

LES AUTEURS



Vincent ARTERO est chercheur au Laboratoire de chimie et biologie des métaux (CEA/CNRS/Université Joseph Fourier Grenoble 1) du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), à Grenoble.

Nicolas GUILLET est ingénieur-chercheur au Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (LITEN) du CEA, à Grenoble.

Daniel FRUCHART est directeur de recherche émérite à l'Institut Néel du CNRS, à Grenoble. Il est directeur scientifique de la Société McPhy-Energy.

Marc FONTECAVE est professeur au Collège de France, titulaire de la chaire de Chimie des processus biologiques.

d'un cheveu) imperméable aux gaz et isolante vis-à-vis des électrons, mais qui conduit les protons, de l'électrode où ils sont produits (anode) vers celle où ils sont consommés (cathode). Fonctionnant entre la température ambiante et 80 °C, avec une alimentation en eau pure et sur une large plage de courant (jusqu'à quatre ampères par centimètre carré), ces dispositifs allient compacité et forte réactivité aux brusques variations de courant.

Ces trois types de procédés – alcalin, à membrane échangeuse de protons et à haute température – existent aussi pour les piles à combustible qui convertissent l'énergie chimique contenue dans l'hydrogène gazeux en énergie électrique, à travers un fonctionnement inverse de celui des électrolyseurs.

Les premières piles à combustible utilisées étaient de type alcalin, développées pour les applications spatiales dans le cadre des programmes *Gemini*, *Apollo*, *Soyouz* dans les années 1960. Peu coûteux, ce dispositif est cependant incompatible avec le dioxyde de carbone atmosphérique (qui perturbe son fonctionnement en réagissant avec l'hydroxyde de potassium de l'électrolyte) et nécessite un apport d'oxygène purifié. C'est pourquoi la plus grande partie de l'effort en recherche et développement des der-

nières années s'est concentrée sur les piles à combustible à membranes échangeuses de protons.

Ces dispositifs offrent une vaste gamme de puissances (de 0,1 watt à 100 kilowatts) et permettent d'obtenir des rendements de conversion électrique compris entre 50 et 70 pour cent. Ils ont d'ores et déjà trouvé des marchés d'applications pour la génération autonome d'électricité, en habitat isolé ou pour des applications mobiles telles que l'électronique. Ils ont aussi été retenus par la plupart des constructeurs automobiles pour le développement de véhicules à hydrogène.

Piles à combustible réversibles

Ainsi, tant pour la production d'hydrogène par électrolyse que pour sa conversion en électricité dans une pile à combustible, les systèmes à membranes échangeuses de protons sont parmi les dispositifs les plus prometteurs. On peut d'ailleurs combiner les deux fonctions au sein d'un même appareil, nommé pile à combustible réversible, qui, couplé à un dispositif de stockage, produit de l'hydrogène en cas de surproduction d'électricité et la restitue le moment venu. Peu encombrant et nécessitant peu de maintenance, ce système est compatible avec une application domestique. Le coût des matériaux nécessaires (membrane et catalyseur) reste le principal frein au développement de la méthode.

Les dispositifs à membrane échangeuse de protons nécessitent en effet l'utilisation de métaux nobles pour la fabrication des électrodes. Comme ces systèmes fonctionnent en milieu acide, on ne peut utiliser les métaux abondants tels le fer, le cobalt et le nickel, qui s'oxyderaient et se dissoudraient rapidement. Or, aux températures de fonctionnement des systèmes à membrane échangeuse de protons, il est indispensable de recourir à des catalyseurs : ces molécules ont la particularité d'abaisser les barrières d'énergie nécessaire pour déclencher les réactions, ce qui favorise et accélère leur déroulement. Les métaux nobles tels le platine, le palladium et l'iridium sont ainsi couramment utilisés, mais ils sont rares et chers – un kilogramme de platine vaut 40 000 euros ! – d'autant qu'ils sont déjà largement utilisés dans les pots catalytiques des véhicules.

La consommation d'une famille

Pour comprendre la pertinence de l'hydrogène en tant que moyen durable de stockage et de distribution d'énergie renouvelable, considérons un cas simple : une famille vivant en France consomme en moyenne (hors chauffage – cette dépense énergétique triplerait la consommation) entre 2 500 et 3 100 kilowattheures par an d'électricité. En utilisant un système à base de piles à combustible de 5 kilowatts présentant un rendement électrique de 50 pour cent et sachant que la combustion du dihydrogène libère 33 kilowattheures par kilogramme, il suffit de produire chaque jour 500 grammes de dihydrogène – à partir de 2,3 litres d'eau – pour assurer les besoins énergétiques de cette famille. Un électrolyseur consommant environ 54 kilowattheures

d'électricité par kilogramme de dihydrogène produit, il faut un minimum de 27 kilowattheures produits chaque jour par des panneaux solaires.

Compte tenu des variations quotidiennes et saisonnières de l'ensoleillement en France métropolitaine, il serait donc nécessaire d'installer un système à 8 kilowatts-crête, soit la production d'électricité d'environ 55 mètres carrés de panneaux solaires actuels en silicium polycristallin. Bien sûr, avec une demande énergétique plus faible (ampoules à basse consommation, électroménager moins énergivore, modifications du mode de vie...), les surfaces nécessaires diminueraient d'autant. Sans compter que la chaleur produite par l'électrolyse et le fonctionnement de la pile à com-

bustible peut contribuer au chauffage de l'eau sanitaire et de l'habitation.

Dans l'état actuel, on estime que le coût global – couvrant l'amortissement de l'investissement initial et les coûts de maintenance – de production de dihydrogène à partir de sources d'énergies renouvelables et intermittentes (éolien, photovoltaïque) peut varier entre 4 et 20 euros par kilogramme, soit un coût de deux à dix euros par jour pour couvrir les besoins hors chauffage d'une famille moyenne française, contre environ un euro par jour actuellement avec une alimentation énergétique exclusivement *via* le réseau électrique. D'où l'intérêt de diminuer le coût des composants du système... et de consommer moins.