

électrique obtenues sont encore faibles, de l'ordre de 100 à 1 000 fois inférieures à celles obtenues avec du platine, mais le coût de ce matériau est moindre. Si de nombreuses étapes restent à franchir pour développer un catalyseur bio-inspiré capable de rivaliser avec le platine, le nouveau matériau présente d'autres avantages, tels qu'une bonne tolérance au monoxyde de carbone qui contamine souvent l'hydrogène, notamment lorsqu'il est produit à partir de biomasse, et qui empoisonne les catalyseurs à base de platine.

Une telle approche bio-inspirée peut aussi être exploitée pour développer de nouveaux matériaux pour membranes échangeuses de protons. Aujourd'hui, ces membranes sont principalement réalisées à base d'un polymère perfluoré sulfoné (le plus connu est le Nafion®, commercialisé depuis les années 1960 par la Société DuPont). Toutefois, la présence de fluor dans sa composition rend la production de ce matériau très coûteuse et impose un recyclage efficace. Or, chez les organismes vivants, le transport de protons à travers les membranes est un processus fondamental de la respiration. En créant des canaux à travers une membrane et en greffant des acides aminés (les constituants des protéines) sur leurs parois, Thomas Berthelot et ses collègues du CEA à Saclay ont reproduit la structure des pompes à protons situées dans la membrane des mitochondries, les compartiments de la cellule où ont lieu de tels échanges de protons, qui assurent la respiration cellulaire. On obtient ainsi un matériau compétitif avec le Nafion, mais moins sensible au dessèchement et présentant une bien meilleure stabilité mécanique.

Reste une autre difficulté : le stockage de l'hydrogène. Ce gaz, le moins dense de tous, ne se liquéfie qu'à très basse température (-253 °C à pression atmosphérique). Mais ce n'est pas vraiment un écueil puisque la liquéfaction de l'hydrogène n'est pas envisageable, ce processus consommant presque la moitié de l'énergie chimique stockée dans les molécules d'hydrogène. En outre, l'hydrogène liquide ne se conserve pas : il s'évapore peu à peu du fait des pertes thermiques du récipient.

On peut aussi stocker l'hydrogène gazeux sous une forme comprimée. Pour les applications liées au transport, des solutions de stockage à haute pression (de 350 à 700×10^5 pascals, soit de 350 à 700 fois la pression atmosphérique) sont proposées.

La photosynthèse artificielle

✓ **Un système pourrait-il capter la lumière et la transformer directement en hydrogène ?**

C'est ce qu'envisagent les scientifiques aujourd'hui.

Via la photosynthèse, les organismes vivants utilisent l'énergie solaire pour produire de la biomasse en fixant le dioxyde de carbone. Certaines algues et bactéries photosynthétiques produisent même de l'hydrogène à partir d'eau et de lumière.

Les chercheurs tentent d'imiter ce processus en couplant les catalyseurs de l'électrolyseur (qui produisent l'hydrogène et l'oxygène) à un photosensibilisateur qui absorbe la lumière solaire et la convertit en électrons. Dans ce dispositif, les électrons sont directement transférés du photosensibilisateur vers les catalyseurs.

Encore au stade de la recherche fondamentale, cette technologie pourrait concurrencer le couplage photovoltaïque-électrolyse, d'une part, grâce à la compacité et à la simplicité des dispositifs et, d'autre part, car elle offrirait une alternative bon marché aux matériaux coûteux utilisés dans les cellules photovoltaïques et les électrolyseurs à membranes échangeuses de protons (voir *De l'énergie issue de feuilles artificielles*, page 36).

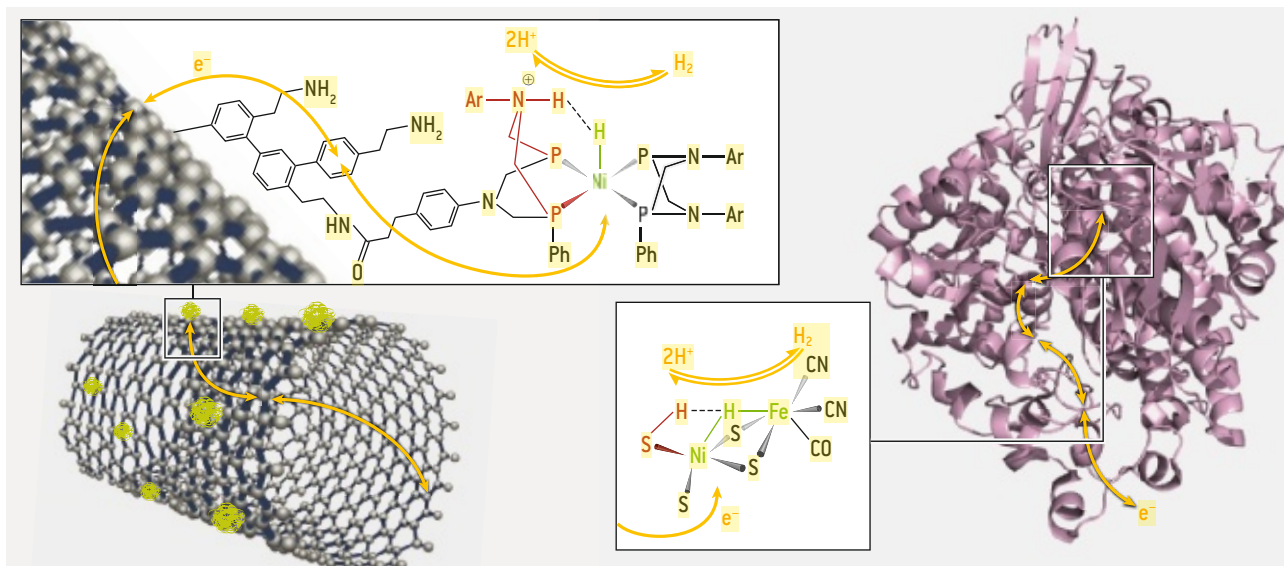
Le conteneur doit alors garantir un stockage efficace et en toute sécurité à de telles pressions et supporter environ 5 000 cycles de remplissage. Or il ne doit pas être en métal, car l'hydrogène diffuse à travers la plupart des parois métalliques, les fragilisant à moyen terme. La solution retenue par des équipes du CEA pour élaborer un réservoir de véhicule renfermant 4,2 kilogrammes d'hydrogène consiste à effectuer un moulage rotatif d'une matière plastique composite (d'une seule pièce, la matière plastique est plus résistante, tout en étant imperméable à l'hydrogène). L'utilisation de ce type de conteneur est en cours d'étude chez Air Liquide.

Stocker l'hydrogène sous forme solide

Une autre solution consiste à tirer parti de la capacité du dihydrogène à s'insérer dans les structures métalliques pour former des composés nommés hydrures. Un tel stockage dit solide de l'hydrogène est développé par la Société McPhy-Energy qui met en application les résultats obtenus dans l'équipe de Daniel Fruchart, à l'Institut Néel du CNRS à Grenoble. Ainsi, un matériau contenant principalement du magnésium métallique (Mg) se transforme en hydrure de magnésium MgH_2 lorsqu'il est placé sous 10^6 pascals d'hydrogène. Selon ce procédé, le matériau absorbe jusqu'à plus de six pour cent de sa masse en hydrogène, qui est libéré dès que la pression devient inférieure à 2×10^5 pascals.

Certains réservoirs contiennent en outre un matériau à changement de phase, qui stocke la chaleur dégagée pendant la phase de stockage pour la restituer lors du déstockage, ce qui favorise celui-ci. En associant plusieurs réservoirs avec matériau à changement de phase au sein d'un conteneur classique utilisé pour le transport de marchandises (environ 37 mètres cubes), on stocke sous forme d'hydrure solide (MgH_2) l'équivalent de 70 kilogrammes d'hydrogène gazeux, soit 2,3 mégawattheures, avec un rendement de restitution de l'énergie supérieur à 95 pour cent. Une unité de même taille sans matériau à changement de phase stocke quant à elle jusqu'à 700 kilogrammes d'hydrogène (23 mégawattheures), mais avec un rendement de 60 pour cent.

Très sûrs et supportant plusieurs milliers de cycles de stockage et déstockage, ces réservoirs ont la souplesse de fonction-



2. LE CATALYSEUR À BASE DE NICKEL conçu au CEA par Vincent Artero et ses collègues (*à gauche*) est inspiré du fonctionnement d'une hydrogénase, une enzyme qui transforme l'eau en dihydrogène et inversement dans des bactéries et des micro-algues (*à droite*). Dans l'enzyme, des agrégats métalliques (*non représentés*) guident les électrons (e^-) vers le site catalytique

(*en vert*), constitué d'un atome de nickel (Ni) et d'un atome de fer (Fe), où se déclenche alors la transformation de l'eau en dihydrogène H_2 (la réaction inverse est aussi possible). Le catalyseur synthétique, quant à lui, est fixé à un nanotube de carbone. Guidés par le nanotube et la molécule de liaison, les électrons atteignent de même le site catalytique, constitué de nickel.

nement requise pour le stockage des énergies renouvelables : ils fonctionnent quelle que soit la quantité d'hydrogène qui leur parvient et libèrent l'énergie à la demande. Ils sont aussi adaptés pour le stockage de l'hydrogène tant au niveau d'une habitation que d'une station-service, qu'elle soit autonome grâce à des capteurs solaires ou des éoliennes, ou régulièrement approvisionnée par conteneur d'hydrogène solide.

À cause de la masse de l'hydrure métallique et des conditions de température nécessaires, la technologie n'est pas encore transposable à un véhicule. Néanmoins, les performances de certains hydrures légers laissent entrevoir des voitures hybrides, combinant moteur thermique et pile à combustible, ce qui augmenterait leur autonomie. Par exemple, des hydrures à base de titane, de vanadium ou de chrome, disposés dans un réservoir hybride où l'hydrogène est stocké à la fois sous forme solide et sous forme comprimée à 300 bars, fonctionnent à température ambiante. C'est une solution envisagée par Toyota, étudiée à Grenoble en collaboration avec le LITEN (CEA), l'Institut Néel et autres partenaires. Une autonomie de 600 kilomètres peut être assurée pour une masse et un volume de réservoir compatibles avec un véhicule actuel. Le rendement énergétique doublerait alors et le coût serait inférieur à celui des batteries au lithium utilisées actuellement dans les automobiles électriques. Et le rechargement serait plus rapide... (le

« plein d'hydrogène » ne durerait que quelques secondes). Là encore, cependant, le coût du matériau composite de stockage reste trop élevé.

Une mutualisation de l'hydrogène ?

Actuellement, aucun procédé de production d'énergie à partir de ressources renouvelables (à l'exception de la production hydro-électrique déjà saturée) n'est compétitif en termes de coût de production avec ceux utilisant les carburants fossiles ou l'énergie nucléaire. L'augmentation du coût des carburants fossiles ou l'instauration de taxes pour l'émission de dioxyde de carbone pourraient modifier ce constat à moyen terme. Ainsi, le développement d'un bouquet énergétique incluant des énergies alternatives nécessite aujourd'hui des incitations fiscales telles que la TVA réduite ou le crédit d'impôt offert pour l'équipement de l'habitation principale en panneaux photovoltaïques.

Les technologies couplant énergies renouvelables et stockage à l'hydrogène se développent sur de petits marchés, par exemple pour la production et le stockage de l'énergie en habitat isolé ou pour des applications autonomes mobiles (utilisées en expédition ou pour la navigation de plaisance, par exemple). Mais le problème du stockage des énergies alternatives va vite se poser à plus grande échelle : le 12 novem-

bre 2010, le parc éolien français a couvert 5 pour cent de la consommation nationale, avec une pointe à 7,9 pour cent dans la nuit. Sans une régulation *via* un stockage adapté, il sera bientôt impossible de concilier les besoins du réseau et le caractère aléatoire de cet apport énergétique. D'où l'intérêt de l'hydrogène...

L'hydrogène permet en outre d'envisager une organisation décentralisée, individualisée et autonome de la production d'énergie et de son utilisation, où tout un chacun serait tour à tour producteur, utilisateur et distributeur d'hydrogène vers ses proches voisins. C'est le système original proposé en 2002 par l'économiste américain Jeremy Rifkin dans son ouvrage *L'économie hydrogène : après la fin du pétrole, la nouvelle révolution économique*.

L'utilisation de l'hydrogène est aujourd'hui maîtrisée et sécurisée. En produisant l'hydrogène chez soi, on évite la mise en place d'infrastructures lourdes et coûteuses de production et de distribution de l'hydrogène et on limite les pertes énergétiques lors de l'acheminement de l'électricité et de l'hydrogène.

Bien sûr, la transition entre le modèle énergétique industriel actuel – qui privilégierait une production à grande échelle dans des centrales gigantesques reliées, d'une part, à de vastes étendues de panneaux photovoltaïques et d'éoliennes et, d'autre part, à un réseau de gazoducs – et un modèle ultra-décentralisé, s'il voit le