

En fait, le baclofène présente deux inconvénients : d'une part, c'est un générique qui n'est plus protégé par aucun brevet, ce qui signifie qu'aucun laboratoire ne peut espérer de retour financier si l'intérêt de ce produit était confirmé ; d'autre part, comme nous l'avons souligné, la sensibilité à cette molécule varie notablement d'une personne à l'autre, de sorte qu'il n'existe pas de dose optimale pour tout un chacun. Michel Dettelleux, à l'Hôpital Cochin, à Paris, a déposé un projet, au Programme hospitalier de recherche clinique visant à évaluer deux doses de baclofène (60 et 120 milligrammes par jour). Des contraintes financières ont conduit à modifier ce protocole qui est passé de trois groupes (dont un qui aurait reçu un placebo) à deux groupes, dont un seul sera traité par 90 milligrammes par jour.

À quand des études cliniques fiables ?

Les résultats de cette étude ne seront connus qu'en septembre 2012 au plus tôt. Renaud de Beaurepaire, à l'Hôpital Paul-Guiraud, à Villejuif, qui fait partie des pionniers du baclofène en France et des « résolument pour », présente déjà une objection à ce type d'étude. Puisque les doses efficaces pour chaque patient varient de 1 à 15, il est illusoire de penser qu'une dose unique moyenne pourra donner des résultats statistiquement significatifs.

Ainsi, ces problèmes de doses sont au centre de l'efficacité du baclofène. Augmenter les doses signifie aussi augmenter les effets indésirables et ils sont bien connus : somnolence, fatigue, nausées, vertiges, céphalées, diarrhées, hypotension, constipation, voire douleur abdominale. Cette liste paraît longue, mais si l'on tient compte du fait que ce traitement est susceptible de libérer le patient d'une souffrance difficilement supportable et qui peut le conduire à des pathologies bien plus graves, voire à la mort, le rapport bénéfices sur risques reste nettement en faveur du traitement.

D'autant plus que les « résolument pour » expliquent que les doses peuvent être augmentées progressivement et que la plupart des effets indésirables sont réver-

sibles ; il suffit de respecter des paliers après avoir augmenté la dose afin de surveiller l'apparition d'éventuelles complications, voire de diminuer temporairement la dose.

Le seul doute vient d'études récentes non confirmées. Il existerait deux effets secondaires qui ne doivent pas être pris à la légère : d'une part, la diminution du seuil de déclenchement de crises d'épilepsie, et l'on sait que les personnes dépendantes à l'alcool présentent un risque accru d'avoir de telles crises ; d'autre part, une augmentation des idées suicidaires et des tentatives de suicide. Mais, comme c'est souvent le cas avec le baclofène, ces effets indésirables n'ont pas donné lieu à des études systématiques.

Quelle est l'attitude des autres pays ? Quelques résultats positifs ont été obtenus en Allemagne et aux Pays-Bas, où la situation est comparable à ce qui se passe en France. En revanche aux États-Unis, le baclofène n'est pas prescrit pour le sevrage alcoolique dans la mesure où il n'a pas obtenu d'autorisation de mise sur le marché – AMM – pour cette indication, et que les médecins ne prescrivent pas de médicaments sans AMM.

Ainsi, beaucoup des études précliniques et cliniques réalisées jusqu'à présent suggèrent que le baclofène entraîne une baisse de la motivation à consommer des drogues, en particulier l'alcool. Il faut néanmoins insister sur le fait que l'addiction ne peut pas être considérée comme une simple difficulté à diminuer sa consommation de drogue ou d'alcool. Il est vraisemblable que les personnes dépendantes souffrent de modifications à long terme de certains de leurs réseaux neuronaux, et que ce sont ces modifications qui les font souffrir et les conduisent à consommer pour soulager leur malaise.

En ce sens, il est peu probable que le baclofène permette à lui seul de faire disparaître ces troubles psychiques et puisse être considéré comme soignant l'addiction en tant que telle. En revanche, en permettant aux patients de diminuer, voire d'arrêter, leur consommation, il peut participer à une abstinence à long terme, et cette abstinence semble, jusqu'à présent, être l'une des meilleures thérapies de l'addiction dont on dispose. ■

L'AUTEUR



Jean-Pol TASSIN, directeur de recherches à l'INSERM, dirige le Groupe Physiopathologie de la dépendance et de la rechute, à l'Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, INSERM U952 / CNRS UMR 7224.

✓ BIBLIOGRAPHIE

J.-C. Garbutt *et al.*, Efficacy and safety of baclofen for alcohol dependence : a randomized, double-blind, placebo-controlled trial, *Alcohol Clin. Exp. Res.*, vol. 34, pp. 1849-1857, 2010.

S. Vlachou et A. Markou, GABA B receptors in reward process, *Advances in Pharmacology*, vol. 58, pp. 315-371, 2010.

J.-P. Tassin, Uncoupling between noradrenergic and serotonergic neurons as a molecular basis of stable changes in behavior induced by repeated drugs of abuse, *Biochem. Pharmacol.*, vol. 75, pp. 85-97, 2008.

G. Addolorato *et al.*, Effectiveness and safety of baclofen for maintenance of alcohol abstinence in alcohol-dependent patients with liver cirrhosis : randomised, double-blind controlled study, *Lancet*, vol. 370, pp. 1915-1922, 2007.

W. Schultz *et al.*, A neural substrate of prediction and reward, *Science*, vol. 275, pp. 1593-1599, 1997.

✓ Ce texte fait suite au débat organisé en mai 2011 par l'Institut de recherches scientifiques sur les boissons, l'IREB, sur le thème : *Baclofène : pour ou contre ?*

V. Artero, N. Guillet, D. Fruchart et M. Fontecave

L'HYDROGÈNE

Une énergie propre pour demain ?

A l'heure où la plupart des constructeurs automobiles annoncent la mise sur le marché de véhicules électriques pour 2011, faut-il encore croire que l'hydrogène sera le carburant du XXI^e siècle, comme cela a été annoncé il y a quelques années ? On sait depuis longtemps récupérer de l'énergie à partir de ce gaz : le principe d'une pile à combustible, qui produit de l'électricité et de la chaleur en recombinant de l'hydrogène gazeux et de l'oxygène de l'air avec pour seul « rejet » de l'eau, a été décrit dès 1806 par le chimiste britannique Humphry Davy, et le premier prototype remonte à 1839. Depuis, la NASA a montré le potentiel de tels dispositifs lors des missions *Gemini* et *Apollo*. Pourtant, l'horizon d'une mise sur le marché d'une telle technologie ne cesse d'être repoussé... Et pour cause : d'une part, si les piles à combustible sont toujours plus performantes aujourd'hui, c'est au détriment de leur coût. D'autre part, l'hydrogène n'existe pas à l'état naturel sur Terre. Utiliser ce gaz comme carburant implique donc aussi de le produire, de le stocker et de le distribuer à

grande échelle, en toute sécurité et à bas prix. Pour chacune de ces étapes de la filière hydrogène, diverses solutions se dessinent. C'est notamment le cas pour l'un des éléments les plus coûteux de la filière – le catalyseur qui augmente la puissance et le rendement de la pile à combustible. Actuellement à base de métaux nobles tel le platine, il pourrait être remplacé d'ici quelques années par un catalyseur bon marché inspiré... de micro-organismes. Parallèlement, un stockage de l'hydrogène sous forme solide, beaucoup moins dangereux que les bonbonnes de gaz et plus compact, est aussi en cours de commercialisation. Nous examinerons ici l'intérêt potentiel de la filière hydrogène, comment produire ce gaz, comment le stocker et de quelle façon on pourrait réduire les coûts de mise en œuvre, qui restent l'un des principaux freins à son développement.

Mais d'abord, pourquoi l'hydrogène ? Pour plusieurs raisons. Ce gaz a un très fort potentiel énergétique : la molécule d'hydrogène gazeux, nommée dihydrogène, est constituée de deux atomes d'hydrogène

liés entre eux. C'est là que réside le secret : rompre cette liaison, par exemple par réaction avec l'oxygène de l'air (O_2), conduit à une importante libération d'énergie qui peut être convertie en électricité avec une pile à combustible. De plus, cette réaction ne rejette que de l'eau. L'hydrogène (par commodité, on utilisera ce terme à la place du dihydrogène) peut donc être envisagé comme une alternative non polluante aux énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon...).

Stocker les énergies renouvelables

Ensuite, il existe une matière première abondante à partir de laquelle on peut produire l'hydrogène : l'eau. Ainsi, la filière hydrogène pourrait reposer uniquement sur deux réactions chimiques qui ne rejettent pas de gaz à effet de serre. L'hydrogène peut en effet être produit par électrolyse de l'eau *via* une réaction où de l'énergie électrique assure la transformation de l'eau en hydrogène et oxy-



Produire de l'hydrogène, le stocker et le convertir en électricité à la demande est désormais possible. Pour que la filière hydrogène devienne compétitive, il reste à en réduire les coûts. Les chimistes s'inspirent de bactéries pour perfectionner les catalyseurs utilisés.

gène gazeux. Et à l'inverse, de l'hydrogène et de l'oxygène gazeux peuvent être recombinaison pour produire de l'eau en libérant chaleur et électricité. Le bilan de matière de ces deux réactions est donc nul. L'hydrogène a seulement été utilisé de manière temporaire pour stocker de l'énergie, et l'eau utilisée pour le produire a été régénérée au cours du processus.

L'hydrogène peut ainsi être envisagé comme un moyen durable de stocker l'énergie électrique, offrant la possibilité de la restituer à la demande avec un assez bon rendement global. Ce principe apparaît particulièrement adapté pour le stockage des énergies renouvelables. Les sources d'énergie éolienne et solaire, par exemple, sont réparties de façon inégale et présentent un caractère intermittent peu prévisible, lié à leur dépendance aux conditions météorologiques. Le stockage des surplus d'énergie sous forme d'hydrogène permettrait un lissage de l'approvisionnement et une distribution régulière de l'énergie. Ainsi, sur l'île d'Utsira, à 18 kilomètres des côtes de la Norvège, on ali-

mente les habitations avec de l'électricité produite à partir d'éoliennes. Mais l'excédent d'électricité est utilisé pour électrolyser de l'eau et produire de l'hydrogène, lequel est stocké sur place. Ce gaz est ensuite combiné à de l'oxygène de l'air dans une pile à combustible lorsque le vent faiblit, et est ainsi reconverti en énergie électrique. Une dizaine d'habitations sont ainsi alimentées uniquement par de l'énergie renouvelable ! Des projets similaires sont mis en place en Corse et sur l'île de La Réunion pour évaluer l'intérêt d'alimenter en électricité des sites isolés au moyen d'énergie solaire photovoltaïque.

Il s'agit donc de construire en grande quantité et à un coût raisonnable des dispositifs fiables de production et d'utilisation de l'hydrogène. C'est encore loin d'être le cas : si plusieurs technologies performantes existent, aucune ne concilie à la fois faible coût, compacité et durabilité. C'est tout l'enjeu des recherches sur l'hydrogène aujourd'hui.

La première étape de la filière hydrogène est sa production. Celle-ci, nous

L'ESSENTIEL

✓ À la différence du pétrole, l'hydrogène n'est pas disponible à l'état libre : il faut le produire à partir d'une autre ressource énergétique, si possible renouvelable.

✓ Plusieurs dispositifs existent, tant pour sa production que pour son stockage, mais aucun ne concilie faible coût, compacité et durabilité.

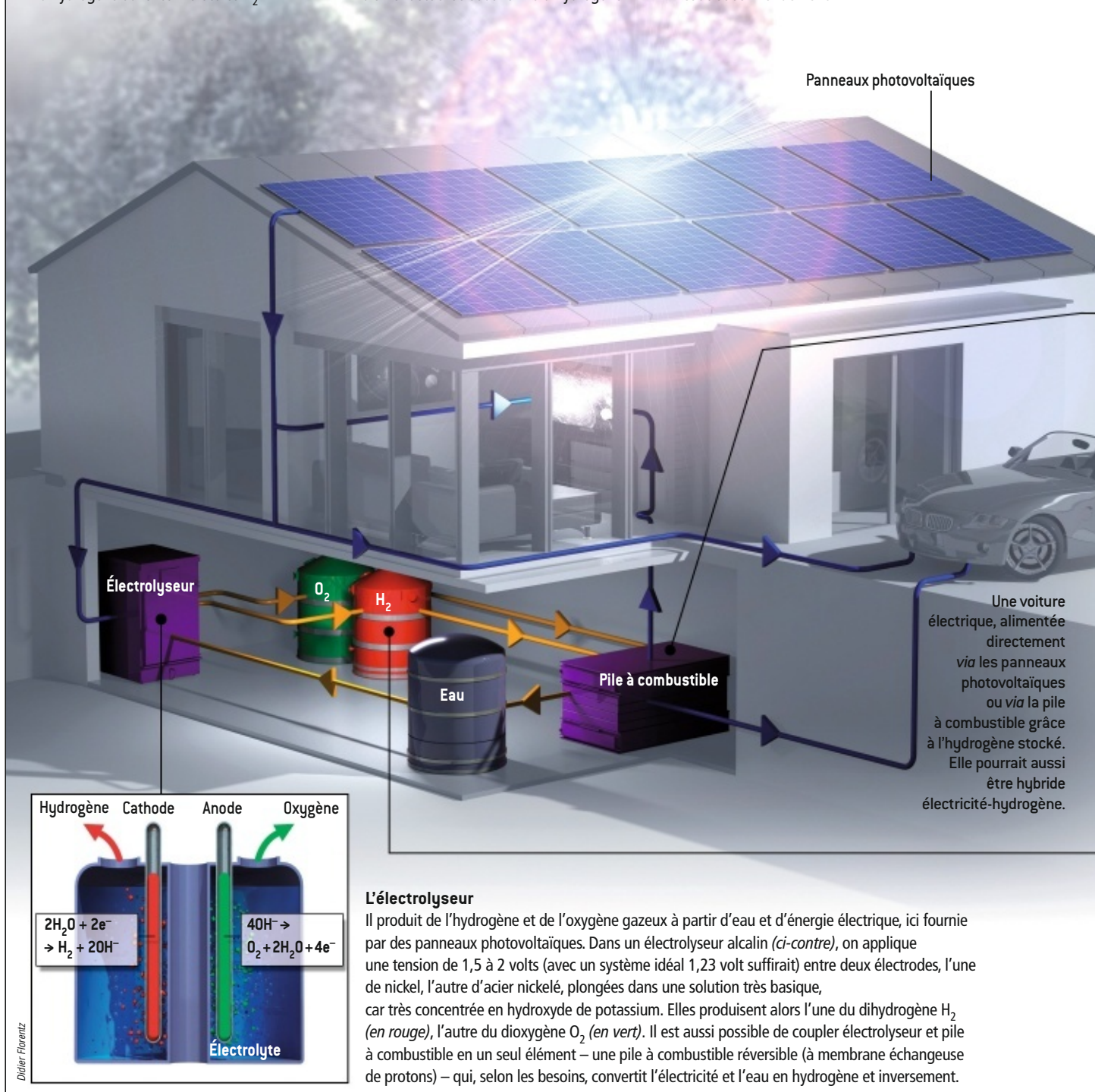
✓ Pour les améliorer, on s'inspire de certaines bactéries, qui produisent de l'hydrogène à l'aide d'enzymes, et l'on envisage un stockage de l'hydrogène sous forme solide.

© Shutterstock/Anna Ormelchenko

Dans les habitations de demain, des panneaux photovoltaïques transformeront la lumière solaire en électricité qui sera directement utilisée pour alimenter les appareils électroménagers et les véhicules électriques. Le surplus d'énergie sera acheminé vers un électrolyseur, où il assurera la transformation d'eau en dihydrogène H_2 et dioxygène O_2 : cette réaction convertit l'énergie électrique en énergie de liaison des atomes d'hydrogène dans les molécules H_2 .

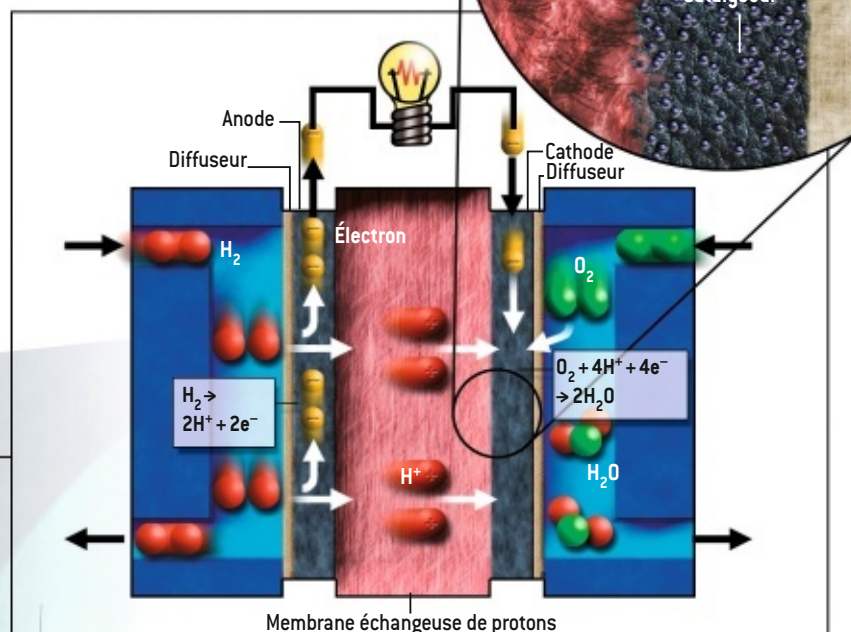
Les deux gaz seront acheminés dans deux réservoirs différents. L'hydrogène pourra être stocké sous forme solide, associé à un métal – un conditionnement qui offre une meilleure compacité qu'un conteneur d'hydrogène gazeux. En l'absence de soleil, l'hydrogène et l'oxygène seront déstockés et acheminés vers une pile à combustible, qui les transformera en eau, libérant, sous forme d'électricité, l'énergie préalablement stockée sous forme d'hydrogène.

Un catalyseur (abondant et bon marché) déposé sur les électrodes facilitera la réaction, augmentant son rendement. Fondée sur la conversion, le stockage et la distribution d'énergies renouvelables, cette filière énergétique n'émet pas de dioxyde de carbone. Les chimistes travaillent à la rendre propre sur toute sa chaîne de production, des panneaux photovoltaïques au catalyseur, tout en améliorant son coût et son rendement.



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.

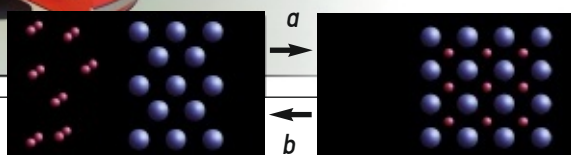
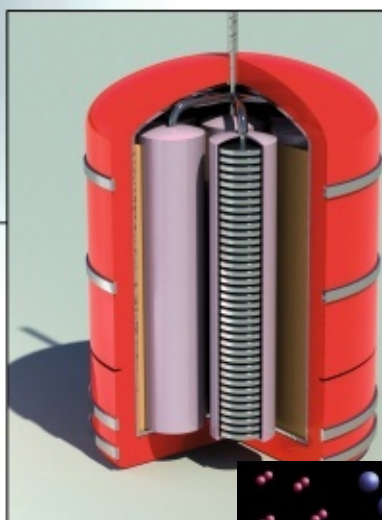


Pile à combustible à membrane échangeuse de protons

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.

Aujourd'hui, une pile à combustible destinée à alimenter les moteurs électriques d'un véhicule de taille moyenne contient entre 20 et 30 grammes de platine, ce qui représenterait, au cours actuel du platine, plus de 20 pour cent du prix de revient d'une pile produite en série. Il n'y aurait d'ailleurs pas assez de métaux nobles sur la planète pour équiper rapidement tous les véhicules de par le monde. On estime à 30 000 tonnes la quantité totale de platine disponible, et on en extrait actuellement 200 tonnes par an, soit de quoi fabriquer les piles à combustible pour équiper dix millions de véhicules. Or la planète compterait plus de 700 millions de véhicules...

Ainsi, avec la technologie actuelle, près d'un tiers des ressources totales de platine seraient mobilisées dans le parc automobile, sans compter les pertes dues à un recyclage incomplet (actuellement seulement 50 pour cent du platine d'une pile à combustible sont récupérés *in fine*).

Pour lever cette difficulté, il faudrait diminuer la quantité de métaux nobles nécessaire au fonctionnement optimal de ces systèmes. L'objectif est de réduire à deux ou trois grammes la quantité de platine nécessaire au fonctionnement d'une pile à combustible alimentant un véhicule (divisant par dix les quantités actuelles) – soit 0,1 gramme de platine par kilowatt d'énergie électrique produite –, et cela, sans diminution ni des performances ni de la durée de vie des dispositifs. Plusieurs voies sont explorées. La première consiste à mieux disposer le catalyseur au sein de la couche réactive. L'idée : ne mettre que ce qu'il faut, là où il faut !

L'essor des nanotechnologies a permis la synthèse de particules de platine parfaitement calibrées à l'échelle nanométrique et, surtout, l'organisation de ces dépôts pour optimiser les surfaces de réaction et ainsi l'activité catalytique. Cependant, l'objectif de 0,1 gramme de platine par kilowatt d'énergie électrique produite semble difficile à atteindre avec le platine seul.

La deuxième solution vise à augmenter les propriétés électrocatalytiques intrinsèques des catalyseurs. En alliant le platine à des métaux de transition moins onéreux (nickel, cobalt, manganèse, fer...) au sein de nanoparticules, on obtient des catalyseurs présentant des performances supérieures à celles du platine seul.

Enfin, un fonctionnement des piles à combustible à plus haute température



1. SUR L'ÎLE D'UTSIRA, EN NORVÈGE, l'électricité qui alimente les habitations est produite par deux éoliennes. Le surplus d'énergie est stocké sous forme de dihydrogène non loin des éoliennes, puis reconverti en électricité lorsque le vent est insuffisant.

(150 °C au lieu des 80 °C actuels) permettrait de réduire la quantité de métaux nobles nécessaires et limiterait leur empoisonnement par certaines impuretés et polluants (CO , NO_x , SO_2 , H_2S , NH_3 ...) présents dans les gaz réactifs (air et hydrogène). Cela nécessite cependant le développement de nouvelles membranes échangeuses de protons fonctionnant sur une plage plus large de températures.

Des catalyseurs inspirés de la nature

Ces trois voies sont explorées en parallèle. Au cours des cinq dernières années, les avancées techniques et les progrès en modélisation de nombreux organismes, notamment le Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (LITEN, CEA Grenoble), ont conduit à une réduction substantielle de la quantité de métaux nobles nécessaires au bon fonctionnement des piles à combustible. On approche aujourd'hui en laboratoire 0,25 gramme de platine par kilowatt d'énergie électrique produite.

Certains micro-organismes ont élaboré des systèmes enzymatiques efficaces pour catalyser les réactions qui ont lieu dans les électrolyseurs ou les piles à combustible. Notamment, ces systèmes n'utilisent que des métaux abondants. Par exemple, pour réduire l'eau en hydrogène ou inversement, les hydrogénases présentes dans de nombreuses bactéries ou micro-algues

utilisent du nickel ou du fer. Ces enzymes constituent ainsi une source d'inspiration pour les chimistes, qui inventent de nouveaux catalyseurs reproduisant certaines propriétés structurales et fonctionnelles des sites actifs de ces enzymes.

Cette approche, dite de chimie bio-inspirée, a été mise en œuvre avec succès par l'équipe de Marc Fontecave et Vincent Artero au Laboratoire de chimie et biologie des métaux (CEA-CNRS-Université J. Fourier, au CEA de Grenoble). Récemment, en collaboration avec Serge Palacin et Bruno Jousset, du Laboratoire de chimie des surfaces et interfaces (CEA de Saclay) et en combinant chimie bio-inspirée et nanosciences, il a été possible d'élaborer, pour la première fois, un matériau sans métal noble qui catalyse aussi bien la production d'hydrogène à partir de l'eau (dans les électrolyseurs) que son oxydation (dans les piles à combustible). Dans ce matériau, un atome de nickel est niché au cœur d'une molécule reproduisant certaines caractéristiques des hydrogénases, laquelle est greffée sur des nanotubes de carbone (*voir la figure 2*). Les nanotubes offrent une surface importante et une bonne conductivité électrique.

Déposé sur une électrode et testé au LITEN (CEA), le matériau obtenu s'est révélé à la fois stable et capable de fonctionner de façon réversible et en milieu acide, ce qui le rend compatible avec les technologies à membranes échangeuses de protons. Jusqu'à présent, seul le platine était connu pour avoir de telles propriétés. Bien sûr, les densités de courant

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).

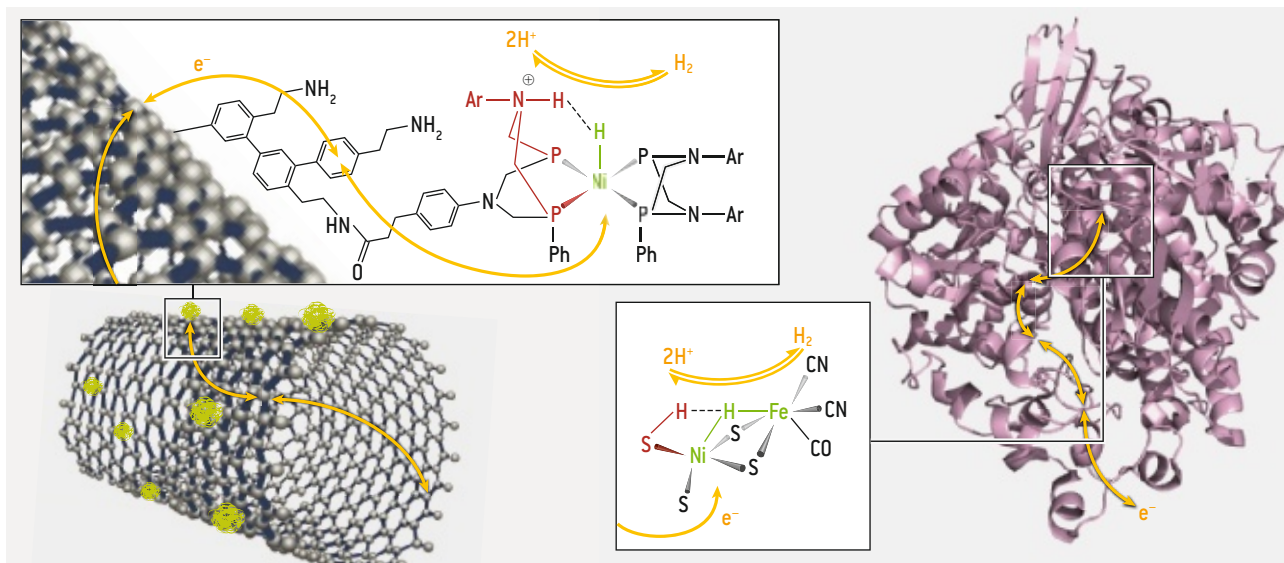
Le conteneur doit alors garantir un stockage efficace et en toute sécurité à de telles pressions et supporter environ 5 000 cycles de remplissage. Or il ne doit pas être en métal, car l'hydrogène diffuse à travers la plupart des parois métalliques, les fragilisant à moyen terme. La solution retenue par 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

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'approvisionnement 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'éclairer 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. ■

La librairie **SCIENCE**

Le savoir scientifique au fil des pages...

NOUVELLE
ÉDITION
ENRICHIE



Les mathématiciens ■ Collectif

« Nul ne peut être mathématicien s'il n'a une âme de poète », disait Sophie Kowalevskaja. D'Archimède à Jacques Hadamard, cet ouvrage dresse les portraits d'une vingtaine de mathématiciens, autant artistes que scientifiques.

280 pages • 24 euros • ISBN 978-2-8424-5109-7



À contre-idées ■ Didier Nordon

Trouver du comique dans une idée sérieuse (et inversement), du local dans une idée générale (et inversement), de l'absurde dans une idée sensée (et inversement)... Au fil de ses billets d'humeur, Didier Nordon s'ingénie à bousculer les idées reçues.

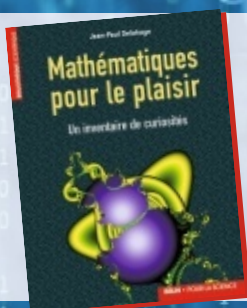
224 pages • 19 euros • ISBN 978-2-8424-5110-3



Au nom de l'infini ■ Jean-Michel Kantor, Loren Graham

Les auteurs retracent un épisode fascinant et dramatique de la création mathématique. Sur les traces de chercheurs russes et français du XX^e siècle, ils nous éclairent sur les liens étroits entre science, religion et politique.

288 pages • 24 euros • ISBN 978-2-8424-5107-3



Mathématiques pour le plaisir ■ Jean-Paul Delahaye

Les mathématiques ne se réduisent pas – heureusement – à ce qu'on nous en apprend à l'école. Partout présentes, elles sont une source de joie et d'épanouissement pour celui qui sait y consacrer un peu d'attention et d'esprit ludique. Dans cet ouvrage, découvrez pourquoi les mathématiques sont faciles et comment s'y adonner est un plaisir.

208 pages • 25 euros • ISBN 978-2-8424-5104-2



La physique buissonnière ■ Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik

Une plante plus rapide qu'une mouche, un tuyau qui parle, une cape qui rend invisible, etc. La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus. Passionnés de physique, les auteurs vous invitent à une promenade sur des chemins de traverse pour comprendre cette physique du quotidien.

160 pages • 22 euros • ISBN 978-2-8424-5105-9

Des livres à découvrir en librairie et sur www.pourlascience.fr

De l'énergie issue de feuilles artificielles

La photosynthèse utilise la lumière du Soleil et l'eau pour produire de l'énergie. Pourrait-on imiter ce procédé naturel pour obtenir de l'hydrogène ?

Antonio Regalado

L'ESSENTIEL

✓ Les plantes produisent leur propre combustible chimique – du sucre – à partir de lumière solaire, d'air et d'eau, et sans émission nocive.

✓ Des chercheurs s'inspirent pour concevoir des feuilles artificielles qui transformeraient la lumière solaire et l'eau en combustible – l'hydrogène.

✓ La principale difficulté est le coût de telles structures. Des feuilles minces et souples fabriquées à l'aide de nanofils de silicium offriraient un compromis intéressant entre coût et rendement.

Les conférences de Nathan Lewis sur la crise énergétique sont à la fois terrifiantes et stimulantes. Pour éviter un réchauffement climatique mondial, déclare ce chimiste de l'Institut de Technologie de Californie (Caltech), il va falloir trouver un moyen de produire une puissance de plus de dix térawatts (10^{12} watts) à partir d'énergie propre, sans carbone, d'ici 2050. Ce niveau correspond à trois fois la demande énergétique moyenne des États-Unis, qui est de 3,2 térawatts. La France, quant à elle, a consommé 3 térawattheures d'énergie primaire en 2009, soit une puissance de 0,3 térawatt, dont elle a produit 20 à 25 pour cent : 88 pour cent sous forme d'énergie nucléaire, 5 pour cent sous forme d'énergie renouvelable – hydraulique, éolien et photovoltaïque –, et le reste sous forme d'énergie fossile – charbon, pétrole, gaz naturel.

Des barrages sur tous les lacs, fleuves et rivières de la planète ne fourniraient que cinq térawatts d'hydroélectricité. L'énergie nucléaire relèverait le défi, mais à condition qu'un nouveau réacteur soit construit tous les deux jours pendant les 50 prochaines années.

Pour N. Lewis, la solution est le Soleil, qui déverse sur Terre plus d'énergie en une heure que ce que l'humanité n'en consomme en une année. Plus précisément, des feuilles artificielles qui, à l'instar des

plantes vertes, capteraient les rayons du Soleil et produiraient, sur-le-champ, du combustible chimique. Nous pourrions alors brûler ce combustible, comme nous brûlons du pétrole ou du gaz naturel, pour faire rouler des automobiles, libérer de la chaleur ou produire de l'électricité, et nous stockerions ce combustible pour l'utiliser la nuit. Quels seraient les avantages de ces feuilles artificielles ? Et d'abord, en quoi consistent-elles ?

Une source d'énergie bio-inspirée ?

Dans plusieurs laboratoires, dont celui de N. Lewis, on travaille sur de telles feuilles prototypes : à peine plus grandes que des puces informatiques, ces feuilles sont conçues pour produire, à partir d'eau, de l'hydrogène (le combustible), au lieu du glucose que créent les végétaux par photosynthèse. Contrairement aux combustibles fossiles, l'hydrogène a une combustion propre puisque la réaction chimique ne libère que de l'eau, de l'oxygène et de l'énergie. D'autres chercheurs étudient des alternatives pour capter l'énergie solaire, telles que des organismes biologiques qui pourraient produire du pétrole, ou des algues optimisées pour produire des lipides – de l'huile – en grande quantité. Cette huile pourra être ensuite utilisée pour produire du diesel, comme on le fait déjà à partir de l'huile de colza. Toutes ces approches visent à transformer la lumière solaire en une énergie chimique stockable, transportable et facilement consommable – un combustible dit solaire. Cependant, pour N. Lewis, la feuille artificielle reste le projet le plus susceptible de



DES FEUILLES ARTIFICIELLES pourraient produire un combustible – de l'hydrogène – pour alimenter les automobiles et les centrales électriques.

fournir les énormes quantités d'énergie requises aujourd'hui.

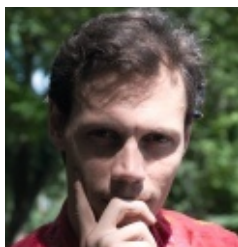
Quelques prototypes de laboratoire ont déjà produit de petites quantités de combustible à partir de la lumière solaire. Néanmoins, cette technologie doit être améliorée pour que ce combustible soit fabriqué à grande échelle et à faible coût. Pour alimenter en énergie les États-Unis, estime N. Lewis, il faudrait fabriquer non pas des dispositifs discrets semblables à des puces, mais des films à combustible solaire fins et souples en quantité, qui sortiraient de leur chaîne de production aussi vite que les journaux quittent les rotatives. Ces films devraient être aussi bon marché que de la moquette et couvrir une surface de la taille de la Caroline du Sud (environ 80 000 kilomètres carrés).

Loin d'être un rêve insensé, la technologie du combustible solaire a progressé par à-coups depuis que le président Jimmy Carter a donné un élan à la recherche de sources d'énergie alternatives lors des chocs pétroliers des années 1970. Actuellement, avec une nouvelle menace de crise énergétique et climatique, le combustible solaire retient l'attention. Selon Stenbjörn Styring, de l'Université d'Uppsala, en Suède, qui développe des systèmes artificiels imitant la photosynthèse, le nombre de consortiums travaillant sur ce sujet est passé de 2 à 29 depuis 2001.

En juillet dernier, le ministère de l'Énergie des États-Unis a alloué une somme de 85 millions d'euros sur cinq ans à une équipe de scientifiques de différents laboratoires, dirigée par N. Lewis, pour développer la technologie du combustible solaire, l'une des trois priorités de recherche sur les nouvelles énergies de cet organisme gouvernemental.

Du combustible à partir des photons

Comment, concrètement, fabriquer du combustible à partir de lumière solaire ? Lors de la photosynthèse, dans les feuilles vertes, l'énergie du rayonnement solaire est utilisée pour réarranger les liaisons chimiques de l'eau et du dioxyde de carbone, produire et stocker du combustible sous forme de glucose. Il s'agit de fabriquer un dispositif qui fonctionne aussi simplement qu'une feuille verte, mais qui produit une autre molécule. La feuille artificielle requiert ainsi deux éléments principaux : un capteur qui transforme l'énergie solaire



Antonio REGALADO est journaliste scientifique.

(les photons) en énergie électrique (les électrons) et un électrolyseur qui utilise l'énergie des électrons pour décomposer l'eau en hydrogène et en oxygène. Un catalyseur – un composé chimique ou un métal – est ajouté pour faciliter cette décomposition. Des cellules photovoltaïques produisent déjà de l'électricité à partir du rayonnement solaire, et des électrolyseurs sont utilisés dans divers procédés déjà commercialisés : le défi consiste à allier les deux pour constituer des films solaires performants et bon marché.

Des prototypes volumineux ont été développés pour montrer comment cette alliance fonctionnerait. Par exemple, des ingénieurs du constructeur automobile japonais *Honda* ont fabriqué une « boîte » plus haute qu'un réfrigérateur, recouverte

à combustible solaire devraient coûter moins de huit euros par mètre carré de surface captant la lumière et transformer dix pour cent de cette énergie en combustible chimique. Un matériau nouveau et adaptable, tel que des films fabriqués à partir de ressources bon marché, est donc nécessaire.

À la recherche du bon catalyseur

Malgré plusieurs décennies de travail, le coût des dispositifs conçus est encore loin des performances requises. En 1998, par exemple, John Turner, du Laboratoire américain de l'énergie renouvelable à Golden, dans le Colorado, a construit un dispositif de la taille d'une boîte d'allumettes qui, lorsqu'il est placé dans l'eau et exposé à la lumière solaire, produit de l'hydrogène et de l'oxygène : il est même 12 fois plus performant qu'une feuille naturelle. Toutefois, le système nécessite des matériaux rares et chers, dont le platine, qui catalyse la réaction. Selon une estimation, la pile à combustible solaire de J. Turner coûte sept euros par centimètre carré ! Un prix accessible pour des applications militaires ou satellitaires, mais inenvisageable pour une utilisation à grande échelle. L'idéal serait de remplacer le platine par des minéraux bon marché tels que le fer, le cobalt ou le manganèse...

Une autre difficulté est due au fait que la réaction de décomposition de l'eau est très corrosive et dégrade les constituants du système. Dans les plantes, cette difficulté est levée par le fait que leur machinerie photosynthétique est en perpétuelle reconstruction. La pile à combustible solaire de J. Turner, elle, ne dure que 20 heures.

Aujourd'hui, le physicien consacre ses recherches à imaginer des catalyseurs toujours un peu moins chers et des capteurs de lumière fonctionnant toujours un peu plus longtemps. Mais ces recherches sont laborieuses.

D'autres équipes de chercheurs, dont celle dirigée par Daniel Nocera, de l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT), sont à la recherche de catalyseurs. En 2008, D. Nocera et un collègue ont découvert une combinaison bon marché de phosphate et de cobalt qui catalyse la production d'oxygène – une étape nécessaire de la réaction de décomposition de l'eau.

Même si ce dispositif prototype n'était qu'une pièce du puzzle – il reste encore à

de cellules photovoltaïques. À l'intérieur, un électrolyseur utilise l'électricité solaire pour décomposer les molécules d'eau. Cette boîte libère l'oxygène dans l'air ambiant, et compresse et stocke l'hydrogène restant ; *Honda* aimerait utiliser cet hydrogène pour recharger des voitures à piles à combustible.

Sur le principe, ce système a toutes les qualités requises pour résoudre le problème du réchauffement climatique mondial : seules la lumière solaire et l'eau sont nécessaires pour produire de l'énergie ; le sous-produit de la réaction est l'oxygène, et le produit de la combustion de l'hydrogène dans une pile à combustible est l'eau (voir l'article *L'hydrogène, une énergie propre pour demain ?*, page 26). En pratique, la situation est plus compliquée : les cellules solaires du commerce contiennent des cristaux de silicium, qui sont très coûteux. En outre, les électrolyseurs sont abondamment dopés au platine ; or ce métal noble, à ce jour le meilleur matériau pour catalyser la réaction de décomposition de l'eau, coûte 40 euros le gramme !

Par conséquent, la station d'hydrogène solaire de la Société *Honda* ne pourra jamais alimenter le monde en énergie. N. Lewis a calculé que, pour satisfaire la demande mondiale en énergie, les futurs dispositifs

POUR SATISFAIRE LA DEMANDE MONDIALE EN ÉNERGIE,
les futurs dispositifs à combustible solaire devront
coûter moins de huit euros par mètre carré
et transformer dix pour cent de l'énergie solaire
captée en combustible.

✓ BIBLIOGRAPHIE

S. W. Boettcher *et al.*,
Energy-conversion properties
of vapor-liquid-solid-grown silicon
wire-array photocathodes,
Science, vol. 327, pp. 185-187, 2010.

H. B. Gray, *Powering the planet
with solar fuel*, *Nature Chemistry*,
vol. 1, p. 7, 2009.

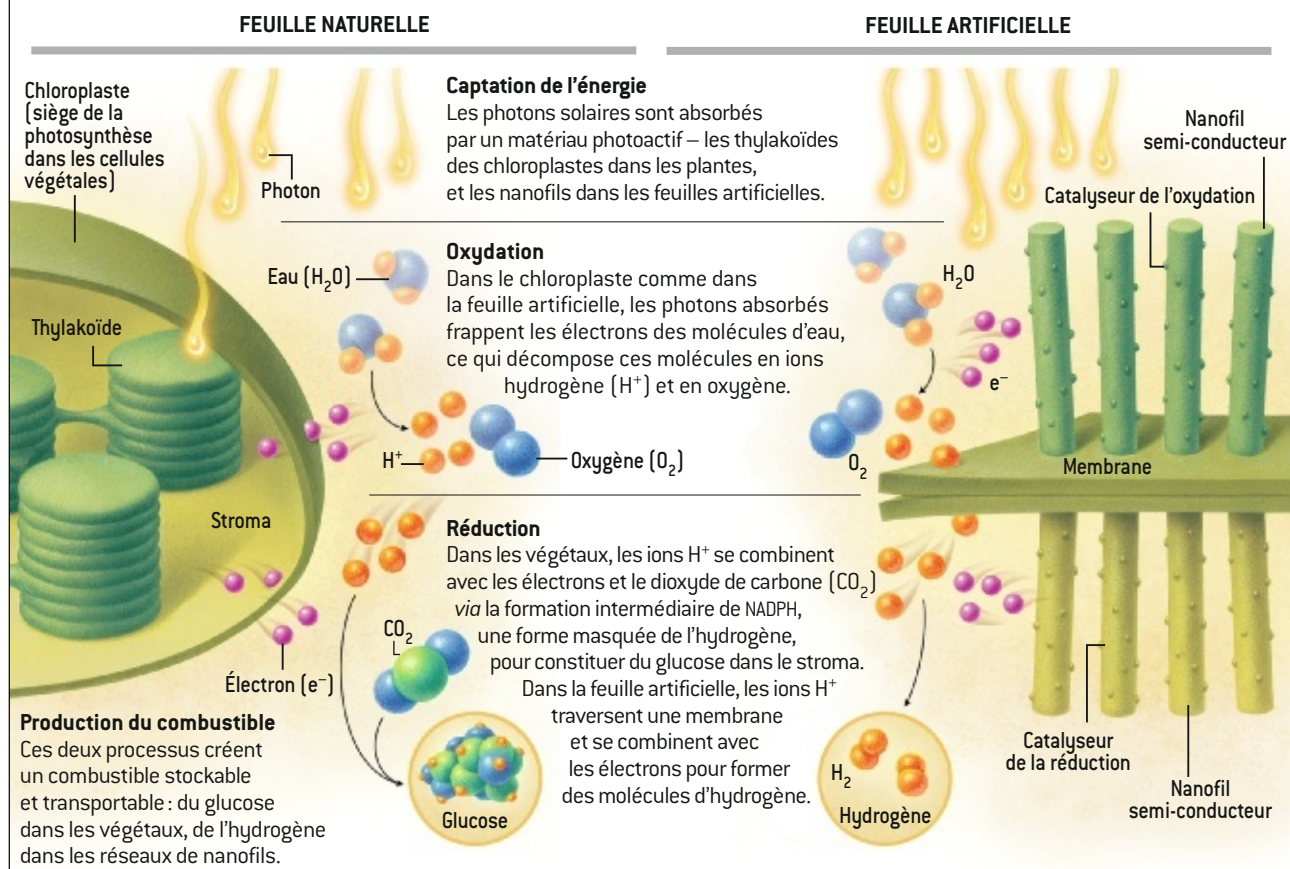
M. W. Kanan *et al.*, *In situ* formation
of an oxygen-evolving catalyst
in neutral water containing
phosphate and Co^{2+} , *Science*,
vol. 321, pp. 1072-1075, 2008.

N. S. Lewis et D. G. Nocera,
*Powering the planet : chemical
challenges in solar energy
utilization*, *PNAS*, vol. 103, n° 43,
pp. 15729-15735, 2006.

DES NANOFILS POUR IMITER LA PHOTOSYNTHÈSE NATURELLE

Les végétaux utilisent l'énergie solaire pour transformer le dioxyde de carbone et l'eau en glucose – un combustible chimique qu'ils consomment ou stockent (à gauche). Des chercheurs imaginent des feuilles artificielles qui captent la lumière

solaire pour décomposer les molécules d'eau en hydrogène et oxygène. L'équipe de Nathan Lewis, à l'Institut de technologie de Californie, a conçu une feuille couverte de nanofils en silicium qui pourrait produire de l'hydrogène (à droite).



trouver un meilleur catalyseur pour produire l'hydrogène –, le MIT l'a présenté comme un grand bond vers la photosynthèse artificielle. D. Nocera a même prédit qu'il serait bientôt utilisé dans les voitures à hydrogène. Ce n'est pas l'avis de certains experts, qui pensent que ce type de recherche demandera encore plusieurs décennies. D'autres sont plus optimistes: le Département américain de l'énergie et la Société *Polaris Venture Partners* financent les travaux en cours de D. Nocera dans la Société *Sun Catalytix*, à Cambridge, dans le Massachusetts.

Pendant ce temps, au Caltech, N. Lewis travaille sur la première étape de tout dispositif à combustible solaire: la captation des photons du Soleil et leur transformation en électricité. L'idée était de construire un système bien meilleur marché que les piles solaires à silicium cristallin actuellement utilisées. Il a conçu et fabriqué un capteur constitué de nanofils de sili-

cium enrobés dans un film plastique transparent – une membrane échangeuse de protons – qui, à grande échelle, pourrait être «roulé et déroulé comme une moquette» (voir l'encadré ci-dessus). Ses nanofils transforment la lumière en énergie électrique avec un rendement de sept pour cent. C'est peu comparé aux 20 pour cent atteints par les piles solaires commercialisées. Mais si la production en quantité de ce matériau devient suffisamment bon marché, un rendement inférieur serait acceptable.

Quel combustible pour demain ?

Les chercheurs débattent aussi sur le choix du combustible à fabriquer: et si l'hydrogène n'était pas le meilleur? Pour les équipes travaillant sur des organismes biologiques qui produisent des biocombustibles liquides, ces derniers sont plus faciles

à stocker et à transporter que l'hydrogène. Mais ce gaz s'adapte à divers usages: il peut être utilisé dans des voitures à piles à combustible, brûlé dans des centrales pour produire de l'électricité, et même servir à produire de l'essence synthétique. La clef du problème reste cependant de fabriquer un combustible chimique à fort rendement énergétique, avec le minimum d'émission de carbone.

La photosynthèse prouve que la lumière solaire peut être transformée en combustible avec seulement quelques éléments courants. L'humanité réussira-t-elle à imiter ce processus? La réponse n'est pas claire. Quoi qu'il en soit, la société – y compris les responsables politiques, les organismes de financement gouvernementaux et même les scientifiques – n'a pas encore saisi l'ampleur du problème de l'énergie et la nécessité de trouver des solutions innovantes. Toutes les pistes prometteuses sont à explorer...

Neurosciences

Les crises de la conscience

En observant comment la conscience est altérée lors de certaines crises d'épilepsie, les neuroscientifiques comprennent mieux son fonctionnement normal et découvrent des réseaux cérébraux impliqués.

Don Tucker
et Mark Holmes

Chaque seconde, notre cerveau reçoit des informations du monde qui nous entoure et nous en prenons conscience : nous savons ce que nous faisons et ce que nous avons fait. L'éveil est nécessaire à la conscience qui est un concept à multiples facettes présentant deux composantes majeures : la conscience de l'environnement et la conscience de soi. En outre, certains scientifiques proposent que pour être consciente, une expérience nécessite une diffusion globale de l'information dans le cerveau (de vastes réseaux de neurones y participent). Comment avons-nous conscience des phénomènes externes et internes à notre organisme, voire de notre existence ? Quels sont les supports neuronaux de la conscience ?

Si l'étude de la conscience est complexe et difficile à mettre en œuvre (*voir l'encadré page 46*), les neuroscientifiques cherchent quels événements neuronaux sont à la fois nécessaires et suffisants pour une expérience consciente. Pour ce faire, ils observent ce qui se passe dans le cerveau dans des situations conscientes et les comparent à des situations non conscientes, ou

