Caractérisation par diffraction des rayons X in situ de matériaux d'électrode de batterie Li-ion pendant le cyclage. ©CNRS Phototèque/ H. Raquet

Energie : vers une gestion intelligente

L'approvisionnement et la gestion de l'énergie sont plus que jamais au centre de nos préoccupations quotidiennes et représentent une priorité socio-économique majeure. La recherche s'avère particulièrement active sur les questions du stockage de l'énergie et de son utilisation intelligente.

Il est illusoire de penser s'affranchir totalement de l'énergie nucléaire à court terme. Mais la transition énergétique est aujourd'hui une nécessité et elle passera par la diversification des sources d'approvisionnement en énergie. Une transition d'autant plus nécessaire que les stocks limités en énergies fossiles — y compris en gaz de schiste — sont limités, ce qui nous conduira à terme à bouleverser notre schéma de production énergétique. Les énergies éolienne, solaire, géothermique et d'origine marine - dont l'empreinte CO_2 est faible - devront donc être maîtrisées dans un futur proche. Surtout, au-delà de leur production, l'intégration des énergies renouvelables par exemple dans le réseau électrique pose le problème de leur gestion et de l'interfaçage entre le réseau et la source pour mettre en adéquation production et demande en temps réel : ce que l'on appelle le smart grid. Mais la problématique de la gestion de l'énergie ne concerne pas que les installations de plusieurs GWh comme c'est le cas pour le réseau électrique. On la retrouve par exemple au niveau de la gestion de l'alimentation de réseaux de capteurs communicants sans fil - utilisés dans l'aéronautique — ou en électronique de puissance.

Maîtrise de la consommation

Un autre enjeu est la maîtrise de la consommation d'énergie. Elle implique d'une part de changer nos habitudes de consommation mais également de mettre au point des com-

posants et des systèmes moins gourmands - voire autonomes - en énergie.
Les exemples dans notre vie quotidienne sont nombreux puisque le spectre des applications concernées s'étale des composants pour l'électronique et l'électronique de puissance à la conception des bâtiments à faible empreinte énergétique ou à énergie positive.

Stockage de l'énergie

Si la production, la gestion et la maîtrise de l'énergie sont un des défis majeurs pour nos sociétés dans les prochaines décennies, le stockage de l'énergie est un enjeu stratégique. Le stockage est en particulier le seul moyen de décaler dans le temps la production de la demande d'énergie. Le système le plus utilisé aujourd'hui pour stocker de grandes quantités d'énergie lors de périodes de surproduction est le stockage hydraulique, qui consiste à remonter l'eau dans les barrages. Si d'autres moyens de stockage à grande échelle existent (air comprimé, volants d'inertie...), le plus largement utilisé reste incontestablement le stockage électrochimique avec les supercondensateurs et les batteries. Ce succès s'explique par l'avantage considérable qu'ils apportent par rapport à d'autres solutions : la mobilité. La mise au point de générateurs électrochimiques performants revêt donc une importance toute particulière. Le passage au véhicule tout électrique avec des autonomies supérieures à 300 km nécessitera par exemple la mise au point de batteries plus énergétiques comme le Li-S ou le métal-air (Zn-air ou Li-air par exemple).

Lorsque l'on passe à des applications nécessitant le stockage localisé (sur site) de très grandes quantités d'énergie, comme celui des énergies renouvelables pour utilisation dans le réseau électrique, on ne peut pas faire appel au stockage hydraulique. Dans ces cas, le choix des modes de stockage n'est plus dicté par les performances en énergie par unité de masse (Wh/kg) ou de volume (Wh/L); le coût prend une place plus importante. Les batteries à circulation d'électrolyte (rédox flow batteries en anglais) sont particulièrement intéressantes dans ces applications puisqu'elles stockent l'énergie dans l'électrolyte sous forme de systèmes rédox dissous, électrolytes contenus dans des réservoirs qui peuvent atteindre plusieurs centaines de m^3. Le développement de ces systèmes reste cependant technologiquement compliqué, ce qui explique les difficultés d'industrialisation. Le vecteur hydrogène, avec en particulier les piles à combustibles et les électrolyseurs (pour produire de l'hydrogène), offre également des perspectives intéressantes pour ces applications de stockage à grande échelle où les batteries conventionnelles ont également un rôle important à jouer. La solution de stockage sera donc multi-système et dans ce contexte l'étude électrique de l'association de plusieurs sources d'énergie - l'hybridation — prend tout son sens.

Nous présentons dans ce dossier quelques uns des travaux réalisés par les équipes du site toulousain concernant le stockage, la conversion et l'utilisation intelligente de l'énergie. ■

Vue globale du bâtiment ADREAM situé au LAAS : un bâtiment entièrement expérimental vers un bâtiment à énergie positive.

Patrice Simon, professeur UPS au Centre interuniversitaire de recherche et d'ingénierie des matériaux (CIRIMAT, unité mixte UPS/CNRS/INP)

Contact
simon@chimie.ups-tlse.fr

L'offre de formation :

L'offre de formation du site toulousain dans le domaine du développement durable et de l'énergie en particulier est parmi les plus complète sur le territoire national. Les trois principales filières identifiées sur le plan national et international sont :

Le master Erasmus Mundus « Material for Enegy Storage and Conversion » [1]**. Il est co-habilité avec 7 universités, dont 5 en Europe (Amiens, Cordoue, Marseille, Toulouse, Varsovie) et 2 hors Europe (Drexel, USA et Xiamen, Chine). Enseigné en anglais, ce master, qui accueille des étudiants du monde entier, forme des chercheurs ou des ingénieurs en sciences des matériaux spécialisés dans le stockage électrochimique de l'énergie.**

Le master EEA-AEETS[2] **est un des masters en ingénierie du réseau FIGURE**[3]**, avec quatre spécialités : « Electronique pour les systèmes embarqués et télécommunication », « Conversion de l'énergie - systèmes électriques », « Ingénierie des systèmes temps-réel » et « Signal, imagerie et applications ». Adossé aux laboratoires LAPLACE et LAAS, il forme indifféremment des ingénieurs et des chercheurs, en lien étroit avec le pôle de compétitivité AESE.**

Le master Génie de l'habitat opère progressivement une restructuration vers l'Energétique de l'habitat en lien fort avec le département de mécanique, l'UPSITECH et le milieu industriel. Cette formation est une des plus anciennes de l'UPS et a tissé des liens solides avec le tissu industriel local.

[1] http://www.univ-tlse3.fr/1303996537831/0/fiche___article/&RH=rubinter02
[2] http://www.reseau-figure.fr/spip.php?article197
[3] http://www.eea.ups-tlse.fr/V2/pages/diplomes/master_eea.php

Coupleur intercellules pour convertisseur d'énergie électrique.

Carole Hénaux, maître de conférences UPS, **Thierry Meynard** et **Thierry Lebey** directeurs de recherches CNRS, tous les trois au Laboratoire plasma et conversion d'énergie (Laplace, unité mixte UPS/CNRS/INP)

Contact
carole.henaux@laplace.univ-tlse.fr, thierry.meynard@laplace.univ-tlse.fr, thierry.lebey@laplace.univ-tlse.fr

Conversion de l'énergie électrique : de l'intégration de puissance à tous les étages !

L'électronique de puissance est partout présente dans notre vie quotidienne : téléphones, ordinateurs, moyens de transport. Les recherches dans ce domaine passent par le développement d'approches pour augmenter la standardisation, la modularité, l'efficacité, la fiabilité, la réduction d'échelle, la baisse des coûts de ces systèmes et dispositifs.

L'électronique de puissance couvre un domaine s'étendant de quelques fractions de Watt au GigaWatt. Son principe est de « manipuler » l'énergie électrique afin d'adapter la forme (alternative ou continue) de l'énergie entre une source (le réseau électrique, une batterie), et une charge (l'application). Pour ce faire, elle fait appel à des composants semi-conducteurs utilisés en commutation et à des composants passifs (condensateurs et inductances) pour stocker et/ou filtrer l'énergie électromagnétique. Dans un nombre important de domaines d'applications, elle s'appuie de plus en plus sur l'intégration de puissance. De nature pluridisciplinaire par définition, ces recherches ont un impact sur des domaines aussi variés que l'architecture des systèmes, les matériaux, les composants, la thermique, l'énergétique, l'électronique du signal...

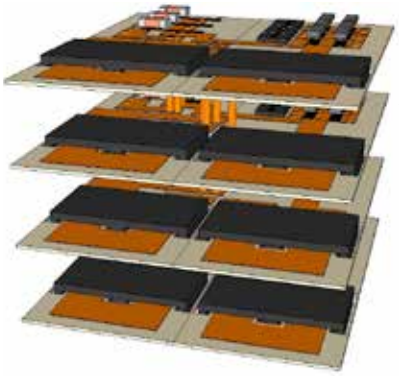
Composants grand-gap

L'utilisation de semi-conducteurs grand gap (à base de carbure de silicium-SiC- ou de nitrure de gallium-GaN-SiC-) est souvent présentée comme LA solution pour augmenter la densité de puissance (définie comme la puissance commutée par unité de volume). Ce paramètre s'avère crucial dans les systèmes embarqués dans lesquels, outre le rendement, la masse et le volume des équipements sont limités. Utilisés directement en substitution du silicium dans des structures classiques, ils devraient permettre grâce à des fréquences de commutation plus élevées de conduire à une amélioration significative de la puissance massique. Cet espoir pourrait cependant être partiellement déçu : en effet, compte tenu des normes concernant les perturbations électromagnétiques induites, augmenter la fréquence – au moins dans une gamme de 10 à 150 kHz- conduit à utiliser des filtres de dimensions plus importantes diminuant ainsi la densité de puissance. Les travaux menés au Laplace dans le cadre de 3DPHI[1] montrent que l'utilisation conjointe de ces composants dans des structures de conversion dites multicellulaires/multiniveaux conduit à des fréquences de coupure apparentes bien plus élevées, Ceci a pour conséquence de réduire les dimensions des filtres, mais hélas pas de les supprimer. Une approche combinée du dimensionnement de la machine et de l'actionneur devient donc incontournable.

Intégrer des filtres dans la charge

La solution proposée consiste à dimensionner des actionneurs à double fonctionnalité en intégrant des filtres dans la charge. Il faut à la fois garantir la fonction motrice visée tout en assurant une fonction de filtrage ou de couplage magnétique afin d'optimiser l'association convertisseur-machine. Cette contrainte conduit logiquement sur les structures opérationnelles actuelles à augmenter de façon significative le volume de cuivre. En conséquence il faut être en mesure de reconsidérer les structures d'actionneurs dans leur intégralité afin de répondre au mieux aux choix technologiques de futur, en s'appuyant soit sur des technologies classiques mais déjà éprouvées soit en considérant l'apport des matériaux électroactifs dans le cas de certaines niches d'applications (morphing). ■

[1] Afin de mener à bien leurs travaux dans ce domaine, les chercheurs de 12 laboratoires se sont rassemblés dans un Groupement d'intérêt scientifique nommé 3DPHI (3D Power Hybrid Integration), doté d'une plate-forme technologique hébergée par le Laplace.



Projection de la mise en série/parallèle de structures de conversion à base de GaN utilisant un coupleur intracellulaires magnétique.

Des panneaux solaires sur les ailes des avions

Les avions destinés aux essais en vol sont truffés de capteurs, alimentés par des kilomètres de câbles… Une contrainte dont on peut s'affranchir en utilisant des capteurs sans fil alimentés par des panneaux solaires.

Un A380 comporte environ 500 km de câbles. S'il s'agit d'un avion destiné aux essais en vol, il en comptera 300 km supplémentaires. Aux problèmes de poids et d'encombrement, s'ajoutent aussi pour certaines mesures temporaires effectuées à l'extérieur de l'avion (mesures de pression aérodynamique sur les ailes) d'autres contraintes : rivets à enlever pour passer les câbles, fixation des câbles et des capteurs à l'extérieur… Le développement d'un réseau de capteurs sans fil constitue une solution élégante pour réaliser les centaines de mesures de pression sur les ailes lors des vols d'essais.

Des équipes du LAAS travaillent sur le développement d'un tel réseau de capteurs sans fil et en particulier sur *l'alimentation électrique* de ce réseau. En effet, si les avantages du sans *fil* sont évidents (les câbles sont supprimés), ce choix implique l'autonomie énergétique des capteurs. Or, dans les conditions de vol, où les températures sont très basses (-50 °C environ), sans même évoquer les questions de sécurité, les batteries électrochimiques ne conviennent plus. Il reste alors la possibilité de faire appel, lors des vols diurnes qui constituent la majorité des cas pour des raisons de sécurité, à la production d'énergie électrique à partir du soleil par conversion photovoltaïque.

Les chercheurs ont intégré un système constitué de trois parties : des cellules photovoltaïques sur substrat souple, une électronique de contrôle de faible épaisseur développée au laboratoire, et un étage de stockage d'énergie à base de supercondensateurs. Ces derniers apportent l'autonomie nécessaire lorsque le flux solaire est réduit à cause des nuages, par exemple.

Conditions extrêmes

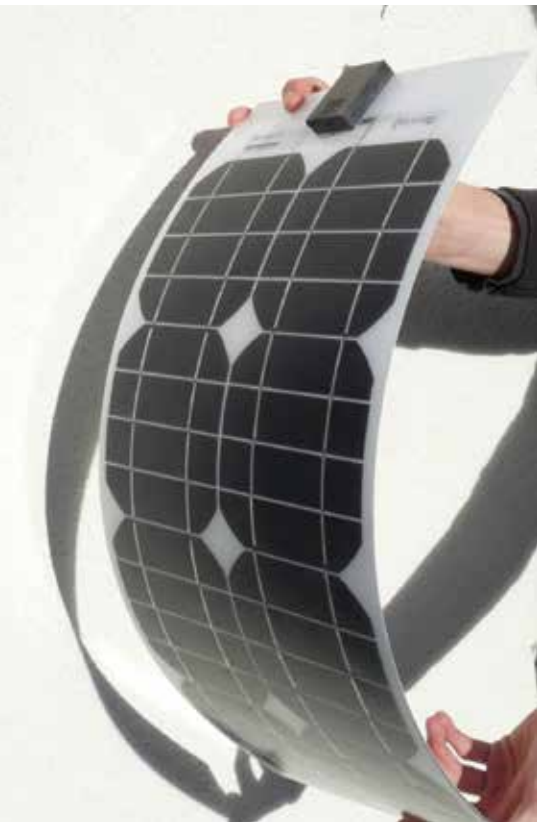
Cet ensemble est compatible avec des profils mécaniques courbes et sa géométrie ne perturbe pas trop les écoulements aérodynamiques. Après une première définition de l'architecture, nous avons identifié et qualifié l'ensemble des composants compatibles avec les conditions extrêmes rencontrées en température et en pression, puis dimensionné les éléments en fonction du profil de mission proposé par le partenaire aéronautique.

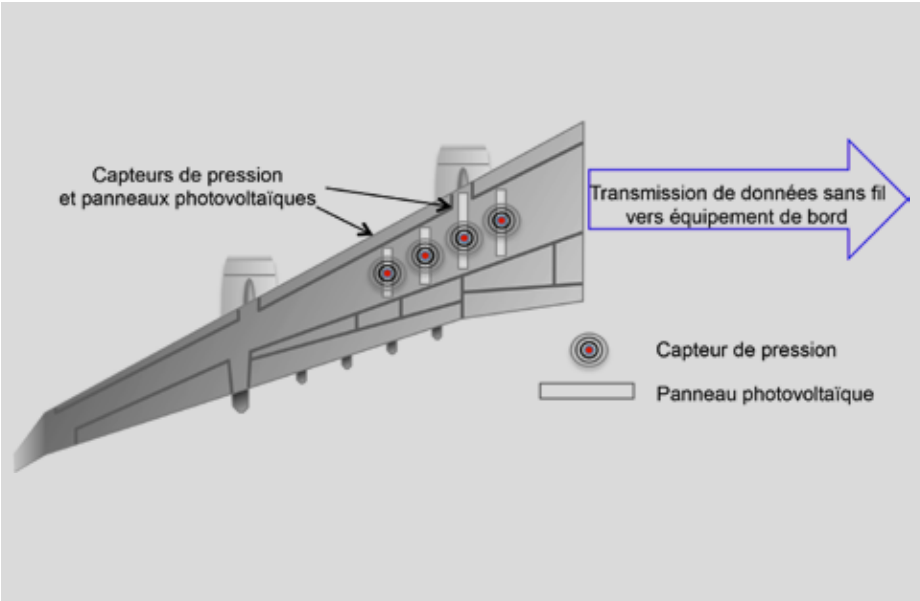
Plusieurs prototypes ont déjà été réalisés.

Le prochain avion ainsi équipé devrait voler fin 2013. ■

Jean-Marie Dilhac, professeur à l'Insa Toulouse ; **Vincent Boitier,** maître de conférences UPS et **Paul Durand Estebe,** doctorant, tous au Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS, unité propre CNRS, associée à l'UPS

Contact
dilhac@laas.fr, vboitier@laas.fr





Ci-dessus :
Panneau photovoltaïque souple

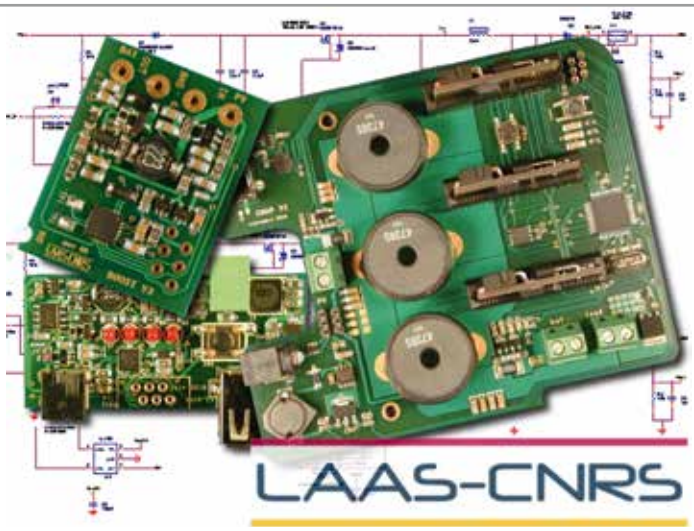
Ci-contre :
Architecture de principe d'un réseau de capteurs de pression sans fil et panneaux photovoltaïques associés.

Optimiser l'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire est l'énergie du futur… à condition de savoir la capter et la transformer en énergie électrique de manière efficace ! Un champ de recherche largement arpenté par les équipes du LAAS.

Corinne Alonso et **Bruno Estibals**
professeurs de l'UPS et chercheurs au Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS, unité propre du CNRS, associée à l'UPS)

Contact
corinne.alonso@laas.fr



Exemples de réalisation de convertisseurs statiques conçus comme étages d'adaptation pour l'énergie photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque, découvert en 1839, par les physiciens français Becquerel, a nécessité de constants efforts pour comprendre et améliorer la conversion de l'énergie issue des photons en électricité par des matériaux sensibles aux longueurs d'onde de la lumière (Prix Nobel d'Albert Einstein en 1921 sur ses travaux sur l'effet photo-électrique). En 1954, la première cellule photovoltaïque est sortie des laboratoires Bell avec un rendement de 4 %. Pendant longtemps, les coûts élevés des cellules et leurs rendements médiocres n'ont pas permis une exploitation à grande échelle pour une source d'énergie au quotidien.

Depuis sa création en 1967, le LAAS travaille sur l'optimisation de sources d'énergie d'origine photovoltaïque autant sur les cellules, les bus électriques embarqués dans les satellites que le contrôle de trackeurs et les systèmes photovoltaïques terrestres pour applications isolées ou connectées à un réseau. Aujourd'hui, l'optimisation de l'énergie photovoltaïque fait partie de ses priorités à travers le programme transversal de recherche ADREAM. Pour que cette énergie devienne une source de production d'électricité à part entière et contribue au mix énergétique des sources dans les réseaux intelligents de demain, il faut que l'électricité produite en fonction des conditions environnementales soit adaptée aux consommations à tout instant par l'intermédiaire de moyens de stockage.

Production maximale d'énergie

La connexion d'un module photovoltaïque à une charge via un convertisseur statique permet d'optimiser la production d'énergie électrique. Ainsi, les premières innovations du LAAS concernaient des commandes nommées MPPT (Maximum Power Point Tracking). L'objectif : s'adapter instantanément à tout changement et assurer une production maximale de l'énergie produite. Cependant lors d'ombrages partiels, l'apparition de discontinuités ne permet pas de garantir cette production maximisée à cause de la présence de « points de puissance maximum » (PPM) secondaires. Aujourd'hui, nous concentrons nos recherches sur l'électronique de puissance et les algorithmes de contrôle associés pour continuer à augmenter l'énergie photovoltaïque produite. Nous étudions ainsi, en lien fort avec des partenariats industriels et académiques, de nouvelles architectures de puissance reconfigurables garantissant l'extraction de PPM utilisant des systèmes distribués.

Par ailleurs, nous développons des outils de gestion pour optimiser les échanges énergétiques. Il existe encore un potentiel d'innovations important sur la maximisation de rendement et de sécurisation des architectures de conversion. Une des tendances consiste à approcher les interfaces électroniques au plus près de la source photovoltaïque à contrôler en discrétisant l'architecture de puissance avec plusieurs étages de puissance différente, connectés en cascade. Cette approche permet de gérer au mieux les différences de puissances produites localement.

Plusieurs innovations issues du LAAS sont aujourd'hui intégrées dans les systèmes nommés « optimiseurs » placés en entrée des onduleurs et les principes de discrétisation préconisés dans les publications du laboratoire depuis de nombreuses années sont aujourd'hui repris dans de nombreux onduleurs commercialisés recherchant des solutions globales adaptées à chaque contexte et au gisement solaire local. Ainsi 5 brevets conjoints Total-CNRS dont 4 avec extension internationale portent sur des innovations d'amélioration en terme de rendement sur les convertisseurs statiques conçus pour extraire le maximum d'énergie des panneaux photovoltaïques.

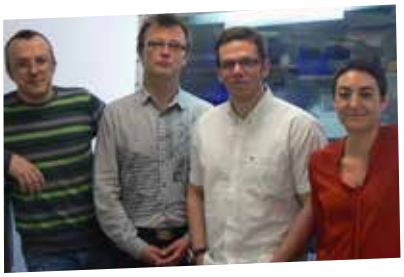
Habitat à énergie positive

Nos travaux sur le photovoltaïque sont de plus en plus couplés aux nouveaux challenges sur l'efficacité énergétique dans l'habitat se voulant à énergie positive, les compteurs intelligents, le développement de modèles et de scénarios novateurs sur les micro-grids et les smart-grids.

La nouvelle plateforme photovoltaïque, où s'effectue aujourd'hui la majorité des validations expérimentales en fort lien avec le bâtiment à énergie positive ADREAM, est labellisée par le pôle de compétitivité Derbi et plusieurs instances européennes pour offrir à la communauté universitaire et au monde industriel des possibilités de tests en conditions réelles. ■

Stockage à l'aide de supercondensateurs « musclés »

Ils stockent de l'énergie, et peuvent fournir des pics de puissance sur quelques secondes. Les supercondensateurs pourraient voir leur capacité de stockage démultipliée grâce à des travaux réalisés au Cirimat.



De droite à gauche : **Barbara Daffos,** ingénieur d'étude UPS, **Pierre-Louis Taberna,** chargé de recherche CNRS, **Patrick Rozier,** maître de conférences UPS, et **Patrice Simon,** professeur UPS au Centre interuniversitaire de recherche et d'ingénierie des matériaux (CIRIMAT, unité mixte UPS/CNRS/INP)

Contact
simon@chimie.ups-tlse.fr

Les supercondensateurs sont des systèmes de stockage de l'énergie, intermédiaires entre les batteries et les condensateurs. Ils sont utilisés par exemple dans les véhicules hybrides (fonction « stop and start »), les tramways (récupération d'énergie de freinage) ou encore l'aéronautique (portes de l'A380). Ils utilisent comme matériaux actifs des carbones poreux de grande surface, et stockent les charges à l'interface carbone/électrolyte par adsorption des ions de l'électrolyte à la surface du carbone.
C'est cette interface carbone/électrolyte que des chercheurs du CIRIMAT cherchent à modifier La surface spécifique des carbones poreux peut atteindre 2 500 $m^2.g^{-1}$ de carbone en développant la porosité, c'est-à-dire en créant un réseau poreux dans le volume de particules micrométriques de carbone. En analysant le transport des ions d'un électrolyte dans les nanopores de carbone, les chercheurs ont montré que l'on pouvait augmenter la quantité de charge stockée et donc l'énergie des supercondensateur.

Carbones nanoporeux

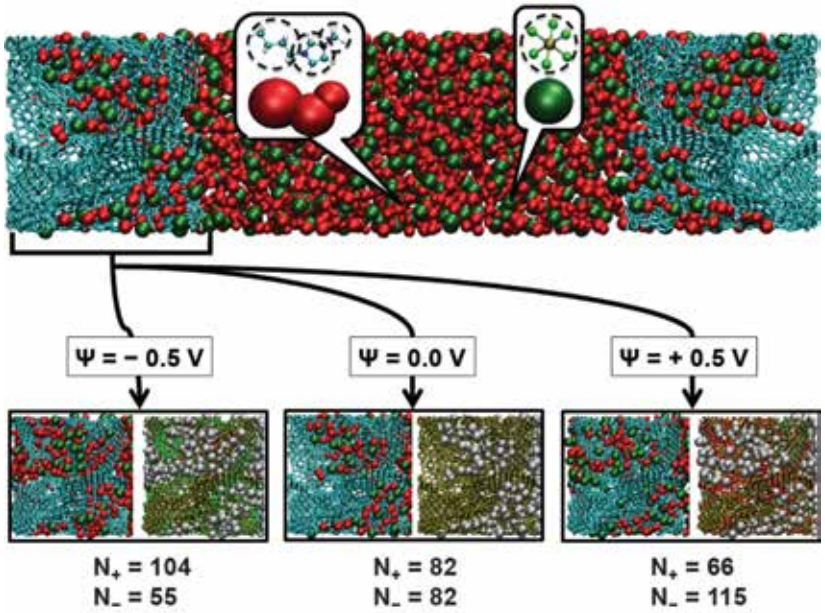
En collaboration avec Yury Gogotsi de l'université de Drexel (USA), nous avons montré que, contre toute attente, les ions d'un électrolyte peuvent facilement accéder à des pores plus petits que la taille des ions solvatés (moins de 1 nm), ce qui s'explique par une désolvatation partielle des ions. Lorsque ce phénomène se produit, la quantité d'ions qui est stockée dans le carbone est multipliée par un facteur 2 à 3! Mais on peut en rentrer plus! Cette perspective a ouvert un champ de recherche important pour essayer d'expliquer le mécanisme de désolvatation et également pourquoi le déplacement des ions dans ces pores confinés est si rapide malgré la taille réduite. Des essais de modélisation effectués dans le cadre du RS2E[1] ont confirmé la désolvatation partielle et un déplacement rapide des ions. Même si nous sommes loin d'avoir élucidé le mécanisme réactionnel, ces travaux remettent en question ce que l'on pensait connaître de l'adsorption et du transport des ions lorsque l'on passe dans des milieux confinés sub-nanométriques. Au-delà de cet aspect fondamental, ils peuvent permettre de prédire les structures de carbone les plus adaptées au stockage capacitif pour mettre au point des supercondensateurs de grande densité d'énergie. Une autre application de ces matériaux est la réalisation de micro-supercondensateurs possédant des énergies volumiques 3 à 4 fois plus élevées que leurs concurrents utilisant des carbones poreux. La micro-fabrication de ces systèmes est développée en collaboration avec le LAAS et le LPCNO.

Désalinisation de l'eau de mer

Du fait de leurs grandes capacités de stockage des charges, ces carbones nanoporeux sont actuellement étudiés pour la désalinisation de l'eau de mer. Le principe est identique: sous l'effet d'une polarisation, les ions sont adsorbés dans les pores des carbones. De l'eau salée contenant les carbones en suspension passe entre deux électrodes qui sont polarisées. Les ions sodium sont adsorbés à l'électrode négative et les chlorures à la positive. Une fois chargé d'ions, le carbone est filtré et on obtient de l'eau désalée.

Tous ces travaux bénéficient du soutien du European Research Council (Advanced Grant 2011), la Fondation EADS (Chaire d'excellence), la DGA et l'ANR. ■

[1] Réseau sur le Stockage Electrochimique de l'Energie, voir http://www.energie-rs2e.com/fr

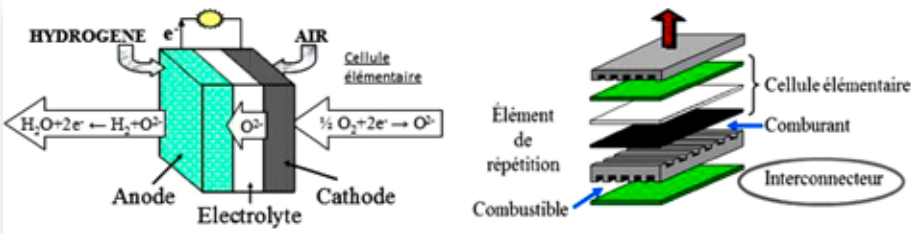


Panel du haut: Simulation d'une cellule comprenant deux électrodes de carbone CDC (0,9 nm de taille de pore) dans un électrolyte BMI-PF6. Les cations sont en rouge et les anions en vert. La cellule comprend initialement 82 anions et 82 cations. Panel du bas: structure de l'électrode sous différents potentiels appliqués avec pour chaque potentiel les ions adsorbés dans les pores (gauche) et la charge des atomes de carbone (droite).

Piles à combustible à oxyde solide

Eléments indispensables pour l'exploitation de l'énergie verte, les piles à combustible sont l'objet de recherches poussées au Cirimat. L'objectif : des piles à haut rendement fonctionnant à température modérée.

Florence Ansart, professeur UPS, **Pascal Lenormand,** maître de conférences UPS au CIRIMAT (unité mixte UPS/CNRS/INP) et **Théo Tzédakis,** professeur UPS au Laboratoire de génie chimique (LGC, unité mixte UPS/CNRS/INP)



Description schématique d'une cellule élémentaire (a) et d'un élément de répétition (b) pour pile à combustible SOFC

Contact
lenormand@chimie.ups-tlse.fr,
ansart@chimie.ups-tlse.fr,
tzedakis@chimie.ups-tlse.fr,
simon@chimie.ups-tlse.fr

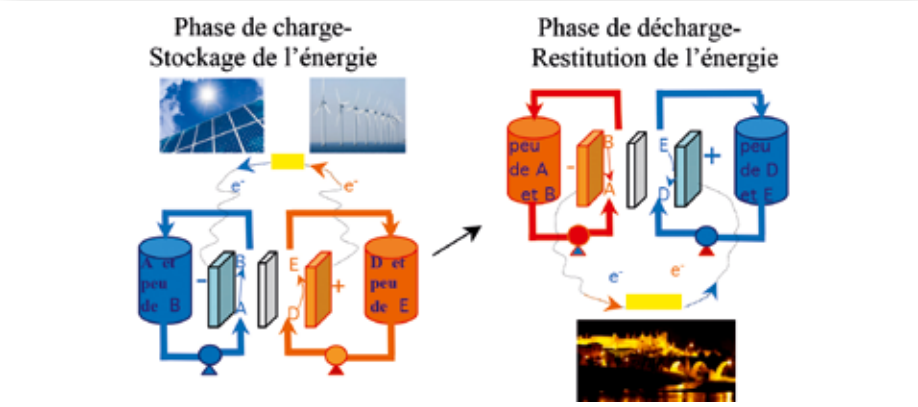
Les piles à combustible à oxyde solide (Solid Oxide Fuel Cells – SOFCs-, en anglais) sont des systèmes électrochimiques qui permettent la conversion de l'énergie chimique sous forme électrique. Le principe est très simple puisqu'à partir d'un combustible tel que l'hydrogène et d'un comburant comme l'oxygène, de l'eau et de l'électricité sont produits. Au-delà de l'intérêt écologique que ces systèmes présentent, puisqu'ils ne rejettent aucun gaz à effet de serre, ils mettent en évidence les potentialités de l'hydrogène comme vecteur énergétique permettant la production d'électricité mais aussi le stockage de l'énergie sous forme chimique. Les applications essentiellement visées sont la production décentralisée d'énergie avec des puissances électriques fournies pouvant aller de quelques kW à quelques centaines de kW sur plusieurs centaines d'heures, pour les secteurs résidentiel et urbain.

Rendements supérieurs à 80 %

Les éléments constitutifs des piles SOFCs sont des matériaux de nature oxyde solide. Cela impose, pour l'obtention d'un coefficient de diffusion de l'oxygène dans l'électrolyte optimal, de fonctionner à haute température, typiquement de l'ordre de 800 à 1000 °C. L'intérêt est que la vapeur d'eau produite peut être réutilisée en cogénération. Dans ce cas, les rendements énergétiques de ces systèmes sont supérieurs à 80 %.
Pour des raisons de coût, de choix et de durabilité des matériaux, plusieurs laboratoires et notamment le CIRIMAT, travaillent à la réalisation de piles devant fonctionner, à rendements équivalents, avec des températures inférieures (600-700 °C). Dans ce cadre, le CIRIMAT synthétise par voies liquides (sol-gel et dérivées) et met en forme l'ensemble des matériaux actifs de la cellule élémentaire (anode-électrolyte-cathode) ainsi que les verres de scellement permettant l'obtention d'éléments de répétition, préalable indispensable à la réalisation de cellules pouvant délivrer des puissances électriques importantes. Les procédés développés permettent de maîtriser les microstructures des matériaux mis en forme afin de limiter au maximum les chutes ohmiques liées notamment aux transferts de charges aux interfaces anode-électrolyte et cathode-électrolyte qui font parties des verrous technologiques à lever pour valider le fonctionnement de ces systèmes dans ces gammes de température.

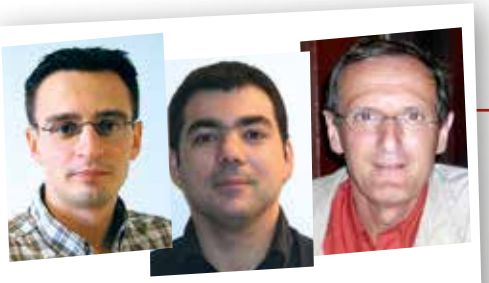
Batteries de grande taille

Le stockage de l'électricité produite par les énergies renouvelables pour alimenter le réseau électrique nécessite des batteries de grande taille (plusieurs MWh pendant plusieurs heures). Les batteries à circulation, des systèmes électrochimiques capables de stocker, sous forme chimique, des quantités importantes d'énergie électrique puis de la restituer, constituent des candidats sérieux. Une collaboration entre des équipes du CIRIMAT et du LGC a pour objet la mise au point de batteries à circulation utilisant des systèmes rédox non pas solubles mais en suspension. Les matériaux utilisés sont ceux rencontrés dans les batteries Li-ion ($LiFePO_4$, $Li_4Ti_5O_{12}$...), ou dans les piles alcalines (Zn, MnO_2). Lors de la phase de charge, l'énergie électrique renouvelable est convertie en énergie chimique qui est emmagasinée dans les réservoirs de stockage. Les transformations inverses permettent de restituer l'énergie électrique durant la phase de décharge.
Les verrous technologiques à lever sont de diverse nature. On peut citer la mise au point de suspensions stables de composés actifs ($LiFePO_4$, MnO_2...), l'optimisation de la conduction électronique dans les suspensions ou encore le transport de matière dans les suspensions. Vaincre ces limitations nécessite des compétences pluridisciplinaires. ■



Des batteries à hydrogène

Elles apparaissent comme une pièce maîtresse d'un futur énergétique renouvelé et sans carbone. Les batteries à hydrogène sont actuellement testées par des chercheurs du Laplace dans une plateforme d'essais qu'ils ont développée.



Christophe Turpin, chargé de recherche CNRS ; **Olivier Rallières,** ingénieur de recherche CNRS, (en charge de la plateforme dédiée H2), **Stéphan Astier,** professeur à l'INP, tous trois membres du Groupe énergie électrique et systémique (GENESYS) du Laplace (unité mixte UPS/CNRS/INP).

Contact
christophe.turpin@laplace.univ-tlse.fr

Contrairement aux sources d'énergie fossiles, aisément stockables pour être utilisées quand on en a besoin, la plupart des sources renouvelables sont, par nature, issues de flux assez fortement variables, voire intermittents. C'est le cas du soleil et du vent. L'électricité solaire et éolienne hérite de cette variabilité. Même en exploitant au mieux la diversité des productions, les pics de production d'électricité ne correspondent pas aux pics de la demande, d'où une difficulté accrue de la gestion des réseaux électriques. Il apparaît donc essentiel de stocker temporairement cette électricité pour un usage différé en fonction de la demande, stockage qui constitue objectivement à ce jour un frein au développement d'électricité renouvelable.

Electrolyseur et pile à combustible

Parmi les différentes possibilités offertes pour remplir cette fonction, le couple hydrogène – électricité constitue une voie pleine de promesses. Ceci conduit à la mise au point d'une batterie à hydrogène, tandem électrolyseur d'eau/pile à combustible associé à un stockage de gaz. En cas d'excès de production électrique, la batterie se recharge à partir de l'électrolyseur d'eau produisant du di-hydrogène (H_2) et du di-oxygène (O_2) qui sont stockés. Elle se décharge en délivrant l'électricité répondant aux besoins, en exploitant une pile à combustible qui génère directement de l'électricité et de la chaleur en combinant H_2 et O_2 pour (re) synthétiser de l'eau. A ces composants de base doivent éventuellement être associés d'autres dispositifs assurant un fonctionnement optimal de cet ensemble : électronique de puissance d'adaptation, composants auxiliaires de stockage tels que batteries ou supercondensateurs, systèmes de gestion des flux d'énergie échangés, etc.

Aéronefs ou automobiles

Tout cela peut conduire à un « système hybride » complexe qui associe judicieusement différentes sources d'énergie et organes de traitement offrant au concepteur plusieurs degrés de liberté pour définir les puissances de recharge ou de décharge et l'énergie qui peut être stockée sur de longues durées. On peut aussi s'intéresser à des sous-systèmes fonctionnels, soit pour la seule production d'hydrogène par électrolyse, soit pour la seule production d'électricité et de chaleur à partir d'hydrogène, par exemple pour des applications embarquées comme les aéronefs ou les automobiles.

Plateforme d'essais

Les travaux engagés depuis plus de dix ans au Laplace ont pour objectif de proposer des systèmes couplant hydrogène et électricité, compétitifs aux points de vues technique, économique et écologique. Outre les études sur les matériaux constitutifs, la conception de systèmes opérationnels requiert des études théoriques (modélisation et simulation) mais aussi, un effort substantiel en essais de caractérisation des composants et de validation du fonctionnement des systèmes développés. Dans ce but, une plateforme d'essais a été récemment installée au LAPLACE. Elle permet de mener à bien des essais de longue durée jusqu'à des puissances de 5 kW, sur des systèmes mettant en œuvre simultanément des électrolyseurs, des piles à combustible, des batteries d'accumulateurs, des supercondensateurs interconnectés dans différentes architectures pilotées par des stratégies de gestion de l'énergie variées. Les essais permettent d'affiner et de valider les modèles. Nous avons ainsi validé des modèles phénoménologiques génériques communs aux piles à combustible PEM (Proton Exchange Membrane) et aux électrolyseurs PEM et commencé récemment la validation des résultats théoriques visant à remplacer la génération électrique de dernier secours à bord d'avions par différentes solutions exploitant une pile à combustible à hydrogène hybridée par des supercondensateurs. Cette plateforme permettra d'héberger à terme des travaux multidisciplinaires (du matériau jusqu'au système et inversement) intéressant le site toulousain sur ce sujet d'enjeu sociétal fort dans un contexte de transition énergétique. ■

Une partie de la plateforme d'essais H2 du Laplace : le banc de tests pour piles à combustible PEM de 5kW.