

Les piles à combustible

Anne-Sophie Corbeau¹.

Historique

Les piles à combustible ne sont pas une technologie nouvelle : leur principe de fonctionnement a été découvert en 1839 par William Grove. Cependant, elles sont restées largement oubliées jusqu'au milieu du XX^e siècle où elles réapparurent grâce, en particulier, aux travaux de Francis Bacon qui construisit une pile hydrogène-oxygène. Ce prototype mènera aux piles utilisées dans les programmes spatiaux des années 1960, où les piles servaient de générateurs dans les programmes Gemini et Apollo. Mais c'est vraiment au début des années 1990 que les piles connaissent un regain d'intérêt.

Aujourd'hui plusieurs facteurs relancent la recherche dans les piles à combustible

Cet intérêt accru est dû à plusieurs facteurs : recherches effectuées dans les années 70 et 80 sur les piles qui ont débouché sur de nombreux progrès technologiques : membranes plus performantes pour les PEMFC², meilleurs catalyseurs... ; début de prise de conscience sur la nécessité de trouver des moyens de production d'énergie moins polluants, sur les réserves limitées en énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon) et les incertitudes liées à leur approvisionnement, sur l'augmentation des besoins énergétiques à l'échelle mondiale et enfin sur l'intérêt d'une production d'électricité décentralisée. Dès lors, les premiers prototypes sont développés pour les différents champs d'application (véhicules, installations stationnaires, ordinateurs portables) ; des programmes sont mis en place pour les tester dans le quotidien.

Lors des cinq dernières années, on a vu ces programmes s'intensifier avec l'implication accrue des entreprises, des centres de recherche et des gouvernements. Dans les transports, Daimler Chrysler compte une centaine de véhicules en circulation début 2005 ; des bus à pile circulent dans les rues de grandes villes européennes - 30 sont prévus dans le cadre du programme CUTE avec le premier bus lancé dans les rues de Madrid en Mai 2003. Des piles ont été installées dans des maisons ou bâtiments administratifs pour tester leur fonctionnement pour les applications résidentielles. Pour les applications portables (téléphone et ordinateurs), des fabricants comme NEC, Toshiba, ont déjà présenté de nombreux proto-

types. Pour l'instant, les piles sont encore au stade de prototypes avancés et leur mise sur le marché n'est pas prévue dans l'immédiat.

Principe

Une pile à combustible permet de convertir directement de l'énergie chimique en énergie électrique. À la différence des moyens traditionnels de production de l'énergie, son rendement ne dépend pas du cycle de Carnot. L'un des intérêts de la pile à combustible est que les températures sont d'un plus faible niveau que dans les turbines ou les moteurs à combustion. Ceci permet, entre autres, d'éviter la formation de NOx. Cependant, à ce niveau de température, la plupart des carburants carbonés traditionnels sont trop peu réactifs et seul l'hydrogène convient. Le méthanol peut aussi être utilisé dans les piles directes à méthanol (DMFC), mais leurs performances restent inférieures à celles des piles à hydrogène. Pour utiliser des combustibles type méthane ou autres alcools, il faut des températures de fonctionnement bien plus élevées : 800 à 1000°C, ce qui est le cas des piles haute température. La réalisation de ces piles est encore problématique à cause des contraintes thermiques.

La cellule élémentaire d'une pile est constituée de trois éléments : deux électrodes et un électrolyte, les deux électrodes étant séparées par l'électrolyte. À l'anode, on amène le combustible (souvent de l'hydrogène pur ou produit par reformage, mais parfois du méthanol, de l'éthanol, du méthane). La cathode est alimentée en oxygène (ou plus simplement en air, enrichi ou non en oxygène). Les ions transitent dans l'électrolyte.

Dans le cas d'une pile hydrogène-oxygène, l'hydrogène est oxydé à l'anode sous l'action d'un catalyseur, souvent à base de platine. L'atome d'hydrogène réagit en libérant deux électrons, qui circulent dans le circuit électrique qui relie l'anode à la cathode. À la cathode, on assiste à la réduction cathodique (également catalysée) de l'oxygène. Certains catalyseurs sont sensibles aux impuretés et, dans le cas de l'utilisation d'hydrogène produit par reformage dans une PEMFC, la présence de monoxyde de carbone (CO) diminue les performances (Fig. 1).

Quand on parle de pile à combustible, on tend à oublier qu'il n'existe pas un type de pile à combustible mais six, chacun se différenciant par sa température de fonc-

1. Courriel : anne-sophie.corbeau@centraliens.net

2. PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell, Pile dont l'électrolyte est une membrane échangeuse de protons.

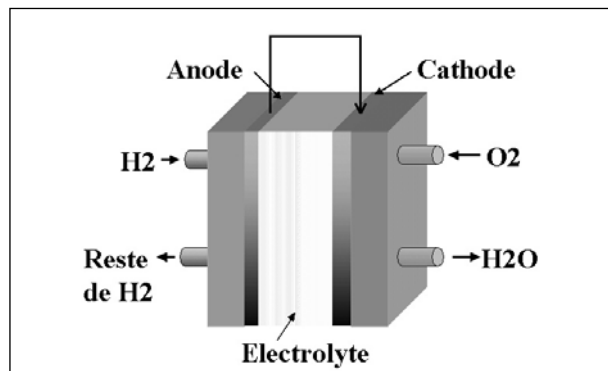


Figure 1. Schéma général d'une pile à combustible.

tionnement, le type d'électrolyte, sa capacité à utiliser d'autres carburants que l'hydrogène, le type d'applications pour lesquelles il est destiné. Les PAFC qui ont été largement testées dans les années 90, semblent aujourd'hui en perte de vitesse ; les PEMFC ont une grande variété d'applications et sont largement testées, tandis que les MCFC et SOFC sont encore en développement en raison des contraintes de température ; les DMFC, fonctionnant au méthanol, sont réservées aux applications portables.

Les piles à combustible peuvent être utilisées dans un large panel d'applications, allant du véhicule automobile, voire maritime ou même aérien, à la production d'électricité et de chaleur en passant par l'alimentation des ordinateurs et autres téléphones portables.

Avantages des piles à combustible

Les piles à combustible présentent un certain

nombre d'avantages qui, dans le contexte énergétique mondial actuel, ont suscité un regain d'intérêt pour cette technologie.

Un haut rendement énergétique. Le rendement électrique net dépend du type de pile ; il varie entre 40 et 70%. Il faut cependant tenir compte du système global avec les auxiliaires (pompes, échangeur, reformeur...), du fonctionnement sous pression ou de la sur-stœchiométrie en carburant et en air qui font baisser cette valeur. Le rendement électrique augmente à charge partielle, il ne diminue donc pas dans le cas de petites installations. Le rendement chute à très faible charge en raison de la consommation des accessoires. Cependant, il convient de resituer les piles dans le cadre de leur applications futures et de les comparer aux technologies existantes. En particulier, pour les véhicules automobiles, il faut comparer les technologies avec des bilans du « puits à la roue » en comptabilisant la transformation du carburant (extraction, transport, procédés de raffinage, transport et distribution). Les chiffres donnés sont souvent issus de simulations faites avec des modèles de véhicules sur un parcours type.

Silencieuses. C'est un avantage pour leur insertion en milieu urbain. Seuls certains organes comme les compresseurs, les pompes, le système de ventilation produisent un léger bruit. Les émissions sonores de la pile ONSI PC25 sont de 58 dB à 10 m.

Émissions limitées. On cite souvent les piles à combustible comme atout dans la lutte contre la pollution. Les émissions produites par un système pile dépendent cependant étroitement du carburant utilisé et de son origine. Si on ne considère que le véhicule, il ne produit rien s'il fonc-

Type de pile	AFC	PEMFC	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Nom	Alkaline Fuel Cell	Polymer Exchange Membrane Fuel Cell	Direct Methanol Fuel Cell	Phosphoric Acid Fuel Cell	Molten Carbonate Fuel Cell	Solid Oxid Fuel Cell
Electrolyte	Solution KOH	Membrane polymère conductrice de protons	Membrane polymère conductrice de protons	Acide phosphorique	Li ₂ CO ₃ et KCO ₃ fondu dans une matrice LiAlO ₂	ZrO ₂ et Y ₂ O ₃
Ions dans l'électrolyte	OH-	H+	H+	H+	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Niveau de température	60-80°C	60-100°C	60-100°C	180-220°C	600-660°C	700-1000°C
Combustible	H ₂	H ₂ (pur ou reformé)	Méthanol	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)	H ₂ (pur ou reformé)
Oxydants	O ₂ (pur)	Air	Air	Air	Air	Air
Domaines d'application	Spatial	Automobiles, Portable, Cogénération, Maritime	Portable	Cogénération	Cogénération Production centralisée d'électricité, Maritime (?)	Cogénération Production centralisée d'électricité Automobile (APU), Maritime (?)

tionne à l'hydrogène, un peu de CO_2 , CH_4 , CO s'il fonctionne au méthanol ou à l'éthanol, et un peu de CO_2 , CH_4 , CO , SO_2 pour de l'essence. Mais, si on considère toute la chaîne du « puits à la roue », les bilans peuvent varier grandement selon les hypothèses faites sur la provenance des carburants et la méthode d'obtention de l'hydrogène, donnant un très large spectre de résultats. On obtient les plus faibles émissions quand on a un véhicule PAC fonctionnant à l'hydrogène produit par une électrolyse avec de l'électricité renouvelable. Ces émissions peuvent être en revanche plus élevées si l'électricité correspond à un « mix » européen (thermique, nucléaire, renouvelable).

Modularité. Les piles sont constituées de cellules élémentaires mises en parallèle ou en série pour obtenir la puissance voulue entre 1 kW et plusieurs MW. Pour les piles de très petite puissance, on a recours à des techniques de miniaturisation.

Diverses températures de fonctionnement. Les piles de faible température de fonctionnement sont plus adaptées aux applications mobiles ou portables qui n'ont pas besoin de la chaleur produite par la pile. En revanche, pour les piles avec une température de fonctionnement plus élevée, on peut utiliser la chaleur pour des applications domestiques ou industrielles voire un couplage avec une turbine.

Absence de parties rotatives. Comme il n'y a aucun mouvement dans une pile à combustible, il n'y a donc pas d'usure mécanique pour le cœur de la pile. Sa tenue chimique et sa longévité restent encore à prouver car les prototypes actuels ont une durée de vie encore limitée.

Si les piles sont si intéressantes, pourquoi ne les trouve-t-on pas sur le marché ? Il existe en fait encore de nombreux problèmes à résoudre.

Le coût. C'est le plus gros problème actuellement malgré des progrès rapides : le coût des piles est cinq à dix fois supérieur à celui assurant la compétitivité face aux technologies concurrentes. Les coûts se répartissent entre la pile, le reformeur, le convertisseur AC/DC. Pour la pile PEMFC, le coût va se répartir entre la membrane, les électrodes (le platine), les plaques d'interconnexion et de refroidissement qui sont en graphite usiné, les auxiliaires et l'assemblage des éléments. De nombreux progrès ont déjà été faits en terme de teneur en platine, mais pour les membranes et les plaques, il faudrait revoir le processus de production et l'impact d'une production en série sur les coûts.

Poids et volume. Ces deux aspects sont une contrainte pour les applications portables et surtout automobiles. Il faut que la pile et le module de stockage de carburant soit intégrable au véhicule sans que cela n'affecte l'habitabilité. C'est encore plus délicat avec un reformeur. Le système pile ne doit pas être trop lourd pour ne pas affecter les

performances du véhicule. Néanmoins, les constructeurs automobiles sont en passe de dépasser ces contraintes.

Durée de vie et maintenance. On manque encore de recul sur cette nouvelle technologie pour apporter des réponses sur les frais de maintenance ou la nécessité de changer une ou plusieurs pièces dans le système. La durée de vie devrait être de quelques milliers d'heures pour l'automobile à au moins 40 000 heures en stationnaire. Les prototypes actuellement testés permettront d'apporter une réponse.

Gestion thermique du module. Dans le cas des applications automobiles, il faut évacuer la chaleur générée par la pile (pour éventuellement l'utiliser pour le reformage). Cela impose un système de refroidissement efficace. Pour les applications stationnaires, il s'agit de valoriser au maximum la chaleur, sans pour autant devoir mettre 40 échangeurs de chaleur!

La question du carburant

C'est sans doute la principale question parce qu'elle renvoie à l'hydrogène. Entre les piles et l'hydrogène se pose le problème de l'œuf et de la poule, soit : qui est mis en place en premier ? De plus, hydrogène n'implique pas forcément pile à combustible et réciproquement. Certaines piles - haute température en particulier - peuvent fonctionner avec d'autres carburants, certes fossiles, et l'hydrogène peut être utilisé pour d'autres applications.

L'hydrogène est souvent présenté comme le combustible du futur et reste le combustible idéal des piles à combustible. Or l'hydrogène n'existe pas à l'état naturel, à la différence du pétrole et du gaz naturel, et l'infrastructure adéquate (production, transport, stockage) devra être mise en place, ce qui va engendrer un effort considérable en termes de coûts et de recherche. Il faudra aussi régler le problème du transport et du stockage : gazeux sous pression, liquide à très basse température, stocké dans des hydrures métalliques, des nanotubes. Utiliser l'hydrogène devra être économiquement viable et être accepté par la population. L'utilisation massive de l'hydrogène devra donc dépasser des obstacles industriels, économiques et politiques.

Le premier problème concerne la production de l'hydrogène : on en produit déjà environ 500 milliards de Nm^3 , soit 6,5 EJ¹. Or la demande mondiale en énergie primaire est de 425 EJ, dominée majoritairement par les énergies fossiles, pétrole, gaz et le charbon. Ce qui signifie que la production actuelle ne recouvrirait que 1,5% de la demande ; il y a donc beaucoup à faire du côté de la production pour que l'hydrogène atteigne une part significative, surtout avec une demande énergétique mondiale en pleine croissance. L'hydrogène est actuellement

1. EJ = exajoules = 10^{18} joules

produit en majeure partie à partir du reformage d'hydrocarbures. Les méthodes de production sont le vaporeformage (gaz, naphta), l'oxydation partielle (naphta, charbon, hydrocarbures lourds.), l'électrolyse, la co-production dans la fabrication d'éthylène. Les deux premières techniques correspondent à près de 95% de la production totale ; seulement 2% de l'hydrogène sont produits par électrolyse.

De grands groupes sont spécialisés dans la production d'hydrogène : Air Liquide, Air Products, Linde Gas, Mahler, Praxair, mais d'autres sociétés comme Shell Hydrogen, Norsk Hydro s'impliquent également. L'accent est aussi mis sur l'électrolyse utilisant de l'électricité à partir des énergies renouvelables (éoliennes, hydraulique, biomasse, algues vertes ou bactéries), mais aussi sur une électrolyse haute température, ce qui pourrait faire intervenir le nucléaire avec les réacteurs de 4^{ème} génération prévus pour 2030.

On a souvent évoqué l'utilisation d'un carburant intermédiaire pour les applications automobiles, en particulier le méthanol, mais cela imposerait de mettre en place tout le système de production, transport et distribution pour un carburant qui ne durera peut être que 10 ans. Avec l'essence, on évite ce problème mais il faut utiliser de l'essence à faible teneur en soufre et avoir un reformeur adéquat. Il est aussi question d'utiliser l'éthanol qui n'est pas toxique et biodégradable. Dans tous les cas, un autre carburant que l'hydrogène impose l'utilisation d'un reformeur : une contrainte du point de vue place, poids et temps de démarrage. D'ailleurs, les derniers prototypes de véhicule à pile utilisent tous de l'hydrogène. Dans les applications stationnaires, l'utilisation du gaz naturel semble rallier un consensus, car c'est le plus simple à mettre en place ; l'infrastructure est en place et les contraintes sont moindres en termes de volume, de poids et de temps de réponse du système.

Le second problème concerne la distribution et le stockage de l'hydrogène. Pour le moment, l'hydrogène est souvent produit et consommé sur site (dans la pétrochimie, la chimie...). Trois options se présentent pour l'infrastructure de production d'hydrogène : une production centralisée suivie d'une distribution aux utilisateurs par pipelines et camions, une production décentralisée par électrolyse ou par reformage avec une consommation de l'hydrogène sur site ou à proximité, ou une production intégrée dans les piles à combustible avec un reformage interne à partir de gaz naturel, de méthanol ou d'essence. Les deux premières options requièrent la mise en place d'une infrastructure pour le stockage, le transport et la distribution, la troisième est plus complexe (surtout pour un reformage embarqué), mais l'infrastructure de distribution des carburants existe en général. Quant au stockage, il pose un problème d'ordre technologique car l'hydrogène est à la fois léger et volu-

mineux. Le stockage sous forme gazeuse requiert des pressions élevées et la liquéfaction se fait à -253°C. D'autres alternatives sont à l'étude comme les hydrures métalliques ou les nanotubes. La mise en place, et surtout le coût de la distribution et du stockage, seront cruciaux pour la viabilité économique des différentes options.

Conclusion

Les piles à combustible apparaissent comme une technologie prometteuse mais elles ont encore un certain nombre de contraintes à franchir, tant technologiques que de coûts. Par ailleurs, la question du carburant hydrogène doit être résolue en parallèle. Certains imaginent une économie tout hydrogène, mais cela semble techniquement et économiquement difficilement réalisable. L'expérience de pays comme l'Islande nous apportera un début de réponse, mais nécessitera un long travail de R&D (avec des budgets conséquents), que ce soit à l'échelle nationale, au niveau des compagnies privées ou sous forme de programmes de coopération internationaux.

Une pile à combustible installée à Orléans La Source¹

En 2003, EDF a fait l'acquisition de quatre piles à combustible résidentielles de dernière génération auprès de la société Vaillant afin de conduire des expérimentations sur le terrain dans le but de tester l'application de cette nouvelle technologie. Rappelons ici qu'EDF ne travaille que sur des piles installées sur site et pas sur des dispositifs embarqués (véhicules). L'expérimentation d'Orléans est donc l'une des quatre opérations mises en place par EDF, la seule installée dans une ville de l'importance d'Orléans et, également, la seule en région Centre. La pile Vaillant installée est du type EURO 2, de petite puissance (4,6 kWe et 9,1 kWth), fonctionnant à l'hydrogène (Photo 1). Elle peut opérer en cogénération tout en étant raccordée au réseau électrique. L'expérimentation relève d'un partenariat entre EDF et l'OPAC d'Orléans et bénéficie du soutien de la Ville d'Orléans.

L'immeuble, retenu par l'OPAC d'Orléans (Résidences de l'Orléanais), est celui du 25 allées Camille Flammarion dont la réhabilitation a été achevée fin 2004 dans le cadre du Grand Projet de Ville en cours sur le quartier (Photo 2). La pile est en service depuis janvier 2005. Pour l'OPAC, cette expérimentation s'inscrit dans le programme de réhabilitation et de maîtrise des coûts (donc des loyers) entrepris par Les Résidences de l'Orléanais depuis plus de deux ans. Pour EDF, il s'agit d'une opération expérimentale destinée à fournir le maximum d'informations à EDF Recherche et Développement sur ce type de système.



Photo 1. La pile à combustible installée à La Source (cliché EDF).

L'expérimentation permettra d'évaluer :

- les contraintes réglementaires d'installation et d'exploitation d'un tel système en secteur résidentiel ;
- l'intégration de la pile avec les autres composants de la chaufferie, tels que les chaudières et ballons d'eau chaude, ainsi que leur coordination ;
- les performances d'exploitation de la pile (rendements électrique et thermique, capacité au cyclage) ;
- le rendement global sur la base d'un profil de consommation réel, ainsi que les paramètres environnementaux (cycle de vie, bruit, émissions) ;
- la durée de vie, des composants des systèmes, principalement du réformeur et du *stack*. Le réformeur est le système qui assure la transformation du combustible (gaz naturel, méthanol...) en hydrogène. Le *stack*, ou cœur de pile, assure une réaction chimique contrôlée entre l'hydrogène émis par le réformeur et l'oxygène de l'air. Cette réaction permet de produire directement de l'électricité et de dégager de la chaleur.

La pile alimentera en chaleur (eau chaude sanitaire et chauffage) les appartements de l'immeuble et en électricité les parties communes. En cas de défaillance, une situation normale dans le cadre d'une expérimentation de recherche, ou d'insuffisance de la pile, le réseau de chaleur apportera le complément de sorte que les habitants ne connaîtront aucune coupure de chauffage ou d'eau chaude sanitaire. De même, le réseau électrique EDF compensera les défaillances ou insuffisances de la pile expérimentale pour alimenter les parties communes.



Photo 2. L'immeuble du 25 allées Camille Flammarion (cliché EDF).

1. La Rédaction. Remerciements à Jean-Pierre Evelin (EDF Région Centre) pour son aide dans l'élaboration de ce document.