

La pile à combustible PEMFC : une solution très crédible

Destinées prioritairement aux applications embarquées, notamment l'automobile, **les piles à combustible PEMFC doivent diminuer leur coût et leur encombrement tout en augmentant leur durabilité et leurs performances dans un contexte de forte concurrence internationale.**

Le défi vaut d'être relevé car, dans la conjoncture actuelle de diversification des sources d'énergies primaires propres, les piles à combustible PEMFC offrent une solution très crédible.



Pile à combustible Genepac (pour générateur électrique à pile à combustible) développée par le CEA, en partenariat avec Peugeot-PSA, pour une prochaine utilisation dans l'automobile.

Élaboré par Sir William Grove dès 1839, le principe de fonctionnement de la pile à combustible restera un dispositif de laboratoire jusque dans les années 1960. Sortie de l'oubli par le développement des programmes spatiaux qui l'utilisent comme générateur d'énergie électrique, elle s'inscrit aujourd'hui comme une solution efficace dans les politiques mises en œuvre pour la réduction des gaz à effet de serre et pour développer les énergies alternatives au pétrole, au gaz naturel et au charbon. Cinq principaux types de piles à combustible occupent actuellement le marché dont la PEMFC (pour *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*). Il s'agit d'une pile à membrane échangeuse de protons, plus particulièrement dédiée aux véhicules électriques et à l'électronique domestique.

Un système multiéchelle, multiphysique et multimatériaux

Dans son principe, la pile à combustible PEMFC se définit comme un dispositif électrochimique capable de convertir, en énergie électrique, l'énergie chimique contenue dans l'hydrogène et l'oxygène (figure 1). Outre cette fourniture d'électricité, ce type de pile offre comme second avantage de ne produire rien d'autre que de la chaleur et de l'eau.

Il s'agit donc d'un système de conversion non polluant, offrant une alternative sérieuse aux moteurs thermiques actuels.

Dans sa configuration, la pile à combustible PEMFC se présente comme un empilement de cellules élémentaires (figure 2), constituées elles-mêmes d'un électrolyte et de deux électrodes : une anode et une cathode alimentées en gaz réactifs par des distributeurs, soit poreux (mousses), soit à canaux (plaques métalliques embouties ou composite graphite/polymère).

- L'électrolyte se compose d'une membrane polymère dont le rôle est double : d'une part, assurer le transport des protons entre l'anode et la cathode dans lesquelles se situent respectivement les réactions d'oxydation de l'hydrogène et de réduction de l'oxygène ; d'autre part, éviter les transferts électriques et gazeux entre l'anode et la cathode. À l'heure actuelle, les matériaux les plus performants sont des polymères qui nécessitent néanmoins d'être suffisamment hydratés pour jouer leur rôle de conducteurs protoniques ; de plus, ils ne peuvent fonctionner au-delà de 100 °C.

- Les électrodes, quant à elles, utilisent deux composants. D'abord, une couche active dans laquelle se produisent les réactions électrochimiques, constituée de grains de carbone (pour assurer le transfert

des électrons) sur la surface desquels est déposé le catalyseur sous forme de particules de platine (indispensable pour assurer les réactions électrochimiques) enrobées par de l'électrolyte (généralement identique à celui de la membrane et assurant le transport des protons). Après séchage, cette couche devient poreuse, permettant ainsi le transport des gaz. Une seconde couche à base de fibres de carbone, dite couche de diffusion, crée un milieu poreux à base de fibres de carbone et opère plusieurs missions : l'alimentation homogène en gaz de la couche active, l'évacuation de l'eau et de la chaleur, la collecte des électrons (figures 1 et 2).

Du fait de la multiplicité de ses constituants, la cellule élémentaire de la pile PEMFC se caractérise par une grande variété d'échelles géométriques : quelques centaines de cm^2 pour la surface des composants, 5 à 200 μm pour leur épaisseur, 10 nm à 1 μm pour les pores des couches de diffusion et des couches actives, 30 à 50 nm pour les grains de carbone et 2 à 5 nm pour les grains du catalyseur (figure 3). Ce dernier entre, pour une grande part,

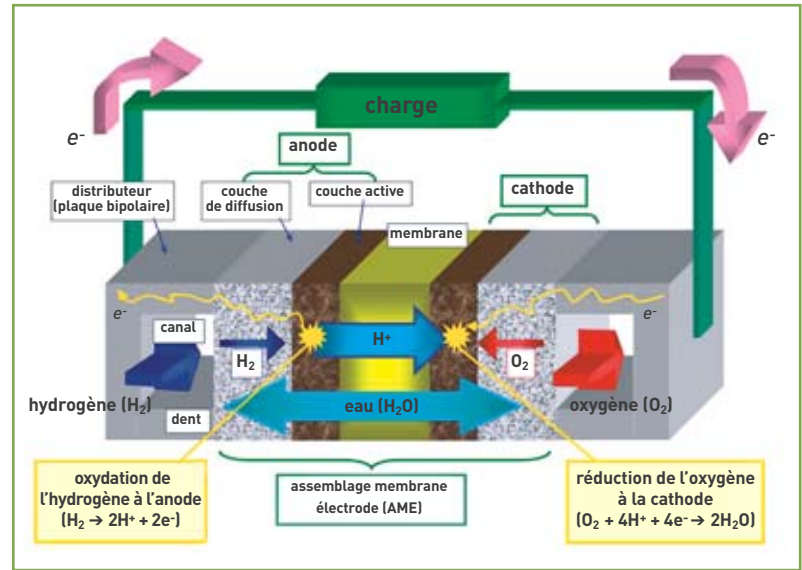


Figure 1. Principe d'une cellule élémentaire de pile à combustible de type PEMFC.

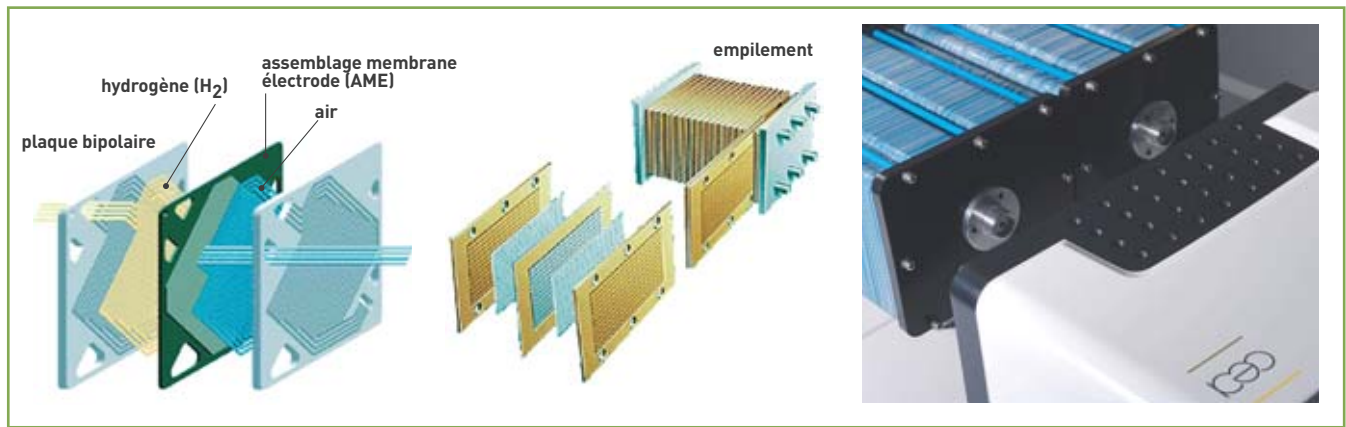


Figure 2. Une pile à combustible de type PEMFC se réalise par l'empilement de cellules élémentaires (à gauche). Chaque cellule est constituée d'une plaque bipolaire (pour la distribution des gaz par des canaux et pour la collecte du courant électrique) et d'un élément nommé AME (pour « Assemblage membrane électrode » correspondant, ici, à l'empilement anode/membrane/cathode). Le CEA, associé à PSA Peugeot-Citroën, dans le cadre du projet Genepac (pour Générateur électrique à pile à combustible) a développé une pile de 80 kW pour l'application automobile (à droite).

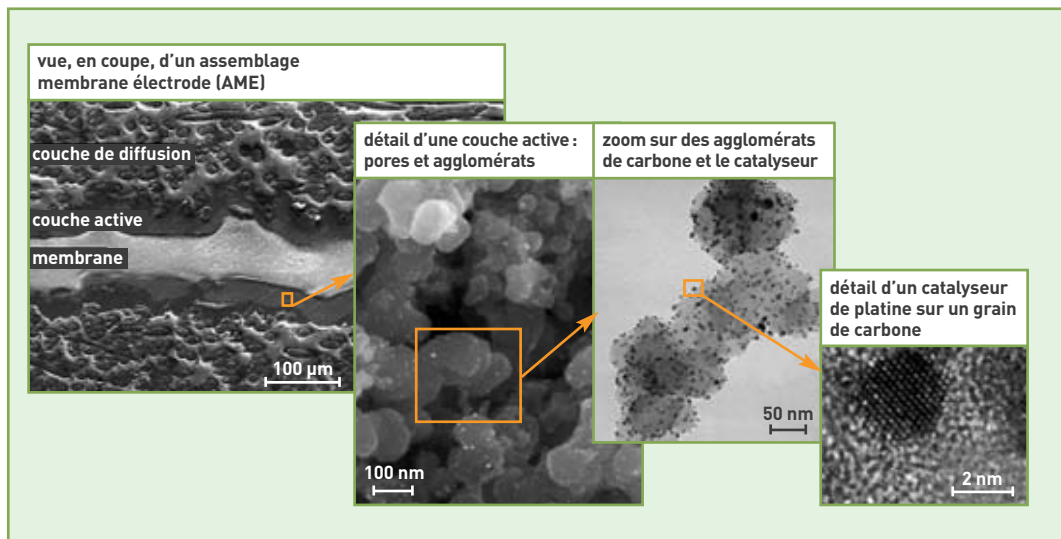
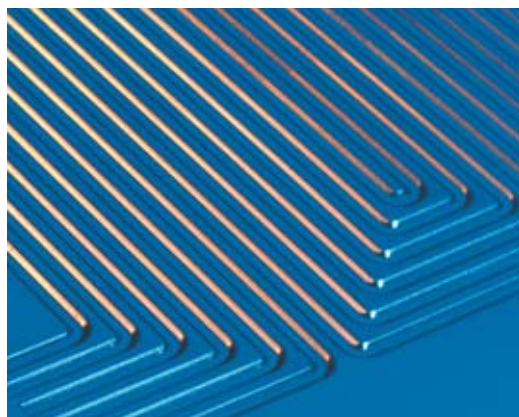


Figure 3. Microscopie électronique d'un AME (pour « Assemblage membrane électrode ») et détail d'une couche active montrant les différentes échelles physiques en jeu.



D. Michon/Artechnique/CEA

Plaque bipolaire métallique emboutie. Les cannelures de surface (ou canaux) 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. Comparées aux traditionnelles plaques usinées en graphite, les plaques bipolaires métalliques embouties entraînent un gain de masse et de volume considérable, une meilleure homogénéité en température et un coût réduit d'un facteur 100 qui permettent d'envisager leur utilisation dans l'automobile.

dans le coût global d'une pile à combustible PEMFC, son utilisation doit donc être optimisée.

En vue de leur développement, les piles de type PEMFC doivent préalablement résoudre une série de contraintes. En effet, il faut savoir que les différents matériaux utilisés pour réaliser les composants de cette pile à combustible assurent plusieurs couplages multiéchelle et multiphysique : par exemple, des transferts d'espèces gazeuses (**convection** et **diffusion**) en mono et/ou en **diphasique** (effets de la capillarité), des transferts de chaleur (diffusion, évaporation/**condensation**), des transferts de charge (électrique et protonique, électrochimique...). Il faut donc que les différents matériaux utilisés pour les composants de la pile à combustible puissent assumer ces divers transferts. Le bon fonctionnement des piles

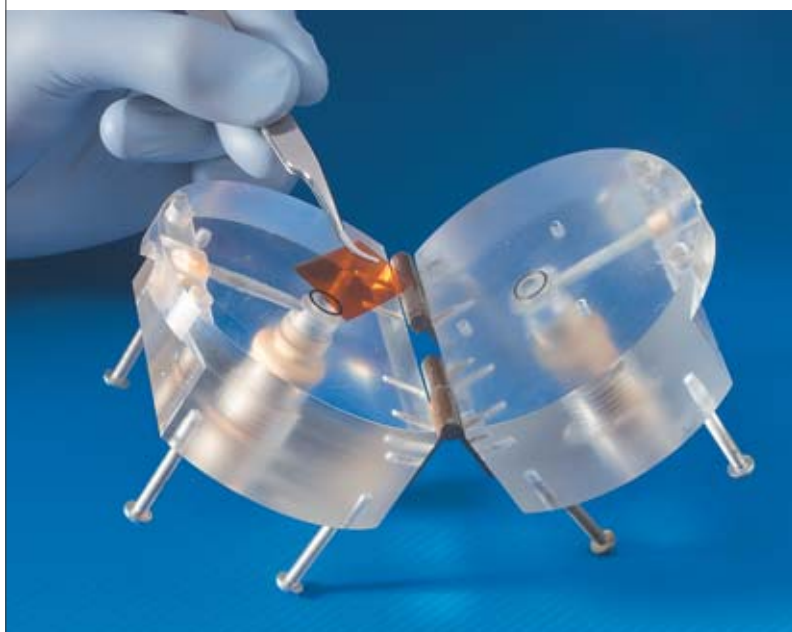
dépend donc des propriétés et de la stabilité dans le temps des différents composants ainsi que de leurs méthodes d'assemblage (répartition des constituants, résistances de contact aux diverses interfaces). Le CEA, en partenariat avec **PSA Peugeot Citroën**, dans le cadre des projets Genepac (pour Générateur électrique à pile à combustible) et Fisypac (pour Fiabilisation système pile à combustible) a réalisé une pile qui se situe, à ce jour, au meilleur niveau mondial pour le critère de masse (kW/kg) et d'encombrement (kW/litre), critère clé pour l'application automobile (figure 2). Les prochains défis lancés aux chercheurs et ingénieurs consistent, maintenant, à diminuer le coût et à augmenter la durée de vie des PEMFC, sachant que le cahier des charges de cette application automobile demeure un des plus contraignants (nombreux transitoires, cyclages, marche/arrêt, pollution...).

La membrane d'électrolyte : un composant difficile à stabiliser chimiquement et mécaniquement

Dans une pile à combustible PEMFC, la membrane de l'électrolyte a pour double mission d'opérer le transport des protons de l'anode à la cathode, tout en assurant la séparation des électrons et des gaz entre les compartiments anodique et cathodique.

Actuellement, les membranes employées, dans la quasi-totalité de ce type de pile, proviennent de polymères ayant une structure chimique similaire : un squelette polymère **perfluoré** (de type **Teflon**®), **hydrophobe**, sur lequel se répartissent, de façon statistique, des chaînes pendantes terminées par un groupe acide sulfonique (SO_3H) très **hydrophile** permettant d'assurer la conductivité protonique. Le **Nafion**®, qui appartient à cette famille de polymères, a déjà permis d'élaborer un premier type d'électrolyte solide, souple, relativement performant et stable (figure 4). Développé, au début des années 1960 par la société **Dupont de Nemours**, ce matériau fut à l'origine d'une avancée significative de la technologie des PEMFC, notamment par l'amélioration de leurs performances due à une augmentation de la conductivité protonique, mais également à une meilleure stabilité chimique assurant une durée de vie accrue. Sa composition chimique conduit à une structure physique singulière, caractérisée par une séparation de phase à l'échelle nanométrique entre les domaines hydrophobes constitués des chaînes polymères et les domaines hydrophiles contenant les groupes donneurs de protons et l'eau absorbée (figure 4). Bien que développé il y a déjà 50 ans, le Nafion® n'en demeure pas moins une référence obligée en dépit des nombreuses recherches menées, ces deux dernières décennies, pour lui trouver une alternative capable de palier ses inconvénients.

Aujourd'hui, le développement des membranes suppose que soit préalablement levée une série d'obstacles. D'abord, leur coût de production élevé compte tenu de la chimie du **fluor** (**corrosion** et **sécurité**). Ensuite, parce que les membranes doivent être humidifiées, par l'intermédiaire des gaz, pour offrir une **conductivité** protonique satisfaisante. Mais un problème se présente lorsque la température excède 80 °C, autrement dit la gamme de températures requise pour l'utilisation de la pile



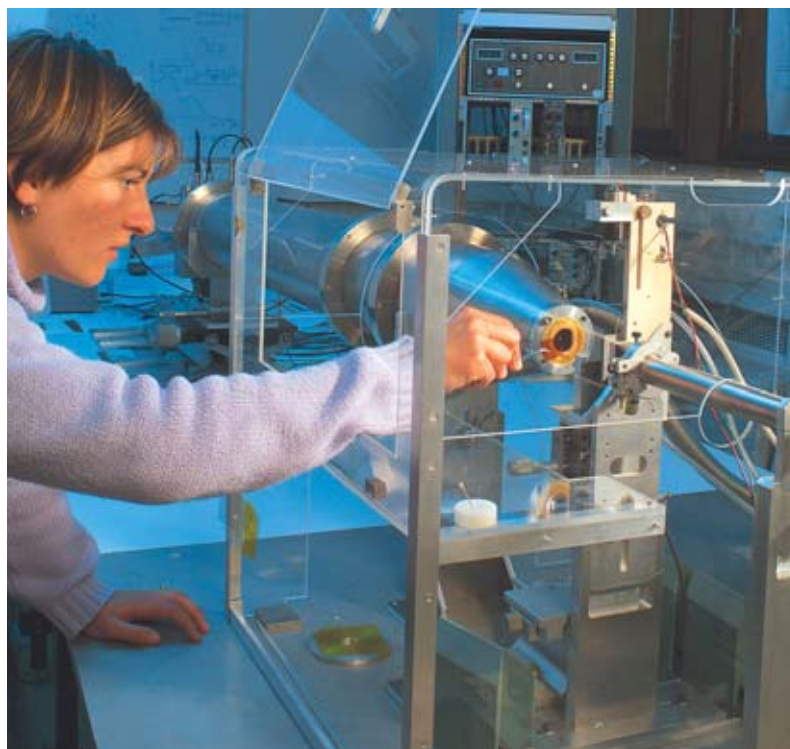
D. Michon/Artechnique/CEA

Membrane de pile à combustible. Cellule à électrode de mercure utilisée pour déterminer la conductivité ionique des membranes polymères par spectrométrie d'impédance.

dans les transports : à ce niveau, toutes les propriétés mécaniques de la membrane s'effondrent du fait de la diminution des interactions entre les chaînes polymères. L'autre difficulté à résoudre découle des conditions de fonctionnement de la pile, à la fois très oxydantes à la cathode et très réductrices à l'anode, ce qui altère leur composition chimique. De plus, du fait de son hydrophilie, la membrane peut absorber jusqu'à 40 % de son volume en eau : en conséquence, comme phases asséchantes et hydratantes alternent pendant le fonctionnement de la pile, la membrane subit des variations dimensionnelles cycliques sources de rupture. Reste enfin à souligner que si la dégradation des performances découle parfois de l'altération de l'ensemble des composants, l'arrêt de la pile provient toujours d'un percement de la membrane, ce qui provoque le mélange des réactifs avec les risques associés (échauffements, explosion notamment). La dégradation de la membrane demeure donc un point critique dans le fonctionnement d'une pile à combustible PEMFC.

De nombreux progrès restent donc à réaliser pour améliorer les performances des membranes ainsi que leur stabilité chimique et mécanique en vue d'une application dans les transports. Les nouvelles voies de recherche s'orientent vers un meilleur contrôle de la structure de ces membranes, lequel passe par la séparation de ses propriétés mécaniques et de transport. Ce processus fonctionne déjà pour les composites organiques/inorganiques développés par la Direction des applications militaires (DAM) ou dans les Réseaux interpénétrés de polymères (Rip) au Liten. Il consiste à réduire le gonflement de la membrane tout en assurant une bonne rétention d'eau à haute température, ce qui permet d'améliorer la conductivité protonique. Les nouvelles membranes composites ainsi obtenues se différencient par leur composition : des particules inorganiques fonctionnalisées, dispersées dans une matrice polymère neutre, plus répandue, moins chère et plus facile à mettre en œuvre. Leur avantage réside dans leur faible coût de fabrication. Reste néanmoins une difficulté à résoudre, celle du contrôle de la **dispersion** des charges au sein de la matrice organique avec laquelle les charges sont peu en interaction, l'objectif étant d'assurer leur **percolation**, tout en évitant leur **élution** en présence d'eau.

L'autre voie de développement porte sur les membranes Rip dont le principe consiste à associer deux réseaux de polymères enchevêtrés mais indé-



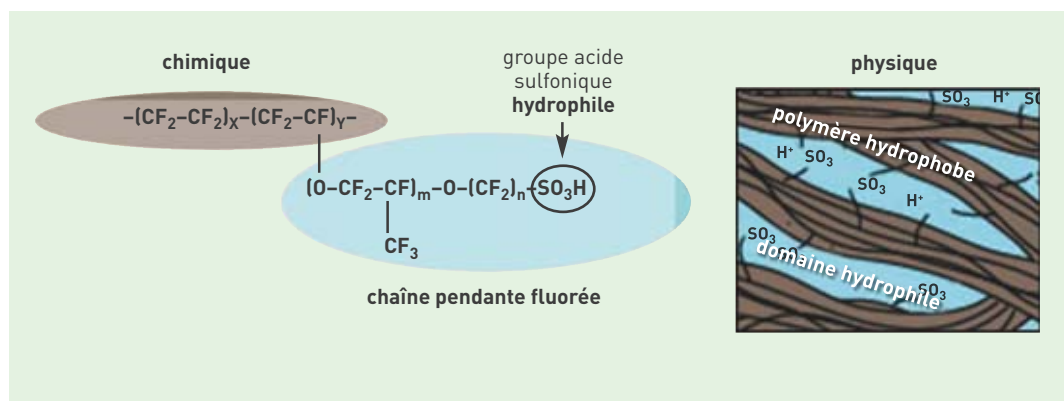
D.Michon/Artechnique/CEA

Caméra de diffusion de rayons X aux petits angles pour l'étude de la structure des membranes de piles à combustible à l'échelle nanométrique.

pendants l'un de l'autre. Le premier étant fluoré, confère à la membrane sa stabilité chimique et mécanique alors que le second favorise la conduction protonique. L'interpénétration des deux réseaux assure une excellente stabilité mécanique et chimique car, même dans l'hypothèse d'une dégradation éventuelle du polymère conducteur protonique, celle-ci ne provoque pas de rupture dans la membrane. La difficulté de conception de ces membranes réside à la fois dans la synthèse des **monomères** et dans le contrôle des paramètres de polymérisation afin d'obtenir une séparation de phase à l'échelle nanométrique.

Comment structurer les couches actives et les catalyseurs ?

Dans le cœur des piles, une autre zone stratégique se situe au niveau des couches actives, lieu des réactions électrochimiques indispensables à l'obtention de la puissance demandée par le système. Ces couches actives se composent de matériaux catalytiques, placés



CEA

Figure 4. Structure physique et chimique du Nafion®.

de part et d'autre de la membrane échangeuse de protons. Or, la proximité immédiate de la membrane impose des conditions de fonctionnement extrêmes en terme d'acidité, conduisant à une **corrosion** rapide des matériaux. Ces électrodes doivent donc se composer de matériaux stables en milieu acide. Cet impératif exclut les métaux de transition (**Fe, Co, Ni, Cr**) comme catalyseurs des réactions électrochimiques. En pratique, seul le platine possède un pouvoir catalytique suffisant pour atteindre des performances intéressantes, mais il s'agit d'un élément cher parce que rare. Les piles à combustible actuelles contiennent, généralement, près d'un gramme de platine par kW d'énergie électrique produite. À lui seul, le platine compte aujourd'hui pour la moitié du prix de la pile. Il s'avère donc primordial d'en réduire les quantités nécessaires tout en optimisant ses performances. Pour atteindre le seuil de rentabilité économique des piles à combustible, l'objectif actuel du CEA vise à réduire la quantité de platine à 0,1 g_{Pt}/kW. La solution passe par une structuration de la couche active et/ou par structuration des matériaux qui la composent. Vu que les réactions électrochimiques se produisent à la surface des matériaux catalyseurs, la première opération consiste à réduire la taille des particules de platine pour augmenter le rapport surface/volume et pour limiter la quantité de platine inutilisée au cœur de ces particules : le diamètre optimal des **nanoparticules** sphériques pour la réduction de l'oxygène se situe entre 3 et 5 nm. Ensuite, aux particules de platine situées à la surface des grains de carbone pour assurer le transfert électronique, s'ajoutera un **ionomère** conducteur protonique. Son rôle ? Assurer la continuité de la conduction des protons entre les deux électrodes. D'autres études menées au Liten cherchent à stimuler tous les transports d'espèces vers et depuis les sites actifs. Pour ce type de matériaux catalytiques, la mise en œuvre des constituants en carbones platinés et de l'ionomère électrolyte s'effectue par une technique d'impression : un mélange de poudres est mis en suspension dans un liquide qui s'apparente à une encre. Les dernières avancées en la matière, et leur potentiel d'optimisation, portent essentiellement sur



Banc d'enduction des couches actives des piles PEMFC. Membrane en cours de recouvrement par une encre constituée de carbone platiné et d'électrolyte.

D. Michon / Artechnique / CEA

l'amélioration des procédés de dépôt de ces encres. Une fabrication à grande échelle impose de maîtriser les techniques d'impression telles que le jet d'encre, la micro-pulvérisation ou la sérigraphie... Il s'agit d'améliorer la répartition relative des matériaux, voire d'établir des gradients contrôlés dans le volume pour une **fonctionnalisation** de la couche à diverses échelles.

En parallèle à leurs travaux sur la structuration de la couche active, les chercheurs du CEA étudient également la structuration du catalyseur lui-même – notamment la modification de la forme des particules situées à la surface des grains de carbone, ou encore l'exploration de nouveaux concepts de structure intégrant toutes les fonctions requises (figure 5).

Dans l'avenir, des matériaux multimétalliques faisant intervenir des métaux de transition pourraient se substituer partiellement au platine. Ainsi, les performances électrocatalytiques de nanoparticules de catalyseurs bimétalliques, alliant le platine à d'autres métaux moins chers tels le cobalt, le nickel ou le **palladium**, permettent de réduire sensiblement la quantité de platine nécessaire, tout en conférant une stabilité et des performances accrues. L'autre voie d'exploration très prometteuse consiste à utiliser des catalyseurs analogues à ceux agissant dans certains organismes vivants – par exemple, des catalyseurs à base de fer pour la réduction de l'oxygène et de nickel pour l'oxydation de l'hydrogène. Des résultats très prometteurs ont été récemment obtenus par des équipes du CEA appartenant à l'Institut rayonnement matière de Saclay (Iramis), à l'Institut de recherche et technologies et sciences pour le vivant (iRTVS), au Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (Liten) et au **Collège de France**.

Plusieurs voies s'entrecroisent donc pour tenter de diminuer le chargement des électrodes de piles à combustible de type PEMFC en métaux nobles : entre autres, une meilleure répartition des particules métalliques dans la couche active, une nano-organisation et une nano-architecture des électrodes, la substitution des métaux nobles par des **métaux de transition** et enfin le développement de catalyseurs inspirés de processus biologiques. Chacune de ces voies conduit à de meilleures performances et leur développement conjoint permet d'envisager des avancées significatives dans la réduction des coûts des piles à combustible.



Banc de sérigraphie avec application d'une encre céramique.

F. Rhoades / CEA

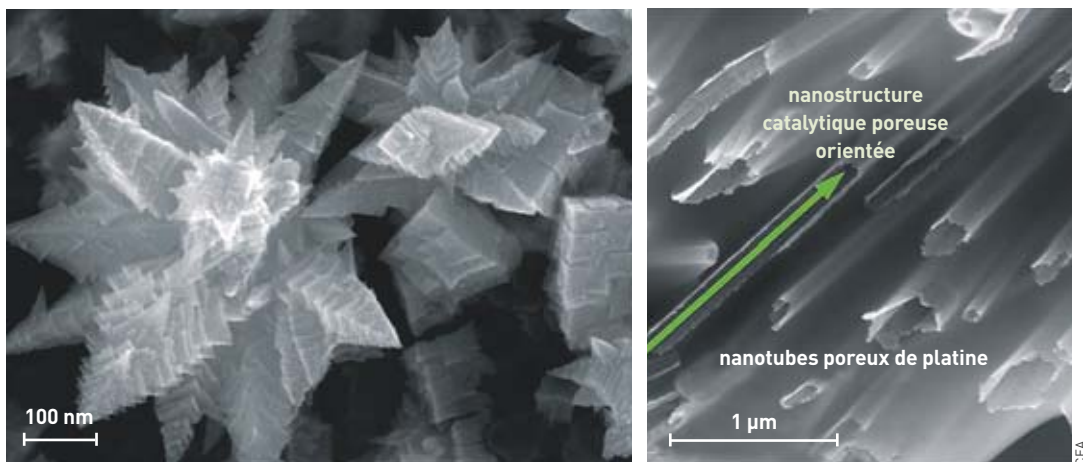


Figure 5. Nanostructuration du platine sous forme de nanoparticules (à gauche) et (à droite) de nanotubes poreux (réalisé dans le cadre d'une recherche financée par le projet *Challenge Innovation*, destiné à faire émerger des projets ambitieux et de les faire démarrer : collaboration Liten/Inac).

Réaliser des couches de diffusion à propriétés contrôlées

La couche de diffusion a pour mission d'assurer le transfert des gaz réactifs des canaux vers la couche active (figure 1). Elle assure trois fonctions : évacuer la chaleur et l'eau produite à la cathode, transférer les électrons entre les couches actives et les dents des distributeurs, et enfin répartir les contraintes mécaniques d'assemblage sur la membrane et les couches actives.

Matériau poreux, la couche de diffusion se compose d'un support en fibres de carbone auquel s'ajoute un liant, sous la forme de tissus (feutres ou papiers) avec des porosités de l'ordre de 0,7 à 0,8 et des tailles de pores de l'ordre de 1 à 10 µm. S'y ajoute souvent un dépôt microporeux. Celui-ci se compose de grains de carbone ainsi que d'un liant et présente des porosités de l'ordre de 0,4 à 0,5 et des tailles de pores de l'ordre de 10 nm à 1 µm.

Cette couche de diffusion, dont le support s'avère fortement **anisotrope** (figure 6), a pour mission d'homogénéiser le fonctionnement de la couche active en créant un gradient de tailles de pores entre, d'une part, l'alimentation en gaz ponctuelle centimétrique à l'entrée de la cellule et, d'autre part, un catalyseur nanodispersé. Elle contribue à résoudre un double compromis. D'une part posséder une porosité suffisamment élevée pour faciliter l'accès des gaz, mais pas trop, pour ne pas pénaliser les conductivités électroniques (ce qui augmenterait les pertes **ohmiques**, en particulier dans le plan pour le transport des électrons vers les dents) et thermiques (ce qui augmenterait les écarts de température et ainsi limiterait les risques de condensation et donc de noyage des composants).

D'autre part, la couche de diffusion va jouer un rôle majeur dans la gestion de l'eau présente dans le cœur de la pile (AME) sous forme de vapeur et/ou de liquide selon les conditions de fonctionnement et les propriétés des composants (condensation possible car la couche active est à température plus élevée). Et comme l'électrolyte doit demeurer suffisamment hydraté pour assumer son rôle de conducteur protonique, cela suppose que l'eau soit maintenue en quantité suffisante au niveau de la membrane et de la couche active, mais pas en trop grande quantité, pour

ne pas gêner le transfert des gaz par la présence d'eau liquide. Cette eau liquide devra donc être évacuée vers les distributeurs de gaz pour ne pas obstruer les pores. Ce compromis, couramment appelé « gestion de l'eau », consiste à maintenir un niveau d'hydratation « suffisamment élevé mais pas trop ». Il s'obtient grâce aux propriétés de transfert diffusif ainsi qu'à la capillarité du support fibreux et du dépôt microporeux. Le contrôle de ces propriétés s'effectue grâce à la structure poreuse des couches, notamment par la distribution de la taille des pores et leur tortuosité, mais aussi par la mouillabilité de cette structure. Afin de mieux évacuer l'eau liquide, les couches subissent un traitement hydrophobe classiquement réalisé par **enduction** ou imprégnation d'un polymère hydrophobe. Ce traitement doit être le plus homogène possible sur toute la surface des fibres et ne pas obstruer les pores. Enfin, comme pour les autres composants, certains mécanismes de dégradation des couches de diffusion (corrosion du carbone, perte d'hydrophobie...) sont fortement suspectés de réduire la durée de vie de la pile. Ces effets s'exacerbent en présence d'eau liquide, avec les contraintes mécaniques générées par l'assemblage (serrage) et le fonctionnement de la pile (gonflement/dégonflement de l'électrolyte). Les nombreux travaux en cours au CEA, notamment au Liten, montrent le rôle essentiel de la couche de diffusion sur l'ensemble des points clés pour le développement industriel des PEMFC : performance, durée de vie et réduction des coûts.

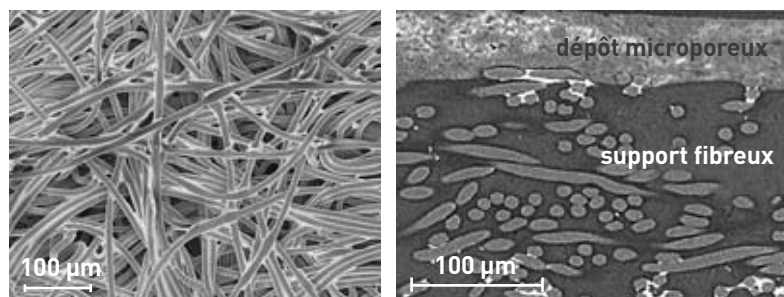


Figure 6. Vue par **microscopie électronique à balayage** (MEB) d'une couche de diffusion avec les fibres de carbone et les agents hydrophobes autour des fibres (en blanc). Vue de dessus (à gauche) et en coupe (à droite).

À l'heure actuelle, les couches de diffusion commerciale se déclinent, la plupart du temps, à partir de composants développés pour d'autres applications industrielles. Elles ne sont donc pas optimisées spécifiquement pour les piles à combustible de type PEMFC. Des études récentes, réalisées au Liten, montrent que des améliorations restent possibles en modifiant la structure et la fonctionnalisation des couches. Pour les chercheurs, il s'agit de relever plusieurs défis. D'abord, parvenir à réaliser des structures poreuses (porosité, mouillabilité...) multicouches et multizones, adaptables aux hétérogénéités inhérentes à la présence des dents et des canaux (figure 1). Ensuite, pouvoir tenir compte des variations de fonctionnement entre l'entrée et la sortie de la cellule. Comme les procédés traditionnels ne le permettent pas, des procédés alternatifs sont en cours d'étude au Liten, notamment pour les dépôts microporeux. En ce qui concerne les supports de diffusion fibreux, ils visent à organiser la distribution spatiale des fibres de carbone ou à créer une structure conductrice contrôlée.

Enfin, il convient de souligner le rôle essentiel de la couche de diffusion sur la répartition des contraintes dans la pile. Ses effets jouent, à la fois, sur les performances (résistances de contact, décohésions aux interfaces) et sur la durée de vie (contraintes différentielles sur les autres composants) – d'où la nécessaire prise en compte des propriétés mécaniques de la couche de diffusion.

Lutter contre la corrosion des plaques bipolaires

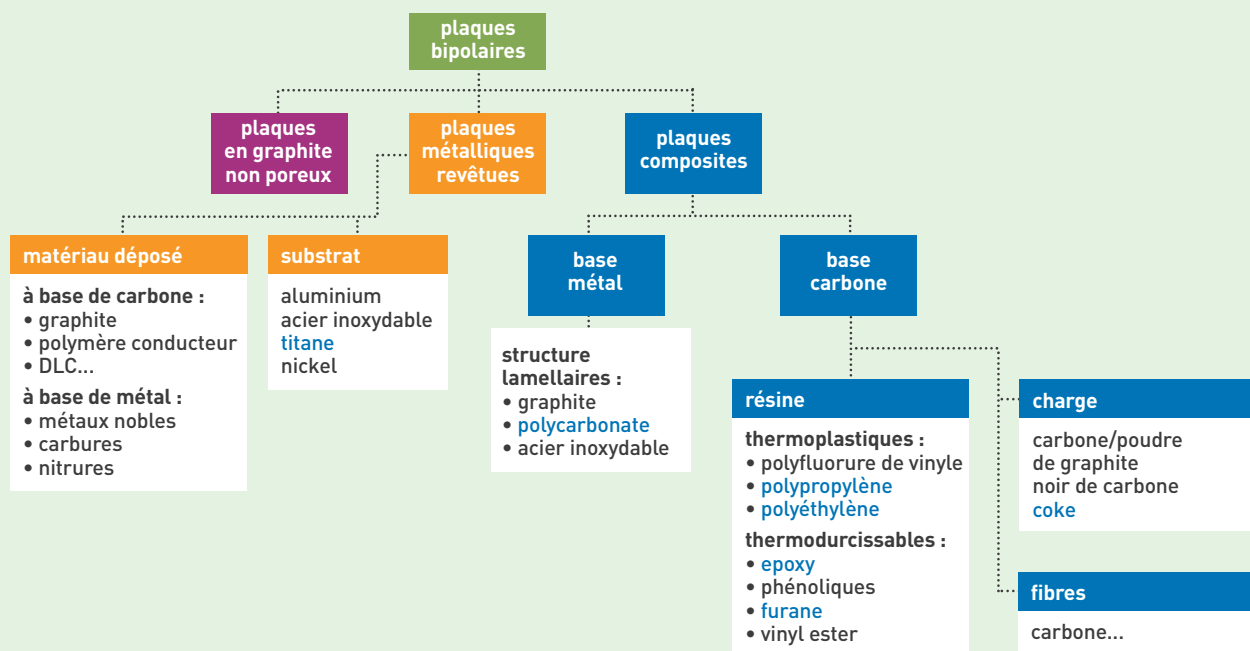
Le développement et la commercialisation des piles PEMFC passe par le remplacement du graphite des plaques bipolaires (figure 2) par des métaux, des alliages métalliques ou des matériaux composites. En effet, malgré les faibles températures de fonctionnement, le milieu liquide et acide de la cellule s'avère corrosif pour les plaques bipolaires traditionnelles. Diverses solutions sont donc à

l'étude pour remédier à cet inconvénient (figure 7). Comme les matériaux graphite composites (figure 8) demeurent très chargés en graphite et nécessitent des conditions de mise en œuvre contraignantes⁽¹⁾ et peu économiques, la technique la plus souvent utilisée reste la **thermocpression**. Pour aller vers la fabrication en grande série de plaques bipolaires, le moule initial comporte les empreintes des canaux sur ses faces inférieure et supérieure : cela permet de minimiser, voire même de supprimer, une reprise en usinage ultérieure. Mais la reproduction de canaux, selon un *design* optimisé pour favoriser l'écoulement des fluides, pose des problèmes de conception et de transformation. Une voie alternative consiste à utiliser des plaques bipolaires métalliques. Malheureusement, l'utilisation de métal pose d'autres problèmes, au premier rang desquels figure le risque de corrosion. En effet, si la tenue à la corrosion s'avère insuffisante, il y a risque d'empoisonnement des autres composants de la pile à combustible par les cations métalliques issus de la plaque. *A contrario*, dans le cas où la couche d'oxyde protectrice se formant devient trop épaisse, elle provoque une augmentation des résistances de contact. Dans les deux cas évoqués, cela entraîne une perte des performances, incompatible avec les caractéristiques requises pour une pile à combustible de type PEMFC.

Le bon compromis entre la tenue à la corrosion et la conduction électrique reste donc à trouver. Les matériaux **passivables** non revêtus, comme les **aciers inoxydables**, pourraient apparaître comme une solution possible, mais ils présentent des résultats souvent contradictoires en termes de performance et de dura-

(1) En effet, il faut préparer le matériau de base fait d'un mélange de graphite et de polymère ; maîtriser ce mélange, respecter les étapes de chauffage de ce matériau afin qu'il soit suffisamment visqueux pour pouvoir être formé, ne pas baver et être réticulé lors de la compression et du recuit qui s'ensuit.

Figure 7. Classification des matériaux des plaques bipolaires.



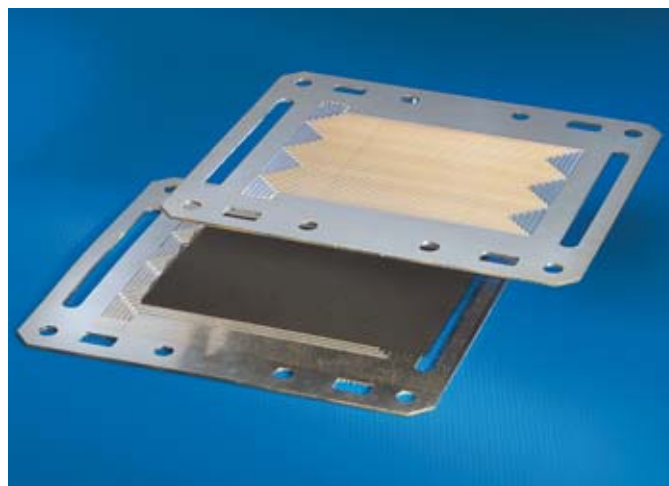


Figure 8. Plaques bipolaires en composite (à gauche) et en acier inoxydable (à droite).

bilité, empêchant toute conclusion définitive. Aussi, pour limiter ces effets liés à la corrosion des alliages métalliques, préfère-t-on ajouter des dépôts dont les propriétés physicochimiques garantissent à la fois :

- une conductivité électrique satisfaisante et stable dans le milieu considéré ;
- une stabilité chimique convenable (résistance à la corrosion) ;
- une compatibilité avec le substrat (coefficients de dilatation thermique et potentiels électrochimiques respectifs) et avec les autres matériaux de la pile (inertie chimique).

Aujourd'hui, trois types de dépôts priment : les métaux précieux, les nitrures ainsi que les polymères conducteurs et les dépôts carbonés. L'enjeu actuel réside dans la découverte du ou des dépôts capables d'assurer ces propriétés physicochimiques à un moindre coût pour un traitement industriel, et le plus en amont possible dans le procédé de fabrication des plaques bipolaires. Ainsi, limite-t-on le nombre d'étapes de fabrication et donc le coût des plaques. De plus, en cas de défauts dans le revêtement, le coût du rebut d'une tôle sera toujours plus bas que celui d'une plaque bipolaire.

Structurer et fonctionnaliser les composants pour innover

Les cellules de PEMFC ne fonctionnent pas de manière homogène, notamment entre l'entrée et la sortie de la cellule ou le long des canaux de distribution de gaz. Les gaz réactifs étant consommés par la réaction, leur

concentration devient plus faible à la sortie de la cellule qu'à son entrée. À l'inverse, la production d'eau par la réaction induit une quantité d'eau (liquide ou vapeur) plus élevée à la sortie qu'à l'entrée de la cellule. Mais comme les matériaux et les composants actuellement utilisés, eux, sont homogènes dans leur plan, ils ne peuvent donc pas gérer ces disparités. L'optimisation des composants des piles à combustible de type PEMFC procède donc de multiples compromis entre les nombreux mécanismes physiques en jeu aux différentes échelles de la cellule. L'amélioration des performances, l'augmentation de la durabilité de ces piles et la diminution de leur coût passent forcément par une meilleure maîtrise des propriétés des composants et des matériaux à différentes échelles (nano et micro), que ce soit pour leur structuration ou pour leur fonctionnalisation.

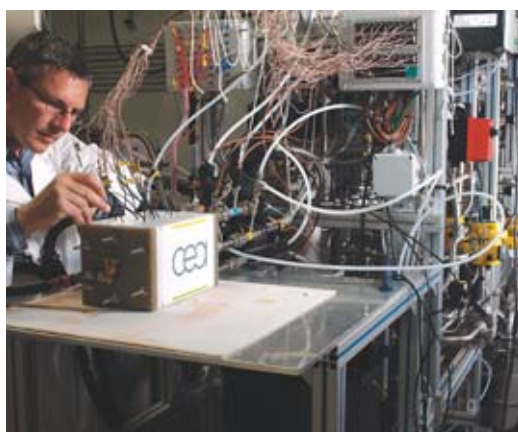
Le défi scientifique et technique s'avère donc important mais certaines études sur les matériaux et les procédés d'élaboration des composants sont en cours dans cet objectif au sein de diverses équipes du CEA. Il s'agit notamment du développement de catalyseurs bimétalliques pour la réduction de la quantité de platine ou la tolérance à certains polluants de l'air, de la structuration des couches actives et des couches de diffusion pour placer la juste quantité de matériaux à l'endroit nécessaire pour augmenter les performances, de la réduction des besoins en matériaux (notamment en platine), des dépôts opérés sur les plaques bipolaires pour en limiter la corrosion... L'ensemble des travaux se concentre sur les points clés actuels pour le développement industriel des PEMFC, à savoir l'augmentation des performances et de la durée de vie, et la réduction des coûts.

> **Joël Pauchet, Arnaud Morin, Sylvie Escribano, Nicolas Guillet et Laurent Antoni**

Institut Liten (Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux)
Direction de la recherche technologique
CEA Centre de Grenoble

> **Gérard Gebel**

Institut nanosciences et cryogénie (Inac)
Direction des sciences de la matière
CEA Centre de Grenoble



Banc test pour pile à combustible PEMFC.