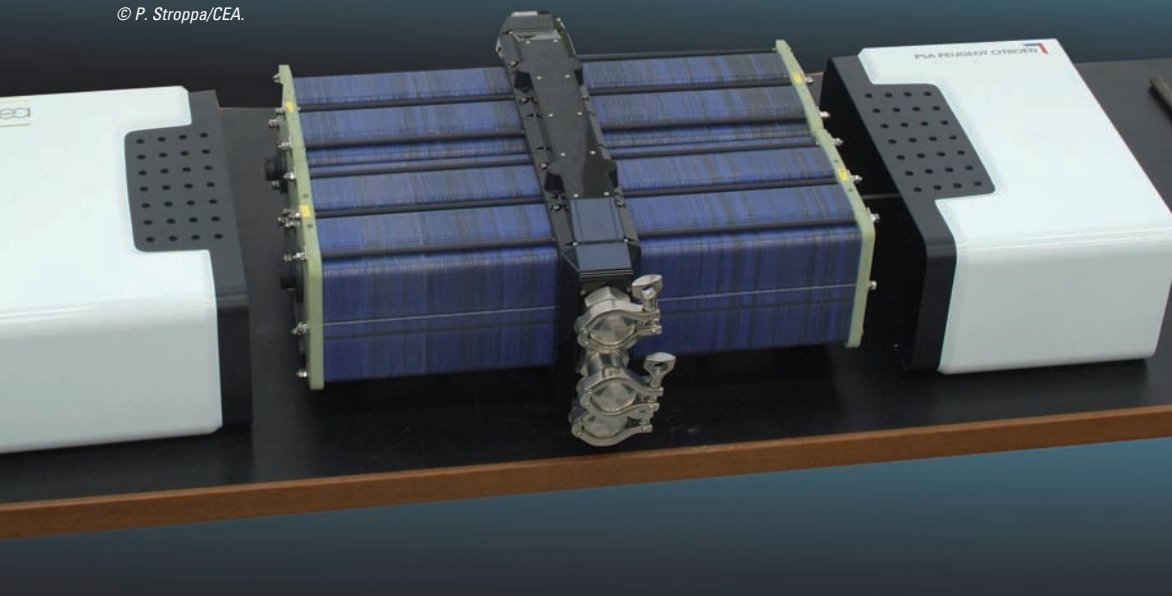


La pile à combustible

Un convertisseur d'énergie d'avenir

© P. Stroppa/CEA.



LAURENT ANTONI
Docteur-ingénieur,
responsable du Laboratoire
des systèmes piles à combustible
basse température au Commissariat
à l'énergie atomique,
Laboratoire d'innovations
pour les technologies
des énergies nouvelles
et les nanomatériaux
(CEA/LITEN), Grenoble

Les besoins en énergie, de plus en plus importants de nos sociétés, sont associés à la volonté politique de réduire les émissions polluantes pour l'environnement, et en particulier les gaz à effet de serre. La pile à combustible s'inscrit dans ces préoccupations, à savoir utiliser les énergies renouvelables (EnR), augmenter le rendement de conversion des systèmes énergétiques, généraliser l'électricité, comme énergie secondaire du fait de la qualité et de la commodité du service qu'elle permet d'atteindre.

Les progrès techniques dans la connaissance et la fabrication des matériaux ont relancé, depuis quelques années, l'intérêt de développer les piles à combustible (PAC). Leur développement ne sera cependant assuré que dans la mesure où les coûts de production et leur durée de vie seront compétitifs par rapport aux moyens de production actuels d'énergie électrique.

Pour relever ce défi, il faut inventer des matériaux, des techniques de fabrication aussi économiques que possible. Ces verrous ne pourront cependant être levés qu'à partir de la connaissance approfondie des propriétés de chaque composant des PAC et de l'impact de l'un sur les autres.

Après le rappel du principe de fonctionnement d'une PAC et des différentes technologies associées, nous présenterons des exemples de leur intégration à des systèmes et à des prototypes. Enfin, nous aborderons, pour les piles à combustible PEMFC, les axes de développement nécessaires pour relever le défi du coût et de la durée de vie et ainsi conduire à leur commercialisation.

Contexte

Dans la dernière partie du XX^e siècle, l'avènement des PAC s'inscrit dans une évolution globale au travers des siècles de la production d'énergie dictée par quatre grandes contraintes :

- la recherche d'un vecteur énergétique unique et généralisé facilement convertible en d'autres formes d'énergie plus apte à répondre aux divers besoins de l'homme (transport, chauffage, communications) ; l'électricité est le candidat retenu, car il est facile de la produire et de la transporter, mais elle a le gros inconvénient d'être difficile à stocker ;
- la recherche d'une diversification des énergies primaires pour limiter les dépendances énergétiques en particulier vis-à-vis des énergies fossiles (pétrole ou gaz) ;
- l'augmentation des rendements des convertisseurs y compris dans le transport ;
- la contrainte environnementale, elle-même déclinable en deux sous-contraintes : d'une



D. R. Photographie V. Varène.

part, la limitation des émissions polluantes à durée de vie courte (pollution locale : CO, NO_x, HC, particules...) et, d'autre part, la limitation des émissions de polluants à durée de vie longue et en particulier ceux à effet de serre (pollution globale).

L'utilisation des PAC reste indissociable de l'élément hydrogène qui, à défaut d'être disponible tel quel, présente l'avantage d'être un composé chimique transportable, stockable et qui peut être produit à partir d'énergies renouvelables diversifiées.

Au sens du rendement de la chaîne de conversion énergétique, une approche simpliste du problème fait apparaître la PAC comme plus prometteuse par principe que les convertisseurs « électrothermiques » (électrodiesel, électroturbine).

Le nombre d'étapes de la transformation énergétique et de composants nécessaires semble être moindre que dans le cas du passage par une conversion (fig. 1) :

« chimique → thermique → mécanique → électrique. »

L'autre intérêt en particulier pour les PAC à haute température est d'être intégrable à un cycle de conversion dit « combiné » où l'on met en cascade une PAC et une ou deux turbines à gaz ou vapeur. Le rendement électrique global peut alors monter jusqu'à 80 %.

D'autre part, du fait de sa modularité, la PAC s'intègre bien dans les stratégies actuelles d'accompagnement des grands réseaux de distribution électrique par des sources d'énergie locales, de faible puissance.

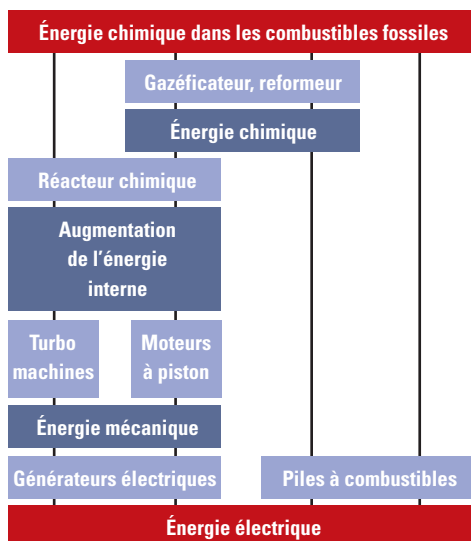


FIGURE 1
 Comparaison des chaînes de conversion
 chimique/électrique traditionnelle et à PAC.

Le défi à relever pour les PAC, comme pour toute nouvelle chaîne énergétique est de répondre aux cinq critères suivants :

- la qualité du service ;
- la commodité du service ;
- le rendement économique de la chaîne délivrant le service ;
- le rendement énergétique de celle-ci ;
- la qualité « environnementale » de la chaîne énergétique délivrant le service.

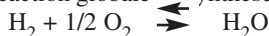
Le critère coût est le plus difficile à respecter actuellement, sachant que les solutions concurrentes (thermiques) ont plusieurs générations d'avance et occupent les marchés actuels. L'application à la traction automobile illustre bien cette problématique.

Fonctionnement d'une pile à combustible :

cas de la PEMFC

Principe de fonctionnement d'une PAC

Une PAC est un convertisseur d'énergie chimique en énergie électrique et thermique. La réaction mise en œuvre est une réaction électrochimique entre l'hydrogène H_2 (carburant) et l'oxygène O_2 (comburant) avec production simultanée d'eau, d'électricité et de chaleur selon la réaction globale de synthèse de l'eau :



Contrairement aux piles traditionnelles ou aux batteries, l'énergie n'est donc pas stockée dans le volume fini de la pile lui-même mais dans des réservoirs de gaz qui peuvent alimenter la PAC de manière continue. Le flux d'énergie délivré par la PAC découle de la circulation du gaz combustible (H_2) et du gaz oxydant (O_2).

La mise en œuvre de cette réaction s'effectue au travers de deux demi-réactions l'une à l'anode correspondant à l'oxydation de l'hydrogène et l'autre à la cathode avec la réduction de l'oxygène produisant de l'eau.

Parmi les différentes technologies, deux sont privilégiées : la filière polymère à basse température PEMFC et la filière céramique à haute température SOFC. Elles offrent des perspectives d'utilisation larges dans trois domaines : les applications portables, les transports et les applications stationnaires.

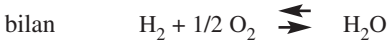
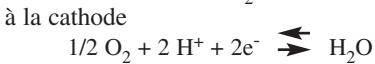
Piles PEMFC

Dans le cas des piles de technologie PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell* ou pile à membrane échangeuse de protons), le lien entre ces deux demi-réactions est réalisé par une membrane électrolyte conduisant les protons H^+ . Le principe de fonctionnement

nécessite une cellule élémentaire comprenant une anode, une cathode, un électrolyte ainsi que les alimentations en combustible et comburant (fig. 2)

Le circuit électrique externe est également représenté.

Les réactions mises en œuvre sur chaque électrode sont :



Pour que ces réactions aient lieu aux températures de fonctionnement d'une pile PEMFC, l'ajout d'un catalyseur dans les électrodes est nécessaire. Le meilleur catalyseur reste

aujourd'hui le platine. La production d'énergie électrique s'accompagne de pertes thermiques qu'il convient d'évacuer par l'intermédiaire d'un circuit de refroidissement.

La cellule élémentaire de PAC est un montage constitué d'un assemblage membrane électrodes (noté AME), inséré entre deux collecteurs de courant ou plaques bipolaires (fig. 3). Ces dernières permettent le passage des fluides, y compris celui de refroidissement et assurent l'étanchéité entre les trois circuits fluidiques.

Une pile proprement dite est un empilement de ces cellules élémentaires, connectées en série d'un point de vue électrique, et en parallèle d'un point de vue hydraulique. Les plaques bipolaires séparent deux AME adjacents et permettent leur connexion électrique.

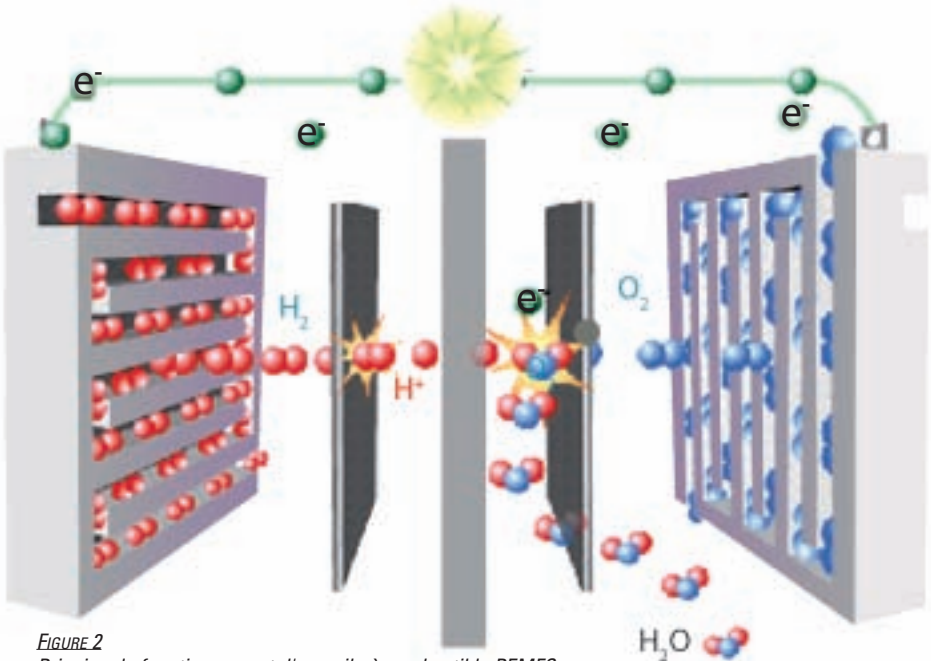


FIGURE 2
Principe de fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC.

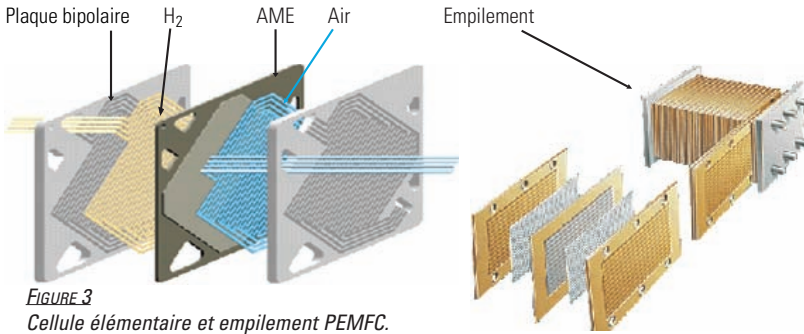


FIGURE 3
Cellule élémentaire et empilement PEMFC.

Dans les PAC céramiques à haute température dites SOFC, par suite du choix d'un oxyde solide, ce sont les anions O^{2-} qui migrent à travers l'électrolyte solide. La réaction de réduction de l'oxygène se produit à la cathode (aussi appelée « électrode à air »), générant les ions O^{2-} qui migrent dans l'électrolyte solide jusqu'à l'anode où ils participent à l'oxydation de l'hydrogène pour former de l'eau.

Les différents types de piles à combustible

Les différents types de PAC ainsi que leurs domaines de température de fonctionnement sont résumés sur la figure 4.

Jusqu'en 2005, plus de 14 500 unités de PAC ont été produites à travers le monde. La technologie dominante est la PAC à membrane échangeuse de protons (PEMFC) qui constitue la technologie la plus flexible et la seule vraiment examinée pour le marché automobile (fig. 5). Cependant, les autres technologies prennent lentement leurs marques, créant ainsi une industrie plus dynamique et robuste.

Pour les plus fortes puissances, les piles à carbonates fondus (MCFC) restent toujours la technologie de choix. Les piles SOFC, malgré les grandes avancées de ces dernières années, luttent toujours pour passer des unités de recherche à un démonstrateur en conditions réelles d'usage. Bien que le nombre d'unités en pile à combustible à acide phosphorique (PAFC) demeure pratiquement inchangé en 2005 (et donc avec une part de marché cumulé qui a diminué), ceci devrait changer dans

les deux années à venir avec un nouveau produit d'une durée de vie annoncée de 80 000 heures (ceci serait alors le record sur le marché).

Pour les plus petites puissances, nous constatons que le marché des véhicules à moteur est dominé par les piles PEMFC qui prennent près de 100 % de la part de marché. Néanmoins, elles sont actuellement clairement absentes du grand marché stationnaire au-dessus de 50 kW. Les piles SOFC ont également pénétré le marché des transports mais en grande partie comme générateur auxiliaire de puissance (APU) (jusqu'à 3 - 5 kW).

Un marché relativement nouveau est le marché stationnaire résidentiel ou « petit stationnaire ». Dans la réalité, comme dans la terminologie, ceci est considéré comme deux marchés séparés avec des sociétés misant sur l'un des marchés ou sur l'autre, plutôt que d'essayer de vendre le même produit dans les deux marchés. La technologie principale est la pile PEMFC, mais la pile SOFC a une petite mais significative part de marché.

Enfin, les petits marchés portables (nomades) sont dominés à part égale par les piles PEMFC et DMFC. Cependant, il faut noter que d'autres technologies sont actuellement à l'étude.

Dans le marché de niches moins bien définies, les piles PEMFC dominent toujours. Non seulement cette technologie est sans doute la plus appropriée, mais surtout elle est la plus facile à acheter et à des tailles très variables. Lorsque d'autres piles seront devenues plus facilement disponibles, il n'est pas exclu qu'elles se vendent également dans ces marchés variables.

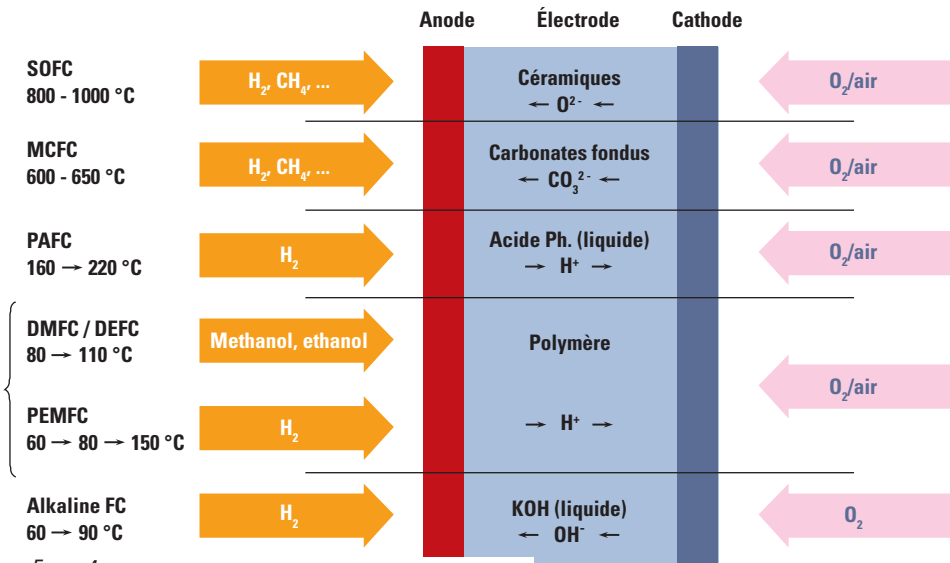


FIGURE 4
Différents types de piles à combustible.

Système à pile à combustible

Un système à PAC (fig. 6), ou module de puissance est un système réalisant de façon autonome la conversion de l'énergie de combustion d'un carburant en énergie électrique directement utilisable. Pour cela, la pile est accompagnée d'équipements auxiliaires pour que sa fonction principale, la fourniture d'énergie électrique, puisse être remplie. Ces composants assurent l'approvisionnement des réactifs, leur conditionnement, l'évacuation des produits, de la chaleur, la conduction et la transformation de l'électricité au profit des équipements consommateurs électriques (moteur électrique, auxiliaires divers...).

Suivant la nature de la pile et son application (notamment son combustible) l'environnement devra être adapté avec :

- la gestion des apports en combustible et comburant avec une étape de pré-reformage éventuelle et/ou une mise sous pression pour les PEMFC ;
- la gestion thermique avec des plaques bipolaires à circuit liquide ou air pour le refroidissement des PEMFC ou l'utilisation de la chaleur fournie pour la SOFC pour réchauffer les gaz en entrée ;

- la gestion électrique pour la transformation du courant continu délivré par la pile en courant alternatif au voltage désiré.

Enfin, pour les applications transport, la chaîne de traction électrique est constituée de l'ensemble des systèmes intervenant dans la conversion d'énergie, depuis la sortie du réservoir de carburant jusqu'aux roues. Le groupe électrogène à pile à combustible est l'un des éléments principaux de cette chaîne de traction, où l'on peut distinguer deux autres composants majeurs : le groupe motopropulseur et l'éventuel stockage secondaire

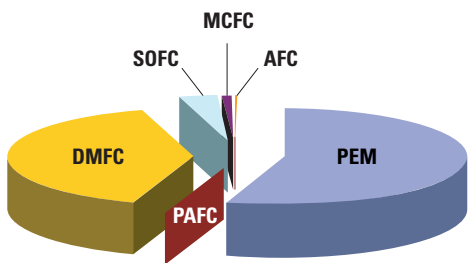


FIGURE 5
Répartition des systèmes PAC produits (2005).
Source : Fuel Cell Today.

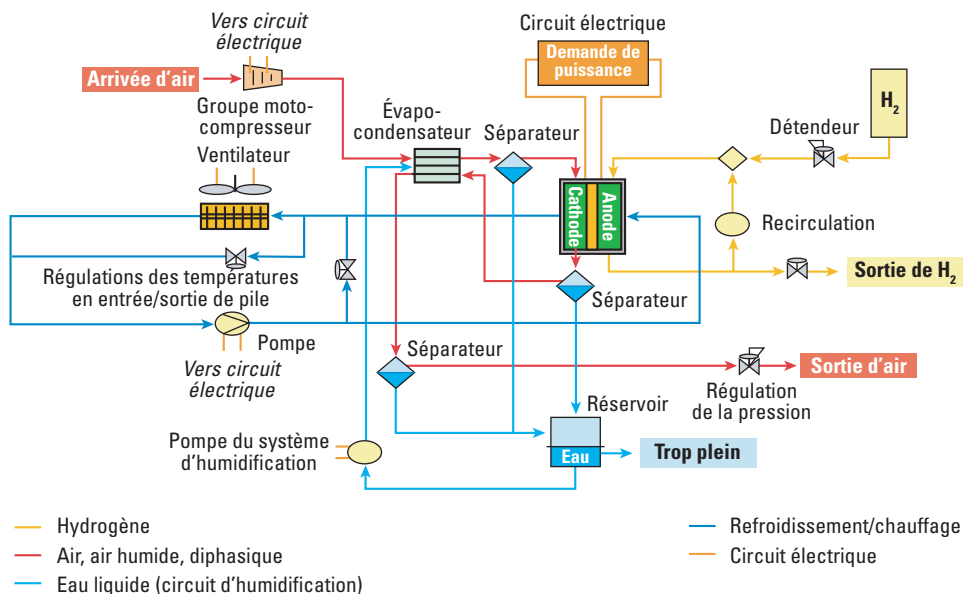


FIGURE 6

Système PAC pour le transport automobile.

d'énergie. Le premier réalise la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique, et le second est un stockage tampon d'énergie électrique (par exemple une batterie ou une super capacité).

Le combustible : l'hydrogène

Comme précisé plus haut, la PAC est un convertisseur d'énergie chimique en énergie électrique et ne stocke pas d'énergie. L'énergie chimique est contenue dans l'hydrogène entrant dans la PAC. Mais l'hydrogène n'est pas directement disponible dans la nature.

Il peut être produit à partir de trois énergies primaires : les énergies fossiles, nucléaire et renouvelables (fig. 7). Pour être économiquement et écologiquement viable, la production d'hydrogène doit répondre à trois critères :

- la compétitivité économique, avec un coût de production pas trop élevé ;
- le rendement énergétique (la production d'hydrogène ne consommant pas trop d'énergie) ;
- la propreté en utilisant un processus de fabrication non polluant.

Plusieurs méthodes sont aujourd'hui opéra-

tionnelles mais aucune ne répond pour l'instant parfaitement à ces trois critères.

Si l'utilisation de l'hydrogène reste encore faible dans le domaine de l'énergie, il est une des matières de base de l'industrie chimique et pétrochimique et est utilisé dans les secteurs de la métallurgie, de l'électronique, de la pharmacologie ainsi que dans le traitement de produits alimentaires. Ceci représente environ 50 millions de tonnes d'hydrogène produites par an.

Les applications des piles à combustible et les prototypes actuels

Même si l'état de développement des PAC se situe encore pour beaucoup au stade de la recherche et développement, le nombre de démonstrateurs, de prototypes, voire de systèmes commercialisés ne cesse d'augmenter. Ainsi, en 2004, le marché des PAC a connu un impressionnant taux de croissance de 32 %. Le nombre total d'unités produites s'élève actuellement à environ 14 500 (fig. 8).

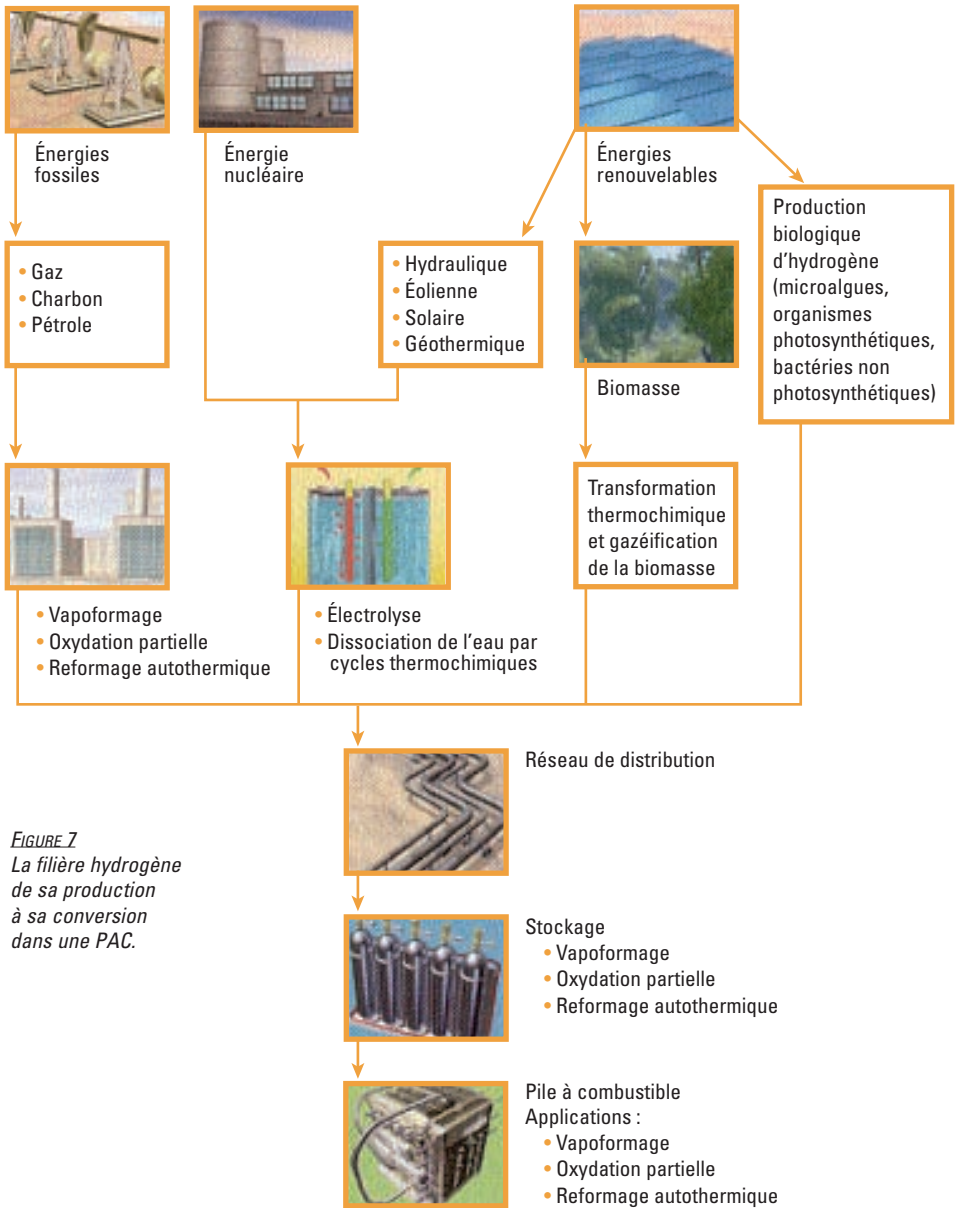


FIGURE 7
La filière hydrogène de sa production à sa conversion dans une PAC.

Le fonctionnement de ces unités constitue de par leur retour d'expérience une source d'informations essentielle au développement de composants et de systèmes PAC améliorés, répondant ainsi aux critères de performance, durabilité et fiabilité et aux critères économiques.

Grâce à leur propriété de modularité et aux différentes technologies développées, les PAC peuvent s'appliquer avantageusement à presque tous les domaines de puissance du watt à plusieurs mégawatts. Les applications essentiellement militaires et spatiales à l'origine ont permis le développement des piles de

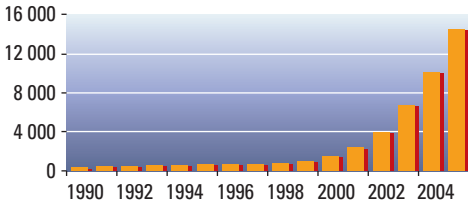


FIGURE 8
Évolution du nombre d'unités PAC produites depuis 1990. Source : Fuel Cell Today.

type AFC, PEMFC et même DMFC. Depuis 1990, apparaissent également des prototypes de véhicules pour des marchés de niche comme la voiturette de golf, l'auxiliaire de puissance pour camping-car ou le véhicule utilitaire urbain.

Le marché de niche

On peut constater depuis quelques années que ce marché est en pleine croissance avec notamment une multiplication par cinq du nombre d'unités annoncées entre 2005 et 2006. Les principales applications sont les auxiliaires de puissance (une unité fournissant une puissance qui ne sert pas à la propulsion), les applications maritimes (sous-marins allemands, par exemple), les chariots élévateurs (ces trois domaines représentant plus de 85 % des unités produites en 2006), les deux roues, le transport ferroviaire et les applications aérospatiales. Les piles PEMFC couvrent plus de 80 % de la production avec l'émergence des piles SOFC pour les auxiliaires de puissance.

Le transport

Bus doté de pile à combustible

La PAC trouve dans le marché de la flotte captive un environnement très propice à son développement. En effet, il s'agit d'un environnement industriel habitué à respecter des consignes de sécurité inhérentes à l'utilisation de l'hydrogène et pour lequel le critère environnemental de réduction locale des émissions de polluant est majeur.

De même que les États-Unis, le Canada et bientôt la Chine avec les Jeux olympiques en

2008 et la Corée, les grandes nations européennes (à l'exception de la France) se sont dotées avec le projet CUTE de flottes expérimentales (fig. 9). Il s'agit d'un retour d'expérience indispensable au déploiement de ce type de bus qui affiche plus de 1 000 000 km cumulés parcourus, 100 tonnes d'hydrogène consommé et 2,5 millions de personnes transportées dans trente bus dotés de PEMFC répartis dans dix villes.

Véhicules légers

Depuis les années 1990, un important constructeur automobile développe des versions toujours plus compactes et plus performantes d'un véhicule électrique (« NECAR ») alimenté par une pile PEMFC. Il a livré à ce jour soixante véhicules dans le monde.

Ce constructeur est désormais rejoint par la quasi-totalité de ses concurrents qui disposent tous d'un ou plusieurs démonstrateurs. Si dans un premier temps, les piles utilisées provenaient toutes d'un seul fabricant, les constructeurs automobiles développent désormais leur propre pile. On dénombre au total plus de cinquante modèles représentant environ 600 véhicules dans le monde en 2006.

Une attention particulière peut être accordée à la pile à combustible de 80 kW (fig. 10) développée dans le cadre d'une collaboration entre un constructeur automobile français et le CEA. Cette pile, présentée en 2006, présente des performances de compacité (1,5 kW/L et 1,1 kW/kg) au meilleur niveau mondial.

Image non disponible.

Se reporter à la version
papier du n° 344-345
de la revue
Découverte

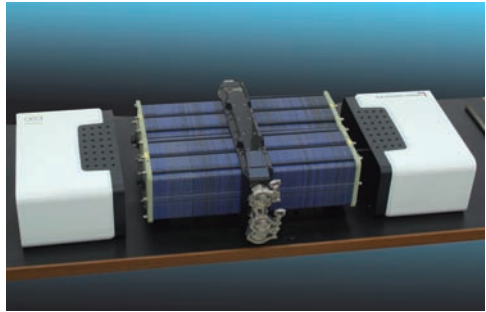
FIGURE 9

Bus du programme CUTE. © Hyfleet : CUTE project.



FIGURE 10

La pile GENEPAC de 80 kW avec et sans capots. © P. Stroppa/CEA



Des industriels révisent déjà intégralement la conception des véhicules pour l'adapter aux spécificités de la PAC, du stockage du combustible et d'une architecture électrique (rétroviseur remplacé par une caméra, suspension électrique active, réservoir H_2 intégré dans la structure). En effet, l'ensemble des constructeurs s'accorde à penser que la démarche actuelle d'intégrer dans une plateforme existante une pile à combustible n'a pas d'avenir et qu'il faudra réinventer le véhicule. Leur dernière prévision de démarrage de la commercialisation des véhicules légers à piles à combustible est en 2015 avec une production en masse à partir de 2020.

Le stationnaire

La dérégulation de l'énergie favorise l'implantation de centrales électriques décentralisées, marché sur lequel la pile à combustible à de légitimes espoirs de développement (fig. 11).

Certains bureaux de poste, des banques, des centres informatiques et diverses entreprises profitent déjà de cet approvisionnement énergétique très sûr, sans interruptions, et décentralisé, fourni par les piles à combustible, ou en font usage comme générateur de secours.

Les applications nomades

Depuis 2000, on assiste à une course à la miniaturisation des PAC en vue de concurrencer l'autonomie et la durée de vie des batteries. Cette miniaturisation concerne les piles de type PEM ou DMFC qui peuvent alors être

utilisées pour faire fonctionner n'importe quel appareil, de l'ordinateur portable au chargeur de téléphone portable. Pour la PEM, le principal verrou reste le stockage de l'hydrogène. Pour la DMFC, c'est le convertisseur lui-même et notamment sa membrane qui limite sa performance.

Les axes de développement

L'augmentation importante des systèmes PAC produits ces dernières années répond à la demande croissante en énergie tout en préservant l'environnement. Cependant, le glissement répété de la date de début de commercialisation massive de cette technologie démontre l'existence de verrous qu'il

Image non disponible.

Se reporter à la version
papier du n° 344-345
de la revue
Découverte

FIGURE 11

Générateur stationnaire Hélicon pour alimentation de secours de 30 kW nets, installé au siège du CEA, 2006. © Hélicon.



FIGURE 12

Chargeur nomade de téléphone portable composé d'une cartouche H_2 jetable (PAC PEMFC miniature (boîtier noir) développée au CEA). © P. Stroppa/CEA.

convient d'identifier, puis de lever.

Les principales limitations actuelles identifiées sont :

- le combustible (production, stockage, distribution en toute sécurité avec un contrôle de l'effet sur l'environnement) ;
- le coût des composants critiques et du système intégré ;
- les performances et la durabilité des produits existants.

Combustible H_2

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique et son acceptation sociale imposent le développement de technologies qui offre un niveau de sûreté et de sécurité au niveau de la production, du stockage et de la distribution au moins équivalent à l'industrie du gaz naturel et une réglementation adaptée. L'hydrogène n'est pas plus dangereux que le gaz naturel ou l'essence, il est différent. Le risque objectif associé est maîtrisable à condition que la sécurité soit intégrée dès la conception des installations et des systèmes, comme cela est le cas dans les différents développements actuels et dans les travaux de normalisation et de réglementation⁽¹⁾ aux niveaux national, européen et mondial.

Production

L'utilisation de l'hydrogène comme vecteur énergétique impose également d'augmenter radicalement sa production tout en contrôlant l'impact sur l'environnement.

Actuellement 95 % de l'hydrogène est produit à partir des combustibles fossiles par reformage. Mais ce procédé a l'inconvénient de rejeter du CO_2 dans l'atmosphère. Pour éviter cela, il conviendrait de le séquestrer par des techniques qui doivent faire l'objet de développements.

Une autre voie possible est la dissociation des atomes d'hydrogène et d'oxygène de l'eau par électrolyse ou par cycles thermochimiques. Ces techniques ont l'avantage de ne pas émettre de CO_2 . Mais pour être rentable, l'électrolyse exige de pouvoir disposer de courant électrique à très bas coût. L'énergie nucléaire ou un couplage avec les énergies renouvelables (photovoltaïque, éolienne) sont les candidats envisagés. Par ailleurs, l'électrolyse à haute température (EHT) qui fait actuellement l'objet de nouveaux développements, permettrait d'améliorer les rendements énergétiques.

La biomasse, constituée de tous les végétaux, est une énergie primaire potentiellement très importante pour la production d'hydrogène par un procédé de gazéification puis de purification. Au niveau écologique, l'éco-bilan est nul car la quantité de CO_2 émise lors de la conversion de la biomasse correspond à celle absorbée par les plantes au cours de leur croissance.

Stockage

L'autonomie de fonctionnement d'une PAC est directement liée à la quantité d'hydrogène disponible. Son intégration dans des véhicules ne pourra se faire que si la sécurité, la fiabilité et la facilité d'emploi de l'hydrogène sont équivalentes à l'utilisation des carburants actuels et si la quantité embarquée permet de garantir une autonomie comparable. Les objectifs technico-économiques fixés pour le

(1) ISO/TC 197 pour les technologies de l'hydrogène IEC/TC 105 pour les PAC.

stockage embarqué d'hydrogène sont donc essentiellement basés sur les spécifications des véhicules plus que sur les limitations des différentes technologies envisagées. Celles-ci sont au nombre de trois :

- *Stockage sous forme liquide*

Cette forme de stockage à 20 K et 10 bar permet d'atteindre des densités volumique et massique intéressantes mais nécessite des réservoirs bien isolés thermiquement pour limiter l'évaporation. De plus, l'énergie nécessaire et les coûts engendrés pour la liquéfaction limitent son application à grande échelle.

- *Stockage gazeux sous haute pression*

Actuellement à 350 bar, il permet d'atteindre une densité massique satisfaisante avec des réservoirs en composite. Un passage à une pression de 700 bar paraît inévitable pour répondre aux exigences de densité volumique.

- *Stockage sous forme solide*

Ce stockage sur des substrats sous forme adsorbée ou absorbée, notamment sur des hydrures métalliques présente une densité volumique intéressante mais une densité massique très faible. La cinétique, la température et la pression de cyclage restent également des points durs à lever.

Transport et distribution de l'hydrogène

Il faudra pour cela répondre aux questions sur les lieux de production : délocalisée avec des usines de production, des points de ravitaillement (stations services, dépôts de bus...), ou bien in situ (sites isolés, embarquée sur véhicule). En fonction du choix précédent, il faudra mettre en place respectivement une distribution par un réseau de distribution, un stockage tampon ou bien une alimentation en hydrocarbure. Le mode de production et de distribution reste à définir.

Le nombre total de stations hydrogène a atteint 115 unités en 2005. Pour 2006, il était prévu l'ouverture de trente à quarante nouvelles stations à travers le globe.

Aux États-Unis, ce déploiement se fait principalement le long de la côte ouest. L'objectif est de relier le nord du Mexique au Canada par l'autoroute de l'hydrogène (*from Baja California to British Columbia*).

Réduire le coût des composants critiques et du système intégré

En l'absence de pression écologique majeure (effet de serre provoquant des catastrophes climatiques, épuisement des réserves fossiles, etc.) les PAC doivent produire une électricité au même coût pour pénétrer le marché. Or les coûts annoncés actuellement restent bien supérieurs. Un effort particulier doit donc être apporté pour rendre cette technologie plus attractive du point de vue économique. Pour cela, il est intéressant de décomposer les coûts des différents éléments d'un système PAC.

Il en ressort d'une étude récente sur la répartition des coûts d'un système PAC d'une puissance nette 80 kW pour le transport, produit à 500 000 unités par an, que la pile est le composant le plus cher du système (63 % du coût total). Les auxiliaires (compresseur d'air, humidificateur, échangeur thermique, vannes, débitmètres...) représentent 34 % et l'assemblage du système 3 %. Contrairement aux auxiliaires pour lesquels chaque composant est unique ou à quelques unités par système, la pile est composée de nombreux éléments semblables (empilement de plusieurs centaines d'AME et de plaques bipolaires par pile). On peut donc a priori espérer une baisse du coût de la pile par effet de volume bien supérieure à celle des auxiliaires.

En considérant la répartition des coûts de la pile, l'étude montre que plus de 80 % de son coût est lié à l'électrode (principalement le platine) et la membrane. Or il n'y aura pas d'effet de volume sur le coût du platine, si ce n'est au contraire une augmentation possible du fait d'une demande accrue.

Ces considérations expliquent les nombreuses études qui cherchent soit à continuer à diminuer la quantité de platine soit à le

substituer par des éléments nettement moins onéreux.

Accroître les performances et la durabilité des produits existants

Le niveau de performance d'un système à pile à combustible est le résultat d'une optimisation entre les paramètres de fonctionnement de la pile (température, pression, humidité des gaz), les points de fonctionnement et la consommation d'énergie associée des différents auxiliaires. Le marché des piles à combustible n'existant pas encore aujourd'hui, les composants auxiliaires présents dans les systèmes n'ont généralement pas été conçus et optimisés pour cette application. L'amélioration sensible des performances (en terme de puissances volumique et massique et de rendement) et de la durabilité passera donc par un développement spécifique de composants adaptés aux plages de fonctionnement des différentes technologies de PAC et permettant, par une meilleure intégration de la pile dans le système, de trouver un équilibre entre les contraintes appliquées à la pile et aux auxiliaires.

La performance et la durabilité des piles ne pourront être améliorées qu'à partir de la connaissance approfondie des propriétés et des mécanismes de fonctionnement et de vieillissement de chaque composant des PAC et de leurs interactions mutuelles. La figure 13 illustre une courbe de polarisation⁽²⁾ représentative d'une PAC. Le cas idéal est représenté par la droite horizontale en bleu clair en arrière plan et le cas réel par la courbe en vert au premier plan. L'écart entre ces deux courbes représente l'énergie chimique dissipée en chaleur et donc non transformée en électricité. Ces limitations sont de trois

natures : la surtension d'activation (région 1), la surtension ohmique (région 2) et la surtension de concentration (région 3).

La surtension d'activation (région 1) observée aux faibles densités de courant traduit une limitation des cinétiques de mécanismes réactionnels aux électrodes (transfert de charge), notamment celles liées à la réduction de l'oxygène à la cathode. Améliorer les performances conduirait à décaler la courbe i-V vers le haut. Ceci peut être atteint en augmentant :

- la quantité de catalyseur platine (Pt) mais cela est incompatible avec les aspects économiques,
- la surface d'échange du catalyseur par l'optimisation de la taille des particules (aujourd'hui nanométriques) de catalyseur,
- la température de fonctionnement des piles PEMFC, ce dernier point impliquant de changer d'électrolyte.

La surtension de concentration (région 3) observée aux fortes densités de courant traduit une limitation liée à des phénomènes de transport. La quantité de gaz (H_2 , air) et d'eau produite est proportionnelle au courant délivré par la pile. Il convient donc aux fortes densités de courant d'assurer à la fois l'arrivée d'une grande quantité de gaz au niveau des électrodes et l'évacuation hors de la pile de l'eau produite. Le risque est d'immerger les sites réactionnels des électrodes et donc d'empêcher les réactions électrochimiques (on parle alors de « noyage » de la pile). Améliorer les performances conduirait à décaler la courbe i-V vers les plus fortes densités de courant. Ceci peut être atteint en adaptant la morphologie et l'hydrophobicité de la couche de diffusion en contact avec les électrodes dans l'AME et la géométrie des plaques bipolaires.

La surtension ohmique (région 2) traduit une limitation de la conduction électrique (électrodes, plaque bipolaire) et/ou ionique (électrolyte) dans les différentes parties de la pile. Dans les piles PEMFC, la chute ohmique au

(2) Évolution de la tension de la pile V en fonction de la densité de courant i (A/cm^2) ; la puissance délivrée par la pile étant le produit de ces deux grandeurs.

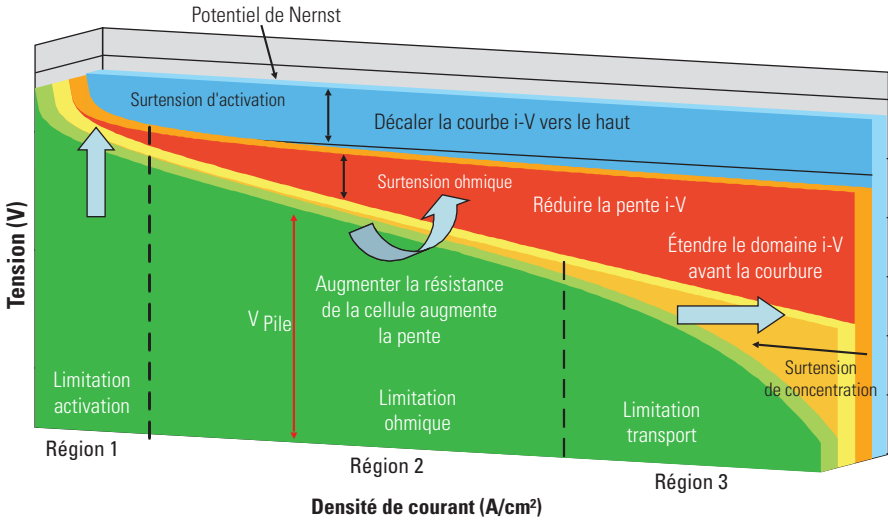


FIGURE 13

Courbe de polarisation typique et mise en évidence des trois surtensions (activation, ohmique et de concentration) limitant les performances d'une PAC.

travers de la membrane polymère peut varier entre 5 % et 20 % de la tension aux bornes de la pile en fonction de l'épaisseur et de la teneur en eau de la membrane. Les résistances de contact électrique sont essentiellement liées à la nature des plaques bipolaires (le graphite présente des résistances de contact inférieures à l'acier inoxydable) et à la pression de serrage de la pile. Améliorer les performances conduirait à réduire la pente de la partie linéaire de la courbe i-V. Ceci peut être atteint :

- en diminuant l'épaisseur des membranes avec le risque de les fragiliser et donc de réduire leur durée de vie ;
- en maintenant une teneur en eau élevée dans les membranes quelles que soient les conditions de fonctionnement tout en évitant de conduire à un noyage de la pile ;
- en développant des électrolytes à conduction ionique améliorée ;
- en adaptant la conductivité électrique des surfaces des plaques bipolaires, notamment métalliques, par un revêtement ou un traitement de surface ;

- en augmentant les pressions de serrage avec le risque de dégrader les performances des AME vis-à-vis de la surtension de concentration et de devoir surdimensionner les éléments d'assemblage de la pile.

Il ressort de cette analyse que les axes de développement pour améliorer les performances des piles sont globalement bien identifiés. Cependant, les solutions envisagées pour un composant peuvent avoir des effets antagonistes sur les autres composants de la pile. Le challenge consiste donc à déterminer les meilleurs compromis en fonction du domaine d'utilisation du système PAC.

Enfin, la compréhension et la modélisation de l'évolution temporelle des différents points décrits précédemment permettent de mieux appréhender la durabilité des piles. Cela pourra conduire au développement de nouveaux matériaux, de nouvelles architectures des composants de l'AME et de la plaque bipolaire et enfin à l'émergence de nouvelles architectures pile ou à l'adaptation de la stratégie de contrôle commande du système à pile à combustible.

Conclusion

Nul doute que les piles à combustible participeront au bouquet énergétique du futur. La diversité et la modularité des technologies PAC leur permettent de toucher tous les domaines d'application depuis les « micro-sources » d'énergie pour les applications portables à la production de mégawatts pour l'alimentation de réseaux électriques.

Ces technologies, et plus particulièrement les piles PEMFC, sont notamment appelées à jouer un rôle important dans le transport et l'automobile sur le long terme, secteur gros consommateur d'énergies fossiles et émettant les plus grandes quantités de CO₂. Les avantages de la PAC sont nombreux. Outre la réduction des émissions de CO₂, nécessaire à la maîtrise de l'effet de serre, la PAC contribue à l'amélioration de la qualité de vie en ville, grâce au silence des véhicules utilisant un moteur électrique et à la suppression des émissions polluantes locales (NO_x, particules...). Les voitures dotées d'une PAC, alimentées en hydrogène stocké à bord, sont potentiellement, avec les véhicules électriques à batterie, les seuls véhicules à zéro émission (ZEV). La PAC contribuera à rompre la suprématie du pétrole comme énergie primaire dans les transports individuels, ce qui, dans le contexte énergétique futur, constitue un avantage majeur. En effet, la PAC fonctionne avec de l'hydrogène. Ce gaz peut être fabriqué non seulement à partir d'hydrocarbures tels que le pétrole et le gaz, mais de préférence à partir d'énergies renouvelables (éolienne, solaire, hydraulique, biomasse) ou du nucléaire.

Cette technologie, au fort potentiel d'évolution, doit cependant encore relever de nombreux challenges tant techniques qu'économiques avant d'être commercialisée en grande série. Au niveau économique, les principaux verrous à lever se situent au niveau du coût des composants de la pile (et plus par-

ticulièrement celui des composants de l'AME) ciblé à 30 \$ par kW pour les applications automobiles à l'horizon 2015 pour un système PAC. Ceci pourra être réalisé à travers des actions de recherche et développement visant dans un premier temps des applications stationnaires et portables dont les coûts d'entrée de marché pourront être plus élevés que pour le secteur du transport automobile. Au niveau technique, la durée de vie des piles et l'intégration du système à pile à combustible sont autant de points qui restent à surmonter.

Enfin, un travail important doit être mené sur le combustible hydrogène (production, stockage, sûreté et réglementation) pour rendre viable ce vecteur énergétique. De plus, la mise en place d'une infrastructure de distribution nécessitera des investissements importants.

L. A.

Pour en savoir plus

STEVENS (P.), NOVEL-CATTIN (F.), HAMMOU (A.), LAMY (C.), CASSIR (M.),

Les piles à combustible, Techniques de l'Ingénieur D3340.

MOSDALE (R.), *Transport électrique routier. Véhicules électriques à pile à combustible*, Techniques de l'Ingénieur D5570.

La filière hydrogène,
Clefs CEA N° 50-51, 2004-2005.