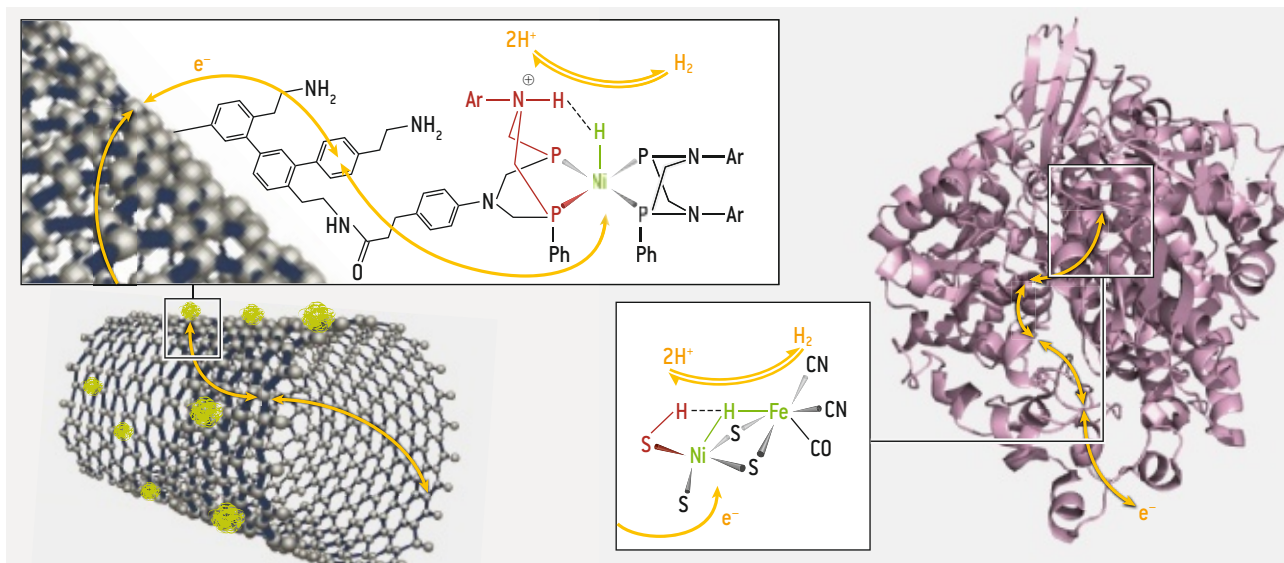




2. LE CATALYSEUR À BASE DE NICKEL conçu au CEA par Vincent Artero et ses collègues (à gauche) est inspiré du fonctionnement d'une hydrogénase, une enzyme qui transforme l'eau en dihydrogène et inversement dans des bactéries et des micro-algues (à droite). Dans l'enzyme, des agrégats métalliques (non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

Produire de l'hydrogène à partir de biomasse

Si l'eau est la matière première la plus abondante pour produire l'hydrogène par électrolyse, d'autres pistes à partir de matière organique abondante sont explorées. Aujourd'hui, le vaporeformage du gaz naturel – le méthane – est la méthode la plus économique pour produire de l'hydrogène : exposé à de la vapeur d'eau très chaude, le gaz libère les atomes d'hydrogène qu'il contient, sous forme de dihydrogène. Néanmoins, parce que le méthane n'est pas une ressource renouvelable et que le processus rejette du dioxyde de carbone, il est préférable d'utiliser d'autres molécules organiques, par exemple celles issues de la biomasse.

Cette solution est neutre en carbone puisque la quantité de dioxyde de carbone produit correspond à celle captée par les plantes grâce à la photosynthèse. Elle pourrait contribuer à la production renouvelable d'hydrogène en couvrant dix pour cent des besoins nationaux en énergie primaire.

Le procédé le plus efficace est la pyrolyse à haute température, qui transforme la biomasse en gaz avec des rendements de l'ordre de 40 à 50 pour cent si la température atteint 1 200 à 1 400 °C (ou 900 à 1 000 °C en présence de catalyseurs spécifiques). Il libère du dihydrogène, du méthane, du dioxyde de carbone, mais aussi du monoxyde de car-

bone (CO), toxique et inhibiteur des catalyseurs des piles à combustible à membranes échangeuses de protons – dispositifs parmi les plus prometteurs pour convertir l'énergie contenue dans l'hydrogène en électricité à usage domestique ou dans les transports. Ce gaz doit donc être éliminé du mélange produit. On peut aussi utiliser le mélange tel quel, dans des piles à combustible fonctionnant à haute température, moins sensibles aux gaz polluants, ou le transformer en carburant liquide.

Par ailleurs, des processus de digestion de la biomasse par fermentation, produisant de l'hydrogène à température ambiante, sont à l'étude. On envisage aussi d'utiliser certains

organismes photosynthétiques qui tirent une partie de leur énergie du soleil : la bactérie *Rhodobacter capsulatus*, par exemple, produit de l'hydrogène par fermentation « à la lumière » (photofermentation) de certains glucides issus de déchets de l'industrie agricole ou papetière. Il reste cependant à améliorer les rendements de décomposition de la cellulose et de la lignine en petites molécules (sucres, etc.), car ces deux polymères végétaux sont très résistants à l'hydrolyse. À terme, on rêve de domestiquer certaines algues pour leur faire produire de l'hydrogène par photosynthèse, à partir d'eau et d'énergie solaire, sans passer par la production de biomasse.

✓ SUR LE WEB

L'association française de l'hydrogène (AFH₂) : www.afh2.org

✓ BIBLIOGRAPHIE

L'hydrogène, carburant de l'après-pétrole ? [collectif], Collection « IFP Energies Nouvelles Publications », Technip, à paraître.

P. Menanteau et al., Une analyse économique de la production d'hydrogène pour des usages transport à partir d'électricité éolienne, *Revue de l'Énergie*, vol. 61, pp. 322-333, 2010.

P. Lucchese, L'hydrogène est-il incontournable ?, *Dossier Pour la Science*, n° 69, pp. 112-117, 2010.

A. Le Goff et al., From hydrogenases to noble metal-free catalytic nanomaterials for H₂ production and uptake, *Science*, vol. 326, pp. 1384-1387, 2009.

S. Ashley, Voiture à hydrogène : la route sera longue, *Pour la Science*, n° 330, pp. 46-52, 2005.

L'hydrogène, carburant de demain ?, *L'Actualité Chimique*, numéro spécial, décembre 2001.

jour, sera progressive. Mais des autoroutes de l'hydrogène se développent déjà, notamment en Californie ou en Norvège, avec des installations de production d'hydrogène de petite taille à proximité de stations-service réparties le long des voies de circulation. Ce ne sont là pour l'instant que des prototypes. Cependant, une infrastructure délocalisée de production d'hydrogène s'étend déjà, notamment dans le Nord de la France, la Belgique et les Pays-Bas, pour répondre à la demande croissante en hydrogène de l'industrie pour le raffinage des hydrocarbures ou la production d'engrais (l'hydrogène est utilisé pour la fabrication d'ammoniac, précurseur du nitrate d'ammonium).

La voiture à hydrogène : pas pour tout de suite

Concernant les transports, la route sera plus longue, mais de nombreux progrès ont été réalisés au cours des dernières années. Des piles à combustible et des réservoirs d'hydrogène, sous forme comprimée ou solide, sont aujourd'hui intégrés dans des automobiles de taille standard, alors qu'en 2002, ces deux composants occupaient le coffre et les places arrière d'un monospace. D'énormes progrès ont aussi été accomplis pour adapter ces technologies aux normes de sécurité les plus strictes.

Si les véhicules électriques dont on annonce la commercialisation immédiate stockent leur énergie au sein de batteries, l'option hydrogène et pile à combustible reste d'actualité pour optimiser l'autonomie de ces véhicules. Par exemple, le prototype 307CC FiSyPAC, développé par la Société Peugeot SA en collaboration avec le CEA, incorpore une batterie lithium-ion de 13 kilowattheures et une pile à combustible de 23 kilowatts ; il assure une autonomie de 500 kilomètres.

L'hydrogène est donc un vecteur énergétique prometteur. En permettant de stocker 33,3 kilowattheures d'énergie par kilogramme, il dépasse de plusieurs ordres de grandeur les matériaux des meilleures batteries au lithium. Rappelons aussi que, contrairement à aujourd'hui, le modèle énergétique à venir ne reposera pas sur une unique technologie. Dans le bouquet énergétique de l'après-pétrole, l'hydrogène sera un vecteur parmi d'autres, permettant par exemple le stockage des énergies solaire et éolienne et régulant ainsi l'alimentation en électricité.

Ainsi, peu à peu, l'hydrogène s'intègre dans le nouveau panorama des ressources énergétiques qui seront exploitées dans l'« ère de l'après-pétrole ». S'éclaircir à l'hydrogène, rouler à l'hydrogène, ne sont sans doute plus hors de portée. On peut espérer que les progrès tant en recherche fondamentale qu'en développement en feront dès 2050 une solution énergétique incontournable. ■