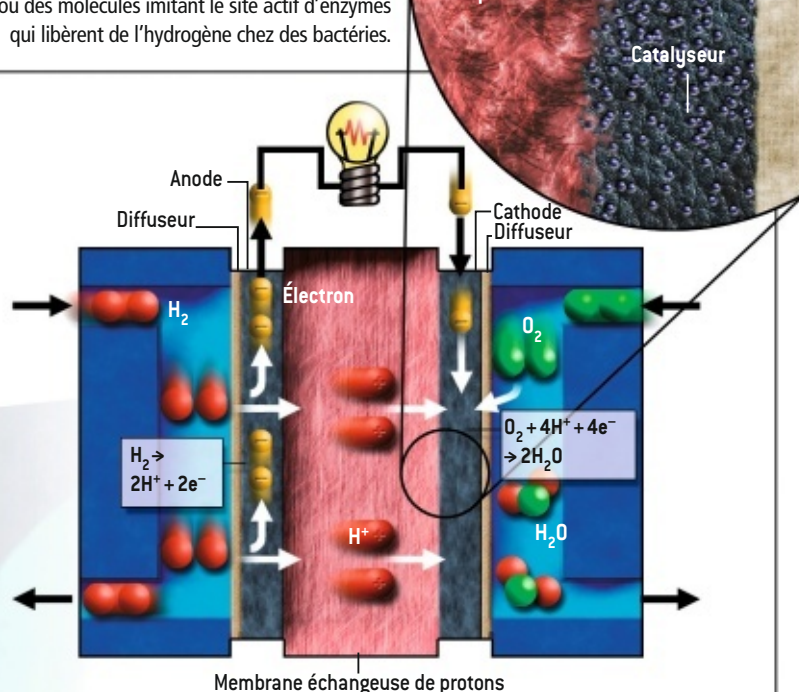


Les électrodes

L'anode et la cathode sont constituées de fines particules – des nanotubes de carbone ou des grains de noir de carbone de 50 nanomètres de diamètre – sur lesquelles est déposé le catalyseur : des particules de platine de quelques nanomètres de diamètre ou des molécules imitant le site actif d'enzymes qui libèrent de l'hydrogène chez des bactéries.

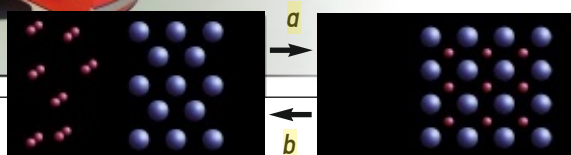
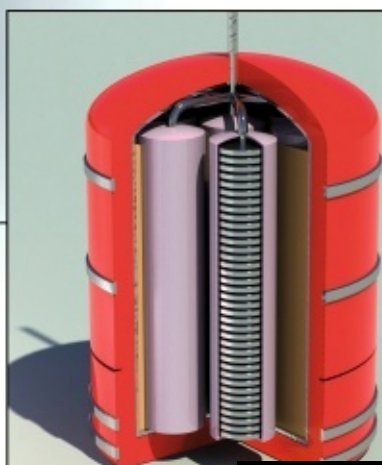


Pile à combustible à membrane échangeuse de protons

Elle transforme le dihydrogène H_2 et le dioxygène O_2 en eau et énergie électrique : le dihydrogène traverse un diffuseur – une matière carbonée poreuse – et atteint l'anode de la pile où il est dissocié en deux protons H^+ et deux électrons. Les électrons circulent vers la cathode dans un circuit électrique qui alimente la maison. Dans le même temps, les protons traversent une membrane en polymère dite échangeuse de protons, et sont attirés par la cathode, où ils se combinent à des électrons libérés par cette électrode et à du dioxygène, reformant de l'eau.

Réservoir d'hydrogène

L'hydrogène est stocké sous forme solide dans des structures métalliques : quand on abaisse la température, les molécules d'hydrogène réagissent avec le métal, se dissocient et s'insèrent dans la structure pour former un hydrure métallique (a). Quand on remonte la température, le gaz d'hydrogène se reconstitue (b). Le métal est entouré d'un « tampon » qui stocke la chaleur dégagée pendant le stockage et la restitue lors du déstockage. Un conteneur de la taille d'un gros cumulus domestique contient 4,5 kilogrammes d'hydrogène, ce qui suffit pour couvrir les besoins d'une famille française durant plus d'une semaine.



l'avons vu, peut se faire par électrolyse de l'eau (on sait également produire de l'hydrogène à partir de biomasse, mais les procédés sont en cours de développement, voir l'encadré page 34). Un électrolyseur est un système électrochimique qui convertit l'énergie électrique en énergie chimique. Il en existe plusieurs types. L'électrolyse dite alcaline de l'eau est sans doute la moins coûteuse et la plus aboutie. Son principal avantage réside dans le fait que ces électrolyseurs peuvent être fabriqués avec des matériaux abondants et peu coûteux : deux simples électrodes, à base d'acier ou de nickel, plongées dans une solution très basique – l'électrolyte – et parcourues par un courant électrique produisent respectivement de l'hydrogène et de l'oxygène gazeux (voir l'encadré ci-contre).

Produire l'hydrogène par électrolyse de l'eau

Développée depuis de nombreuses années pour la production d'hydrogène à l'échelle industrielle, cette technique a montré sa fiabilité. La principale limite des dispositifs actuels, outre qu'ils sont très encombrants, réside dans leur grande sensibilité aux brusques variations de courant ; la plupart des électrolyseurs alcalins industriels doivent également recevoir en permanence un courant minimal et éviter les arrêts fréquents. Une contrainte difficilement compatible avec l'approvisionnement irrégulier des sources d'énergie renouvelables. Ainsi, cette technique semble mieux adaptée pour le stockage d'énergie produite en excès durant la nuit par les centrales nucléaires que pour celui des énergies renouvelables.

Dans ce contexte, une autre technologie en cours de développement, l'électrolyse haute-température (entre 750 et 800 °C), est prometteuse. Elle consiste à utiliser la chaleur produite par une source externe non valorisée – telle la chaleur éliminée dans des tours de refroidissement – pour activer la réaction d'électrolyse et atteindre ainsi des rendements de conversion élevés.

La solution la plus pratique pour la production d'hydrogène à partir d'une source d'énergie intermittente semble être l'électrolyseur à membrane échangeuse de protons : l'électrolyte est remplacé par une membrane polymère très mince (100 à 200 micromètres – soit l'épaisseur

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'oxydèrent 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.