

d'autres types de piles. Les piles à combustible à carbonate fondu et à oxyde solide fonctionnent toutes les deux à plus de 650 °C : comme son nom l'indique, l'électrolyte de la pile à carbonate fondu est un sel liquide, et les piles à oxyde solide nécessitent des températures élevées pour le reformage interne et l'ionisation de l'hydrogène sans catalyseurs onéreux. En outre, l'électrolyte ne conduit qu'à partir de 800 °C. La chaleur nécessaire est produite à partir de l'énergie rejetée par la pile, sans nuire au rendement électrique. Comme pour les piles à acide phosphorique, on récupère une partie de la chaleur dissipée pour la production d'eau chaude et le chauffage des pièces d'habitation (voir la figure 2).

La centrale de deux mégawatts que nous avons déjà évoquée était constituée de piles à carbonate fondu. Des piles de moindre puissance sont actuellement en cours de mise au point. Une quarantaine d'entreprises dans le monde s'intéressent aux piles à oxyde solide.

## Un sérieux outsider

Malgré leurs adaptations récentes, les piles à combustible à acide phosphorique, à carbonate fondu et à oxyde solide sont toutefois des techniques mises au point à l'époque où l'on pensait construire des centrales de forte puissance. Les piles à membrane échangeuse de protons, en revanche, sont apparues en même temps que l'idée de petites centrales de production électrique. Elles semblent prometteuses, car les coûts de production de leurs électrolytes ont fortement baissé et l'on a mis au point des catalyseurs qui résistent mieux au blocage par le monoxyde de carbone produit lors du reformage.

L'électrolyte d'une pile à membrane échangeuse de protons est une mince membrane semi-perméable, qui ne laisse passer que les ions chargés positivement, tels les ions hydrogène (ou protons), mais pas les électrons (la membrane contient des groupements chargés négativement). Il y a quelques années, des ingénieurs ont découvert que le Gore-Tex®, un matériau utilisé pour la fabrication de vêtements étanches à l'eau et au froid, peut renforcer la membrane, améliorant ainsi ses caractéristiques de fonctionnement :



**3. UNE PILE À COMBUSTIBLE à membrane échangeuse de protons, de la taille d'un réfrigérateur, installée près du garage, alimente une maison en électricité. Elle fournit sept kilowatts, assez pour couvrir la plupart des besoins de la maison, sauf aux heures de pointe.**

elle peut être plus mince et plus résistante mécaniquement.

Aujourd'hui, 85 sociétés dans le monde mettent au point des piles à membrane échangeuse de protons d'une puissance de quelques kilowatts à quelques centaines de kilowatts. Ainsi, la Société *Ballard Generation Systems*, en collaboration avec la Société *Alstom*, prévoit de commercialiser, à partir de 2001, une pile à membrane échangeuse de protons qui produira jusqu'à 250 kilowatts. La Société *Plug Power* fait fonctionner une pile à membrane échangeuse de protons de sept kilowatts dans une maison occupée toute la semaine par deux de ses ingénieurs. La Société *H Power Corporation* vend de petites unités de 35 à 500 watts : elle propose leur utilisation dans des systèmes de secours, de télécommunications et de transports (pour l'alimentation de panneaux mobiles de signalisation, par exemple).

Les piles à combustible alcalines sont utilisées depuis longtemps dans des environnements spéciaux, telle la navette spatiale (où les astronautes utilisent l'eau produite par la réaction). Leurs rendements sont élevés, mais d'autres problèmes les ont écartées des applications domestiques. Néanmoins, quelques sociétés essaient de produire des piles alcalines à un prix compétitif par rapport à d'autres piles à combustible, sinon à d'autres filières de production d'électricité.



Courtesy of Plug Power

À quelles conditions les piles à combustible entreraient-elles vraiment sur le marché de la production d'énergie? Des subventions gouvernementales resteront nécessaires pendant encore quelques années, et ces dispositifs resteront cantonnés à quelques niches de marché, dont le nombre et la taille augmenteront petit à petit. À plus long terme, la lutte contre le réchauffement du climat planétaire, dû notamment aux émissions de dioxyde de carbone, pourrait imposer la généralisation des piles à combustible. Nous entrerions alors dans une économie de l'hydrogène, plus propre que celle des combustibles fossiles.

Alan LLOYD dirige le Bureau de la qualité de l'air de l'État de Californie.

Karl KORDESCH et Gunter SIMADER, *Fuel Cells and Their Applications*, VCH Publishers, 1996.

R.H. WILLIAMS, *Fuel Decarbonization for Fuel Cell Applications and Sequestration of the Separated Carbon Dioxide*, Princeton University Center for Energy and Environmental Studies, janvier 1996.

E.A. PARSON et D.W. KEITH, *Fossil Fuels without Carbon Dioxide Emissions*, in *Science*, vol. 282, pp. 1053-1054, 6 novembre 1998.

*Fuel Cells : A Handbook*, quatrième édition, US Department of Energy, 1998.

# Des piles à combustible pour les portables

**CHRISTOPHER DYER**

*Des piles à combustible miniatures pourraient remplacer les accumulateurs électriques dans les téléphones cellulaires, dans les ordinateurs portables ou dans les caméscopes.*

Les appareils électroniques portables sont de plus en plus petits et perfectionnés, mais leurs performances restent limitées par leur alimentation électrique, assurée aujourd'hui exclusivement par des accumulateurs. Lourds et coûteux, ceux-ci ont une capacité limitée : il faut alors les recharger (ce qui immobilise l'appareil pendant plusieurs heures) et, parfois, les changer (que faire alors des systèmes usagés?).

Pourrait-on remplacer les accumulateurs par des piles à combustible? Elles fonctionnent sur le même principe : la transformation silencieuse et non polluante d'énergie chimique en électricité. Leur recharge est toutefois beaucoup plus rapide : il suffit de les réapprovisionner en combustible. En outre, elles tirent leur énergie de l'oxydation de l'hydrogène en eau, réaction plus puissante que celles qui se produisent dans les accumulateurs. Une pile à combustible alimentée par du méthanol fournirait de l'électricité sept fois plus longtemps qu'un accumulateur au lithium de même volume, pour un coût et un poids moindres.

Tandis que les piles à combustible peinent à concurrencer le moteur à combustion interne pour la traction automobile ou la production d'électricité domestique, la concurrence avec les accumulateurs est plus ouverte pour la fourniture des faibles puissances nécessaires aux appareils portables. Plusieurs piles à combustible miniatures ont été fabriquées récemment. Elles laissent espérer des performances bien meilleures que les

accumulateurs actuels : une centaine d'heures d'autonomie pour un ordinateur portable, ou plusieurs mois d'autonomie en veille pour un téléphone cellulaire. Cette miniaturisation est un compromis délicat entre la puissance fournie, la taille, la maniabilité et le coût.

## De vieux concurrents

Quels sont les avantages des piles à combustible sur les accumulateurs électriques? Ces deux systèmes reposent sur le même principe, la transformation en électricité de l'énergie chimique contenue dans des réactifs (voir la figure de la page 36). Les réactions électrochimiques ont des rendements très élevés ; elles sont silencieuses et simples, et elles produisent peu de chaleur et de polluants.

À masse égale, une pile à combustible, avec son réservoir de carburant, contient toutefois beaucoup plus d'énergie qu'un accumulateur. L'énergie des piles à combustible vient en effet de l'oxydation de l'hydrogène en eau et, à masse identique, l'hydrogène liquide contient 200 fois plus d'énergie qu'un accumulateur au lithium. La puissance délivrée par une pile à combustible, ou par un accumulateur, dépend de la tension électrique entre les deux électrodes, qui dépend elle-même de l'énergie libérée par la réaction électrochimique. La tension délivrée par un accumulateur au lithium d'ordinateur portable ne dépasse pas trois à quatre volts. Une pile à combustible portable fournit à peine plus de un volt, mais

elle est beaucoup plus légère et moins encombrante : elle contient plus d'énergie dans le même volume. Bien entendu, l'hydrogène liquide, qui bout à  $-250^{\circ}\text{C}$ , est inutilisable dans un appareil grand public, mais des molécules contenant de l'hydrogène ont aussi une grande densité énergétique : en théorie, un litre de méthanol fournirait une énergie de 5 000 wattheures, soit dix fois plus qu'un accumulateur au lithium de même volume (l'accumulateur au lithium est pourtant celui qui a la plus grande densité d'énergie) ; l'autonomie d'un ordinateur portable serait ainsi portée à plus d'une semaine.

En outre, dans une pile à combustible, on n'a besoin de stocker que le combustible : l'oxygène est disponible dans l'air ambiant. Dans les accumulateurs électriques, au contraire, les réactifs sont les électrodes elles-mêmes (par exemple, l'oxyhydroxide de nickel et le cadmium dans un accumulateur au nickel-cadmium), ce qui en augmente le coût, la taille et le poids.

De surcroît, une pile à combustible se recharge plus facilement qu'un accumulateur : il suffit de la réapprovisionner en combustible pour qu'elle continue de fonctionner, comme un moteur à essence. Les accumulateurs, au contraire, doivent rester branchés longtemps sur le réseau électrique pour retrouver leur pleine charge.

Malgré ces avantages, le coût élevé des piles à combustible les a longtemps réservées à des usages spécifiques, telle l'alimentation électrique des véhicules spatiaux habités. La

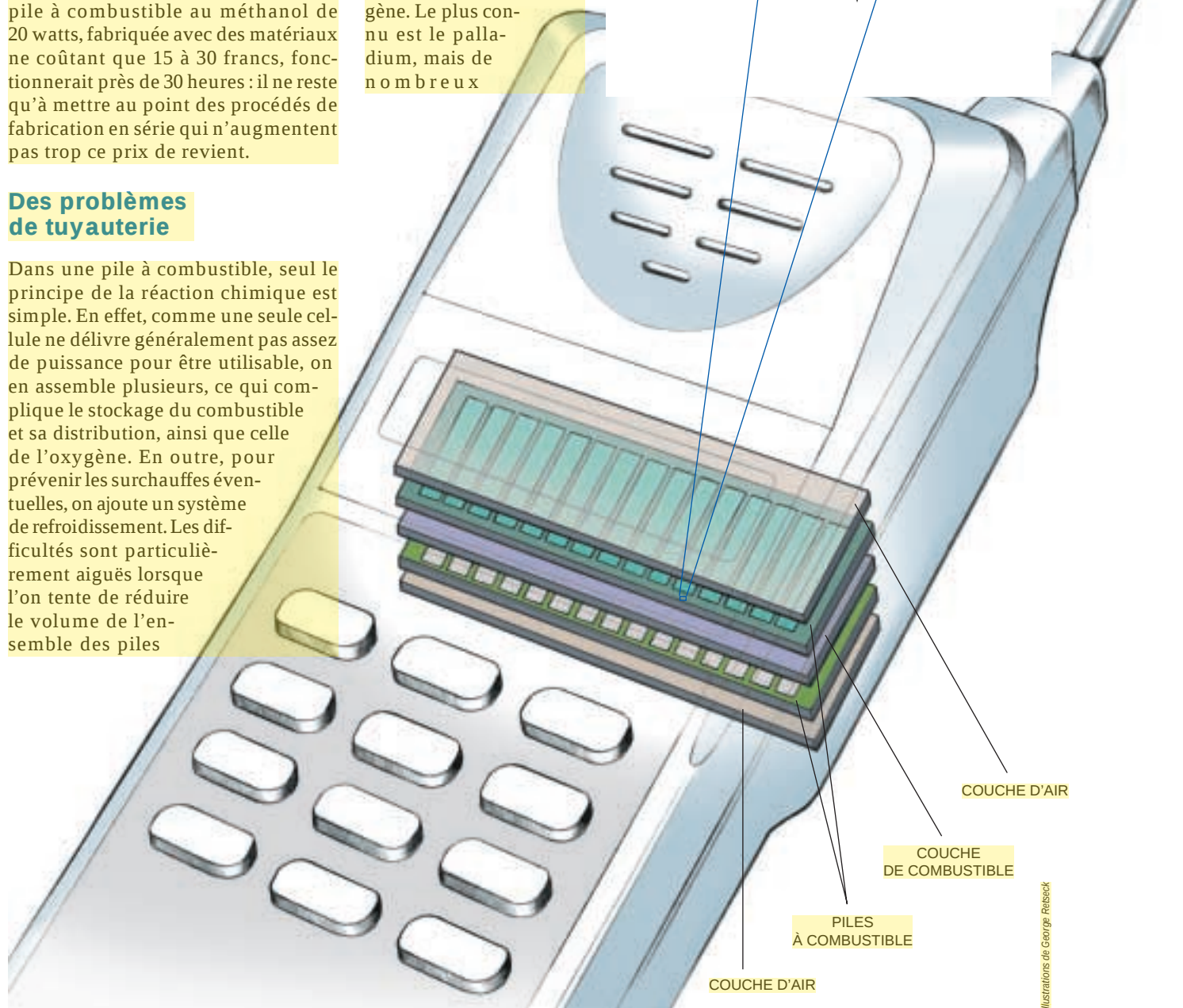
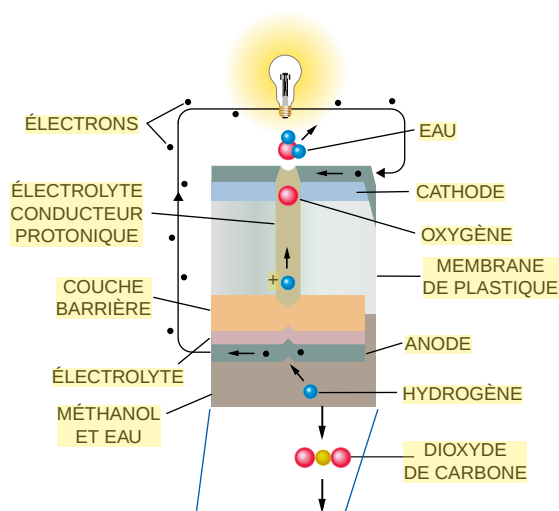
situation change aujourd'hui : le prix de revient des piles à combustible devrait baisser, notamment grâce à la diminution de la quantité de platine nécessaire pour les catalyseurs ; dans le même temps, le coût des accumulateurs à forte densité d'énergie a augmenté, car on les fabrique avec des matériaux plus coûteux. Ainsi, un accumulateur au nickel-cadmium de 20 watts, d'une masse de 0,5 kilogramme, se décharge en une heure et coûte environ 130 francs. Un accumulateur semblable au lithium fournit la même puissance pendant environ trois heures, pour le quadruple du prix. En revanche, une pile à combustible au méthanol de 20 watts, fabriquée avec des matériaux ne coûtant que 15 à 30 francs, fonctionnerait près de 30 heures : il ne reste qu'à mettre au point des procédés de fabrication en série qui n'augmentent pas trop ce prix de revient.

## Des problèmes de tuyauterie

Dans une pile à combustible, seul le principe de la réaction chimique est simple. En effet, comme une seule cellule ne délivre généralement pas assez de puissance pour être utilisable, on en assemble plusieurs, ce qui complique le stockage du combustible et sa distribution, ainsi que celle de l'oxygène. En outre, pour prévenir les surchauffes éventuelles, on ajoute un système de refroidissement. Les difficultés sont particulièrement aiguës lorsque l'on tente de réduire le volume de l'ensemble des piles

pour le faire tenir dans un caméscope ou dans un téléphone portable : aujourd'hui, l'ensemble des sous-systèmes est toujours plus encombrant et plus lourd que la pile elle-même.

La miniaturisation détermine aussi le choix du combustible : nous avons vu qu'on ne peut pas transporter de l'hydrogène liquide ou gazeux dans un téléphone portable. En revanche, divers métaux absorbent l'hydrogène. Le plus connu est le palladium, mais de nombreux



**1. LES PILES À COMBUSTIBLE MINIATURES** pour les téléphones cellulaires occuperont le même volume que les accumulateurs actuels (à droite). La source d'énergie compacte contiendra une rangée de

cellules montées sur deux plaques minces. Chaque pile sera formée de plusieurs couches (en haut, à droite) fabriquées avec les techniques de l'industrie électronique.

Illustrations de George Rebeck

alliages bon marché, tels ceux de lanthane et de nickel, ou de fer et de titane, sont aussi utilisables : l'hydrogène est rapidement extractible à la température et à la pression ambiantes, et l'on n'a pas besoin de sous-systèmes complémentaires. Les hydrures métalliques sont aussi facilement rechargeables en hydrogène : 30 minutes suffisent à 0° C. Des électrolyseurs d'eau domestiques pourraient, dans le futur, produire l'hydrogène nécessaire à cette recharge.

D'autres hydrures, tels ceux contenant du lithium, de l'aluminium, du sodium ou du bore, sont aussi une source pratique d'hydrogène. Plus légers que les précédents, ils sont toutefois coûteux, non rechargeables et laissent un résidu corrosif. Les hydrures organiques liquides, tels la décaline et le méthylcyclohexane, sont beaucoup moins coûteux, mais l'extraction de l'hydrogène à partir de ces composés nécessite de les chauffer à plus de 200 °C en présence d'un catalyseur.

Le méthanol est aussi une bonne source d'hydrogène pour les petites piles à combustible. Cet alcool, riche en énergie, est peu coûteux (on peut le produire à partir du gaz naturel par fermentation de matières végétales à un prix équivalant à celui de l'essence) et facile à manipuler : un téléphone cellulaire pourrait fonctionner avec des ampoules de méthanol vendues dans les grandes surfaces.

Toutefois, l'extraction d'hydrogène du méthanol par une réaction chimique nommée reformage produit aussi du dioxyde de carbone et du monoxyde de carbone. Ce dernier, bien que produit en petites quantités, doit être éliminé : il se fixe sur le platine et bloque son action catalytique. Ainsi, bien que de petits reformeurs réalisant l'extraction et la purification de l'hydrogène aient été récemment mis au point, le reformage du méthanol accroît la complexité et le coût de la pile à combustible.

L'oxydation directe du méthanol sans reformage est possible à moins de 100 °C, avec des

catalyseurs spéciaux, mais la puissance de la pile est alors inférieure. En outre, les inévitables fuites de méthanol vers la cathode, qui créent des pertes, réduisent aussi la puissance et le rendement. On évite cet inconvénient en diluant le méthanol (qui est de toute façon déjà dilué pour que la réaction se produise), mais on dilue simultanément sa densité énergétique : une membrane électrolytique imperméable au méthanol serait un meilleur remède.

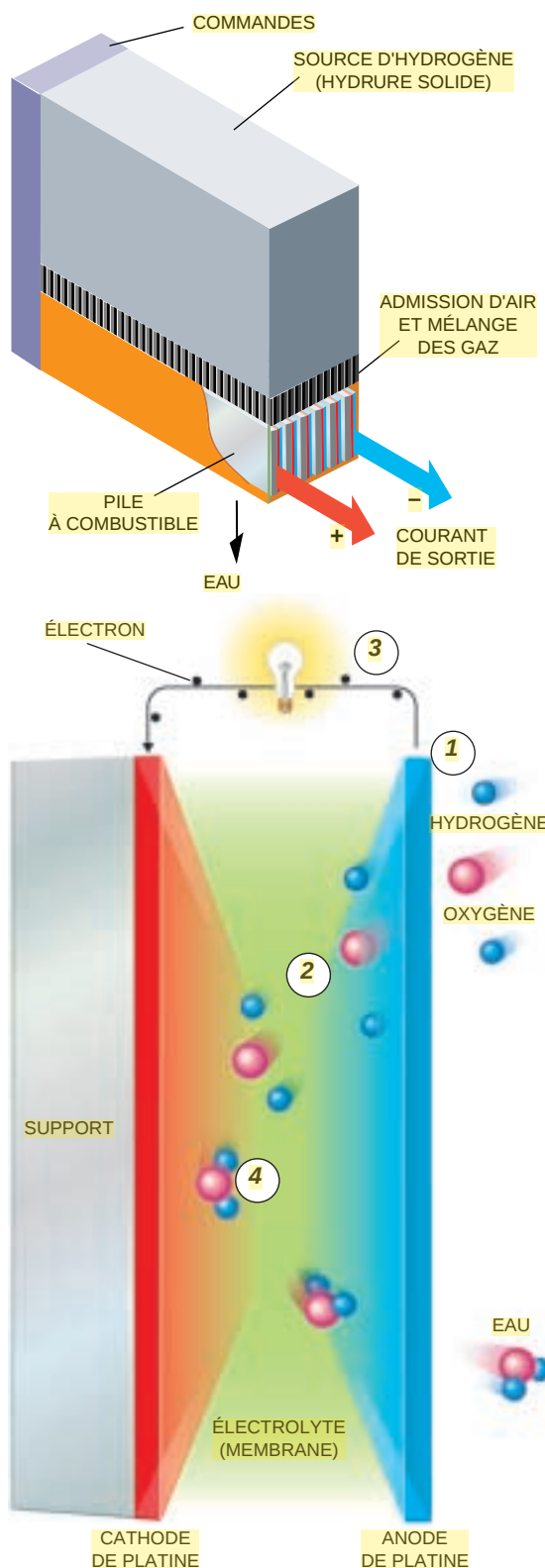
## Des prototypes

Plusieurs entreprises et laboratoires de recherche tentent aujourd'hui de fabriquer des micropiles à combustible. La plupart de ces travaux sont gardés secrets, mais on sait quelles approches sont étudiées.

Ainsi, les Sociétés *Ballard Power Systems* et *H Power* miniaturisent des piles à combustible existantes, pour qu'elles fournissent seulement 20 à 100 watts. Les prototypes semblent avoir des performances comparables à celles des batteries au lithium.

L'Institut Fraunhofer pour les systèmes à énergie solaire, à Fribourg, en Allemagne, et la Société *Siemens* ont construit un prototype de pile à combustible pour ordinateurs portables composé de cinq plaques très minces, contenant chacune cinq cellules. Alimentée par un hydrure métallique solide, cette série de 25 cellules produit 20 watts, ce qui est légèrement mieux en volume que les batteries au lithium.

La Société *Manhattan Scientifics* étudie une micropile à combustible qui serait produite en série par des techniques analogues à celles de l'industrie micro-électronique. Un film de plastique de 25 micromètres d'épaisseur est percé de petits trous par un bombardement de particules nucléaires, puis décapé chimiquement. Ces trous sont remplis d'un polymère conducteur, puis le film est recouvert, par dépôt sous vide, d'une barrière à perméabilité sélective (qui empêche les fuites



**2. UNE PILE À COMBUSTIBLE en couches minces est alimentée par un mélange d'hydrogène et d'oxygène. L'électrolyte est une mince couche poreuse, de moins de un micromètre d'épaisseur, qui sépare les deux électrodes. Sur l'anode, l'hydrogène perd ses électrons (1) ; les ions ainsi formés diffusent vers la cathode à travers la membrane. L'oxygène diffuse aussi à travers l'électrolyte (2), tandis que les électrons empruntent un circuit externe (3). Sur la cathode, les ions hydrogène, les électrons et l'oxygène se combinent (4), formant de l'eau.**