service de l'Amirauté au cours de la Seconde Guerre mondiale, Francis T. Bacon se lance à la recherche d'un mécène prêt à financer ses travaux. Or les grandes firmes lui ferment leurs portes. Une anecdote en révèle les raisons : lors d'un entretien, le directeur d'une organisation de recherches en carburants le questionne sur ses connaissances en chimie. Il admet n'avoir reçu qu'un enseignement scolaire mineur. Cette réponse déplaît et il est rapidement congédié [BAC 79]. Si les caractéristiques sociales atypiques de l'Anglais, en particulier sa formation d'ingénieur, lui permettent de réaliser des progrès notables dans le domaine technique par rapport aux chimistes, elles s'avèrent donc difficilement mobilisables dans les milieux industriels spécialisés où la légitimité à mener des activités est en grande partie garantie par l'autorité accompagnant la détention d'un cursus académique adéquat. Mais cet aveu d'incompétence scientifique a justement un autre sens : il le place dans une posture de défi symbolique par rapport à l'ordre dominant. En signifiant sa distance à la chimie et à son 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. Il postule plutôt que les connaissances autour de ces appareils ont désormais vocation à se constituer grâce à un talent technique associé au savoir-faire de l'ingénieur.

Si Francis T. Bacon n'est pas un chimiste, il n'est en tout cas pas qu'un technicien. C'est aussi un véritable entrepreneur sachant nouer des liens stratégiques entre science, économie et politique pour négocier sa position et constituer un réseau d'acteurs autour de ses appareils. Pour parvenir à ses fins, il prend de plus appui sur certains changements socio-historiques. En effet, il finit par intéresser l'ERA (Electrical Research Association), une organisation de coopération industrielle financée par l'État et des entreprises privées [EIS 09], dans un contexte marqué par l'essor de la politique technologique du Royaume-Uni. La promotion nationale de la R&D est alors vive en faveur du soutien à la défense et à la reconstruction économique [HOR 99]. Il rencontre également le chimiste Eric K. Rideal, qui lui octroie un espace de travail à l'Université de Cambridge. Une nouvelle pile y est réalisée, composée d'électrodes poreux en nickel pour améliorer le contact avec l'hydrogène. S'il profite de conditions favorables à l'amélioration de son procédé – la fabrication du nickel poreux ayant été optimisée au cours de la guerre – Francis T. Bacon continue de déployer les fils de son réseau en demandant à la Mond Nickel Company de produire des électrodes spécifiques à ses besoins. Bientôt financé par le Ministry of Fuel and Power et l'Amirauté en plus de l'ERA, l'Anglais s'entoure d'une véritable équipe : il est rejoint par l'électrochimiste Reginald G.H. Watson de l'Imperial College of Science and Technology, le professeur T.R.C. Fox et Tom F. Fry [BOC 00]. Avec eux, il résout les problèmes posés par la corrosion de la cathode, en la trempant dans une solution d'hydroxyde de lithium, en la séchant puis en la chauffant quelques instants entre 800 et 1000°C, ainsi que ceux provoqués par l'empoisonnement de l'anode, en remplaçant certains joints par du Téflon, un polymère thermoplastique découvert en 1938 par Roy J. Plunkett.

Signe de la mutation qui s'opère dans la science de l'après-guerre, où se mêlent les disciplines et les instruments dans de nouvelles formes d'organisation et de division du travail [GAL 92], l'équipe s'agrandit encore avec l'arrivée du chimiste W.J. Davis, du métallurgiste J.G. Bowers et des trois techniciens Billet, Pike et Young, et se lance dans la réalisation d'un prototype de batterie. Doté de six piles, celui-ci est présenté à l'occasion de la *Production Exhibition and Conference* à Londres en juillet 1954¹⁵. 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 *British and Electrical Allied Manufacturers' Association Journal* qui atteint de façon inhabituelle une

¹⁵ *The Engineer*, Vol. 202, n°5243, le 20 juillet 1956, p. 93.

diffusion internationale. Sur le conseil de l'éditeur, le remplacement du titre original « Hydrogen/Oxygen Cell » par celui de « Hydrogen/Oxygen Fuel Cell »¹⁶ est un succès.

4. L'accélération des études au niveau international : l'essor des entreprises américaines

Les principaux pourvoyeurs de fonds de Francis T. Bacon se retirent pourtant bientôt. 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 technique est considérée comme prête à être diffusée dans le commerce et il est attendu de l'industrie britannique qu'elle prenne désormais le relais. Pour autant, cette dernière s'avère réticente à s'engager, en raison du faible nombre d'applications viables révélées par les années d'études précédentes, et l'équipe de Cambridge est forcée de mettre un terme à ses travaux.

D'autres tendances s'observent au niveau mondial. Plusieurs chercheurs s'activent dans le domaine, participent à l'accumulation et au transfert de savoirs pratiques et de connaissances théoriques. Oganeg K. Davtyan publie en 1947 son ouvrage majeur, *The Problem of Direct Conversion of the Chemical Energy of Fuels into Electrical Energy*, 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'oxygène. Au début des années cinquante à l'université d'Amsterdam, J.A.A. Ketelaar et G.H.J. Broers passent un contrat avec une organisation semi-gouvernementale hollandaise pour les recherches scientifiques appliquées. 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 poreux [KET 93]. 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'oxydes en expérimentant sur les piles à électrolytes solides [GUT 15]. Ils mettent ainsi au point des solutions à base d'oxyde de fer et de ferrite de magnésium [KEN 16].

Aux États-Unis, les études sur les piles à combustible sont effectuées non seulement par des universitaires mais également par des entreprises. Comme au Royaume-Uni, ces initiatives sont facilitées par une politique scientifique consacrant le renforcement des formes de coopération entre les armées, les universités et l'industrie. Entre 1951 et 1965, les contrats étatiques avec des laboratoires privés et publics dépassent ainsi les 200 [AUS 67]. Si l'on a souvent fait de cet intérêt une conséquence du démarrage des programmes spatiaux, les piles à combustible du type Bacon étant successivement utilisées par la NASA dans les capsules Gemini et Apollo, les recherches américaines sur la technique dans les années cinquante concernent en réalité d'autres objectifs. La Navy étudie par exemple les piles pour la génération d'oxygène à destination des équipages de ses nouveaux sous-marins nucléaires [CLE 14] et finance Aerojet General Corporation dans le cadre de la production de batteries à haute densité énergétique. Mentionnons encore C.E. Larson de l'Union Carbide Corporation qui prédit la

¹⁶ *BEAMA Journal*, n°61, 1954, pp. 6-12.

possibilité de remplacer à terme « le bruit ronflant émis par le moteur à combustion » par des piles à combustible¹⁷, et Anthony Moss, de l'entreprise new-yorkaise Patterson Moss, qui entame des discussions pour l'acquisition de brevets sur le système de Francis T. Bacon. Or de l'aveu même de l'ingénieur anglais, ce dernier « n'avait aucune idée qu'il pouvait y avoir une place pour les piles à combustible dans le programme spatial » [BAC 69].

L'une des sociétés américaines les plus influentes dans le domaine reste cependant la General Electric. En 1955, l'un de ses chimistes, Willard T. Grubb, revoit la conception générale de la technique et met au point les premières piles à membranes échangeuses de protons [PER 02]. Composées de polystyrène sulfonaté 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 une alimentation en hydrocarbures, ce qui reste le but affiché. Trois ans plus tard, Leonard W. Niedrach élabore le dépôt d'électrodes en nickel platiné sur la membrane pour améliorer la réaction catalytique. Pour les deux scientifiques, ce type de pile représente une amélioration commerciale considérable étant données « sa construction assez simple et sa petite taille » [GRU 60]. Les recherches de la General Electric, principalement développées pour des solutions militaires portatives¹⁸, sont d'ailleurs diffusées largement, jusqu'à faire l'objet d'un film promotionnel présenté par Ronald Reagan¹⁹.

5. Un engouement français pour les piles à combustible marqué par un complexe du retard sur l'étranger

Au sortir de la Seconde Guerre mondiale en France, les études sur les piles à combustible restent peu nombreuses. Les comptes rendus de l'Académie des sciences ne contiennent que des notes de Henri Moureu, Paul Chovin et Armand Marie de Ficquelmont sur les piles à dépolarisation par l'air en 1951²⁰ et de Madeleine Chenot sur les piles à gaz ionisé en haute fréquence en 1952²¹. D'autres recherches ne sont encore que partiellement corrélées. En 1949, les professeurs Sator et Wolfers de la Faculté des sciences d'Alger s'occupent ainsi de « piles à solvants organiques », et le professeur Bernanose de la Faculté des sciences de Nancy de « piles à électrolytes fluorescents »²². Maurice Bonnemay et le professeur Muxart perfectionnent quant à eux, en 1956, des « piles de température, des piles en milieu de sel fondu, des piles en milieu aqueux et des piles Ag/Agel (dans le chlorure d'argent fondu et dans les solutions aqueuses de NaCl) »²³. Il faut dire que le champ de l'électrochimie est alors considéré comme le « cousin pauvre » [PRO 94] des disciplines légitimes et ne s'organise qu'autour de quelques laboratoires, les plus importants étant ceux de René Audubert, de Maurice Bonnemay et de

¹⁷ *The New Scientist*, Vol. 2, n°44, le 19 septembre 1957, p. 20.

¹⁸ *The New Scientist*, Vol. 8, n°196, le 18 août 1960, p. 461.

¹⁹ General Electric, *Twin Frontiers: Energy and Space*, Archives of the Schenectady Museum, 1955. Note : Ronald Reagan signe en 1954 un contrat avec la General Electric. Il présente l'émission « General Electric Theater » de 1954 à 1962 et participe à des événements promotionnels aux États-Unis.

²⁰ Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, « Étude sur les piles à dépolarisation par l'air. Polarisation statique et polarisation dynamique. Note de MM. Henri Moureu, Paul Chovin et Armand Marie de Ficquelmont, présentée par M. Pierre Jolibois », tome deux-cent-trente-deuxième, janvier-juin 1951, séance du 29 janvier 1951, p. 407.

²¹ Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, « “Pile” à gaz ionisé en haute fréquence. Note de Mlle Madeleine Chenot, présentée par M. Camille Gutton », tome deux-cent-trente-quatrième, janvier-juin 1952, séance du 4 février 1952, p. 608.

²² Ministère de l'Éducation nationale, « Bulletin du CNRS », série A, numéro 1, 1949, pp. 53-59

²³ CNRS, Laboratoire d'électrolyse, « Rapport Bellevue », 1956, p. 2.

l'IFP (Institut français du pétrole) en région parisienne, de Jean-Lucien Andrieux à Grenoble, de Marcel Prettre à Villeurbanne et de Jean-Eugène Germain à Lille. Néanmoins, un intérêt renouvelé pour les piles à combustible semble poindre dans d'autres espaces sociaux à partir de 1956, visiblement sous l'effet de l'accroissement des préoccupations énergétiques et des travaux de Francis T. Bacon. La revue *Atomes* fait par exemple état de ces générateurs « susceptibles de concurrencer l'énergie atomique » à un moment où l'on admet que les sources d'énergie dites classiques vont vers un épuisement progressif qui pose de « graves problèmes à l'humanité »²⁴. La même année, EDF (Electricité de France) fait mention des « piles à gaz » dans un document du Service des études et recherches hydrauliques. Dans ce texte, l'ingénieur Gaston Remenieras écrit particulièrement que « 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 »²⁵.

En 1959, c'est-à-dire au moment où Francis T. Bacon réalise, grâce à de nouveaux financements étatiques, une nouvelle pile « Hydrox » qui a atteint selon lui « un stade de développement similaire à l'aéroplane de Blériot »²⁶, de premières études approfondies s'organisent sur le plan national. Elles sont motivées par le rôle grandissant des structures publiques de la V^{ème} République dans l'organisation des sciences [CHA 06]. C'est d'abord le CASDN (Comité d'action scientifique de la Défense nationale), un organisme militaire chargé de la surveillance et l'appropriation des avancées scientifiques étrangères²⁷, qui va se pencher sur la technique²⁸. En juin, son président, le général Guérin, fait état de son intérêt pour les « piles à gaz » à l'ensemble des armées²⁹ puis convie plusieurs représentants d'institutions potentiellement concernées à une réunion d'information : l'IFP, l'EDF, le CNRS, le CNET (Centre national d'étude des télécommunications) et l'ONERA (Office national d'études et de recherches aéronautiques). La date n'est pas choisie au hasard. À la même période, la toute nouvelle DGRST met en place ses actions concertées visant à stimuler des recherches d'intérêt national dans certains secteurs jugés cruciaux, et notamment la conversion des énergies³⁰. Dans les deux institutions, la volonté de développement des piles tombe sous le sens d'un retard supposément accumulé par la France dans le domaine. Le CASDN signale ainsi qu'en Allemagne la pile à hydrogène de E.W. Justi est proche d'être industrialisée, que les Hollandais disposeraient d'une pile fonctionnelle depuis six mois et que de l'autre côté de l'Atlantique Esso Research aurait réussi à identifier les produits d'oxydation neutralisant l'électrolyte d'une pile alcaline, alors qu'en France les chercheurs ne s'intéressent à ces appareils que « depuis quelques mois »³¹. Ce complexe du retard n'est alors pas nouveau : il a cours depuis le début de la décennie dans le milieu de la politique de la science [BOU 08]. Mais les perspectives amenées par la « vague de publicité » autour des piles à combustible

²⁴ *Atomes*, n°126, octobre 1956, p. 314.

²⁵ EDF, Service des études et recherches hydrauliques, « Vue d'ensemble sur les divers procédés de stockage de l'énergie », mai 1956, pp. 29-31.

²⁶ *The New Scientist*, Vol. 6, n°145, le 27 août 1959, p. 272.

²⁷ Journal officiel, Décret n°48-361 du 24 mai 1948 portant création du Comité d'action scientifique de la Défense nationale, p. 5042.

²⁸ 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 ».

²⁹ 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.

³⁰ DGRST, « Les actions concertées, leur financement », 15 juin 1959, p. 4.

³¹ DGRST, « Comité d'études : Conversion des énergies. Réunion du 29 janvier 1960 », procès-verbal, pp. 2-3.

[SCH 98], conjuguée au fait que toute recherche entreprise aux États-Unis est considérée en pleine guerre froide comme « un phénomène mondial »³², a pour conséquence l'enclenchement des études.

6. Un style de pensée et un réseau social au cœur de l'approche systémique du problème de la catalyse

L'ensemble de ces événements marque le processus d'organisation sociale qui va conditionner l'orientation générale des recherches. Si plusieurs acteurs s'étaient déjà positionnés individuellement sur la thématique, dont le Laboratoire d'électrolyse du CNRS³³, l'IFP³⁴ et Gaz de France³⁵, des choix scientifiques et techniques décisifs sont opérés au sein du CASDN et de la DGRST. Pour autant, les deux institutions ne disposent pas des compétences internes nécessaires et s'en remettent aux membres de leurs groupes de travail respectifs, qui peuvent être perçus comme de véritables « collectifs » [FLE 08] développant leurs propres styles de pensée. En réalité, un style de pensée unique va être engagé, la présence de chercheurs communs aux deux collectifs facilitant cette évolution. À la Défense comme à la Délégation, le directeur du Laboratoire d'électrolyse Maurice Bonnemay prend particulièrement en main les recherches et les dirige vers une meilleure compréhension des phénomènes catalytiques. Pour lui, c'est de cette manière que l'on pourra ensuite déterminer les matériaux susceptibles d'être utilisés et la structure permettant une activité électrochimique idéale³⁶. Ces orientations, appuyées par Marcel Prettre, ne sont pas remises en cause. D'une part, le fonctionnement général de la technique leur donne raison. Si l'intérêt des piles à combustible réside dans leur possibilité d'échapper au cycle de Carnot, des phénomènes de polarisation viennent entraîner des pertes d'énergie. Or un des principaux moyens pour traiter ce point précis est d'intervenir sur les vitesses des réactions mises en jeu, qui sont l'oxydation du combustible à l'anode et la réduction de l'oxygène à la cathode. Dans ces circonstances, l'électrode, qui joue le rôle de catalyseur en plus de celui de conducteur d'électron, devient le cœur du problème. D'autre part, peu de personnes peuvent se targuer d'être aussi légitimes que les deux universitaires dans la lecture des problèmes des piles à combustible, en particulier 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 »³⁷.

La mise en œuvre des recherches repose sur deux types de registres d'action. Preuve de la distribution de l'activité de connaissance scientifique contemporaine [THA 97], elle s'aménage d'abord par le biais d'une répartition des tâches. Épaulé par Jean-Claude Balaceanu de l'IFP, Maurice Bonnemay se voit chargé par le CASDN de la direction des études sous leurs aspects théoriques et fondamentaux. Ce dernier confie à Marcel Prettre les questions fondamentales de catalyse et de cinétique et à Jean Surugue de l'ONERA celles d'ordre technologique touchant à la fabrication des électrodes, des diaphragmes, etc. La DGRST finance aussi bientôt de son côté plusieurs laboratoires, dont ceux du Gaz de France, de la CGE (Compagnie générale d'électricité) et de la CSF (Compagnie

³² Entretien de Pierre Aigrain sur Europe 1, le 1^{er} juin 1973.

³³ CNRS, « Rapport sur l'activité générale du CNRS », octobre 1958-octobre 1959, p. 66.

³⁴ 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.

³⁵ 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.

³⁶ 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 », pp. 1-4.

³⁷ CNRS, comité de direction du Laboratoire d'électrolyse, « procès-verbal de la réunion du 12 mars 1975 », p. 2.

de télégraphie sans fil)³⁸. Ce mode d'intervention, salué par le Premier ministre Michel Debré dans une lettre adressée en 1960 au président du Conseil national du patronat français Georges Villiers³⁹, démontre qu'un réseau social se forme progressivement autour des piles à combustible. Celui-ci est composé par les relations entre les organismes préoccupés par la technique et entre les individus qui y sont rattachés, les collectifs de pensée de la DGRST et du CASDN assurant au centre leur dynamique et la circulation des ressources scientifiques et financières.

Second point à noter, les recherches prennent place dans le cadre d'une approche systémique. Au CASDN par exemple, l'expérimentation d'une pile Redox et la réalisation pratique d'une pile à hydrogène en sont la traduction directe. Six prototypes exploratoires de type Hydrox sont en effet commandés en 1960 à la société Physimeca de Saclay, assemblés à partir de corps de cellules usinés à Toulouse par l'ONIA (Office national industriel de l'azote) et d'électrodes en nickel et carbone produits par le CNRS, la SAFT (Société des accumulateurs fixes et de traction) et la CIPEL (Compagnie industrielle des piles électriques)⁴⁰. Les équipes françaises tentent donc de résoudre les problèmes posés par les électrodes et la catalyse en les réinsérant dans des prototypes complets, pas en les isolant. Un tel régime de production des savoirs n'est pas pour déplaire à la DGRST et au CASDN. Il favorise au contraire le renforcement de la liaison entre science et technique, l'obtention de résultats matériels et la collaboration entre laboratoires privés et publics, soit précisément ce que les deux institutions souhaitent établir en France [CAL 78]. Il renvoie également à des courants de recherche en pleine expansion aux États-Unis depuis 1945, par exemple en sciences des matériaux [HOD 81], mais surtout à celui de Francis T. Bacon. L'assimilation de la posture prise par l'Anglais, plus pratique et technique que théorique, ne se perçoit pas seulement dans le choix de la construction d'un modèle de pile Hydrox : les références sont constantes à son sujet dans les discussions des acteurs du réseau français, bien plus qu'à tout autre scientifique. Ces phénomènes ont des conséquences importantes pour les recherches françaises sur les piles à combustible au cours des années suivantes, en particulier l'abandon de l'élaboration de grands ensembles théoriques de la chimie physique au profit de l'appropriation de solutions techniques fonctionnelles prêtes à être employées le plus rapidement possible dans des applications diverses (voitures, trains, navires électriques, engins spatiaux, centrales de production industrielle d'électricité, groupes électrogènes, etc.).

7. Conclusion

En définitive, l'essor des recherches françaises sur les piles à combustible, à la fin des années cinquante, peut se lire comme le résultat d'une combinaison de plusieurs facteurs hétérogènes. Il est d'abord dû à l'évolution de la technique et à la rupture avec les études entreprises en Europe du XIX^{ème} siècle aux années trente, entraînée par Francis T. Bacon par le biais d'une approche atypique découlant de ses propriétés sociales. Il procède ensuite, après la Seconde Guerre mondiale, du développement des préoccupations énergétiques et d'un complexe du retard sur l'étranger, en particulier sur les États-Unis où de nombreuses études sur les piles à combustible sont engagées. Enfin, il est une conséquence de l'accroissement du rôle de l'État dans l'orientation des sciences dans la V^{ème} République et de l'institutionnalisation de la relation entre les milieux militaires, académiques et industriels. Ces configurations politiques, qui participent en France et ailleurs à l'émergence d'autres travaux à la même époque, tels que ceux concernant le spatial, l'électronique ou l'atome [EDG 15], et qui attestent

³⁸ 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.

³⁹ Lettre du Premier Ministre au président du Conseil national du patronat, 1960, p. 5.

⁴⁰ 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.

de la complexité et de la richesse sociale du développement des techniques, ont encore d'autres répercussions : elles permettent l'établissement d'un collectif de pensée et d'un réseau social autour de la Défense et de la DGRST, qui vont eux-mêmes orienter les recherches selon des registres d'action et des régimes de production des savoirs particuliers.

8. Bibliographie

- [AND 09] ANDÚJAR J.M., SEGURA, F., « Fuel Cells: History and Updating. A Walk along Two Centuries », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 13, p. 2309-2322, 2009.
- [AUS 67] AUSTIN L., *Fuel Cells: A Review of Government Sponsored Research, 1950-1964*, NASA SP-120, 1967.
- [BAC 69] BACON F., « Fuel Cells, Past, Present and Future », *Electrochimica Acta*, Vol. 14, p. 569-585 ? 1969.
- [BAC 79] BACON F., « The Fuel Cell: Some Thoughts and Recollections », *Journal of The Electrochemical Society*, Vol. 126, n°1, p. 7C-17C, 1979.
- [BAC 85] BACON F., « The Development and Practical Application of Fuel Cells: Keynote Adress », *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 10, n°7/8, p. 423-430, 1985.
- [BAG 12] BAGOTSKY V., *Fuel Cells, Problems and Solutions*, Wiley, 2012.
- [BEL 14] BELOT R., PICARD F., « The Three Ages of Fuel Cell Research in France: A Socio-Technical System's Resistance to Change », *Fuel Cells*, Vol. 14, n°3, p. 525-532, 2014.
- [BOC 00] BOCKRIS J., REDDY A., *Modern Electrochemistry, Volume 2*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000.
- [BOU 08] BOUCHARD J., 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.
- [CAL 78] CALLON M., 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.
- [CAL 79] CALLON M., « L'État face à l'innovation technique : le cas du véhicule électrique », *Revue française de science politique*, Vol. 29, n°3, p. 426-447, 1979.
- [CHA 06] CHATRIOT A., DUCLERT V., *Le gouvernement de la recherche. Histoire d'un engagement politique de Pierre Mendès France à Charles de Gaulle (1953-1969)*, Éditions La Découverte, 2006.
- [CHE 03] CHEN E., « History », dans HOOGERS G. (ed.), *Fuel Cell Technology Handbook*, CRC Press, p. 2/8-2/9, 2003.
- [CLE 14] CLEVELAND C., MORRIS C., *Handbook of Energy. Volume II: Chronologies, Top Ten Lists and Word Clouds*, Elsevier, p. 326, 2014.
- [DUM 72] DU MONCEL T., *Exposé des applications de l'électricité, Tome premier*, Eugène Lacroix, p. 397, 1872.
- [EBE 09] EBERLE U., FELDERHOFF M., SCHÜTH F., « Chemical and Physical Solutions for Hydrogen Storage », *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 48, p. 6608-6630, 2009.
- [EDW 08] EDWARDS P., et al., « Hydrogen and Fuel Cells: Towards a Sustainable Energy Future », *Energy Policy*, Vol. 36, p. 4356-4362, 2008.
- [EDG 15] EDGERTON D., « L'État entrepreneur de science », dans BONNEUIL C., PESTRE D. (dir.), *Histoire des sciences et des savoirs. 3. Le siècle des technosciences*, Éditions du Seuil, p. 67-84, 2015.
- [EIS 2009] EISLER M., « A Modern 'Philosopher Stone': Techno-Analogy and the Bacon Cell », *Technology and Culture*, Vol. 50, n°2, p. 345-365, 2009.
- [FLE 08] FLECK L., *Genèse et développement d'un fait scientifique*, Éditions Flammarion, 2008.
- [GAL 92] GALISON P., HEVLY B. (ed.), *Big Science: The Growth of Large-Scale Research*, Stanford University Press, 1992.
- [GRU 60] GRUBB W., NIEDRACH L., « Batteries with Solid Ion-Exchange Membrane Electrolytes: II. Low-Temperature Hydrogen-Oxygen Fuel Cells », *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 107, n°2, p. 131-135, 1960.
- [GUT 15] GUTH U., « Hans-Heinrich Möbius and the Development of Electrochemistry with Solid Electrolytes », dans SCHOLZ F. (ed.), *Electrochemistry in a Divided World*, Springer International Publishing, p. 431-443, 2015.

- [HAU 64] HAUSER V., A study of a Carbon Anode Polarization in Fused Carbonate Fuel Cells, Thèse de doctorat, Oregon State University, 1964.
- [HOD 81] HODDESON L., « The Discovery of the Point-Contact Transistor », *Historical Studies in the Physical Sciences*, Vol. 12, n°1, p. 41-76, 1981.
- [HOR 99] HORROCKS S., « Enthusiasm Constrained? British Industrial R&D and the Transition from War to Peace, 1942–51 », *Business History*, Vol. 41, n°3, p. 42-63, 1999.
- [KEN 16] KENDALL K., KENDALL M., *High-Temperature Solid Oxide Fuel Cells for the 21st Century. Fundamentals, Design and Applications*, Elsevier, 2016.
- [KET 93] KETELAAR J., « History », dans BLOMEN L., MUGERWA M. (ed.), *Fuel Cell Systems*, Springer, p. 28-31, 1993.
- [PER 02] PERRY M., FULLER T., « A Historical Perspective of Fuel Cell Technology in the 20th Century », *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 149, n°7, p. S59-S67, 2002.
- [PLA 83] PLANTE G., *Recherches sur l'électricité*, Gauthier-Villars, 1883.
- [POI 08] POINCARÉ H., BLONDIN J., *Cours de physique mathématique. Thermodynamique*, Gauthier-Villars, 1908.
- [PRO 94] PROVOST S., « Audubert, René (1892-1957). Chargé de cours (1946-1956) puis Professeur d'Électrochimie (1956-1957) », *Histoire biographique de l'enseignement*, Vol. 19, n°1, p. 132-138, 1994.
- [MOB 97] MÖBIUS H.-H., « On the History of Solid Electrolyte Fuel Cells », *Journal of Solid State Electrochemistry*, n°1, p. 2-16, 1997.
- [SCH 98] SCHAFFER G., Fuel Cells for the future. A contribution to technology forecasting from a technology dynamics perspective, thèse de doctorat, Université de Twente, 1998.
- [SER 01] SERRES L., *Cours de physique à l'usage des candidats aux Écoles nationales d'arts et métiers*, Ch. Béranger, 1901.
- [TEI 17] TEISSIER P., « From the Birth of the Fuel Cells to the Utopia of the Hydrogen World », dans BENSAUDEVINCENT B., et al. (ed.), *Research Objects in Their Technological Setting*, Routledge, p. 77, 2017.
- [THA 97] THARGARD P., « Collaborative Knowledge », *Noûs*, n°31, p. 241-262, 1997.
- [URB 25] URBAIN G., *L'énergétique des réactions chimiques. Leçons professées à la Sorbonne*, Librairie Octave Doin, 1925.
- [WIL 94] WILLIAMS K., « Francis Thomas Bacon, 21 December 1904-24 May 1992 », *Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society*, Vol. 39, p. 2-18, 1994.