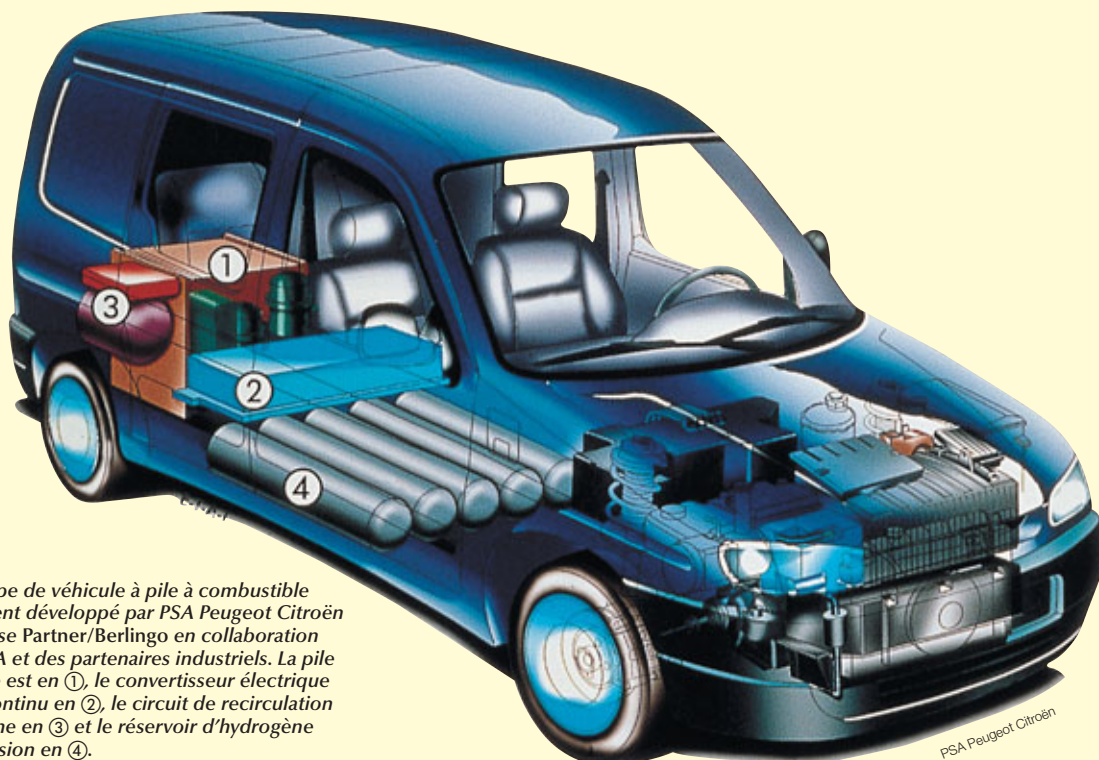


II. LES CONVERTISSEURS D'ÉNERGIE

la pile à combustible : un avenir multiforme

Réduire les émissions de gaz carbonique (CO_2), le plus préoccupant des gaz à effet de serre produit par la combustion de composés hydrocarbonés, dont les hydrocarbures (pétrole, gaz naturel) abondamment utilisés pour la production d'énergie électrique, thermique ou mécanique, est un objectif majeur. Il peut être poursuivi selon deux voies : augmenter les rendements des convertisseurs d'énergie utilisant les hydrocarbures ou utiliser des combustibles d'origine non fossile. Dans ce dernier cas, deux solutions sont envisageables : l'hydrogène et les bio-combustibles. En effet, un hydrogène "propre" peut être synthétisé par électrolyse à partir d'une électricité produite sans émission de CO_2 (éolienne, solaire, hydraulique, nucléaire) ou par gazéification de produits de la biomasse (*voir chapitre I*). Des combustibles issus de cette dernière sont déjà commercialisés comme le diester, l'éthanol ou le bio-gaz ; d'autres sont en cours d'étude comme le DME, le méthane, le méthanol... Les travaux menés sur l'hydrogène et les piles à combustible qui l'utilisent, et auxquels le CEA apporte sa contribution, procèdent de ces deux approches. À titre transitoire, l'hydrogène de ces piles pourra être fourni *via* une étape de reformage (externe ou interne) de composés hydrocarbonés.

La plupart des systèmes de conversion énergétique ont un rendement médiocre. Ce n'est pas le cas des générateurs d'électricité à base de pile à combustible (PAC) dont le rendement, d'environ 50 %, est bien supérieur à celui (de l'ordre de 30 %) des turbines ou des générateurs électro-diesels. Même dans le cas du transport, et donc d'une production d'énergie mécanique, le rendement d'un générateur à PAC et celui d'un moteur diesel sont comparables (autour de 35 %). Or la PAC n'en est qu'au début de son développement ! Promise à des applications qui ne se bornent pas au véhicule électrique, ses limitations sont actuellement d'ordre économique. L'objectif est donc de baisser fortement les coûts et d'augmenter la fiabilité des systèmes – stationnaires ou mobiles – pouvant être construits autour d'une telle pile. Le CEA est impliqué dans ces efforts à tous les niveaux où des gains sont attendus par les industriels. Il réunit aujourd'hui tous les atouts (plateforme numérique et expérimentale, connaissance des matériaux et des mécanismes de réactions, approche système) pour accompagner un partenaire industriel qui désire développer et commercialiser des systèmes à membrane échangeuse de protons (PEMFC) de plusieurs dizaines de kW.



Le prototype de véhicule à pile à combustible actuellement développé par PSA Peugeot Citroën sur une base Partner/Berlingo en collaboration avec le CEA et des partenaires industriels. La pile elle-même est en ①, le convertisseur électrique continu/continu en ②, le circuit de recirculation d'hydrogène en ③ et le réservoir d'hydrogène haute pression en ④.

La pile à combustible : une réponse aux préoccupations énergétiques et environnementales

Excellent convertisseur en électricité de ce vecteur d'énergie essentiel que sera tôt ou tard l'hydrogène, la pile à combustible devrait alors s'imposer. D'abord limitée à des applications où le coût était un facteur secondaire, ce type de pile peut désormais viser des marchés quantitativement significatifs, à commencer dans des installations fixes pour la production d'électricité et de chaleur. Depuis longtemps, un grand avenir lui est par ailleurs promis pour l'alimentation de véhicules électriques. Cette application, qui commence à devenir une réalité pour le transport en commun, demandera encore des efforts de recherche et de développement pour se justifier économiquement pour le véhicule individuel. L'objectif général du CEA et de ses partenaires de l'industrie et de la recherche, dans les deux filières les plus prometteuses (les piles PEMFC et les piles SOFC) est de lever certains verrous scientifiques et technologiques. Les avancées enregistrées pourront également être mises à profit pour l'alimentation des appareils portables, dont le marché explose.



Les différents types de piles à combustible

Les divers types de piles couramment développées fonctionnent généralement autour d'un point qui correspond à un **rendement brut** de l'ordre de 50 %. L'un des points clés de ces technologies est l'électrolyte. Le tableau fait apparaître que, sur ces cinq types de piles, trois fonctionnent avec un électrolyte liquide et deux avec un électrolyte solide. Pour des raisons essentiellement liées à la fiabilité et à des contraintes d'industrialisation en grande série, le concept d'électrolyte solide est plus attractif : c'est la raison pour laquelle se dessine aujourd'hui un consensus international pour privilégier deux filières, celle des piles à combustible à acide polymère (à **membrane échangeuse de protons**, en anglais PEMFC pour *Proton Exchange Membrane*

La planète aura besoin dans l'avenir d'un nouveau vecteur d'énergie. Sans entrer dans le débat de savoir quels sont les meilleurs candidats, il se dessine aujourd'hui un bon consensus sur l'hydrogène, même si les avis divergent encore sur les délais nécessaires à sa mise en place. Se basant sur cette hypothèse, il faut alors disposer d'un bon **convertisseur** de ce vecteur en énergie utilisable (essentiellement électricité et chaleur) : ce sera la **pile à combustible** qui devra supplanter progressivement la conversion traditionnelle, dite "thermique", (moteurs et turbines) du seul fait de ses performances plus attractives. Son principe général est connu (*encadré E*). Il peut être appliqué dans différents types de piles, en fonction des applications envisageables, qui diffèrent principalement par la nature de l'**électrolyte** (tableau).

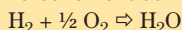
type de pile	électrolyte	température (°C)	domaine d'utilisation et gamme de puissance
alcaline (AFC)	potasse (liquide)	80	espace, transports 1 - 100 kW
acide polymère (PEMFC)	polymère (solide)	80	portable, transports, stationnaire 1W - 10 MW
acide phosphorique (PAFC)	acide phosphorique (liquide)	200	stationnaire, transports 200 kW - 10 MW
carbonate fondu (MCFC)	sels fondus (liquide)	650	stationnaire 500 kW - 10 MW
oxyde solide (SOFC)	céramique (solide)	700 à 1 000	stationnaire, transports 100 kW - 10 MW

Tableau. Les différents types de piles à combustible.

Le principe de la pile à combustible

E

Le principe de la pile à combustible a été démontré par le gallois William Grove, en 1839 : il est généralement décrit comme l'inverse de celui de l'**électrolyse**. Plus précisément, il s'agit d'une combustion électrochimique et contrôlée d'hydrogène et d'oxygène, avec production simultanée d'électricité, d'eau et de chaleur, selon une réaction chimique globale universellement connue :



Cette réaction s'opère au sein d'une structure essentiellement composée de deux **électrodes** (l'**anode** et la **cathode**) séparées par un **électrolyte** ; elle peut intervenir dans une large gamme de températures, de 70 à 1 000 °C (figure). Selon le niveau de température retenu, la nature de l'électrolyte et des électrodes, les réactions chimiques intermédiaires mises en jeu varient mais le principe général est inchangé. Pour les cinq grandes familles de piles (tableau), les réactions électrochimiques mises en jeu sont les suivantes :

● pile alcaline (AFC : *Alkaline Fuel Cell*)
à l'anode : $\text{H}_2 + 2 (\text{OH})^- \Rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^-$
à la cathode : $\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^- \Rightarrow 2 (\text{OH})^-$

● pile à acide polymère/**membrane échangeuse de protons** (PEMFC : *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*)

à l'anode : $\text{H}_2 \Rightarrow 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^-$

à la cathode : $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \Rightarrow \text{H}_2\text{O}$

● pile à acide phosphorique (PAFC : *Phosphoric Acid Fuel Cell*)

à l'anode : $\text{H}_2 \Rightarrow 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^-$

à la cathode : $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \Rightarrow \text{H}_2\text{O}$

● pile à carbonate fondu (MCFC : *Molten Carbonate Fuel Cell*)

à l'anode : $\text{H}_2 + (\text{CO}_3)^{2-} \Rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2 \text{e}^-$

à la cathode : $\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2 \text{e}^- \Rightarrow (\text{CO}_3)^{2-}$

● pile à **oxyde solide** (SOFC : *Solid Oxide Fuel Cell*)

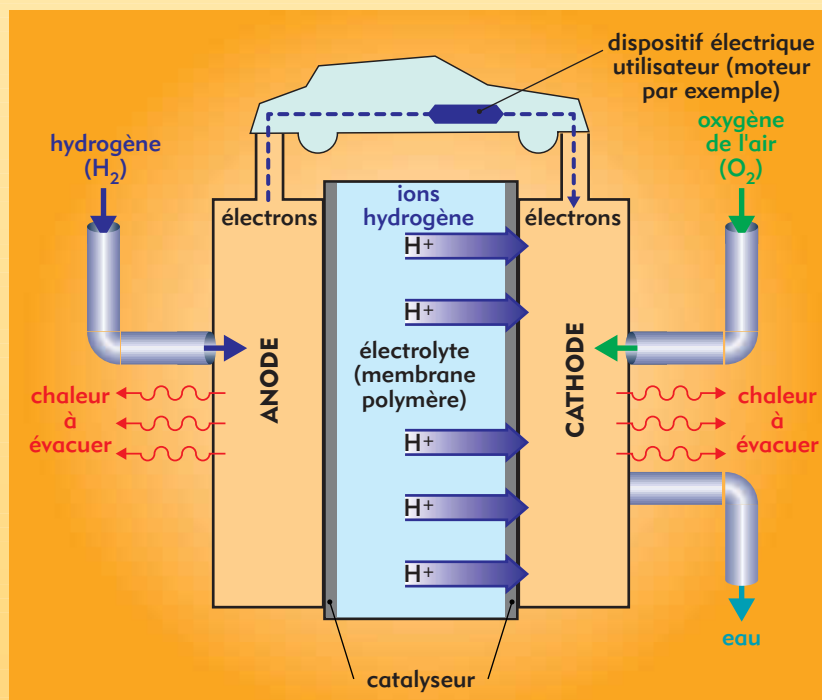
à l'anode : $\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \Rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2 \text{e}^-$

à la cathode : $\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2 \text{e}^- \Rightarrow \text{O}^{2-}$

Pour en savoir plus

Les piles à combustible : application au véhicule électrique, C. Lamy et J.M. Léger. *Journal de Physique IV*, Colloque C1, supplément au *Journal de Physique III*, volume 4, janvier 1994.

Fuel Cell Systems, Leo J.M.J. Blomen et Michael N. Mugerwa, Plenum Press.



Fuel Cell) et celle des piles à oxyde solide (SOFC, pour *Solide Oxide Fuel Cell*). C'est aussi le choix que le CEA a fait dans ses programmes de R&D.

Trois grands domaines d'application

Les marchés potentiels des piles à combustible apparaissent aujourd'hui multiples : ils sont généralement classés en trois grandes familles d'applications : "portable", "stationnaire" et "transport".

Les applications "portable"

Cette famille inclut essentiellement le téléphone mobile (qui consomme une puissance moyenne de l'ordre de 400 mW, 50 mW en veille et 1 W en conversation) et l'ordinateur portable (qui consomme en moyenne 10 W). Ces deux applications connaissent une très forte croissance, mais sont de plus en plus handicapées par l'autonomie de leur **batterie**, même la plus performante comme la batterie lithium-ion. Cette dernière atteint

aujourd'hui une **énergie spécifique** de l'ordre de 160 Wh/kg qui laisse classiquement quelques jours d'autonomie à un téléphone et environ 3 heures à un ordinateur portable. Or les clients demandent aujourd'hui 3 à 5 fois mieux alors que la batterie électrochimique est proche de ses limites. Pour donner une idée de l'enjeu, il suffit de considérer le marché des "portables" : 300 millions d'unités vendues pour les téléphones mobiles fin 1999 dans le monde et 640 millions prévus en 2005 ; 18 millions d'ordinateurs portables vendus en 1999 et 40 millions prévus en 2005.

La solution qui fait l'objet de recherches importantes, essentiellement aux États-Unis⁽¹⁾, est une pile à combustible chargeant une petite batterie qui assure mieux la fourniture d'énergie lors des pics d'émission (voir *Des piles à combustible miniaturisées*). L'autonomie ne sera alors limitée que par la taille du réservoir d'hydrogène ou de méthanol. L'utilisateur rechargera son portable comme il recharge un briquet ou un stylo à encre, en quelques secondes, et chaque recharge donnera 3 à

5 fois plus d'autonomie qu'une batterie actuelle... pour le même encombrement ! L'engouement pour ce secteur est tel⁽²⁾ qu'aujourd'hui de nombreux congrès internationaux ne traitent que de ce sujet. Des prototypes existent et les premiers produits commerciaux sont annoncés à l'horizon de trois à quatre ans. La technologie qui sera utilisée est la PEMFC du fait de sa température de fonctionnement basse et de sa technologie "tout solide" alimentée soit directement en hydrogène, soit en **méthanol** dans sa version dite "méthanol direct". En terme de coût, la référence est celle de la meilleure batterie actuelle (lithium-ion), soit 1 €/Wh.

Le CEA a engagé un travail d'analyse de la valeur sur certains projets de piles à combustible : il contribue, dans un premier temps, à définir le cahier des charges des produits ou procédés proposés, par une approche fonc-

(1) Motorola et Manhattan Scientifics, Inc., en particulier.

(2) "Mon téléphone carbure au méthanol," *Le Monde*, mercredi 1^{er} mars 2000.

Un premier modèle de pile de cogénération à acide phosphorique (PAFC) a été démarré en France début 2000 par EDF pour l'alimentation d'un groupe de HLM à Chelles (Seine-et-Marne).



Thierry Beghin/Libération

tionnelle de l'analyse du besoin. Ce travail consiste ensuite en une estimation analytique du coût de revient final du produit industriel, extrapolée des travaux de laboratoire. Il devient alors possible de positionner le produit final par rapport à l'existant, en terme de fonctionnalités (adéquation avec le besoin) et de coûts associés et d'identifier, le cas échéant, les éléments générateurs de surcoûts. Ce travail est une aide précieuse aux choix qu'il faut faire entre les diverses solutions techniques qui s'offrent aux acteurs de la R&D.

Pour ce qui concerne les applications "portable", les critères économiques seront probablement d'une importance moindre que pour les autres domaines d'applications, dans la mesure où la qualité du nouveau service rendu justifiera – au moins dans un premier temps – un surcoût par rapport à la solution de référence.

Les applications "stationnaire"

Compte tenu des nouvelles lois sur la déréglementation du secteur électrique et des tendances vers la décentralisation de la production d'énergie électrique, ce secteur commence à intéresser de nombreux industriels, en particulier aux États-Unis. L'activité est centrée sur deux grands domaines d'applications : la production collective (les puissances mises en jeu sont dans la gamme 200 kW – quelques MW) et la production individuelle ou domestique (les puissances mises en jeu sont dans la gamme 2 à 7 kW).

De nombreux projets et démonstrations existent déjà dans le premier domaine. C'est ainsi que deux pôles industriels se sont créés autour d'une filiale du Canadien Ballard : un pôle européen avec Alstom et un pôle asiatique avec le Japonais Ebara. Cet ensemble s'est donné pour objectif la diffusion de co-générateurs (électrique-thermique)

de type PEMFC (d'une puissance de 250 kW électriques et 230 kW thermiques). Un exemplaire est en cours d'expérimentation à Trepow, dans la banlieue de Berlin, dans le cadre d'un projet européen avec EDF et quatre partenaires allemands : Bewag, HEW, Preussen Elektra et VEA.

L'année 2000 a aussi vu la réalisation d'un prototype de 250 kW à Waziers (Nord) dans le cadre d'un projet européen Thermie avec côté français Air Liquide, Schneider Electric et le CEA, et côté italien de Nora⁽³⁾, autour d'une technologie PEMFC. De son côté, l'Américain ONSI Corp. commercialise depuis plusieurs années (près de 200 unités vendues) la pile de technologie PAFC (PC 25) de 200 kW (qui fournit en **cogénération** 200 kWh). Un premier modèle a été démarré en France début 2000 par EDF pour l'alimentation d'un groupe HLM à Chelles (Seine-et-Marne).

D'autres technologies font l'objet de tests mais ne sont pas encore au stade d'une commercialisation proche. La MCFC fait ainsi l'objet de plusieurs démonstrations : 1 MWe avec l'Allemand MTU, 250 kW avec l'Américain M-C Power Generation, 1 MWe avec le Japonais Hitachi. La SOFC est testée par Siemens-Westinghouse au niveau de 100 kW.

Dans le domaine de la production individuelle (habitat), plusieurs projets sont en cours de réalisation. Associée à General Electric (GE MicroGen), la société américaine Plug Power LLC lance un générateur de 7 kW (HomeGen 7000). Des tests sont en cours avec une dizaine de prototypes en situation réelle et la commercialisation est prévue vers 2002 avec un coût annoncé de 50-60 centimes/kWh électrique. Des programmes de même nature mais de moindre ampleur ont été engagés avec les Américains Northwest Power Systems (devenu Idatech) et Avista Labs. Ces appareils basés sur une technologie de type PEMFC fournissent électricité et chaleur à 60 °C (chauffage et eau chaude). Ils sont alimentés par des combustibles classiques : un **reformeur** transforme le combustible **hydrocarbure** (généralement du **gaz naturel**) en hydrogène.

Le marché mondial des piles à combustible (pour le seul stationnaire) potentiel est estimé à 45 milliards d'euro à l'horizon 2030⁽⁴⁾. Quant au coût objectif, il se situe autour de 1 000 €/kW installé pour le système complet. Il correspond au niveau actuel de développement de cette technologie, ce

Montée en régime pour le réseau PACo

Créé en juin 1999 à la demande du ministère de l'Éducation nationale, de la Recherche et de la Technologie (MNER) le réseau Piles à combustible et énergies renouvelables est une structure visant à organiser et harmoniser la R&D menée en France sur ces technologies afin d'assurer la réussite de leur industrialisation. Dans un premier temps, cette structure se concentre sur le développement des piles à combustible (PAC), d'où le nom actuel du réseau : PACo. Co-animé par le CEA et l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), le réseau PACo se compose d'un comité d'orientation d'une vingtaine de personnes, unissant à parts égales industriels et chercheurs, et d'un bureau où se retrouvent les organismes qui assurent le financement : le ministère de la Recherche, le ministère chargé de l'Industrie, l'Ademe et l'Anvar (Agence de valorisation de la recherche).

Depuis sa création, le réseau PACo a labellisé plus d'une vingtaine de pro-

jets portant pour moitié sur les piles à combustible (composants et système) et pour un quart sur les combustibles. Les autres projets concernent des actions dites transversales comme la veille et les études technico-économiques ainsi que la sûreté. Par ailleurs, cette structure ayant, comme l'indique le terme de réseau, mission de créer des liens entre les équipes françaises concernées par les PAC, il est intéressant de constater qu'une centaine d'équipes contribuent au total à ces projets, provenant pour moitié de l'industrie et pour moitié des organismes publics de recherche. Environ 20 millions d'euro ont été mis à disposition pour assurer le financement de ces projets pour la période 1999-2000.

Nicole Mermilliod

Direction de la recherche technologique
CEA/Grenoble

(3) De Nora est aujourd'hui devenue Nuvera.
(4) Selon une étude récente du Fuel Cell Commercialisation Group.



DaimlerChrysler

Le prototype DaimlerChrysler Nekar 4, alimenté en hydrogène liquide, est désormais suivi d'un véhicule de pré-série Nekar 5 doté d'un reformeur transformant à bord du méthanol en hydrogène.



qui explique les délais proches (à partir de 2002) généralement annoncés par les divers constructeurs (essentiellement américains jusqu'à maintenant) déjà engagés sur ce marché. Ce sera probablement le premier marché de masse à être occupé par la technologie "pile à combustible".

Les applications "transport"

Le transport est le domaine d'application à l'origine du développement de la pile à combustible à partir du début des années 90. Compte tenu de la contrainte de coût, particulièrement forte dans ce secteur, et de la concurrence de la technologie traditionnelle (moteurs thermiques), mature et performante, il faut distinguer deux sous-familles assez différentes dans leurs cahiers des charges,

suyant qu'il s'agit d'équiper un véhicule léger ou un véhicule lourd. Il est demandé au véhicule léger quelque 3 000 h de fonctionnement pour une dizaine d'années de durée de vie alors qu'un véhicule lourd (transport de passagers ou de marchandises) exige une durée de fonctionnement 100 fois plus longue. Il est évident que la technologie et la durée d'amortissement – donc les coûts admissibles – ne seront pas du tout les mêmes.

Les véhicules légers : une myriade de projets

Dans ce domaine, de nombreux prototypes ont vu le jour depuis 1993. L'Allemand DaimlerChrysler, qui s'équipe en piles à combustible chez Ballard, a montré quatre prototypes Nekar, dont le plus récent (*Nekar 4* alimentée en hydrogène liquide), présenté en 99, est construit sur une base *Class A*. La *Nekar 5*, modèle de pré-série équipé d'un reformeur alimenté en méthanol, a vu le jour en novembre 2000.

Les Américains ont également présenté des prototypes : General Motors un véhi-

cule sur une base Opel *Zafira* équipée d'une pile Ballard de 75 kW ainsi qu'un *Precept* équipé d'une pile "maison" de 75 kW et Ford plusieurs *Think FC5*. Les Japonais ne sont pas en reste : Toyota avec ses deux prototypes *RAV-4*, Nissan avec son *R'nessa*, Mitsubishi, Honda, Daihatsu et Mazda avec son *Demio FCEV*. Le Français Renault a quant à lui présenté, à la mi-98, son prototype *Laguna* équipé d'une pile de Nora de 30 kW, associé à Air Liquide dans le cadre d'un programme européen Joule. D'autres prototypes sont annoncés, et en particulier un prototype français qui sera présenté par PSA, en collaboration avec le CEA, sur une base *Partner/Berlingo*, au cours du premier semestre 2001, dans le cadre d'un programme Joule. Tous ces constructeurs prévoient des pré-séries à partir de 2004-2005. Malgré l'existence de plusieurs prototypes présentés avec de l'hydrogène stocké à bord (sous forme liquide, gazeuse ou absorbé dans un **hydrure**), le combustible utilisé dans une première phase sera très probablement - pour des raisons de sûreté, de réglementation et de logistique de distribution – un combustible hydrogéné (méthanol ou gaz naturel) alimentant un reformeur embarqué. Au cours de la période 2005-2010, les constructeurs vendront probablement à perte pour ouvrir le marché et emmagasiner de l'expérience, comme aujourd'hui Toyota avec le véhicule hybride thermique *Prius*. La technologie ne deviendrait financièrement rentable qu'à partir de 2010. Dans cette période 2005-2010, DaimlerChrysler prévoit de construire entre 50 000 et 100 000 véhicules à pile à combustible. À l'horizon 2030, ce sera le marché mondial qui sera visé, avec une production annuelle supérieure à 50 millions de véhicules, soit 10 % du marché global.

La technologie utilisée dans ces applications sera essentiellement de type PEMFC, même si quelques expériences utilisent l'AFC (par la société anglaise ZeTek) ou la PAFC (Université de Georgetown, USA). Le coût objectif de cette filière est de 100 €/kW pour l'ensemble de la chaîne de traction, dont environ un tiers pour la pile seule.

Une solution déjà viable pour les véhicules lourds

Plusieurs prototypes de bus ont été construits à partir de 1993. Le Canadien Ballard a fait office de pionnier avec six bus (pile de 200 kW), qui ont aujourd'hui achevé leurs tests en service régulier à Vancouver et à Chicago, et qui annonce une commercialisation dès l'an 2002. L'Allemand DaimlerChrysler, sur la base de la même technologie Ballard, a montré en 1997 un prototype de bus (*Nebus*), et annoncé le lancement d'une pré-série de 30 bus (projet *Citaro*) pour 2003,

DaimlerChrysler va construire en petite série l'autobus urbain *Citaro*, héritier du prototype de bus à pile à combustible *Nebus* présenté en 1997.



DaimlerChrysler

en vue d'une mise en service dans plusieurs villes d'Europe. Compte tenu de la durée de vie attendue, la situation économique de cette application est la même que pour le "stationnaire", donc commercialement viable dès maintenant, ce qui explique l'optimisme des deux derniers constructeurs cités.

À côté de ces applications routières, certains constructeurs (les Français RVI et Irisbus en particulier) pensent à un tramway propre et sans caténaire, utilisant une pile à combustible.

Il faut enfin noter un intérêt croissant de constructeurs de navires pour la pile SOFC, au

niveau du MW ou plus, pour une propulsion plus propre, plus efficace et plus discrète, en particulier pour des applications militaires. ●

Thierry Alleau et Isabelle Dumas

Direction de la recherche technologique
CEA/Grenoble

Des piles à combustible miniaturisées

Les exigences croissantes des équipements portables en matière de puissance et d'autonomie imposent de nouvelles percées dans les performances de sources d'énergie miniatures. La pile à combustible, qui dissocie les fonctions de stockage de l'énergie et de transformation en puissance, est une solution séduisante. Mais la recherche doit encore apporter des réponses à plusieurs contraintes incontournables.

Téléphone portable à pile à combustible miniaturisée présenté en octobre 2000 par la société américaine Energy Related Devices ; à droite, le réservoir de méthanol amovible.



Energy Related Devices

taires qui pourraient conduire, tout en satisfaisant les besoins en puissance instantanée des appareils portables, à des gains d'autonomie compris entre 3 et 10.

Trois contraintes principales

Il faut cependant se garder d'un optimisme béat car la miniaturisation qu'imposent les appareils portables entraîne des contraintes techniques délicates à surmonter dans trois domaines.

Il s'agit tout d'abord de gérer des appels de puissance très différents entre mode veille et fonctionnement. Ceci implique des variations de débit du **combustible** importantes dont la gestion peut se heurter à des problèmes d'inertie et, dans le cas d'un dispositif portable, de disponibilité des composants miniaturisés permettant l'approvisionnement dynamique souhaité du cœur de pile en combustible. Un régime de fonctionnement quasi permanent est, dans l'état actuel de la technique, plus raisonnable à envisager. Il nécessite cependant de stocker l'énergie électrique fournie et donc d'utiliser un élément tampon qui permettra la régulation de la puissance électrique instantanée nécessaire.

Il faut, en second lieu, assurer la gestion des produits de la réaction électrochimique. Le cœur d'une pile à combustible doit être alimenté en oxygène et en combustible (qui fournira l'hydrogène) pour donner de l'eau. Si tous les éléments de la réaction sont relativement faciles à gérer dans les piles à combustible traditionnelles, de volume important, le problème se pose de façon plus délicate dans un dispositif portable miniaturisé.

La troisième contrainte est liée au stockage et à la fourniture du combustible sous une forme acceptable et dans un volume réduit, compatible avec l'autonomie désirée. Bien que la séparation entre réservoir et cœur de

Le développement des équipements portables et plus particulièrement du téléphone cellulaire pose de manière cruciale le problème de la fourniture d'énergie. Ce point ne constitue pas aujourd'hui un handicap majeur car les fonctions associées au téléphone portable restent limitées. Mais l'évolution prévisible des fonctionnalités et des usages des appareils portables (accès à Internet, nouveaux services, utilisation moins intermittente...) et l'introduction de composants électroniques nouveaux (écrans plats complexes...) vont, dans les mois à venir, modifier considérablement la donne en terme de puissance consommée et d'autonomie. Ce qui lui apparaît aujourd'hui comme de simples désagréments (autonomie de quelques jours et temps de charge un peu long) ne sera à court terme plus accepté par le consommateur.

L'ensemble des équipementiers est conscient de cet état de fait. De nombreuses

recherches s'orientent à la fois vers l'optimisation des composants et des architectures de circuit afin de diminuer la consommation et vers la mise au point de sources d'énergie miniatures nettement plus performantes que les **accumulateurs** actuels dont la marge de progression est désormais relativement faible. Dans ce contexte, la **pile à combustible** apparaît comme une solution attractive car elle permet de séparer les paramètres puissance électrique fournie et autonomie d'utilisation. En effet, dans un accumulateur, le volume de l'**électrode positive**, qui fait partie intégrante du composant, conditionne la quantité d'énergie stockée et donc l'autonomie de ce dernier. La pile à combustible dispose au contraire de deux éléments distincts : le réservoir de combustible (hydrogène, **méthanol**...) et le cœur de pile, qui va transformer l'énergie électrochimique stockée dans le combustible en énergie électrique. Ce type de pile offre donc des degrés de liberté d'exploitation supplémen-

pile donne une liberté d'exploitation supplémentaire, cette liberté est loin d'être totale car l'ensemble du système doit occuper un volume maximum donné. Il faut que ce volume puisse contenir celui du réservoir, conditionné par l'autonomie souhaitée, et celui du cœur, conditionné par la puissance désirée.

Les gains en autonomie de 3 à 10 évoqués plus haut sont techniquement accessibles dans le contexte d'utilisation des téléphones cellulaires mais nécessitent encore un certain nombre de recherches et de mises au point pour devenir réalité et satisfaire les besoins. Ils supposent aussi la maîtrise, sous forme miniaturisée, des composants annexes assurant la gestion et la fourniture du com-

bustible et des fluides associés aux réactions.

Compte tenu de tous les éléments à prendre en compte, il apparaît qu'un remplacement pur et simple des accumulateurs par des piles à combustible n'est sans doute pas une solution directement exploitable aujourd'hui. En revanche, l'association pile à combustible-batterie (ou autre élément de stockage d'énergie tampon) semble pouvoir surmonter la plupart des problèmes évoqués tout en contournant les difficultés de démarrage à froid du dispositif.

Les premiers prototypes qui utilisent le méthanol comme carburant donnent des résultats encourageants mais des études physiques de base sont encore nécessaires pour une meilleure compréhension des méca-

nismes de catalyse, l'adaptation et l'optimisation des électrolytes à la structure miniaturisée et pour un fonctionnement à des concentrations de méthanol élevées. Ce dernier point constitue sans doute un des verrous à faire sauter. Dans ce contexte, le CEA a mis en place en cours d'année 2000 une équipe d'une dizaine de personnes sur ces thématiques clés. Il espère, dans un délai de deux à trois ans, avoir donné une réponse aux principales interrogations et disposer d'un démonstrateur crédible. ●

Serge Valette

Direction de la recherche technologique
CEA/Grenoble

La prospective européenne en matière de piles à combustible

Le programme-cadre de l'Union européenne supporte l'effort de recherche et développement technologique et de démonstration des piles à combustible depuis 1988. Cet effort qui ne cesse de s'accroître se justifie encore et toujours car la Communauté reconnaît que l'utilisation des piles à combustible représente une solution qui pourrait contribuer au développement durable de l'Union et à l'aboutissement des objectifs de diverses politiques européennes essentiellement en matière d'énergie, d'environnement et de transport dans le court, moyen et long terme. Ce soutien européen à l'effort de recherche et de développement technologique s'est accru de 8 millions d'euro entre 1988 et 1992 pour atteindre 54 millions d'euro dans le quatrième PCRD (1994-1998). Depuis le début de la mise en œuvre du cinquième PCRD (1998-2002), la contribution européenne au développement des systèmes de piles à combustible est déjà sensiblement supérieure à 30 millions d'euro. En parallèle, des États membres de l'Union européenne mènent des programmes nationaux liés au développement et à l'application de cette nouvelle technologie.

La coopération dans ce secteur entre les États membres et l'Union a débuté dès 1995 par l'établissement d'une stratégie européenne à dix ans qui fut révisée en 1998. Son objectif est de mieux coordonner la complémentarité entre les programmes nationaux et celui de l'Union afin d'accroître l'efficacité de l'effort de recherche dans ce secteur. Sa mise en œuvre au travers du programme cadre a certainement contribué à améliorer et optimiser les travaux de recherche, de développement et de démonstration en Europe mais n'a sans nul doute pas permis de concrétiser toutes les espérances que l'on pouvait former. Encore aujourd'hui,

les politiques de recherche nationales et la politique de l'Union dans ce secteur ne forment toujours pas, dans une certaine mesure, un tout cohérent.

L'incessante augmentation de l'intérêt témoigné par l'industrie, supportée par les milieux académiques, a encouragé la Commission européenne à choisir le secteur des piles à combustible comme expérience pilote dans le processus de promotion d'un véritable *Espace européen de la recherche* prôné par la Commission et approuvé par le Conseil européen. Cette initiative est de surcroît supportée par le Parlement Européen. Trois grandes pistes de réflexion et d'action ont d'ores et déjà été suggérées par le Commissaire à la Recherche qui pourraient dès à présent profiter des instruments existant au sein du cinquième programme cadre. C'est le cas de la *mise en réseau* des différents acteurs européens autour des thématiques les plus critiques qui présentent encore des barrières importantes à surmonter vers la commercialisation des systèmes de piles à combustible en tant que nouveau produit. Cette mise en réseau devrait permettre d'améliorer l'efficacité de la recherche, ne serait-ce que par la mise en œuvre d'une "masse critique". C'est aussi l'*ouverture* des programmes nationaux à des participations provenant d'autres États membres et la mise en œuvre coordonnée au niveau communautaire et national de *grands projets* ou de programmes communs. C'est, enfin, le renforcement de la coopération avec les pays tiers et en l'occurrence avec les pays signataires des accords de coopération scientifique et technologique avec l'Union.

Ces trois pistes d'actions ne représentent toutefois qu'une suggestion qui émane d'une volonté politique dont la

mise en œuvre ne se fera que sur une base volontaire.

Aujourd'hui, à partir des résultats obtenus lors des précédents appels à propositions dans le programme ENERGIE, une nouvelle approche et de nouveaux axes de priorités ont été suggérés pour la mise en œuvre de ce programme au cours des deux dernières années du cinquième programme cadre. Cette nouvelle approche intègre, entre autres, une action ciblée de RDT sur le court, moyen et long terme portant sur les systèmes de piles à combustible et technologies liées à l'utilisation de l'hydrogène. Les nouvelles priorités se concentrent bien entendu vers les applications stationnaires, mobiles et portables et incluent des activités de recherche socio-économiques et pré-normatives liées au développement de règles en matière de sécurité, normalisation et de formation. Une part importante est de surcroît octroyée à l'encouragement aux initiatives de coopération avec les programmes nationaux et internationaux et notamment le programme EUREKA. Ce type d'action devrait servir à faciliter l'émergence de nouvelles solutions technologiques présentant un impact significatif mesurable et directement pertinent dans leurs contributions aux objectifs des politiques européennes.

En marge de cette nouvelle approche, un nombre limité de priorités stratégiques importantes pour l'Union européenne seront également soutenues au travers d'une action transversale couvrant l'ensemble initial du programme de travail ENERGIE de la Commission européenne.

Gilles Lequeux

Responsable scientifique
Direction générale de la recherche
Commission européenne