



ÉNERGIES

comment les stocker ?

Pour assurer son avenir et celui de la planète, l'humanité doit puiser son énergie à d'autres puits que ceux de pétrole. Mais cette nécessaire transition vers les sources renouvelables, qui fait actuellement l'objet d'un débat national, ne s'opérera qu'à une condition : parvenir à stocker l'énergie. En effet, s'il est aujourd'hui plus ou moins simple de produire de l'électricité, de la chaleur et même de l'hydrogène, stocker durablement ces trois vecteurs d'énergie reste une véritable gageure scientifique et technologique. Un défi que les scientifiques du CNRS relèvent chaque jour.

UNE ENQUÊTE DE JULIEN BOURDET, JEAN-FRANÇOIS HAÏT ET FABRICE DEMARTHON

Des batteries gonflées à bloc **22** |

Maîtriser le chaud et le froid **25** |

De l'hydrogène à la pompe **27** |

À l'horizon 2020, la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie en France devra atteindre 23%, contre 9,2% en 2011¹. Ce développement massif des énergies issues du soleil, du vent, de l'eau ou de la biomasse ne se fera qu'à une condition : la mise en place de solutions de stockage efficaces. « Par définition, les énergies

renouvelables sont intermittentes, car sujettes aux aléas du climat, explique Pascal Brault, du Groupe de recherches sur l'énergétique des milieux ionisés (Gremi)², coanimateur de la cellule Énergie du CNRS. *Il faut donc pouvoir stocker l'énergie produite à un moment donné et qui n'est pas immédiatement consommée (lors des périodes de fort ensoleillement par exemple, dans le cas du solaire), afin de la restituer lorsque le besoin se présente.* » Or aujourd'hui, le stockage de l'énergie, qu'elle soit sous forme d'électricité, de chaleur ou de gaz comme l'hydrogène, constitue un verrou scientifique et technologique important à l'introduction massive des énergies renouvelables dans le mix énergétique. « Cet obstacle existe aussi bien pour le stockage stationnaire à grande échelle que pour les applications nomades ou les

transports », rappelle Alain Dollet, du laboratoire Procédés, matériaux et énergie solaire (Promes)³, coanimateur de la cellule Énergie.

C'est l'électricité qui constitue aujourd'hui le vecteur énergétique le plus difficile à gérer. « À part les technologies





magnétiques qui présentent des limitations importantes, aucun système ne peut stocker le courant électrique », précise Pascal Brault. À grande échelle, l'une des techniques les plus répandues consiste à utiliser l'excès de production électrique pour pomper l'eau d'un lac ou d'une rivière vers un réservoir (un lac de retenue par exemple) situé à une altitude plus élevée. Grâce à ces stations de transfert d'énergie par pompage (STEP), l'électricité est temporairement stockée sous forme d'énergie potentielle. Pour la récupérer ensuite, il suffit de laisser faire la gravité : ouvrir les vannes du réservoir et laisser l'eau s'écouler à travers des turbines qui produiront à nouveau de l'électricité. Il existe actuellement six grandes STEP en activité en France, produisant une puissance installée d'environ 5 gigawatts (5 GW), mais on pourra difficilement augmenter leur nombre, pour des raisons géographiques.

Suivant la même logique, l'eau peut être remplacée par l'air (qui est alors stocké dans le sous-sol) : l'électricité produite à un instant donné permet de comprimer l'air, qui pourra être détendu ultérieurement dans des turbines afin de restituer l'électricité quand on le souhaitera ; c'est la technique CAES (*compressed air energy storage*). « Pour le stockage à grande échelle, un autre moyen consiste à utiliser des batteries géantes ou des fermes de batteries, donc à transformer l'énergie électrique en énergie chimique et vice versa », ajoute Alain Dollet. La Réunion

03 Le barrage et le lac du Verney, en Savoie, appartiennent à une station de transfert d'énergie par pompage (STEP), permettant de stocker de l'énergie électrique.

ÉNERGIE POTENTIELLE
Énergie interne d'un système soumis à une force (gravitation, force mécanique, moléculaire...)



dispose depuis 2010 d'un tel système : une batterie sodium-soufre de haute capacité capable de restituer 1 MW pendant sept heures. Mais l'essor des technologies de stockage électrochimique est entravé par plusieurs problèmes, notamment celui des matériaux utilisés : leur durabilité, leur recyclage... « Il en va de même dans les transports, où l'enjeu consiste à concevoir des batteries puissantes et légères », indique Pascal Brault.

DE GROS VEROUS TECHNIQUES

De leur côté, la chaleur et l'hydrogène sont des vecteurs d'énergie un peu plus simples à stocker que l'électricité. Les recherches en cours se concentrent sur la mise au point de matériaux capables d'emmagasiner la chaleur à haute température (céramiques, déchets amiantés vitrifiés...) ou de fixer l'hydrogène (hydrures...).

Toutefois, « il subsiste de nombreux verrous scientifiques et techniques au stockage de l'énergie. Certaines technologies sont relativement matures, mais d'autres sont encore balbutiantes », notent Alain Dollet et Pascal Brault. Le CNRS s'emploie à lever ces blocages et transfère son savoir-faire vers l'industrie. « Notre organisme, qui est l'un des quatre membres fondateurs de l'Ancre⁴, est un acteur majeur de la recherche dans le do-

main du stockage de l'énergie, souligne Alain Dollet. L'énergie offre en effet un champ d'investigation fortement pluridisciplinaire qui fait appel aux sciences de l'ingénieur, à la chimie, à la physique, mais aussi aux sciences du vivant, aux sciences humaines et sociales... Fort de ses dix instituts, le CNRS réunit toutes ces compétences et son spectre d'intervention va de la recherche fondamentale à l'innovation. »

La mission pour l'interdisciplinarité du CNRS vient d'ailleurs de lancer un grand défi sur le thème de la « **Transition énergétique** » qui vise à explorer de nouvelles voies de recherche en intégrant systématiquement les conséquences sociales, les impacts environnementaux et la disponibilité des ressources⁵. Et la problématique du stockage sera évidemment centrale dans ce défi. **F. D.**

TRANSITION ÉNERGÉTIQUE
Passage d'un modèle énergétique fondé sur la consommation abondante d'énergies fossiles à un modèle plus sobre et plus écologique.

L'exploitation massive des énergies renouvelables, issues des hydroliennes (01) ou des éoliennes et des panneaux solaires (02) ne se fera qu'en levant le verrou du stockage.



© EYEMATRIX/FOTOLIA

1. Source : Service de l'observation et des statistiques, *Bilan énergétique de la France pour 2011*.
2. Unité CNRS/Université d'Orléans.
3. Unité CNRS/Université de Perpignan-Via-Domitia.
4. Ancre : Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (www.allianceenergie.fr), fondée par le CEA, l'Ifpen, le CNRS et la CPU.
5. www.cnrs.fr/mi/spip.php?article247.

CONTACTS :

Pascal Brault
> pascal.brault@univ-orleans.fr
Alain Dollet
> dollet@univ-perp.fr



04

04 Production de batteries lithium-ion pour l'automobile dans l'usine Johnson Controls-Saft de Nersac (France).

© P. PESALLA

Des batteries gonflées à bloc

Environ 160 kilomètres, c'est l'autonomie actuelle maximale d'un véhicule électrique. Et 1 %, c'est la part de l'électricité stockée dans les réseaux de distribution. Ces deux chiffres résumant, à eux seuls, l'énorme défi du stockage de l'électricité. Comment augmenter l'autonomie des véhicules électriques afin qu'ils puissent effectuer des trajets autoroutiers sans recharger ? Comment stocker davantage la production des sources d'énergie électrique conventionnelles, mais aussi renouvelables (éolien, solaire) par nature intermittentes, pour la réinjecter dans

DENSITÉ D'ÉNERGIE
Quantité d'énergie délivrée par unité de volume.

le réseau au moment des pics de consommation ? Face à ce défi, les batteries d'aujourd'hui ne sont pas assez performantes. « *L'enjeu est d'augmenter leur densité d'énergie, en garantissant leur sécurité de fonctionnement et en faisant baisser leur coût, le tout dans une optique de développement durable* », explique Jean-Marie Tarascon, du Laboratoire de réactivité et chimie des solides (LRCS)¹, à Amiens. Une équation qui semble impossible à résoudre, mais pour laquelle se mobilisent les chercheurs des différents laboratoires qui constituent le réseau RS2E (Réseau sur le stockage électrochimique de l'énergie), lancé en 2010, et visant à fédérer tous les acteurs du domaine dont des industriels (lire encadré).

LA PISTE DES MATÉRIAUX

Les batteries actuellement utilisées pour les véhicules électriques sont les lithium-ion (qui contiennent du lithium sous forme ionisée). Pour les améliorer, deux

voies de recherche sont suivies au sein du RS2E. La première consiste à jouer sur le matériau de la batterie lui-même. Soit en augmentant la capacité de matériaux existants, soit en concevant de nouveaux matériaux, comme les fluoro-sulfates et hydroxosulfates, qui rendent les liaisons chimiques plus aptes à former des ions, ce qui permet d'augmenter la densité d'énergie.

Certains matériaux étudiés, notamment au LRCS et à l'Institut des matériaux de Nantes, sont aussi plus « verts » : fabriqués à l'aide d'enzymes ou de bactéries, ou issus de la biomasse... ce qui permettrait de les recycler entièrement.

Deuxième voie suivie pour augmenter les performances : explorer des technologies alternatives. C'est le cas de la batterie lithium-air, dans laquelle l'oxygène de l'air réagit avec le lithium. « *En théorie très efficace, cette solution pose des problèmes complexes, comme la recherche de meilleurs catalyseurs, indispensables pour faire fonctionner l'électrode à oxygène. Elle n'est donc pas pour demain* », prévient Jean-Marie Tarascon.

Ces préoccupations ne valent pas seulement pour les batteries de voiture. Pour

LE RÉSEAU FRANÇAIS SUR LE STOCKAGE ÉLECTROCHIMIQUE

Le RS2E (Réseau de recherche et technologie sur le stockage électrochimique de l'énergie) comprend quatorze laboratoires (dont dix forment le laboratoire d'excellence Store-Ex), trois EPIC (CEA, Ineris, IFP Énergies nouvelles), et des industriels (Renault, PSA, EADS-Astrium, Rhodia, Saft, EDF, Saint-Gobain, Arkema, Solvionic, Acuwatt).

EN LIGNE :

> www.energie-rs2e.com

LE STOCKAGE MAGNÉTIQUE

Fournir une puissance de 100 mégawatts par kilo, soit l'équivalent de dix TGV lancés à pleine vitesse... mais pendant quelques millisecondes seulement : telle est la mission dévolue aux systèmes de stockage appelés SMES (*superconducting magnetic energy storage*).

Leur principe est simple : l'énergie est stockée sous forme d'un champ magnétique généré par la circulation d'un courant électrique dans une bobine court-circuitée. Afin que cette énergie ne se dissipe pas, la bobine est réalisée en matériau supraconducteur. On décharge la bobine quand on le souhaite en la connectant au réseau.

Cependant, pour être opérationnel, le SMES doit être refroidi à environ 4 kelvins (-269 °C) avec les supraconducteurs conventionnels. Cette technologie met donc en jeu des dispositifs volumineux et coûteux, ce qui limite sa diffusion. À Grenoble, l'Institut Néel et le G2Elab conçoivent des SMES fonctionnant

à des températures plus élevées (20 kelvins), ce qui allège beaucoup le dispositif de refroidissement et améliore nettement les performances.

À la clé, des applications qui intéressent les domaines civil et militaire. Ainsi, un lanceur électromagnétique serait capable de propulser des charges à une vitesse bien supérieure à celle qu'autorise la propulsion chimique classique. Cela pourrait être utile pour placer un microsatellite sur orbite basse, aussi bien que pour lancer un obus.

Enfin, cette recherche vise, plus généralement, à concevoir des aimants supraconducteurs beaucoup plus performants et durables.

CONTACT :
Pascal Tixador
> pascal.tixador@g2Elab.grenoble-inp.fr



05 Bobine supraconductrice qui permet de stocker l'énergie sous forme d'un champ magnétique.

certain cas ces couches sont bénéfiques, dans d'autres elles dégradent les performances. En utilisant des méthodes de pointe comme la spectroscopie photo-électronique à rayonnement X (XPS), le laboratoire palois accède à une connaissance fine des espèces chimiques impliquées dans le phénomène, essentielle pour mieux comprendre les mécanismes de vieillissement afin de les retarder.

Autre problème posé aux développeurs : les utilisateurs finaux peuvent avoir besoin de systèmes capables de délivrer une puissance importante pendant quelques secondes seulement. Par exemple : pour l'ouverture d'urgence des portes de l'Airbus A380, pour redémarrer les véhicules dotés d'un système « stop and start » qui coupe le moteur au feu rouge, ou pour actionner une visseuse-dévisseuse sans fil. Or, les batteries détestent être sollicitées de manière intermittente ou intense.

La solution ? Les supercondensateurs. Ces dispositifs (qui pèsent de quelques grammes à plusieurs centaines de kilos) consistent en deux électrodes de carbone poreux, séparées par une membrane et baignant dans un liquide (l'électrolyte) contenant des ions positifs et négatifs. Ces ions s'accumulent de part et d'autre dans les pores du carbone, ce qui crée une différence de potentiel donc un courant électrique. « Comme pour les batteries, l'enjeu est d'augmenter la densité d'énergie des supercondensateurs. Si on y parvient, ils pourraient par exemple, dans les véhicules hybrides et électriques, prendre le relais de la batterie pour récupérer l'énergie issue du freinage ou fournir l'énergie nécessaire

le « stockage de masse », celui destiné à alimenter le réseau électrique, il existe à l'heure actuelle d'énormes batteries au sodium-soufre. Mais elles fonctionnent à 300 °C, ce qui pose des problèmes de sécurité. C'est pourquoi le RS2E explore activement la piste de batteries au sodium-ion, qui fonctionnent à température ambiante, et surtout la technologie dite de *redox flow* (voir schéma). Dans celle-ci, les électrodes sont formées par deux liquides en mouvement, séparés par une membrane à travers laquelle se produit le transport d'ions. Cette méthode est peu coûteuse, mais elle ne délivre pas une énergie suffisante. Les chercheurs du RS2E planchent sur la formulation et les propriétés

d'« encres » (des liquides contenant non plus des ions libres mais des particules en suspension), qui permettraient une plus grande concentration en ions, donc une plus grande densité d'énergie.

CONSERVER LA PUISSANCE

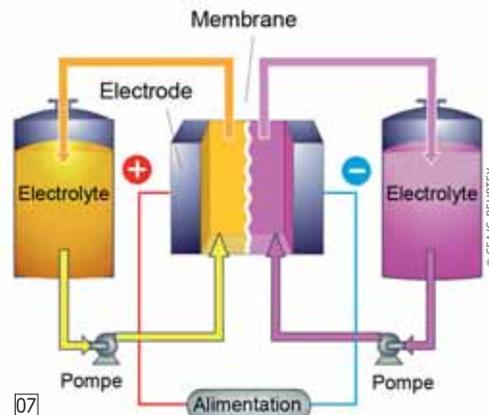
Un autre problème posé par les batteries, notamment lithium-ion, est leur vieillissement, qui se traduit par des pertes de capacité et de puissance. « C'est le résultat de réactions chimiques aux interfaces entre les électrodes et l'électrolyte », explique Danielle Gonbeau, de l'Institut des sciences analytiques et de physicochimie pour l'environnement et les matériaux (Iprem)², à Pau. Des couches de quelques nanomètres, composées de molécules issues de la dégradation des solvants et des sels contenus dans l'électrolyte de la batterie, se forment aux interfaces. Si dans

06 Banc de test des matériaux de stockage électrochimique au Laboratoire de réactivité et chimie des solides (LRCS), à Amiens.

07 Principe de fonctionnement d'une batterie à *redox flow*. Les électrodes sont formées de liquides en mouvement, les électrolytes, séparés par une membrane perméable aux ions.



© C. FRESILLON/CNRS PHOTO THÉRIE



© CEVA/C. BEURTEY

MICRO TAILLE, MAXI PERFORMANCES

L'électronique d'aujourd'hui est « nomade » : elle repose sur de minuscules capteurs communicants pouvant enregistrer quantité de paramètres, à l'image des puces RFID (identification par radiofréquence) utilisées pour marquer toutes sortes d'objets.

Mais comment alimenter ces microdispositifs ?

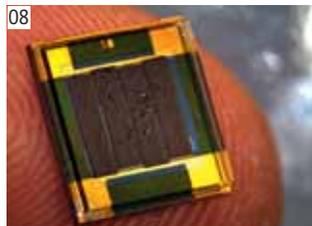
La solution, c'est tout d'abord de récupérer de l'énergie dans l'environnement ambiant :

solaire, vibrations mécaniques ou différentiels de température peuvent être utilisés pour fabriquer de l'électricité. Mais cette énergie est intermittente. Il faut donc la stocker.

C'est dans ce but qu'une équipe du Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS) de Toulouse¹ a conçu un « micro-supercondensateur », en déposant sur une puce en silicium des structures en or, ensuite recouvertes de matière active et d'un électrolyte (solution conductrice). Le matériau usuel des supercondensateurs du commerce, le charbon actif, est ici remplacé par des nanoparticules de carbone constituées de couches concentriques de graphite produites à l'université Drexel de Philadelphie (États-Unis). Les ions de l'électrolyte s'y adsorbent beaucoup plus facilement. Le dispositif, testé au Centre interuniversitaire de recherche et d'ingénierie des matériaux à Toulouse, a alors montré un temps de charge et de décharge 50 fois plus rapide que celui des supercondensateurs conventionnels, et une densité d'énergie multipliée par 10. De telles performances permettront d'alimenter des capteurs devant fournir très régulièrement et rapidement des données.

1. Unité CNRS/Université Paul-Sabatier-Toulouse-III/Insa Toulouse/INP Toulouse.

CONTACT :
Magali Brunet
> mbrunet@laas.fr



08 Ce micro-supercondensateur encapsulé est un dispositif très prometteur.

à une accélération. Cela permettrait de prolonger la durée de vie de la batterie », explique Patrice Simon, du Centre interuniversitaire de recherche et d'ingénierie des matériaux (Cirimat), à Toulouse³.

LES MYSTÈRES DE LA MATIÈRE

Mais, pour les supercondensateurs, là encore, tout le problème réside au cœur du matériau employé. En effet, le procédé actuellement utilisé pour fabriquer le carbone poreux génère des pores de taille variable, supérieurs à 50 nanomètres pour les plus grands et mesurant moins de 2 nanomètres pour les plus petits. Allant à l'encontre du dogme en vigueur qui voulait que les pores de taille moyenne (2 à 5 nanomètres) soient les plus adaptés pour recevoir des ions, les chercheurs du Cirimat ont entrepris, avec l'aide d'un chercheur américain spécialiste des céramiques, de synthétiser un carbone poreux dont tous les pores ont une taille de moins de 2 nanomètres parfaitement contrôlée. Surprise : l'énergie délivrée par le nouveau matériau est deux fois supérieure à toutes les données de la littérature. Il faut désormais déterminer les mécanismes en jeu, notamment la manière dont les ions pénètrent dans des pores aussi petits.

Ce travail a été mené conjointement avec les laboratoires du groupe « stockage capacitif »⁴ du RS2E, tandis que la modélisation des pores de ce carbone est assurée par le laboratoire Physicochimie des

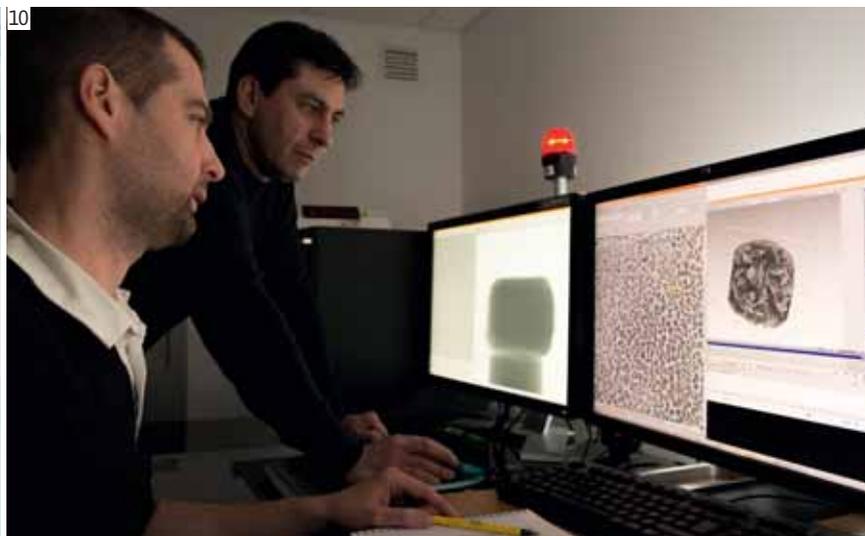
électrolytes, colloïdes et sciences analytiques (Pecsa)⁵, à Paris, et l'IFP Énergies nouvelles (ex-Institut français du pétrole). Car la force du réseau réside dans la multiplicité des compétences. « Sur les thématiques porteuses, comme les batteries sodium-ion ou redox flow, RS2E nous permet de réaliser un continuum entre les chercheurs CNRS, les EPIC et les utilisateurs industriels, avec des thèses et post-doctorats en cotutelle », souligne Jean-Marie Tarascon. Anne de Guibert, directrice de la recherche du fabricant français de batteries Saft, confirme : « À travers RS2E, nous soutenons cette recherche sur les nouveaux matériaux qui nous intéresse sur le long terme ». Une recherche de qualité qui constitue l'atout de la France, alors que les pays asiatiques dominent aujourd'hui le marché des batteries.

J.-F. H.

1. Unité CNRS/Université de Picardie-Jules-Verne.
2. Unité CNRS/Université de Pau et des Pays de l'Adour.
3. Unité CNRS/Université Paul-Sabatier-Toulouse-III/INP Toulouse.
4. IMN (Nantes), ICG-AIME (Montpellier), Cirimat (Toulouse), ICMCB (Bordeaux), IS2M (Mulhouse), LCMCP (Chimie Paris Tech).
5. Unité CNRS/Université Pierre-et-Marie-Curie/ESPCI ParisTech.

CONTACTS :

Jean-Marie Tarascon
> jean-marie.tarascon@u-picardie.fr
Danielle Gonbeau
> danielle.gonbeau@univ-pau.fr
Patrice Simon
> simon@chimie.ups-tlse.fr



09 Réalisation d'un film de poudre de carbone poreux qui servira d'électrode dans les supercondensateurs mis au point au Cirimat.
10 Les chercheurs étudient l'organisation structurale des matériaux poreux à base de carbone.



11

Maîtriser le chaud et le froid

Pour faire bouillir de l'eau, les premiers hommes ont mis au point une technique imparable : chauffer une pierre dans le feu, puis la plonger dans l'eau contenue dans une peau, et répéter l'opération jusqu'à ébullition. Le principe du stockage de la chaleur venait d'être inventé. Une idée qu'on retrouve aujourd'hui dans nos ballons d'eau chaude ou tout simplement dans une bouillotte et qui nous permet de disposer plus longtemps d'une source de chaleur et de l'utiliser en fonction de nos besoins.

Avec l'intérêt porté aux énergies renouvelables, intermittentes par nature, ce principe est plus que jamais remis au goût du jour. Par exemple, dans les centrales solaires à concentration, en plein développement. Grâce au stockage de la chaleur, celles-ci peuvent produire de l'électricité de jour comme de nuit. Le principe est simple. Dans ces installations, la lumière du soleil, concentrée par une multitude de miroirs, permet de chauffer à

11 Les centrales solaires à concentration (ici l'usine Gemasolar, en Espagne) focalisent la chaleur du soleil en un point situé au sommet d'une tour.

12 Ces sels (nitrates de potassium et de sodium), ici sous forme solide, sont liquéfiés puis stockés dans la centrale solaire. Ils permettent de faire tourner la turbine de Gemasolar pendant quinze heures après le coucher du soleil.

plus de 400 °C un fluide, constitué la plupart du temps de sels de nitrate fondus (qui ont l'avantage de rester liquides même à haute température). Ce fluide circule alors jusqu'à un générateur de vapeur d'eau qui alimente une turbine afin de produire de l'électricité. À ce stade, le stockage thermique joue un rôle clé.

RESTITUER LA CHALEUR CAPTÉE

En effet, une partie du fluide utilisé dans la centrale sert, de son côté, à chauffer un immense réservoir, contenant lui aussi des sels fondus. Ces sels, durant la nuit, se refroidissent et, par ce processus, restituent à la centrale toute la chaleur qu'ils ont accumulée pendant la journée. Elle peut ainsi fonctionner sans interruption.

Si cette technique est aujourd'hui bien maîtrisée, elle pose toutefois un problème. « Une centrale électrosolaire de 50 mégawatts nécessite pas moins de 28 000 tonnes de sels pour stocker la chaleur », indique Xavier Py, du laboratoire

Procédés, matériaux et énergie solaire (Promes), à Perpignan. Pour atteindre les objectifs affichés pour 2050¹ dans le solaire à concentration, il faudrait utiliser chaque année environ dix fois la production mondiale de sels de nitrate ! »

Pour surmonter cet obstacle, le chercheur français et ses collègues développent actuellement un nouveau matériau de stockage de la chaleur, solide cette fois.



12



© PHOTOS 1334415 - CNRS/PROMES

Ces réacteurs solaires (13) permettent de vitrifier des cendres de déchets industriels dangereux. Cela produit des céramiques (14) capables de stocker la chaleur à très haute température.

14



15 Éléments de stockage de chaleur élaborés à partir de déchets amiantés.



Ce matériau est une céramique obtenue en faisant fondre à 1 400 °C des déchets industriels dangereux comme l'amiante, les cendres d'usines d'incinération ou encore les déchets métallurgiques. Ainsi recyclés, ces déchets deviennent totalement inertes. « Nous avons calculé que la facture énergétique pour fabriquer ces matériaux serait remboursée en moins d'un an en les utilisant dans une centrale solaire, précise Xavier Py. Qui plus est, nos céramiques sont capables d'absorber de la chaleur jusqu'à 1 000 °C, contrairement aux sels de nitrate qui se détériorent au-delà de 600 °C. » Un avantage considérable quand on sait que les futures centrales solaires devraient générer des températures plus élevées encore qu'aujourd'hui, aux environs de 900 °C.

DES MURS AUTOCHAUFFANTS

L'utilisation de ces céramiques ne s'arrête pas là... On pourrait bientôt les retrouver au cœur même de nos habitations. Insérées directement dans les murs, elles permettraient de collecter (mais à des températures bien plus basses cette fois) la chaleur environnante au cours de la journée pour la libérer pendant la nuit.

Il faut dire que dans l'habitat, où l'heure est aux économies d'énergie, réussir à stocker la chaleur devient une priorité. Outil de prédilection employé? Les matériaux à changement de phase, dont la chaleur entraîne le passage de l'état solide à l'état liquide. C'est le cas par exemple de la paraffine,

le constituant des bougies, qui fond à 70 °C environ. L'idée est de récupérer la chaleur libérée quand le corps repasse à l'état solide. Cette propriété est déjà exploitée dans certains bâtiments : des microcapsules de paraffine dispersées dans les murs absorbent la chaleur de la pièce le jour et la restituent la nuit.

Le gros atout des matériaux à changement de phase est leur capacité de stockage : à volume égal, ils peuvent absorber plus de chaleur que les autres. Autre avantage : ils libèrent la chaleur à une température constante (celle de leur changement d'état).

DES LIMITES À DÉPASSER

Malheureusement, ces matériaux ne sont pas toujours adaptés à la température souhaitée pour une application. De plus, ils conduisent souvent très mal la chaleur, ce qui les empêche de la stocker ou de la restituer rapidement. « D'un côté, les recherches se focalisent donc sur la mise au point de nouveaux matériaux pour élargir la panoplie des températures accessibles, explique Xavier Py. On voit apparaître notamment certains polymères capables de stocker la chaleur entre 20 °C et 200 °C. De l'autre, les chercheurs tentent d'améliorer la conductivité thermique de ces matériaux en y ajoutant par exemple du graphite, extrêmement efficace pour transporter la chaleur. »

Stocker la chaleur le jour pour en profiter la nuit, c'est bien. Mais à l'avenir, il faudra aussi être capable de stocker le surplus d'énergie thermique produit en été pour l'utiliser pendant l'hiver. Pour atteindre cet objectif, les recherches se

tournent vers un stockage de la chaleur qui fait appel à une réaction chimique. Parmi les réactifs envisagés, la chaux. Lorsqu'elle est humidifiée, celle-ci dégage de la chaleur. L'idée est donc d'utiliser l'air chaud en été pour l'assécher et de l'humidifier à nouveau en hiver, notamment pour chauffer l'habitat. Entre les deux, la chaux, conservée à l'abri de l'humidité, peut être stockée sans aucune perte de chaleur.

Le stockage thermo-chimique est assez compliqué parce qu'il faut contrôler très finement la réaction en jeu. Mais il présente de nombreux avantages : stocker plus de chaleur qu'avec les autres méthodes et délivrer l'énergie à une température plus élevée que celle qui a servi à stabiliser le réactif chimique.

De surcroît, avec ce procédé, on peut tirer parti de la réaction pour produire non seulement de la chaleur, mais aussi du froid. Les chercheurs du laboratoire Promes ont ainsi mis au point un dispositif capable de générer des températures allant de - 30 °C à 300 °C. Dans leur système, on trouve d'un côté de l'ammoniac liquide et de l'autre un sel réactif. De façon spontanée, une petite quantité d'ammoniac s'évapore et réagit avec le sel : cela produit de la chaleur. Sous l'effet de la chaleur, l'ammoniac s'évapore de plus en plus, et cette évaporation produit alors du froid. « L'avantage, c'est qu'en jouant sur le type de sel réactif utilisé et sur le niveau de pression, on peut contrôler très finement la température, contrairement à de nombreuses autres sources », souligne Xavier Py.

Aujourd'hui, ce dispositif est utilisé notamment pour réfrigérer des caissons de transport du sang, climatiser des bâtiments, et même, sur un plateau-repas, pour réchauffer un plat d'un côté, tout en gardant au frais le fromage et le dessert de l'autre. Le stockage thermique n'a pas fini d'apporter plus de confort à notre vie quotidienne. **J. B.**

1. Selon l'Agence internationale de l'énergie, le solaire à concentration représenterait 10 % de la production mondiale d'électricité en 2050.



16 Le système de réfrigération thermo-chimique de la société Coldway, fondée par des chercheurs du CNRS, permet de conserver les produits sensibles.

CONTACT :
Oliver Py
> py@univ-perp.fr

De l'hydrogène à la pompe

L'hydrogène possède de sérieux atouts pour devenir un vecteur d'énergie majeur dans le futur.

Trois fois plus énergétique que le pétrole, ce gaz est capable de produire de l'électricité de manière totalement propre lorsqu'il est utilisé dans une **pile à combustible**. La réaction ne libère en effet que de la vapeur d'eau.

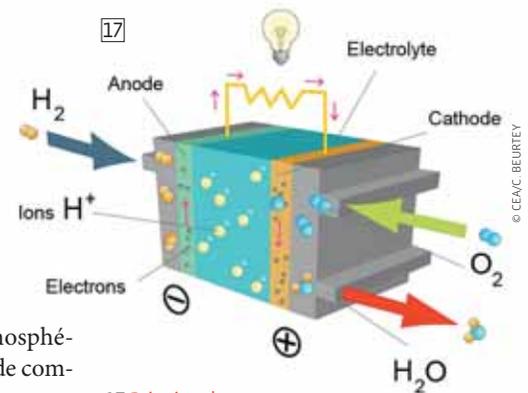
Mais il possède un sérieux handicap : stocker l'hydrogène, notamment dans des systèmes embarqués comme les voitures, est très difficile. Pourquoi ? Parce qu'il est le plus léger de tous les gaz. Imaginez un véhicule qui embarque 4 kilos d'hydrogène, soit suffisamment pour parcourir 400 kilomètres. Son réservoir devrait contenir 45 000 litres de

PILE À COMBUSTIBLE

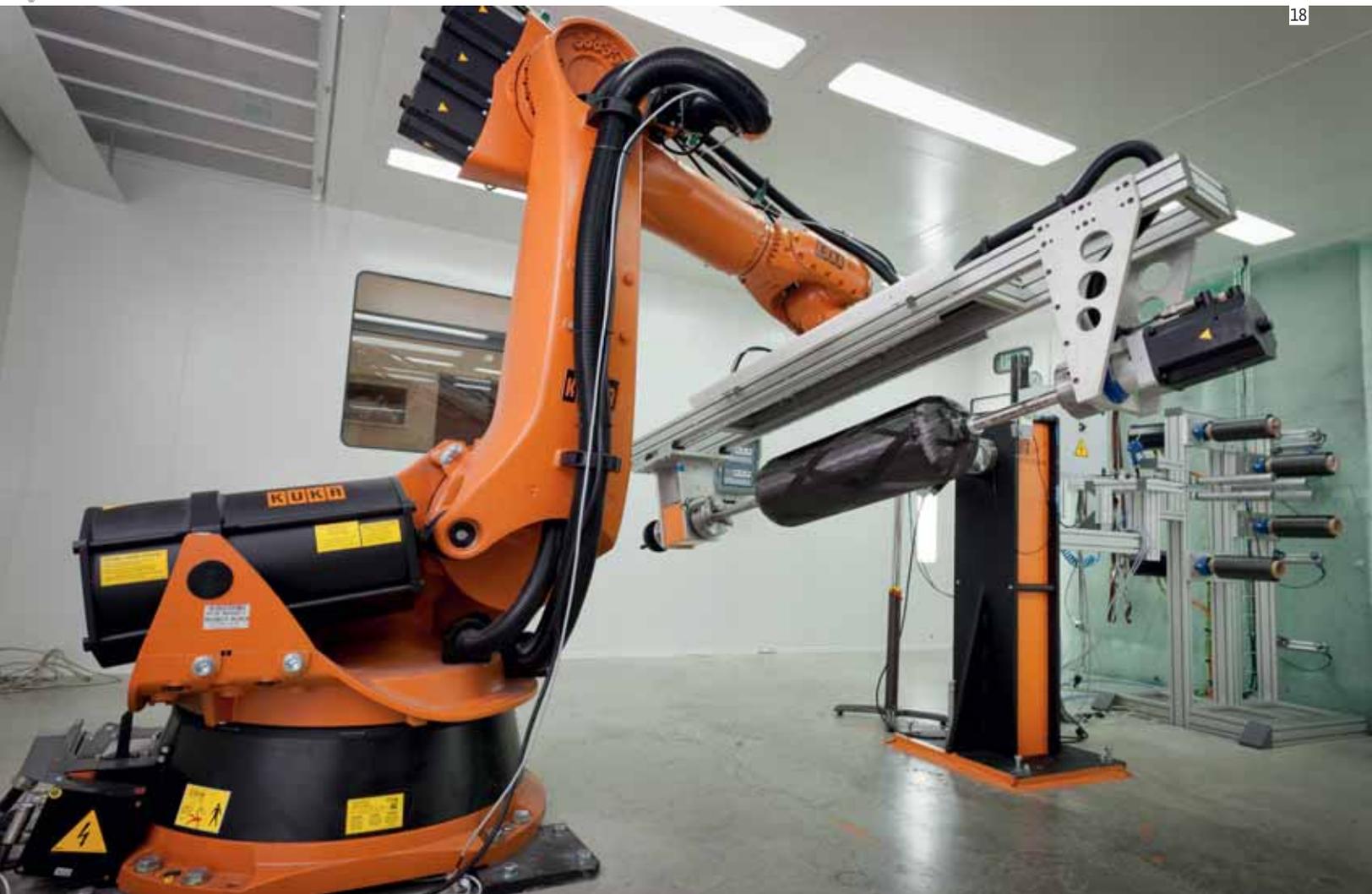
Système dans lequel l'électricité est produite par l'association d'un gaz combustible et d'oxygène. La réaction ne rejette que de l'eau et de la chaleur.

ce gaz stocké à la pression atmosphérique ! Dès lors, il est nécessaire de comprimer l'hydrogène pour qu'il occupe moins d'espace. C'est d'ailleurs le système utilisé dans la majorité des véhicules équipés d'un moteur électrique alimenté à l'hydrogène. La méthode employée est la même que celle qui permet de stocker les autres gaz à usage énergétique tels que le méthane. Mais dans le cas de l'hydrogène, la pression à atteindre (environ 700 bars) est beaucoup plus élevée. Qui plus est, le procédé est relativement énergivore.

Les recherches s'orientent actuellement vers une autre méthode de stockage : le stockage sous forme solide. Dans ce système, l'hydrogène vient se fixer par des



17 Principe de fonctionnement d'une pile à combustible. Elle produit de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène et ne rejette que de la vapeur d'eau. 18 Ce robot permet de fabriquer un réservoir à hydrogène composite capable de résister à une pression interne de 700 bars et aux agressions externes (chute, entaille, produits chimiques, incendie...).





19

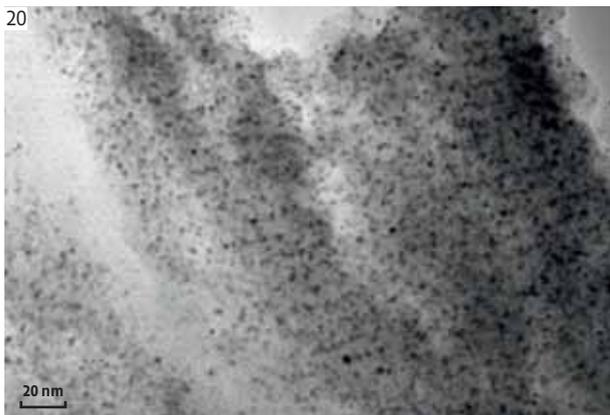
liaisons chimiques à un matériau solide. « On peut ainsi stocker dans un volume donné autant d'hydrogène qu'en le comprimant, mais à des pressions plus raisonnables, de l'ordre de quelques dizaines de bars », précise Gérald Pourcelly, de l'Institut européen des membranes, à Montpellier¹.

DES SOLIDES QUI PIÈGENT LE GAZ

Première piste étudiée par les chercheurs : l'utilisation de matériaux poreux à base de carbone, tels les charbons actifs, les nanotubes de carbone, le graphène ou encore les MOF. « Sur ces solides dont la surface collectrice est très grande, l'hydrogène vient se déposer un peu comme la vapeur d'eau se condense sur une vitre », explique Michel Latroche, directeur de l'Institut de chimie et des matériaux de Paris-Est, à Thiais². Il est alors assez facile, en réchauffant le matériau, de libérer à nouveau l'hydrogène pour l'utiliser dans la pile à combustible. » Seul problème, mais de taille : le mécanisme a lieu à des températures très basses, de l'ordre de $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si bien que pour le moment, même si les physicochimistes tentent d'augmenter la température de condensation de l'hydrogène avec quelque succès, cette approche n'en est encore qu'au stade de la recherche.

Une seconde piste semble bien plus prometteuse : le stockage dans des métaux. Cette fois, l'hydrogène est absorbé par le métal avec lequel il forme des composés appelés hydrures. Ces matériaux découverts dans les années 1970 ont reçu le surnom d'« éponges à hydrogène » tant ils sont capables d'en stocker de grands volumes. Parmi eux, l'hydrure de magnésium fait figure de vedette. Non seulement le magnésium est un métal abondant, peu cher et non toxique, mais sa capacité à stocker l'hydrogène est

20



19 Fusion de divers éléments (terres rares, magnésium, nickel...) pour réaliser un alliage massif employé pour stocker l'hydrogène. 20 Ce matériau hybride « Pd@Carbone », qui contient des nanoparticules de palladium (taches sombres), est aussi étudié pour stocker l'hydrogène.

MOF

Sigle issu de l'anglais Metal Organic Frameworks.

Il désigne des solides composés de carbone et de métaux capables de piéger l'hydrogène dans des pores nanométriques.

l'une des plus élevées (7,6 grammes d'hydrogène pour 100 grammes d'hydrure).

Le procédé est aujourd'hui parfaitement au point. « Pour que l'hydrogène, une fois mis en contact avec le magnésium,

soit rapidement absorbé, le métal est transformé en poudre nanostructurée, détaille Patricia de Rango, de l'Institut Néel, à Grenoble. Toujours pour accélérer l'absorption, nous ajoutons à la poudre un petit pourcentage de métaux de transition qui jouent le rôle d'activateurs de la réaction. La poudre est ensuite compressée sous la forme d'une galette. Plusieurs galettes sont ensuite empilées dans un réservoir. »

Entre 2006 et 2008, la chimiste et ses collègues ont pu concevoir un premier réservoir d'une capacité de stockage

21



21 Ce disque élaboré par McPhy Energy contient 600 litres d'hydrogène. 22 Réservoir développé pour stocker l'hydrogène sous forme solide. Il permet d'absorber 7 000 litres d'hydrogène.

de 110 grammes³. Capacité qu'ils ont multipliée par 10 en 2010. Entre-temps est née la société McPhy Energy qui fabrique et commercialise les réservoirs.

Principal débouché de ces produits : le stockage des énergies renouvelables. Dans le solaire par exemple, une partie de l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques est employée pour fabriquer de l'hydrogène avant de le stocker. Ainsi, la nuit ou lors des périodes nuageuses, cet hydrogène peut à nouveau être utilisé et, grâce à une pile à combustible, générer de l'électricité lorsque le soleil n'est plus là.

Cette année, McPhy Energy va fournir un réservoir de 24 kg d'hydrogène (équivalent à une énergie de 800 kilowattheures) à la plateforme de recherche Myrte (Mission hydrogène renouvelable pour l'intégration au réseau électrique), installée en Corse, à laquelle participent les chercheurs du laboratoire Sciences pour l'environnement⁴. Ce projet porte sur le déploiement d'une centrale photovoltaïque reliée au réseau électrique. Objectif : démontrer, justement, qu'il est possible d'utiliser l'hydrogène pour pallier la nature intermittente des énergies renouvelables.

Dans les réservoirs d'hydrogène, il faut chauffer l'hydrure de magnésium à 300 °C pour qu'il puisse libérer le précieux gaz. Cette étape est complexe à mettre en place et relativement gourmande en énergie. C'est ce qui empêche aujourd'hui le système d'être utilisé dans des dispositifs embarqués et qui le cantonne à des applications fixes. Dans les laboratoires, les chercheurs se sont donc mis en quête de nouveaux hydrures

23 À l'Institut européen des membranes, les chercheurs étudient les hydrures de bore pour stocker l'hydrogène.
24 Synthèse d'un nouvel hydrure de bore.



métalliques capables de fonctionner à des températures plus modérées. Il y a par exemple ceux à base d'aluminium, qui relâchent l'hydrogène à environ 100 °C. Malheureusement, la réaction chimique en jeu est délicate, et la capacité de stockage modeste.

Autres candidats : les alliages de terres rares et de nickel, ou ceux à base de titane et de vanadium, qui possèdent l'énorme avantage d'être utilisables à la température ambiante. Inconvénient majeur : le rapport entre leur masse et la quantité d'hydrogène est très faible. « Dans un véhicule, le réservoir d'hydrogène construit avec ces métaux pèserait 500 kg au bas mot, commente Michel Latroche. En revanche, grâce à leur température de fonctionnement idéale, on peut imaginer les utiliser dans des petits systèmes nomades, comme un téléphone ou un ordinateur portable. »

MINIATURISER LES SYSTÈMES

Pour aller plus loin encore, certains chercheurs tentent même de développer des hydrures fonctionnant à une température négative. « Nous travaillons à la mise au point d'un réservoir de la taille d'une canette de soda, qu'on puisse emporter dans son sac à dos et qui soit utilisable jusqu'à - 20 °C, ce que les batteries portables ne permettent pas actuellement, raconte Salvatore Miraglia, de l'Institut Néel. Nous avons déjà identifié quelques composés prometteurs, tel celui fait de titane, de chrome et de manganèse. »

Quant à la voiture de monsieur Toutle-monde dotée d'un réservoir en hydrures métalliques, peut-on espérer la voir bientôt sur les routes ? « Le cahier des charges est très contraignant, résume Gérald Pourcelly. Le matériau devra être capable de stocker une grande quantité d'hydrogène tout en étant peu massif et compact. Il devra pouvoir fonctionner

pendant plusieurs milliers de cycles stockage-déstockage. Enfin, il devra être réactif pour restituer la puissance très vite, en cas d'accélération par exemple ». Dans cette course de longue haleine, beaucoup de candidats sont en lice, mais peu arriveront jusqu'au bout.

J. B.

1. Unité CNRS/Université Montpellier-II/ École nationale supérieure de chimie de Montpellier.
2. Unité CNRS/Université Paris-Est-Créteil-Val-de-Marne.
3. En collaboration avec le Consortium de recherches pour l'émergence des technologies avancées et le Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels.
4. Unité CNRS/Université de Corse.

CONTACTS :

Gérald Pourcelly
> gerald.pourcelly@iemm.univ-montp2.fr
Michel Latroche
> latroche@icmpe.cnrs.fr
Patricia de Rango
> patricia.derango@grenoble.cnrs.fr
Salvatore Miraglia
> salvatore.miraglia@grenoble.cnrs.fr



Pour en savoir +

À LIRE |

L'énergie : stockage électrochimique et développement durable

Jean-Marie Tarascon, Fayard, coll. « Leçons inaugurales du Collège de France », 72 p.

L'énergie à découvert

Rémy Mosseri et Catherine Jeandel (dir.), CNRS Éditions (à paraître), 350 p.

À VOIR SUR LE JOURNAL EN LIGNE |

 L'album **photo** des recherches sur l'énergie sur la photothèque du CNRS.

 **Des batteries plus performantes** (2011, 3 min), **Film** réalisé par Daniel Fievet, Crafty in Motion, produit par CNRS Images.

 **Hydrogène au volant** (2010, 20 min.) **Film** réalisé par Luc Ronat, produit par CNRS Images.