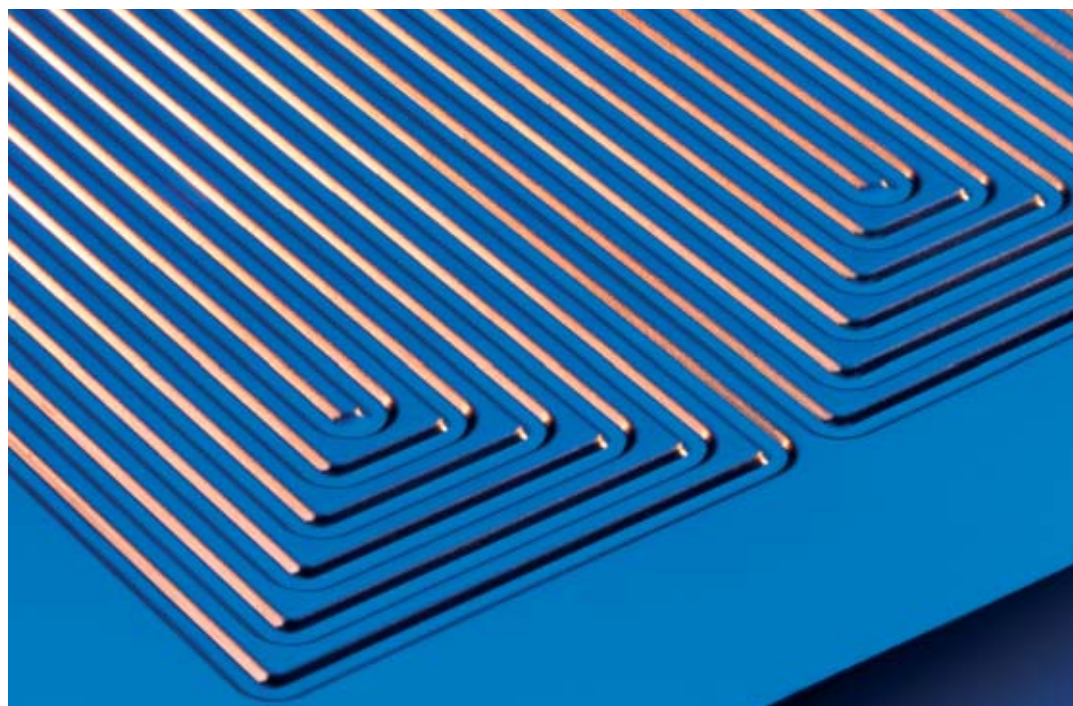




## Des concepts innovants pour les plaques bipolaires

Le développement industriel des piles à combustible de type PEMFC nécessite de réaliser d'importants progrès sur le coût de leurs différents composants. En particulier, les plaques bipolaires présentent encore un coût rédhibitoire pour une utilisation à grande échelle. Fort de ses compétences dans les domaines de la formulation et de la mise en œuvre des matériaux métalliques et composites, le CEA développe deux nouveaux concepts de plaques : les tôles métalliques embouties et les composites organiques moulés. Il étudie également la distribution des gaz par mousses métalliques, une voie qui semble prometteuse.



La réduction des coûts des piles à combustible passe par le développement de nouveaux concepts de plaques bipolaires. Ici, une plaque bipolaire métallique emboutie.

D. Michon-Artequique/CEA

### Une approche globale des systèmes-piles PEMFC

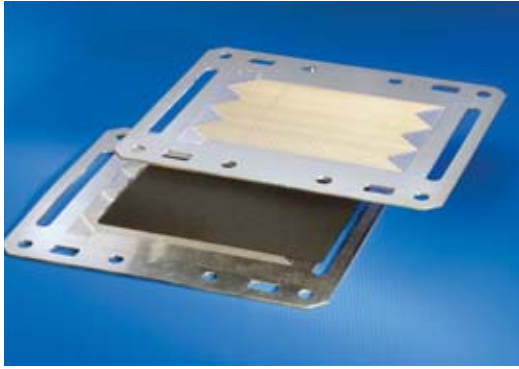
Pour le développement des systèmes-piles à combustible, le CEA applique une démarche globale en quatre étapes, à commencer par l'analyse fonctionnelle et la **modélisation** du système, des plaques et des éléments connexes. La deuxième est l'identification et l'étude des paramètres physiques, des phénomènes élémentaires et de leurs interactions susceptibles d'influer sur le fonctionnement, les performances et sur le dimensionnement optimisé des composants de la cellule élémentaire et du système. Vient ensuite la phase de conception (architecture et dimensionnement), de réalisation, de mise en œuvre et d'évaluation de démonstrateurs (maquettes, composants élémentaires et modules en vraie grandeur) et de leurs procédés de fabrication. En tant que de besoin sont menées des études sur les matériaux (sélection, **formulation**, caractérisation) et sur les procédés (élaboration, mise en forme, assemblage, revêtements, traitements de surface).

L'objectif ? Chercher à définir et valider des moyens d'évaluation comparative rapide des matériaux, états de surface et revêtements par des essais *ex situ* ou en milieux simulés pertinents, sur la base d'une analyse approfondie des essais en pile en conditions réelles.

Cette démarche rigoureuse et volontaire ne va pas sans surprises et contretemps, générateurs à terme d'accroissement significatif des connaissances relatives aux domaines connexes et aux piles PEMFC en général.

La plaque bipolaire doit être considérée simultanément sous ses trois aspects. Elle constitue d'abord l'interface entre le système et le cœur de la **cellule électrochimique élémentaire**. C'est ensuite un élément constitutif du motif élémentaire répétitif, avec les joints d'étanchéité et les EME, qui, à ce titre, conditionne fortement le couple coût-performances de la pile. Enfin, c'est l'élément déterminant des caractéristiques de la pile ou module du point de vue architecture, géométrie, encombrement, masse et caractéristiques mécaniques.

Les plaques bipolaires servent à distribuer les gaz (**hydrogène**, oxygène ou air) et à collecter le courant électrique. Leurs matériaux doivent répondre à des spécifications élevées en termes de **conductivités électrique** et **thermique**, d'imperméabilité aux gaz, de propriétés mécaniques (résistances aux efforts de serrage) et de propriétés chimiques et thermiques dans les conditions d'utilisation des piles PEMFC ou DMFC. L'emploi de plaques en **graphite** satisfait à ces critères. Cependant, la nécessité d'usiner des canaux à la surface des plaques, pour le transport des gaz et pour l'évacuation de l'eau formée dans la pile, entraîne un surcoût incompatible avec la commercialisation en grande série de piles de puissance (prix moyen de



D. Michon - Artechnique/CEA

Plaques bipolaires métalliques embouties et ensemble électrodes-membrane. L'EME enserré entre deux plaques constitue une mono-cellule. Les cannelures de surface des plaques permettent l'alimentation en hydrogène et en oxygène (ou air) sur l'autre face. Un liquide de refroidissement circule entre les deux distributeurs métalliques emboutis adossés.

1 €/cm<sup>2</sup> de plaque en graphite usinée, variable en fonction de la géométrie des canaux et du type d'arrivées et de sorties des fluides). Deux nouveaux concepts de plaques bipolaires à faible coût sont ainsi développés au CEA.

### Les tôles métalliques embouties

Le travail accompli ces dernières années au CEA sur les plaques bipolaires en termes de réduction des coûts, d'amélioration des performances, de la fiabilité et de la durée de vie a déjà permis de diviser par 3 la masse et le volume et, par 100 le coût prospectif de ce composant par rapport à la technologie conventionnelle des plaques à graphite usinées<sup>(1)</sup>. Pour parvenir à ce résultat, les chercheurs du CEA/Grenoble ont appliqué aux distributeurs ou plaques bipolaires métalliques pour les piles PEMFC une approche qui s'inscrit au cœur de leur démarche globale pour le développement des piles à combustible et de leurs composants (**encadré**). Cette démarche les a conduits à concevoir des architectures innovantes, à réaliser et mettre en œuvre des dispositifs de test, des protocoles rigoureux de test et d'évaluation ainsi que les bancs de test nécessaires. Parmi les architectures innovantes se trouvent des plaques à canaux serpents et un système de refroidissement liquide intégré basé sur l'assemblage dos à dos de tôles embouties (**figure 1**), des distributeurs monoblocs à mousses... Les dispositifs de test regroupent des mono-cellules embouties de 60 cm<sup>2</sup> en différents aciers inoxydables, une cellule de référence en graphite usinée à la même géométrie, des plaques embouties en vraie grandeur de surfaces utiles 120, 240 et 360 cm<sup>2</sup> à 3, 6 et 9 canaux et refroidies par un circuit de fluide interne, et des modules de démonstration de 1 à 2 kW. Les protocoles de test et d'évaluation comprennent des essais d'endurance statique et cyclique et des essais dynamiques (**figure 2**).

Ainsi, la prise en compte des contraintes spécifiques propres à l'emboutissage a amené à explorer avec succès des géométries de profils de canaux inexplorées dans

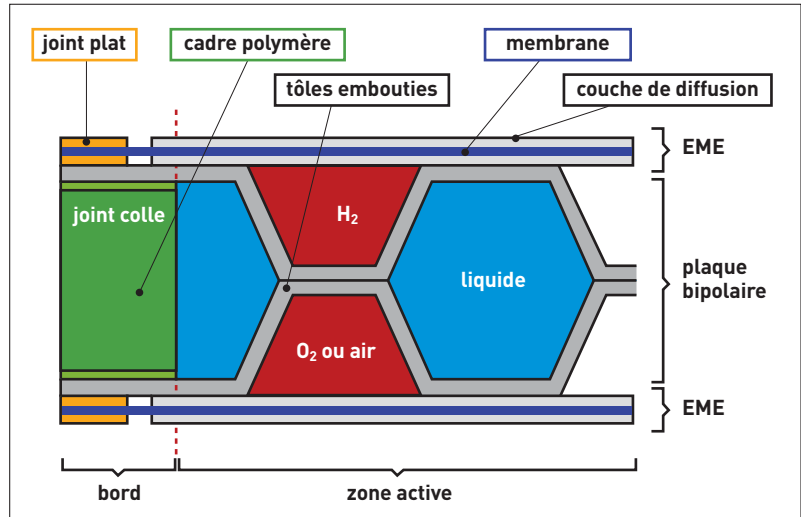


Figure 1. Concept d'architecture de plaque bipolaire métallique emboutie refroidie.

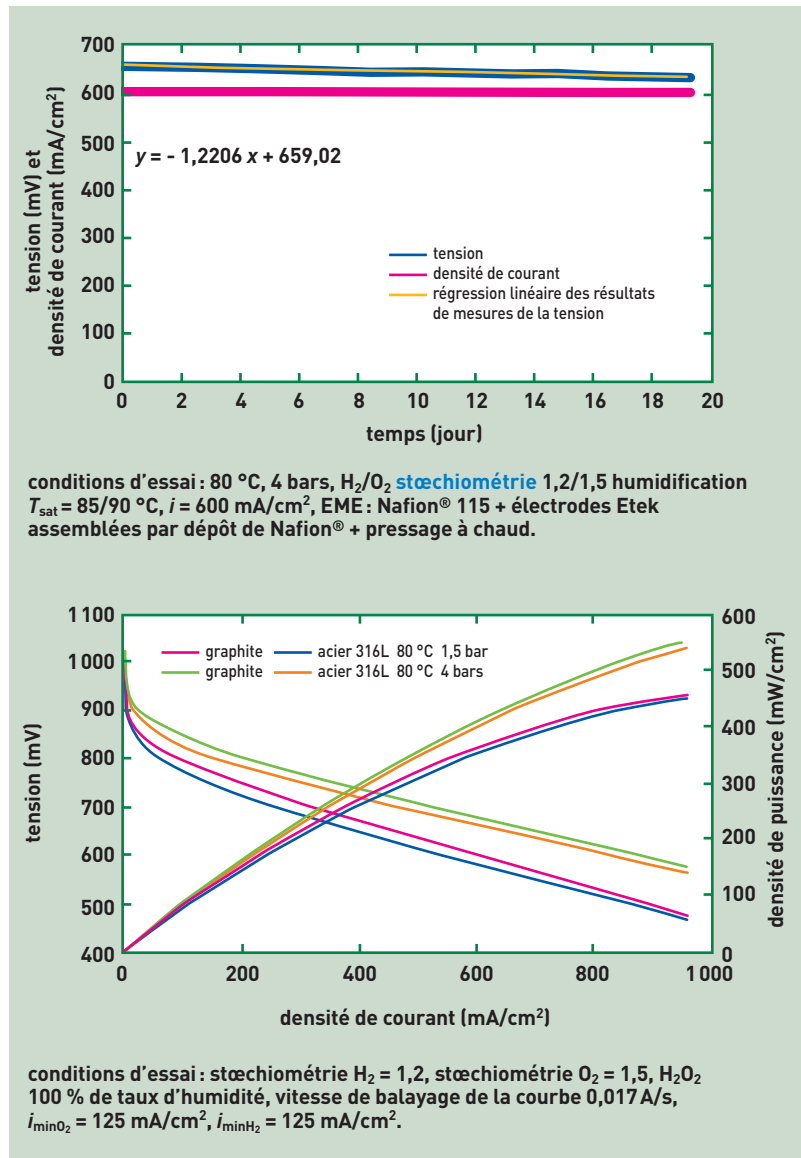


Figure 2. Résultats d'essais sur mono-cellule. En haut, essai d'endurance statique sur une mono-cellule de 60 cm<sup>2</sup> à 2 canaux parallèles en acier inoxydable 316L embouti. En bas, courbes intensité-potential d'une mono-cellule en acier inoxydable 316L embouti et d'une cellule de référence en graphite usinée à la même géométrie pour des pressions de 1,5 et 4,0 bars (essai dynamique).

(1) Une partie des travaux décrits ont été réalisés dans le cadre du contrat Predit-Ademe N° 99 74 003.



CEA



CEA

Banc de test automatique simultané de 4 mono-cellules indépendantes. En haut, cellules de test régulées en température. En bas, vue d'ensemble.

la technologie classique des plaques à graphite usinées. La réalisation d'essais comparatifs rigoureux de différents alliages standard emboutis en mono-cellule, après avoir buté longtemps sur les différences de comportement à l'emboutissage des matériaux, a permis d'apprécier l'influence clé de la profondeur des canaux en relation avec les paramètres d'alimentation et de fonctionnement du module et les propriétés des couches de diffusion, ainsi que la dispersion des performances des EME. L'analyse des causes de dispersion des résultats a par ailleurs conduit les chercheurs à revisiter en profondeur les conditions et technologies de serrage des modules, à prendre plus clairement conscience de l'importance généralement sous-estimée des joints d'étanchéité, et à identifier un mécanisme inconnu intervenant dans la gestion de l'eau en pile qui influe largement sur leurs performances dans certaines conditions. Les premiers essais comparatifs d'endurance en pile, en conditions cycliques, de distributeurs en métal embouti et en graphite usiné ont révélé une vitesse de dégradation fulgurante, aux conditions utilisées, des EME sélectionnées sur la base de leurs performances instantanées ! Les essais d'endurance statique en pile ont mis en évidence une dégradation très modérée des performances de cellules en acier inoxydable 316L, avec une contribution d'un tiers de la dégradation des EME (figure 2).

Ces quelques résultats enregistrés dans le cadre de l'approche globale menée au CEA offrent des possibilités d'interactions fécondes avec les approches d'industriels en général plus étroitement ciblées en raison de leurs contraintes propres et de la poursuite d'objectifs à plus court terme.

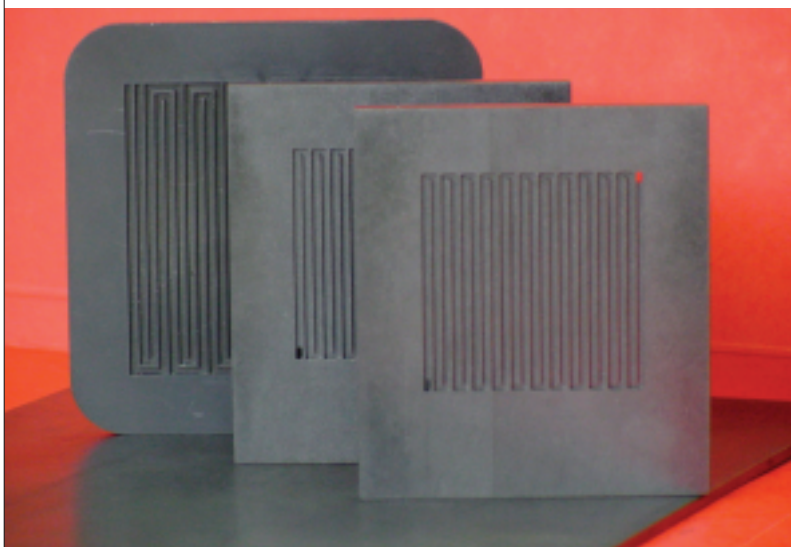
> **Jean Granier**

Direction de la recherche technologique  
CEA centre de Grenoble

## Les composites organiques moulés

La solution consiste à disperser dans une matrice **thermoplastique** ou **thermodurcissable** des charges conductrices, non corrodables, telles que des plaquettes de graphite, des fibres ou du noir de carbone. À des taux volumiques élevés, ces éléments conducteurs

Plaques bipolaires composites moulées.



CEA

d'électricité confèrent au **composite** des propriétés de **conductions électrique** et **thermique** se rapprochant de celles des plaques en graphite.

De plus, ces **formulations** de composites autorisent le moulage direct de plaques bipolaires avec leur système de canaux, voire avec les entrées et sorties de fluides. Le gain apporté par cette technologie est une réduction du prix de revient d'un facteur 10 à 100 par rapport à la voie des plaques à graphite usinées.

Bien que cette solution ait fait l'objet d'importants travaux de recherche et de développement de la part d'industriels et d'organismes de recherche<sup>(2)</sup>, les conditions de mise en œuvre des matériaux composites restent encore contraignantes du point de vue du temps de moulage, et donc coûteuses.

Le CEA (centre du Ripault) et Atofina (groupe Total) se sont associés afin de développer une composition microcomposite innovante, à base de polyfluorure de vinylidène (PVDF) et de plaquettes de graphite, optimisée en termes de propriétés physiques pour plaques bipolaires. L'originalité provient du mode de dispersion des particules de PVDF et de graphite, donnant lieu à une poudre à mouler, homogène et facilement transformable à chaud.

Une fois la poudre moulée par thermo-compression, les propriétés physiques des plaques composites obtenues sont très intéressantes : des conductivités électriques élevées, des conductivités thermiques très élevées et une très faible perméabilité à l'hélium (tableau).

| propriétés physiques   | valeurs  |
|--|--|
| conductivités électriques (S/cm)                                 | 250/350 dans le plan<br>30 à travers le matériau           |
| conductivités thermiques (W/m/K)                                 | 110 dans le plan<br>12 à travers le matériau               |
| perméabilité à l'hélium (m <sup>3</sup> ·m/m <sup>2</sup> /Pa/s) | 3,7·10 <sup>-17</sup> (mesure à 80 °C sous 2 bars absolus) |
| contrainte à la rupture en flexion (MPa)                         | 35   |

Tableau.

Caractéristiques principales des plaques composites obtenues après moulage par thermo-compression.

La géométrie et la structure particulières des particules de poudre de microcomposite facilitent la mise en forme du composite par **extrusion**, et ceci jusqu'à des taux en graphite supérieurs à 80 % volumique. Cette propriété laisse alors envisager une mise en œuvre par extrusion-compression. Cette technologie de moulage, associant une étape en continu, l'extrusion, suivie d'une brève phase de compression, se montre plus rapide et plus polyvalente que ses concurrentes. Elle doit permettre d'atteindre un coût de fabrication global des plaques de l'ordre de 20 à 30 €/kW, soit 0,01 €/cm<sup>2</sup> environ, tout en conservant des performances équivalentes aux matériaux élaborés par thermo-compression.

Ce concept de plaques bipolaires a fait l'objet de trois demandes de dépôt de brevet, dont un en copropriété CEA/Atofina<sup>(3)</sup>. Les travaux en cours visent à développer la technologie d'extrusion-compression,

(2) Parmi eux, SGL Carbon, Schunk, Morgan Fuel Cell, Du Pont de Nemours, Institut Fraunhofer, Institute of Gas Technology...

(3) Poudre microcomposite à base de plaquettes de graphite et d'un fluoropolymère et objets fabriqués avec cette poudre, copropriété CEA/Atofina, PCT/FR02/04569.



Machine d'extrusion-compression pour le moulage rapide de composites thermoplastiques.

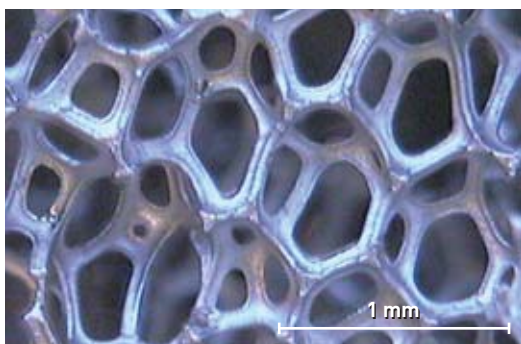
à diversifier les géométries et assemblages de plaques accessibles par moulage direct, et à intégrer les joints d'étanchéité ainsi que le refroidissement, afin de réaliser des éléments complets directement opérationnels.

> Jean-Félix Salas

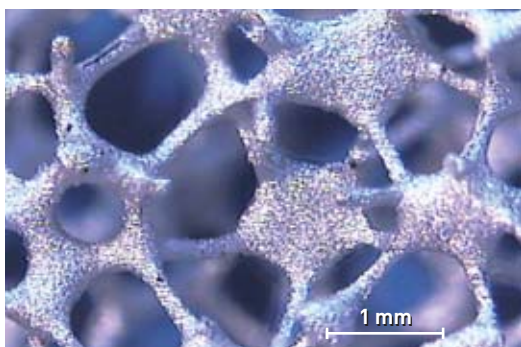
Direction des applications militaires  
CEA centre du Ripault

## Un concept prometteur : les poreux

La distribution des réactifs gazeux et l'évacuation de l'eau formée sont des éléments clés du fonctionnement des piles à combustible de type PEMFC. L'emploi de mousses métalliques à pores ouverts, en remplacement des classiques structures à canaux, constitue une alternative prometteuse. En effet, leur porosité élevée favorise l'accès des gaz aux **électrodes** (surface



CEA - (produit NITECH)



CEA - (produit FORVAIR)

Les mousses métalliques à porosité élevée constituent une alternative séduisante pour la distribution des réactifs gazeux et l'évacuation de l'eau produite dans les piles PEMFC. En haut, mousse de nickel et en bas, mousse d'acier inoxydable.

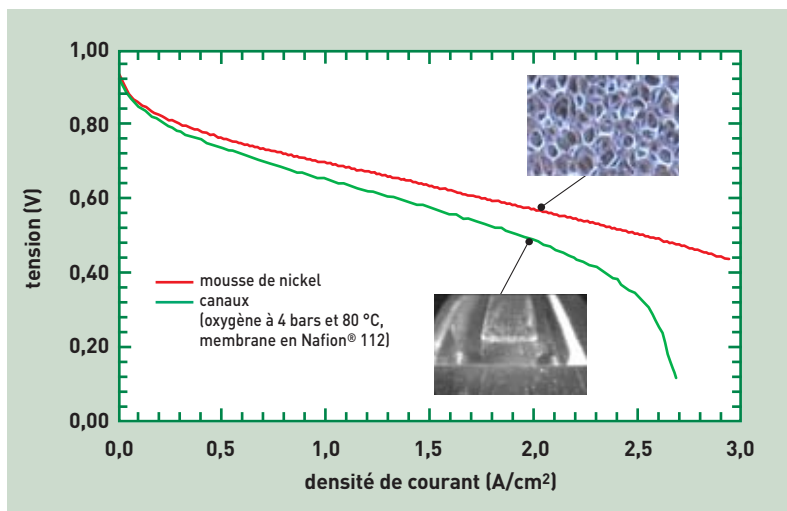


Figure 3. Performances d'une pile PEMFC fonctionnant avec différents types de distributeurs, représentées par la tension délivrée en fonction de la **densité de courant**. Les performances obtenues avec de la mousse de nickel sont meilleures.

accessible supérieure à 90 % au lieu de 60 à 70 % pour les canaux), autorisant *a priori* une utilisation optimale des surfaces **catalysées**. Pour la même raison, ces matériaux peuvent contribuer à l'allègement des assemblages. Leur emploi est également susceptible de faciliter l'intégration de certaines fonctions telles que le refroidissement.

Des tests exploratoires sur mono-cellules ont confirmé l'intérêt des mousses métalliques qui, dans des conditions similaires, ont permis d'atteindre pendant quelques dizaines d'heures de fonctionnement des performances supérieures à celles obtenues avec des distributeurs à canaux (figure 3). Ces premiers essais ont été réalisés avec des mousses de nickel épaisses de 2 mm et comportant des pores d'environ 500  $\mu\text{m}$ . Cependant, avec un tel matériau, une dégradation de la réponse électrique s'observe au cours du temps, avec même dans certains cas une accélération du phénomène lors des phases d'arrêt. Cette détérioration résulte de la corrosion de la matrice solide, pouvant notamment induire une pollution de la membrane **électrolyte** par des **ions** métalliques issus du poreux. Ainsi, la tenue en pile des mousses métalliques constitue le point critique de cette technologie. Le choix du matériau composant la mousse est primordial, mais il est souvent lié au procédé de fabrication (**électrolyse**, dépôt **PVD**, **CVD**...). Lorsque le corps employé est corrodable en milieu "pile à combustible", l'une des parades consiste à le recouvrir d'un revêtement, du chrome par exemple. Plusieurs revêtements ont été testés sur des mousses de nickel et ont fourni des résultats suffisamment encourageants pour envisager la réalisation d'un empiement d'étude de taille réaliste (3 cellules de 225 cm<sup>2</sup>). Néanmoins, l'identification des mécanismes de corrosion mis en jeu apparaît indispensable pour guider le choix de nouveaux matériaux, voire pour définir les protocoles d'arrêt des systèmes utilisant des poreux métalliques.

Parallèlement, afin d'établir des règles de dimensionnement des distributeurs (taille de pores, épaisseur, configuration des entrées et sorties des fluides), une étude des écoulements dans des milieux poreux de type mousse a été entreprise. Elle s'appuie sur des **modélisations**



Empilement CEPACPOR constitué de trois cellules de 225 cm<sup>2</sup> à distributeurs en mousses métalliques et équipé de mesures de densité de courant.

physique et numérique étayées par des essais sur maquettes hydrauliques. Les travaux ont permis de proposer un modèle applicable à ces milieux poreux dans le cas d'écoulements gazeux, la prise en compte des aspects **diphasiques** (eau-gaz) devant être abordée dans une étape ultérieure. En effet, comme dans les structures à canaux, la présence d'eau liquide produite par la pile est susceptible d'entraver l'accès des réactifs aux sites réactionnels. De plus, compte tenu des dimensions réduites, l'importance des phénomènes **capillaires** s'accroît dans les poreux, augmentant les risques de rétention d'eau. La distribution des réactifs par mousses métalliques reste une voie prometteuse, en particulier dans une optique d'accroissement des **densités de puissance**. Elle nécessite cependant une amélioration des connaissances dans les domaines de la corrosion et de l'hydraulique diphasique pour constituer une alternative viable à la distribution par canaux.

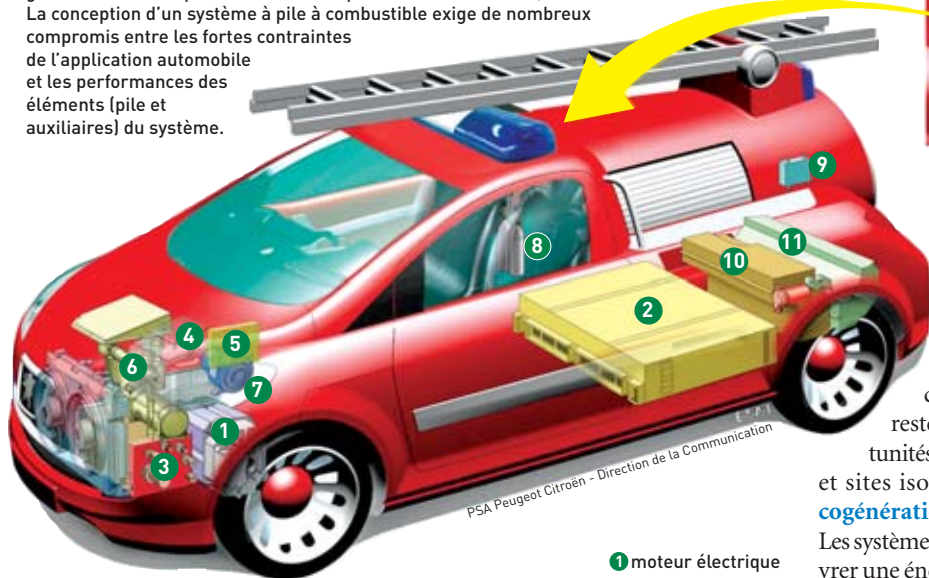
> **Roland Riva**

Direction de l'énergie nucléaire et **Jean-Philippe Poirot-Crouvezier**  
Direction de la recherche technologique  
CEA centre de Grenoble

## La conception de systèmes à pile à combustible : application à l'automobile

Outre les recherches et innovations technologiques portant sur l'amélioration des différents composants des piles à combustible de type PEMFC, des études sont menées sur l'optimisation de l'intégration de ces piles dans des systèmes globaux. La définition d'un système à pile à combustible est le résultat d'un jeu de compromis entre les contraintes de l'application visée, dont l'automobile est l'exemple type, et les performances des divers éléments du système.

Le démonstrateur H<sub>2</sub>O, véhicule électrique à batteries muni d'un générateur électrique constitué d'une pile à combustible de 5,5 kW. La conception d'un système à pile à combustible exige de nombreux compromis entre les fortes contraintes de l'application automobile et les performances des éléments (pile et auxiliaires) du système.



- 1 moteur électrique
- 2 batteries de traction 3 pile à combustible (source d'énergie complémentaire) 4 calculateur de commande du véhicule électrique 5 calculateur du générateur d'hydrogène
- 6 générateur d'hydrogène 7 pompe à air 8 bouteilles d'oxygène comprimé
- 9 calculateur de gestion de la sécurité 10 réservoir de carburant (borohydrure de sodium)
- 11 réservoir pour recyclage (borax) 12 prise de charge extérieure
- 13 connexions électriques pour auxiliaires 14 trappe de remplissage de carburant.

**A**u cours des dix dernières années, la pile à combustible de type PEMFC est sortie du laboratoire pour s'attaquer à différents secteurs de la génération d'énergie. Si l'application la plus en vue reste le véhicule pour particulier, les applications dites **stationnaires** ne sont pas en reste, car elles présentent de véritables opportunités de marchés (groupes électrogènes mobiles et sites isolés, groupes de secours, domotique et **cogénération**...).

Les systèmes à pile à combustible sont capables de délivrer une énergie électrique à partir d'un **combustible** hydrogéné, ceci avec des rejets gazeux et sonores non pénalisants pour l'environnement. Certaines performances demandées au système sont les mêmes que soit l'application visée : un **rendement** énergétique élevé (> 40 %), une durée de vie longue (> 5 000 heures pour l'automobile, voire 10 000 à 40 000 heures

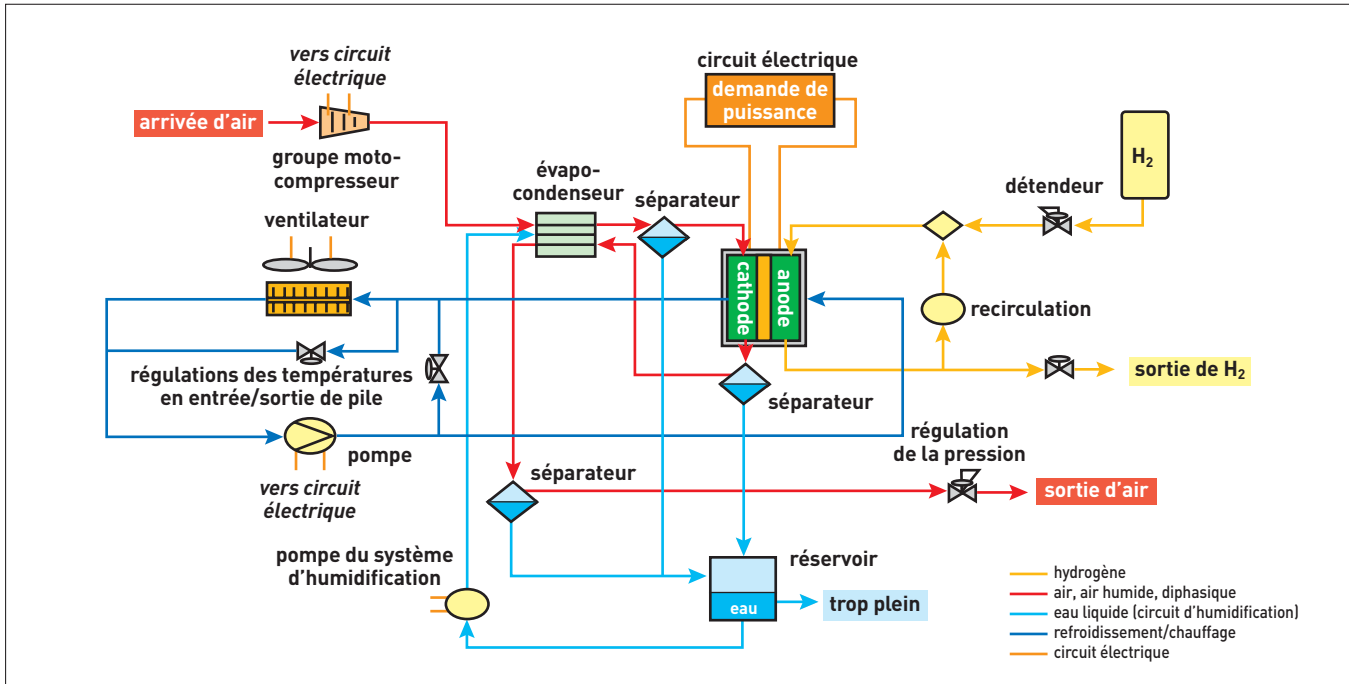


Figure 1. Schéma simplifié du groupe électrogène du véhicule Hydro-Gen.

pour le stationnaire), de faibles émissions de polluants et un coût d'investissement raisonnable. En revanche, les contraintes propres à chaque application conduisent de plus en plus à des conceptions différentes de systèmes, et même à des développements de composants élémentaires spécifiques : cœur de pile, plaque bipolaire, mais également compresseur et système d'humidification. La nature du combustible primaire ainsi que l'évacuation de la chaleur ou le conditionnement du signal électrique ont un impact décisif sur le système. L'objet de cet article est de donner un aperçu de la démarche de définition d'un système à pile à combustible PEMFC en l'illustrant sur l'application automobile.

### Les objectifs, les bases et les données préalables

L'application automobile est la plus concurrentielle et celle où les contraintes sont les plus fortes. En l'absence d'hybridation, les rendements visés pour le système sont de 50 % à puissance nominale (de 50 à 80 kW) et de 60 % au quart de cette puissance. La durée de vie cible est de 5 000 heures et 10 ans. Les contraintes liées plus spécifiquement à l'application concernent essentiellement la compacité du système (650 W/L et 650 W/kg), son coût (45 €/kW) et sa capacité à supporter des températures externes pouvant varier de -20 à +45 °C dans toutes les phases de fonctionnement, y compris le démarrage.

Les constructeurs s'accordent à dire aujourd'hui que le combustible embarqué le plus prometteur est l'hydrogène pur. Son stockage sous forme comprimée simplifie par ailleurs la conception du système. La figure 1 présente un schéma simplifié d'un groupe électrogène typique des années 1995-2000, le système du véhicule Hydro-Gen<sup>(1)</sup>. Celui-ci peut être décomposé en cinq

grandes parties : l'alimentation de la pile en hydrogène, l'alimentation de la pile en air, la pile elle-même, la gestion de l'énergie électrique et la gestion de l'humidification et de la chaleur. Le dimensionnement d'un tel système est l'objet de compromis entre les contraintes imposées par l'application (performances et fonctionnalités) et les liens fonctionnels entre les diverses parties.

La connaissance de quelques données préalables est indispensable au dimensionnement de la pile, élément central du système. Les données de base sont la puissance nominale du système et le rendement énergétique visé. Il est aussi nécessaire de fixer un rapport à la stœchiométrie pour l'hydrogène (rapport entre l'hydrogène introduit dans le système et l'hydrogène consommé) ; celui-ci est généralement proche de 1. Enfin, une estimation de la puissance parasite, consommée en particulier par le compresseur, est requise.

### Le dimensionnement de la pile

À partir de ces données, il est possible de calculer la puissance nominale et le rendement énergétique de la pile. Ce dernier est directement proportionnel à la tension de cellule qui constitue alors le point de départ du dimensionnement. La partie "gestion de l'énergie électrique" spécifie la gamme de tension à respecter pour la pile, ce qui impose le nombre de cellules et le courant à fournir. À partir de la valeur de courant, la surface de cellule peut être déterminée en fonction des performances du cœur de pile. Pour cela, il faut connaître la valeur de la densité de courant débitée par celui-ci au rendement visé. Cette valeur dépend des conditions opératoires : la pression, le taux d'humidité, le rapport à la stœchiométrie en entrée d'anode et de cathode et la température (figure 2). La surface des cellules et leur nombre sont la base du dimensionnement en masse, volume et coût de la pile. Le choix de la technologie de réalisation des composants, comme la plaque bipolaire, s'en déduit en fonction des contraintes de masse et

(1) Financé par la Communauté européenne, le programme Hydro-Gen (1996-2001) associait PSA, Air Liquide, Renault, Nuvera, Solvay et le CEA pour la réalisation d'un véhicule à pile à combustible.

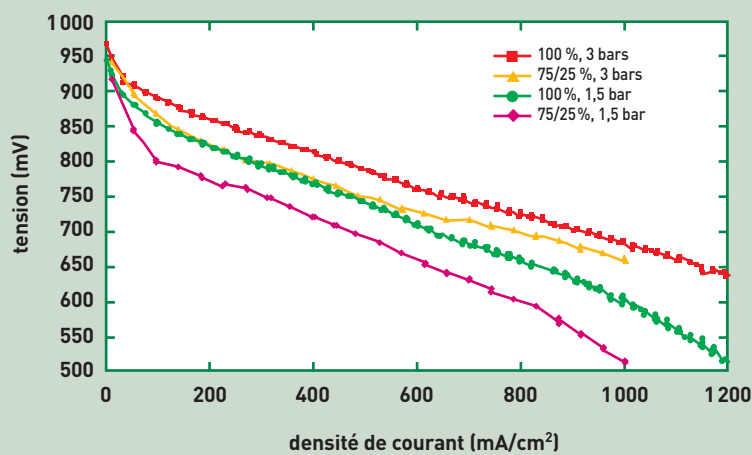


Figure 2. Performances de cœurs de pile actuels pour différentes valeurs de pression (en bar) et de taux d'humidité des gaz en entrée d'anode et de cathode (en %), représentées par la tension délivrée en fonction de la densité de courant.

de volume. L'obtention de performances telles que 1 kW/kg et 1 kW/L n'est pas compatible avec certaines technologies. Par exemple, avec les performances de cœurs de pile actuels, l'utilisation de **graphite** ou de **polymère** chargé permet d'envisager des performances voisines de 0,6 à 0,8 kW/kg et 1 kW/L, tandis que les technologies métalliques (tôle mince emboutie ou mousse) sont susceptibles de donner des piles de plus de 1 kW/kg et 1,5 à 2 kW/L. Chacune de ces technologies présente en outre des avantages et des inconvénients, ainsi que des degrés de développement divers (voir *Des concepts innovants pour les plaques bipolaires*, p. 76).

Il faut noter que ce dimensionnement est tributaire des conditions opératoires choisies, à savoir la pression, la température, les débits gazeux et le taux d'humidité des gaz en entrée. Ces choix déterminent la composition des différentes parties du système

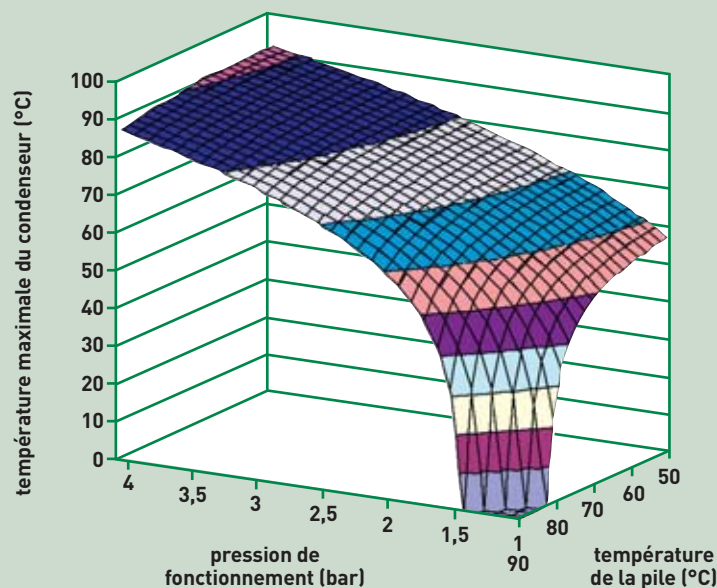


Figure 3. Température de condenseur, exprimée en fonction de la température de la pile et de la pression de fonctionnement, au-delà de laquelle le bilan d'eau est déficitaire.

qui sont elles-mêmes soumises aux contraintes du système. Ainsi pour l'application automobile, le choix de la température de cellule est tributaire des capacités d'évacuation de la chaleur par le radiateur du véhicule.

## Le dimensionnement du refroidissement

Comparé à un véhicule à moteur thermique, un véhicule à pile à combustible doit évacuer beaucoup plus de chaleur par son radiateur. En effet, l'évacuation de celle-ci par les gaz d'échappement et par rayonnement représente plus de la moitié de la chaleur produite pour le moteur thermique, alors qu'elle est négligeable dans le cas de la pile. En outre, le fluide caloporteur est à une température plus élevée pour le moteur thermique (120 °C), ce qui augmente l'efficacité du radiateur. Le dimensionnement du refroidissement est donc un point clé de la conception du système. Les paramètres agissant sur ce dernier sont la différence de température entre le caloporteur et l'air, la section de radiateur, la puissance du ventilateur, le débit de caloporteur et le rendement de la pile.

Le choix de la température de pile, directement liée à celle du caloporteur, détermine en grande partie le dimensionnement. Dans le cas de l'application automobile, la température de l'air extérieur peut être élevée, jusqu'à 40 voire 50 °C, ce qui implique des températures élevées du caloporteur et donc de la pile. La valeur de la température de pile est par ailleurs limitée à 80-90 °C pour diverses raisons, dont la tenue à long terme des cœurs de pile ou la difficulté à humidifier à pareille température. Il est de plus nécessaire d'augmenter la taille du radiateur (d'un facteur 1,3) et la puissance du ventilateur (d'un facteur 4).

Dans le cadre d'applications autres que le véhicule pour particulier, le choix d'une température de pile plus faible devient possible (typiquement 60 °C), au prix d'un surdimensionnement des organes de refroidissement. Ce type de fonctionnement est envisagé sur des systèmes stationnaires, pour lesquels le volume et la masse du système importent moins. L'avantage consiste alors en une simplification du système d'humidification.

Toutefois, dans tous les cas, il est possible de diminuer la quantité de chaleur à évacuer en augmentant le rendement de la pile par le biais de son surdimensionnement, procédé se faisant au détriment de la masse, du volume et du coût du système.

## Le dimensionnement de la gestion de l'eau

Pour garantir un état d'hydratation des membranes compatible avec une bonne **conductivité ionique**, il est indispensable d'humidifier les gaz en entrée de pile. Par défaut, il est possible de choisir de les saturer en eau, mais la quantité de chaleur nécessaire à l'évaporation peut devenir considérable à haute température et basse pression, dépassant même la quantité de chaleur produite par la pile. À cela s'ajoute le problème de la gestion de l'eau, qui consiste à récupérer en sortie de pile au moins autant d'eau qu'il en faut pour hydrater les gaz en tête. La quantité d'eau récupérée est fonction de la quantité d'eau produite et de la température minimale du condenseur. Un tel fonctionnement présente des limites à haute température et basse pression (figure 3). La tempé-

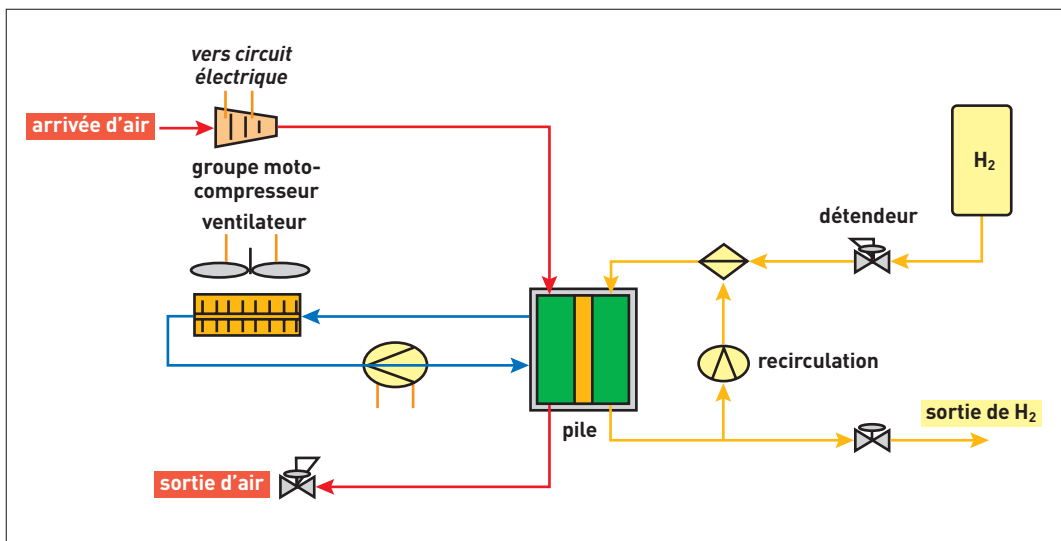


Figure 4. Schéma d'un système simplifié sans turbine de récupération.

rature de condenseur nécessaire à l'autonomie en eau du système devient donc inaccessible dans certaines conditions.

Toutefois, les cœurs de pile actuels permettent de s'éloigner de cette contrainte par une optimisation de leur structure autorisant un fonctionnement avec des gaz partiellement humidifiés. Néanmoins, le raisonnement précédent reste valable.

### Le dimensionnement de l'alimentation en air

La gestion de l'eau et la recherche d'un rendement élevé de la cellule poussent à travailler à haute pression. Le pendant d'un tel choix est l'augmentation de la perte énergétique dans la compression de l'air, qui est fonction de la pression de travail de la pile et du rapport à la stœchiométrie côté air. À titre d'exemple, elle représente plus de 10 % de la puissance brute de pile à 2 bars, ce qui limite, voire annihile, le gain obtenu sur la tension de cellule. Un moyen de réduire cette dépense parasite est la récupération d'une partie de l'énergie mécanique contenue dans le flux d'air sortant de la pile à l'aide d'une turbine. Cette option accroît la complexité du système et de sa gestion.

### Vers une simplification

L'évolution actuelle des différents composants d'un système tend à le simplifier fortement. L'amélioration des performances des cœurs de pile, en particulier à faible taux d'humidification, une conception de pile facilitant le fonctionnement à température élevée et basse pression et les progrès sur la compression de l'air sont les voies permettant cette simplification. Le système idéal pourrait être celui présenté sur la figure 4. Les systèmes pour les applications stationnaires sont soumis à des contraintes moindres, en particulier pour la compacité et l'évacuation de la chaleur. Le fonctionnement à basse température, autorisé par l'absence de contrainte de compacité, rend les problèmes de gestion de l'eau et donc le choix de la pression de fonctionnement moins difficiles. La pile mais aussi les autres composants du système peuvent alors

être différents de ceux de l'application véhicule, avec par exemple une possibilité de refroidir la pile avec de l'air et non plus avec un liquide. La démarche de définition globale reste cependant la même.

Dans tous les cas, le problème non pris en compte dans ce dimensionnement est la durée de vie, notamment celle des cœurs de pile. Il faut s'attendre à ce que cette contrainte entraîne des modifications de compromis.

> Pierre Baurens et  
Jean-Philippe Poirot-Crouvezier  
Direction de la recherche technologique  
CEA centre de Grenoble



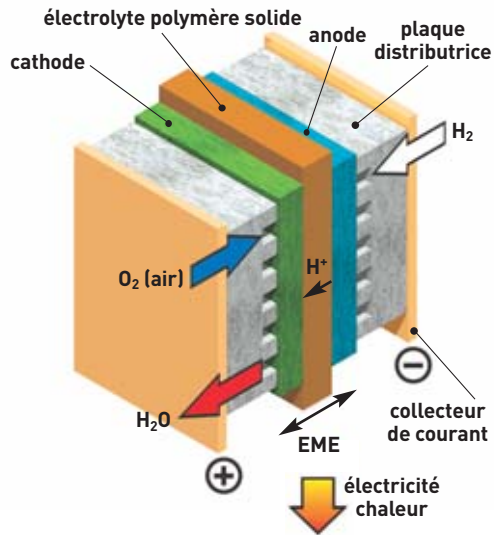
PSA Peugeot Citroën - Direction de la Communication

Le nouveau démonstrateur Quark, de Peugeot, véhicule à deux places dans lequel une pile à combustible vient compléter l'énergie électrique fournie par une batterie au nickel-métal hydrure. L'intégration de la pile à combustible a demandé de nombreuses études de simplification et de "compactage" du système.



C

# Comment fonctionne une pile à combustible ?



Principe de fonctionnement de la pile à combustible. Exemple de la pile à membrane échangeuse de protons. EME représente l'ensemble électrodes-membrane.

La pile à combustible repose sur un principe fort ancien, puisque c'est en 1839 que Sir William Grove construisit la première cellule électrochimique fonctionnant avec de l'**hydrogène** comme carburant, mettant ainsi en évidence la possibilité de produire du courant électrique par conversion directe de l'énergie chimique du **combustible**. La pile à combustible ayant la particularité d'utiliser deux gaz – l'hydrogène  $H_2$  et l'oxygène  $O_2$  – comme couple électrochimique, les réactions d'**oxydo-réduction** qui s'opèrent dans la pile sont donc particulièrement simples. La réaction se produit au sein d'une structure (la **cellule électrochimique élémentaire**) essentiellement composée de deux **électrodes** (l'**anode** et la **cathode**) séparées par un **électrolyte**, matériau permettant le passage des **ions**. Les électrodes mettent en jeu des **catalyseurs** pour activer d'un côté, la

réaction d'**oxydation** de l'hydrogène, et de l'autre côté, la réaction de **réduction** de l'oxygène.

Dans le cas d'une pile à électrolyte acide (ou pile à membrane échangeuse de **protons**), l'hydrogène de l'anode est dissocié en protons (ou ions hydrogène  $H^+$ ) et en **électrons**, suivant la réaction d'oxydation :  $H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$ . À la cathode, l'oxygène, les électrons et les protons se recombinent pour former de l'eau :  $2 H^+ + 1/2 O_2 + 2 e^- \rightarrow H_2O$ . Le principe de la pile à combustible est donc inverse à celui de l'**électrolyse** de l'eau. La tension thermodynamique d'une telle cellule électrochimique est de 1,23 volt (V). Toutefois, en pratique, la pile présente une différence de potentiel de l'ordre de 0,6 V pour des **densités de courant** de 0,6 à 0,8 A/cm<sup>2</sup>. Le rendement d'une telle cellule est donc d'environ 50%, l'énergie dissipée l'étant bien évidemment sous forme de chaleur.