

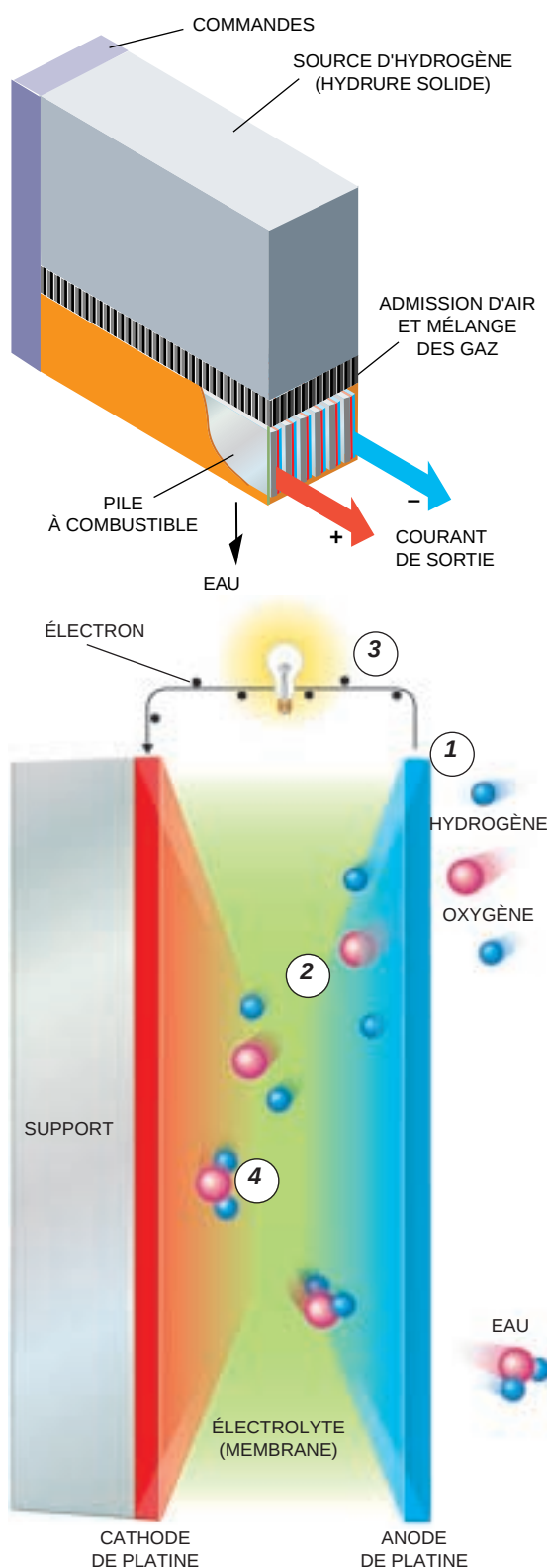
alliages bon marché, tels ceux de lanthane et de nickel, ou de fer et de titane, sont aussi utilisables : l'hydrogène est rapidement extractible à la température et à la pression ambiantes, et l'on n'a pas besoin de sous-systèmes complémentaires. Les hydrures métalliques sont aussi facilement rechargeables 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



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.

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

de méthanol), de deux films métalliques constituant les électrodes, du catalyseur et du réseau conducteur qui relie les piles.

Ces piles à combustible peuvent être remplies directement de méthanol dilué. Elles ne délivrent aujourd'hui qu'une faible puissance, mais elles pourraient être assemblées en série dans un faible volume pour dépasser les performances des batteries au lithium. Elles resteront toutefois insuffisantes pour les démarrages, qui nécessiteront l'assistance d'une batterie, également indispensable lors des pics de consommation.

Le Laboratoire américain de propulsion spatiale et l'Université de Californie du Sud mettent aussi au point, ensemble, une micropile dont le combustible serait le méthanol, dont l'électrolyte serait un polymère et dont l'anode serait couverte d'un catalyseur composé d'un alliage de platine et de ruthénium. Des prototypes fournissant une puissance de 10, 40, 150 watts et plus ont fonctionné pendant plus de huit jours en continu à la température de 90 °C.

Comme ces piles ne fonctionnent pas dès qu'il y a plus de deux pour cent de méthanol dans l'eau, on fait passer l'eau produite à la cathode vers une cavité voisine, l'anode, où elle dilue le méthanol pur, augmentant ainsi le rendement du système tout en minimisant sa taille. L'ensemble du système fournit aujourd'hui 30 watts par litre, et l'objectif est de tripler ce chiffre d'ici à la fin de 1999.

La plus mince

Depuis 1990, j'étudie une pile à combustible en couches minces alimentée par un mélange d'hydrogène et d'oxygène. C'est probablement la pile la plus mince et la plus légère proposée jusqu'ici. Son fonctionnement simple devrait permettre de produire un système plus compact et moins cher que les autres. L'électrolyte, perméable aux gaz, a moins de un micromètre d'épaisseur. Cette membrane est en sandwich entre deux films minces de platine, les deux électrodes, dont l'un est exposé au mélange gazeux et l'autre en est isolé par un support (voir la figure 2).

Les molécules d'hydrogène perdent des électrons sur l'électrode de platine en contact direct avec le mélange gazeux, et se décomposent

L'énergie des piles à combustible		
ÉNERGIE ÉLECTROCHIMIQUE STOCKÉE (en wattheures)		
	En masse (par kilogramme)	En volume (par litre)
PILES À COMBUSTIBLE		
Décaline (C ₁₀ H ₁₈)	2 400	2 100
Hydrogène liquide	33 000	2 500
Borohydrure de lithium (LiBH ₄ et 4H ₂ O)	2 800	2 500
Hydrure métallique solide (LaNi ₅ H ₆)	370	3 300
Méthanol	6 200	4 900
Hydrogène dans des nanofibres de graphite	16 000	32 000
ACCUMULATEURS		
Plomb	30	80
Nickel-cadmium	40	130
Nickel-hydrure métallique	60	200
Ion lithium	130	300

Note : On suppose que l'oxydation de l'hydrogène et des combustibles hydrocarbonés est totale. Les valeurs sont théoriques (maximum thermodynamique), sauf pour les hydrures métalliques et pour les nanofibres de graphite. Les chiffres indiqués pour ces deux matériaux concernent l'hydrogène extractible. Pour les nanofibres de graphite, encore à l'étude, on estime la densité à deux grammes par centimètre cube. Pour les accumulateurs, les valeurs correspondent aux énergies électrochimiques réellement disponibles.

en ions hydrogène, qui diffusent très vite à travers la membrane, vers l'autre électrode. Là, ils se recombient avec les électrons, apportés par le circuit électrique externe, et avec l'oxygène qui a aussi diffusé, produisant de l'eau. La différence de potentiel, aux bornes de la pile est égale à un volt. Elle fonctionne grâce à la proximité des deux électrodes, qui permet une diffusion rapide dans l'électrolyte.

Une seule cellule de ce type, d'une surface de 16 centimètres carrés, fournirait jusqu'à 0,85 watt. Ainsi, une série de six cellules, d'une épaisseur totale de un centimètre seulement, fournirait jusqu'à cinq watts (trois volts avec un courant de 1,7 ampère). Des piles à combustible compactes délivreraient ainsi jusqu'à 1 000 wattheures par kilogramme d'hydrure solide et jusqu'à 1 400 wattheures par litre de méthanol, nettement plus, à masse égale, que les accumulateurs au lithium.

Ces différentes piles à combustible miniatures ne sont encore que des prototypes. La production en série les mettra-t-elle à un prix inférieur à celui des accumulateurs ? Les coûts seraient réduits si l'on trouvait une source d'hydrogène plus facile à utiliser que le méthanol ou que les hydrures

métalliques. Récemment, Terry Baker et ses collègues de l'Université Northeastern ont présenté des tubes de graphite dont un seul gramme contiendrait dix litres d'hydrogène. En théorie, 0,5 litre seulement de ce matériau alimenterait un ordinateur portable de 20 watts en continu pendant plus d'un mois.

Les piles à combustible l'emporteront-elles sur les accumulateurs grâce au carbone ? Ce serait un retournement de situation amusant : on a mis au point les accumulateurs au lithium qui équipent aujourd'hui les appareils électroniques portables quand on a découvert que certaines formes du carbone peuvent contenir d'importantes quantités de lithium.

Christopher DYER est ingénieur de la Société Motorola.

John O'M. BOCKRIS et Supramaniam SRINIVASAN, *Fuel Cells : Their Electrochemistry*, McGraw-Hill, 1969.

A.J. APPLEBY et F.R. FOULKES, *Fuel Cell Handbook*, Van Nostrand Reinhold, 1989.

C.K. DYER, *A Novel Thin-Film Electrochemical Device for Energy Conversion*, in *Nature*, vol. 343, pp. 547-548, 8 février 1990.