

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'en 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

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.

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

✓ 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.

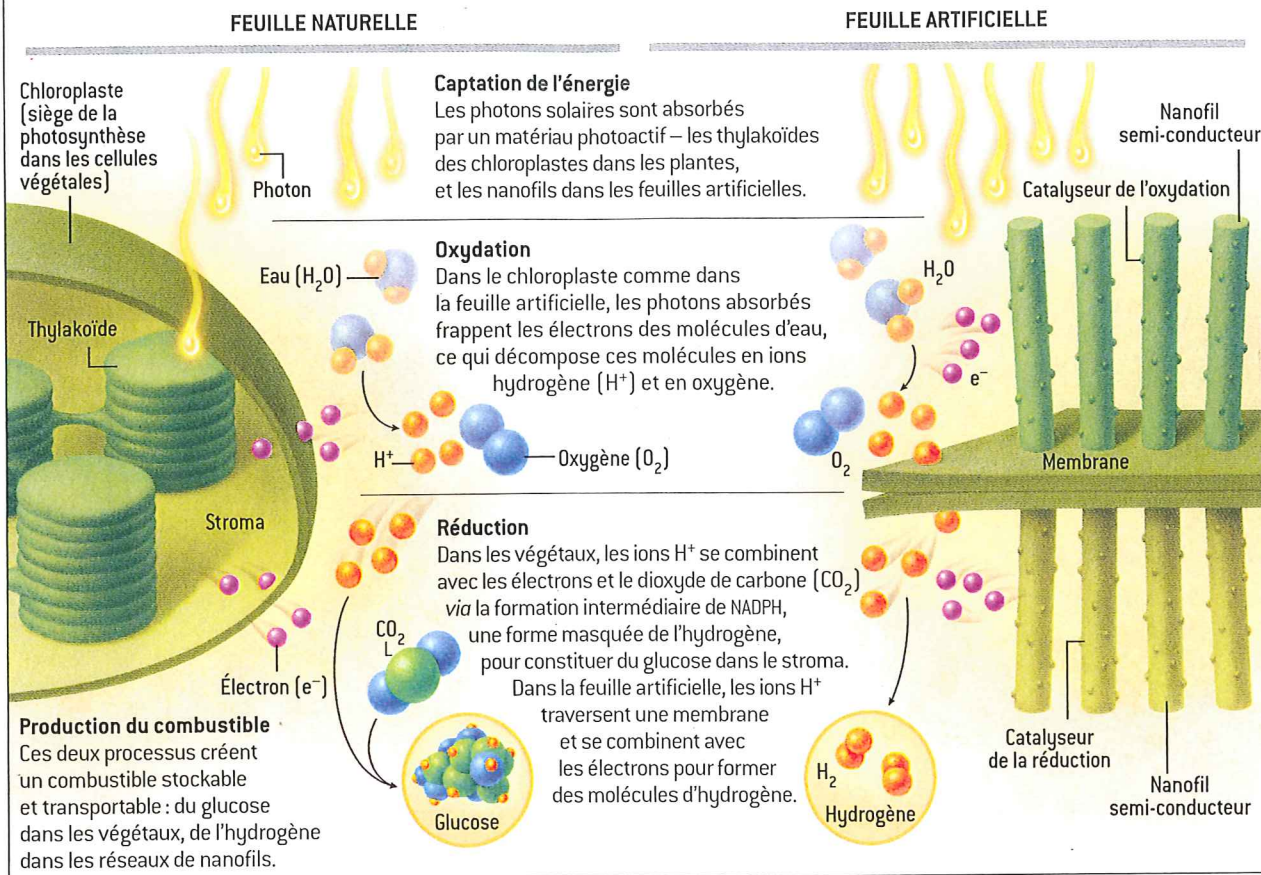
M. W. Kanan *et al.*, *In situ* formation of an oxygen-evolving catalyst in neutral water containing phosphate and Co^{2+} , *Science*, vol. 321, pp. 1072-1075, 2008.

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 enchâssés 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 biocarburants 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...