

les défis du cea

Le magazine de la recherche et de ses applications

184

Novembre 2013



▶ **GRAND ANGLE**

DANS L'INTIMITÉ DES PAC

▶ **COUP DE PROJECTEUR**

LA BALADE MARTIENNE DE CURIOSITY

▶ **TOUT S'EXPLIQUE**

LE MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE EN TRANSMISSION

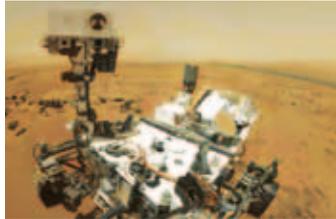


03 ACTUALITÉ

06 COUP DE PROJECTEUR

La balade martienne de Curiosity

La mission Mars Science Laboratory de la Nasa, à laquelle a contribué le CEA, livre les données des 100 premiers jours du rover Curiosity: le sol martien présente une grande diversité chimique et de l'eau!



08 À LA POINTE

Légo moléculaire *in vivo* 08

De l'or contre les tumeurs 09

Le molybdène voit la vie en infrarouge 09

Des bactéries à fort potentiel attractif! 10

Les étiquettes électroniques font forte impression 11



12 TOUT S'EXPLIQUE

Le microscope électronique en transmission: il permet d'étudier la structure et la composition chimique de la matière. Ces dernières années, il a atteint des résolutions records grâce aux correcteurs d'aberration des lentilles électromagnétiques.

14 GRAND ANGLE
Dans l'intimité des PAC
 Le déploiement des piles à combustible (PAC) nécessite de lever d'ultimes verrous technologiques quand à leur durabilité et leur compétitivité. Une mission que mène le CEA, notamment à travers sa plateforme de nanocaractérisation qui rassemble des équipements de pointe et des compétences uniques au monde.



22 À VOIR, À LIRE, À ÉCOUTER

Le CEA dans les médias 22

Kiosque 23

Sur le Web 23

ABONNEMENT GRATUIT

Vous pouvez vous abonner sur:
www.cea.fr/le_cea/publications, ou en faisant parvenir par courrier vos nom, prénom, adresse et profession à *Les Défis du CEA - Abonnements*. CEA. Bâtiment Siège. 91191 Gif-sur-Yvette.



Éditeur Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, R. C. S. Paris B77568019 | **Directeur de la publication** Xavier Clément | **Rédactrice en chef** Aude Ganier | **Rédactrice** Amélie Lorec | **Ont contribué à ce numéro** Patrick Philippon et Vahé Ter Minassian | **Comité éditorial** Susana Bahri, Alexandra Bender, Vincent Coronini, Claire Abou, Elizabeth Lefevre-Remy, Jean-Luc Sida, Brigitte Raffray, Emmanuelle Volant | **Iconographie** Michéline Bayard | **Infographie** Fabrice Mathé | **Photo de couverture** © CEA | **Diffusion** Lucia Le Clech | **Conception et réalisation** www.rougevif.fr | N°ISSN 1163-619X | Tous droits de reproduction réservés.
Ce magazine est imprimé sur du papier PEFC Magno Satin, issu de forêts gérées durablement. Imprimerie Sira.

DISTINCTION

LA FEMME SCIENTIFIQUE DE L'ANNÉE, C'EST ELLE!

Valérie Masson-Delmotte vient d'être distinguée par le prix Irène Joliot-Curie 2013, dans la catégorie « femme scientifique de l'année ». Directrice de recherche au CEA et responsable de groupes de recherche au LSCE¹, elle est également co-coordinatrice du chapitre « Climats du passé » du volet scientifique du 5^e rapport du GIEC².

Âgée de 42 ans, elle travaille depuis vingt ans sur la compréhension des mécanismes d'évolution du climat à partir d'archives naturelles (notamment les glaces polaires) et de modélisation. Directrice de recherche au CEA depuis 2008, elle a obtenu son habilitation à diriger des recherches (HDR) en 2004, à l'Université Pierre et Marie Curie sur le thème de la variabilité du climat et du cycle de l'eau. Le prix Irène Joliot-Curie est destiné à promouvoir la place des femmes dans la recherche et la technologie en France. Créé en 2001 par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et soutenu par la fondation EADS depuis 2004, ce prix a vu sa portée scientifique renforcée en 2011 par un partenariat toujours en vigueur avec l'Académie des sciences et l'Académie des technologies.



© CEA

Notes :

1. Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (unité mixte CEA/CNRS/UVSQ).
2. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

RELATIONS INTERNATIONALES

RESPONSABILITÉ CIVILE NUCLÉAIRE : L'INITIATIVE FRANCO-AMÉRICAINE PRÉSENTÉE À L'AIEA

L'Administrateur général du CEA a conduit la délégation française à la 57^e conférence générale de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) en septembre dernier à Vienne en Autriche. Bernard Bigot a prononcé la déclaration française en séance plénière devant les représentants des 159 États membres de l'Agence et a rencontré, lors d'une série d'entretiens bilatéraux, ses homologues des principales délégations ainsi que le Directeur général de l'AIEA, Yukiya Amano. L'occasion

pour l'Administrateur général de promouvoir la déclaration conjointe franco-américaine sur la responsabilité civile en matière de dommages nucléaires, signée en août dernier. Une déclaration qui permet aux deux pays de se rejoindre sur la définition des conventions internationales pertinentes en la matière. Elle appelle ainsi tous les États à adhérer à ces instruments juridiques comme première étape sur la route d'un régime mondial de responsabilité civile nucléaire.



© AIEA

◀ Cinquième jour de la 57^e conférence générale de l'AIEA.

ARTS & SCIENCES

ARCHITECTURE URBAINE OU CELLULAIRE : JEUX DE SUPERPOSITIONS AU CŒUR DE LA NUIT BLANCHE

Des cellules vivantes ont colonisé les murs de l'hôpital Saint-Louis à Paris ! Un étrange phénomène dû à la fibre artistique de biologistes du CEA qui, avec les plasticiens du groupe Laps, ont présenté leur œuvre¹ lors de la « Nuit Blanche » le 5 octobre dernier. En superposant l'image d'une cellule à celle d'un immeuble, ils ont voulu mettre en évidence les similarités et les différences entre les architectures de nos villes et celle de nos cellules. « De par leur taille, les cellules sont insensibles à la gravité. Les filaments qui constituent leur architecture interne obéissent ainsi à des lois différentes de celles régissant la construction d'un bâtiment » explique Manuel Thery, chercheur au CEA-IRTSV. Avec ses acolytes, il a reproduit la façade de l'hôpital au format des cellules et a filmé, des jours durant, les organismes évoluant sur la structure miniature. Ce sont ces films, accélérés, qui ont été diffusés pour une rencontre mémorable...



▲ Projection de division cellulaire sur la façade de l'Hôpital Saint-Louis.

Note:

1. Voir les explications sur le site de i-Télé: <http://www.itele.fr/chroniques/invite-matinale-week-end/manuel-thery-ou-lart-de-la-cellule-57649>

ARTS & SCIENCES

LE SON ET LA LUMIÈRE AU BOUT DES DOIGTS



Un spectacle inédit a été présenté en ouverture de la biennale Arts Sciences¹/Rencontres-i les 4 et 5 octobre derniers. Sur scène, l'artiste beatboxer Ezra ne jouait pas que de la musique, certes vocale, il contrôlait également l'ensemble du dispositif son et lumière de son concert avec une curieuse gestuelle. Tout réside dans un gant interactif truffé de microcapteurs et de batteries miniaturisées. Ce dispositif est le fruit d'une collaboration entre la compagnie Organic orchestra 2.0 et des chercheurs du CEA (Leti et Liten)² ainsi que des étudiants designers de l'ENSCI. Ce projet concrétise une approche innovante initiée au CEA en 2007, celle de faire se rencontrer les mondes de l'art et de la science. « Le regard des artistes nous intéresse beaucoup. La création et la démarche artistiques peuvent orienter et inspirer des pistes de recherches. Par exemple, le gant interactif d'Ezra pourrait très bien avoir des déclinaisons dans le champ du jeu vidéo ou du handicap... » a confié Michel Ida, directeur de l'innovation ouverte au CEA, à l'occasion de la performance.

Notes:

1. atelier créé par le CEA, la Scène nationale de Meylan et le CCSTI de Grenoble.

2. Une présentation du gant et de l'artiste sur http://www.youtube.com/watch?v=YBriAUKb_po

▶ Performance du beatboxer EZRA, muni de son gant interactif développé avec le CEA.

TEXTO

Carton plein pour iSketchnote

Ils espéraient lever 35 000 \$ de fonds pour lancer leur produit innovant iSketchnote (voir *Les défis du CEA* 183, p. 5). Ce sont finalement 346 127 \$ que l'équipe ISKN du CEA-Leti a récoltés sur le site de financement participatif Kickstarter. Quelque 2395 contributeurs, répartis sur plus de 40 pays des 5 continents, ont ainsi été séduits par la matrice qui numérise et enregistre toutes les notes ou croquis dessinés sur une simple feuille de papier... Alors que leur start-up ISKN doit voir le jour, Jean-luc Vallejo, Timothée Jobert et Tristan Hautson se préparent à présent à l'industrialisation d'iSketchnote pour envoyer aux quatre coins du monde les 3 000 matrices et 10 000 stylos précommandés. Le tout, en continuant la R&D autour d'un concept qui intéresse déjà des fonds d'investissement, des distributeurs et des grandes entreprises...



INTERVIEW
Gervais Johanet,
directeur adjoint de HEC Entrepreneurs

ÉCHANGE DE BONS PROCÉDÉS À LA « SILICON SACLAY »

Les 1^{er} et 2 octobre derniers, 96 étudiants d'HEC ont visité des laboratoires du CEA dans le cadre de l'opération « Silicon Saclay » d'HEC Entrepreneurs et du Centre d'entrepreneuriat d'HEC. Une opération, organisée pour encourager les synergies, qui s'est avérée féconde aussi bien pour les apprentis entrepreneurs que pour les chercheurs du CEA qui ont des technologies à valoriser...

En quoi consiste le cursus HEC Entrepreneurs ?

HEC Entrepreneurs est un master réservé à de hauts diplômés qui manifestent une intention entrepreneuriale certaine, quel que soit leur profil. Parmi les 96 membres de la promotion 2013, deux tiers ont suivi un cursus littéraire, juridique ou sont diplômés d'écoles d'ingénieurs et un tiers est issu des rangs d'HEC. Notre mot d'ordre : « Donner un concentré d'expériences » via un réseau de 300 professionnels (commerce, finance, marketing, etc.) qui inspirent et accompagnent les étudiants. Pour cela, nous nous appuyons sur une pédagogie unique en son genre, reposant sur quatre missions de terrain et des séminaires lors desquels les futurs entrepreneurs s'immergent dans des situations concrètes de vente (stage d'une semaine chez Darty), de management de crise (une semaine à l'École Navale), etc. L'objectif, à terme, est de donner les clés pour mener à bien un projet de création d'entreprise.

Quel est l'objet de cette visite sur le centre CEA de Saclay ?

Dans le cadre de ces missions, la précédente promotion s'est rendue à San Francisco, dans la Silicon Valley, pour y découvrir son écosystème entrepreneurial. Ici, le Plateau de Saclay bénéficie également d'un fort potentiel innovant avec des organismes de recherche d'excellence, des écoles prestigieuses et des grands groupes comme EDF ou Danone. Mais, pour développer une « Silicon Saclay », il nous faut favoriser les synergies en reliant les ressources entrepreneuriales et technologiques. Nous nous sommes donc rapprochés de ces grands acteurs pour y organiser des visites de laboratoires : Institut d'optique, Polytechnique, INRIA, CEA, Université Paris-Sud et laboratoires CNRS associés. À l'issue de ces rencontres, les 96

étudiants répartis en groupes ont été invités à présenter des opportunités d'innovation dérivées des technologies présentées.

Et quelles thématiques ont particulièrement intéressé les étudiants ?

Parmi les treize dossiers défendus, onze ont valorisé des technologies du CEA découvertes lors des ateliers Sciences du vivant, Sciences de la matière, Systèmes numériques intelligents et Énergie nucléaire. De quoi imaginer différentes applications : valorisation des terres rares, IRM pour la prospection pétrolière, détection et décontamination à l'uranium, bras robotisés commandés par la pensée, simulateur d'interventions de chirurgie esthétique, etc. Cette créativité a par ailleurs été stimulée par des conférences sur l'innovation¹ et des rencontres préalables avec des entrepreneurs de start-up issues de technologies CEA.

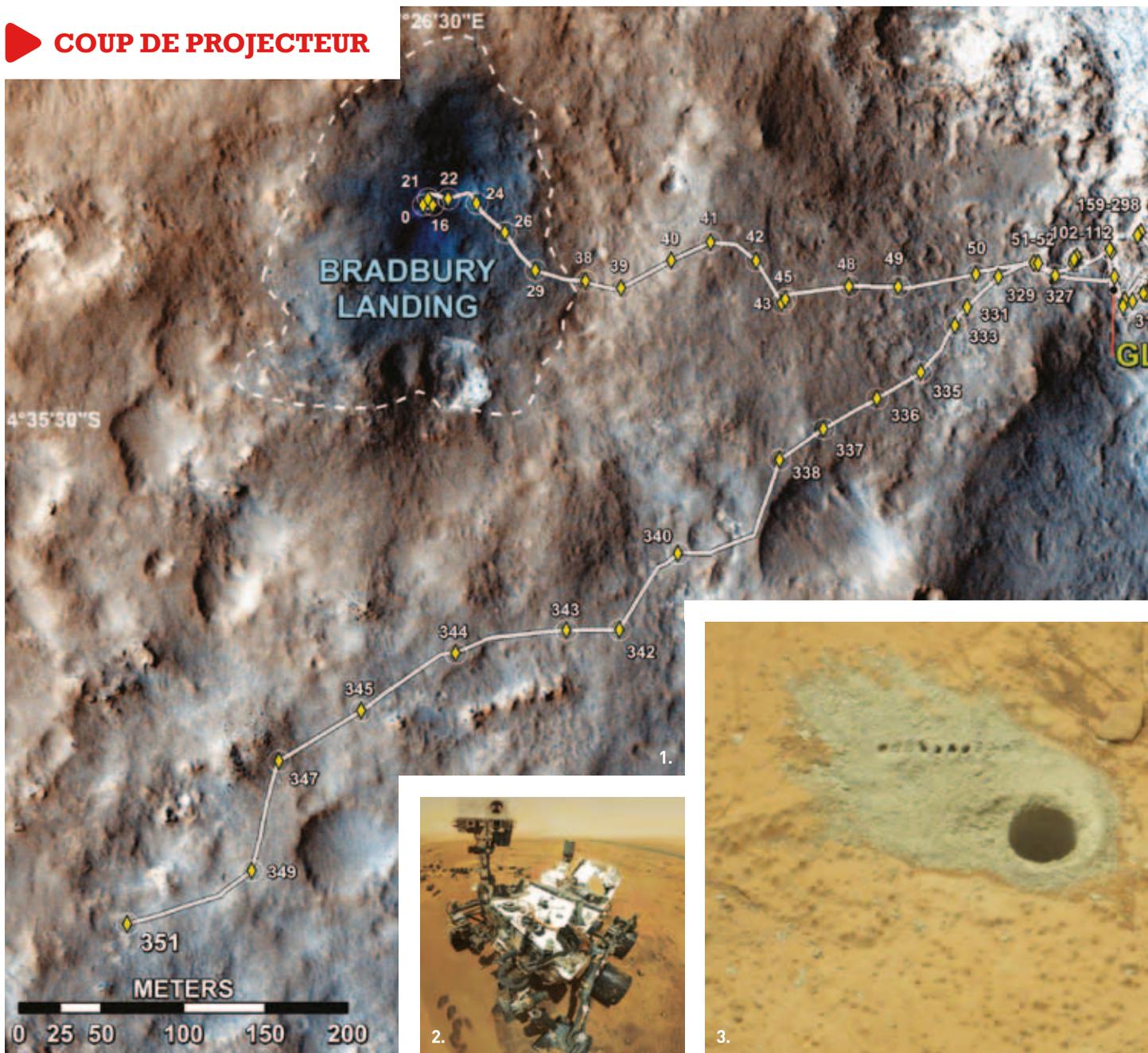
Les échanges ainsi favorisés ont-ils vocation à se pérenniser ?

Si les étudiants sont revenus emballés de leurs visites, les chercheurs du CEA se sont également réjouis de bénéficier de l'éclairage entrepreneurial des futurs diplômés. Des contacts vont donc se poursuivre sur le plan individuel. Par ailleurs, certaines propositions ont révélé un potentiel que nous - Étienne Krieger d'HEC Entrepreneurs, Yvan Baumann, Responsable de l'essaimage à la Direction de la valorisation du CEA et moi-même - sommes prêts à accompagner. Le CEA et HEC sont en effet dotés de structures spécialisées dans l'aide à la création d'entreprises innovantes. Affaires à suivre et surtout, à renouveler !

Propos recueillis par Aude Ganier

Note :

1. Conférences du CEA sur l'innovation relatives à la transition énergétique, aux technologies pour la santé et à l'usine numérique.



1. Parcours du rover Curiosity entre août 2012 et août 2013 (1 686 m en 351 jours).
 2. Autoportrait du rover Curiosity réalisé grâce à la caméra installée au bout de son bras articulée (absent sur la photo).
 3. Petits trous : impacts des tirs lasers de la LIBS ; gros trou : forage pour collecter de la poussière.
 4. 5 et 6. Images prises par Curiosity au cours de son périple, à l'aide de ses caméras Navcam et Hazcam.



© NASA/JPL-Caltech

10 000

Nombre de spectres chimiques enregistrés et transmis par Chemcam durant les 100 premiers jours d'exploration martienne de Curiosity.

5 à 9 %

Part d'eau contenue dans la fraction la plus fine du sol martien.



LA BALADE MARTIENNE DE CURIOSITY

Une grande diversité chimique et de l'eau ! Telle serait la composition du sol martien selon l'analyse des premières données récoltées par le rover Curiosity de la mission Mars Science Laboratory de la Nasa. Une mission à laquelle a contribué le CEA en développant la technologie d'analyse à distance Libs pour l'instrument ChemCam embarqué sur Curiosity...

Les 100 premiers jours de l'exploration martienne du rover Curiosity sont déjà riches d'enseignements ! Les analyses effectuées par des chercheurs de l'IRAP¹, en collaboration avec des équipes franco-américaines, livrent deux grandes informations². Tout d'abord, le sol martien révèle une diversité chimique plus grande qu'observée jusqu'alors. Néanmoins, sa fraction la plus fine semble très homogène à la surface ce qui reflète l'efficacité du processus de mélange à l'échelle globale tel que les tempêtes de poussière. Par ailleurs, cette fraction fine, riche en fer et en magnésium, est constituée d'une phase amorphe hydratée contenant 5 à 9 % d'eau. Cela pourrait correspondre à une partie importante du réservoir d'eau déjà observé à la surface de Mars au cours de missions précédentes. Ces données ont été récoltées par ChemCam, et d'autres instruments embarqués sur Curiosity comme SAM³, sur près de 140 échantillons de sol, le long d'une traverse de 400 mètres.

Le CEA consulté en tant qu'expert des spectres chimiques atypiques...

Tout a commencé le 6 août 2012, jour où le rover Curiosity a atterri sur Mars. Depuis, il en arpente la surface pour analyser sa composition chimique, sa minéralogie et ses propriétés physiques. Objectif : étudier l'évolution de l'environnement martien et déterminer si ce dernier a pu être habitable par le passé. Le CEA a pris part à cette aventure scientifique en élaborant le dispositif d'analyse spectroscopique induite par laser, LIBS⁴ pour l'instrument Chemcam. Développée de longue date au CEA pour les besoins du nucléaire, la technologie consiste à produire un plasma[•] en focalisant un faisceau laser sur la cible à caractériser. Cette dernière peut se situer entre 2 et 7 mètres autour du Rover. « Plusieurs tirs pulsés de laser sont réalisés au même endroit, ce qui permet d'étudier jusqu'au premier millimètre de la surface du sol. Les premiers tirs sont caractéristiques de la poussière, les autres sont ensuite représentatifs de la roche. La moyenne des spectres chimiques[•] issus de ces tirs sur un même point permet également de réduire considérablement les incertitudes des résultats » explique Jean-Luc Lacour, chercheur à la Direction de l'énergie nucléaire du CEA. Pendant les opérations, le CEA a été consulté en tant qu'expert « LIBS », notamment pour analyser des spectres atypiques.

• **Plasma** : gaz chaud composé d'atomes, d'ions et d'électrons.

• **Spectre chimique** : dans le micro-plasma, les atomes excités émettent une lumière en retombant à leur état stable. Celle-ci est ensuite analysée par spectrométrie pour fournir la composition chimique de roches du sol.

Notes :

1. Institut de recherche en astrophysique et planétologie.
2. Résultats publiés dans la revue Science.
3. Sample Analysis on Mars.
4. Laser-induced breakdown spectroscopy.

Amélie Lorec

CHIMIE MOLÉCULAIRE

LÉGO MOLÉCULAIRE IN VIVO

Assembler des molécules est un jeu d'enfants pour les chimistes, encore faut-il y parvenir sans perturber leurs propriétés ni celle de leur milieu pour que ces techniques soient utilisables en biologie. Une prouesse à laquelle sont parvenues deux équipes du CEA.

Si les chimistes ont à leur disposition des milliers de techniques pour bâtir des édifices moléculaires, très peu d'entre elles sont utilisables dans des milieux biologiques, comme le sang ou l'intérieur de cellules. Discipline neuve âgée d'une douzaine d'années seulement, la Chimie « click » propose de combler cette lacune. Une mission de haut vol qui passe par le développement de procédés, à température ambiante et en présence d'eau. Deux équipes du CEA spécialisées dans ce domaine, viennent de réussir le tour de force d'ajouter une nouvelle méthode à la dizaine connue à ce jour. Dans la revue *Angewandte Chemie*, Frédéric Taran et ses collègues du CEA-IBITec-S expliquent comment ils ont découvert un moyen pour assembler deux entités - comme des molécules, des protéines, des nano-particules... - sans perturber leurs propriétés, ni celles de leur milieu.

Dénicher le couple idéal... et l'entremetteur !

Pour atteindre cet objectif, les chercheurs ont, au préalable, sélectionné les entités candidates parmi des milliers de combinaisons de composés possibles, grâce à des dispositifs de **criblage haut débit**. Leur procédé fonctionne ensuite en deux temps : « Il consiste, explique Frédéric Taran, à munir d'un motif particulier chacun des deux éléments à assembler : un groupement chimique appelé "sydnone" pour l'un et un groupement dit "alcyne" pour l'autre. Ensuite, ces éléments peuvent "s'emboîter" par l'intermédiaire des liaisons s'établissant entre les motifs (sydnone et alcyne) en les mettant en présence d'un catalyseur, en l'occurrence du cuivre ».

Cette technique permet ainsi de connecter deux entités dans des milieux aussi complexes que le sang humain. De quoi donner lieu, estiment ces scientifiques, à de nombreuses applications dans le domaine médical et dans celui des biotechnologies.

Vahé Ter Minassian

CEA-IBITec-S

L'Institut de biologie et de technologie de Saclay mène des projets de recherche fondamentale et de recherche finalisée dans des domaines très variés des sciences du vivant dont la pharmacocinétique de médicaments ou de molécules biologiques.

• **Criblage haut débit** : technique visant l'étude et l'identification de molécules aux propriétés nouvelles, biologiquement actives.

Criblage de plus de 500 expériences. Plus la couleur jaune est intense ▶
plus les rendements de couplage sont élevés.

RADIOTHÉRAPIE

DE L'OR CONTRE LES TUMEURS

Augmenter les doses de radiothérapie lors du traitement des tumeurs, tout en préservant les tissus sains : une piste explorée par des chercheurs du CEA, grâce à des nanoparticules d'or...

Irradier les cellules tumorales pour les détruire : si la radiothérapie a fait ses preuves, il lui reste encore difficile de ne cibler que les tissus malins. Des chercheurs du CEA-Inac, en collaboration avec une équipe Inserm basée à l'ESRF¹, misent sur une nouvelle approche thérapeutique : injecter dans la tumeur des nanoparticules d'or qui sont activées par rayonnement synchrotron. « Les nanoparticules d'or absorbent davantage le rayonnement que le milieu environnant lorsque ce rayonnement est à basse énergie, comme celui du Synchrotron (88 keV)². L'irradiation cible ainsi la zone tumorale la plus riche en nanoparticules et épargne les tissus sains. Cela permet d'augmenter la dose déposée dans la tumeur » explique Jean-Luc Ravanat du CEA-Inac. Ces résultats ont pu être observés chez des rongeurs dont le

taux de survie a augmenté de manière significative par rapport à ceux traités par irradiation seule. Une piste que les scientifiques envisagent pour progresser dans le traitement des glioblastomes, tumeurs cérébrales aujourd'hui incurables.

Aude Ganier



CEA-Inac

L'institut nanosciences et cryogénie est un acteur majeur de la recherche fondamentale à Grenoble avec des activités en physique, chimie voire biologie qui se regroupent sous la bannière des nanosciences.

Notes :

1. European Synchrotron Radiation Facility, Installation européenne de rayonnement synchrotron située à Grenoble.
2. Ce n'est plus le cas lorsque les rayonnements sont de plus haute énergie (supérieurs au MeV), comme ceux utilisés en radiothérapie.

MATÉRIAUX

LE MOLYBDÈNE VOIT EN INFRAROUGE

Avec l'essor d'Internet et des échanges numériques, l'utilisation des sources ou amplificateurs optiques se généralise dans tous les réseaux de télécommunications. Un marché florissant qui motive de nombreuses innovations, dont celles du CEA-Iramis au sein d'une collaboration multilatérale, qui pourraient dopper les performances lumineuses...

Un procédé inédit pour amplifier à moindre coût les signaux des fibres optiques[•] ? C'est peut-être ce qu'ont réussi à mettre au point des chercheurs du CIMAP¹ et de l'ISCR²... Dans la revue « *Advanced functional materials* », ils expliquent que l'ajout de simples billes (ou « clusters ») de molybdène à un matériau plastique, dopé aux terres rares, permet d'augmenter considérablement ses capacités lumineuses. Une découverte suffisamment prometteuse - notamment grâce à la caractérisation de ce matériau par des chercheurs du CEA-Iramis - pour avoir donné lieu à un dépôt de brevet !

Réduire les quantités d'erbium

Un grand nombre de fibres optiques est fait en silice ou en plastique PMMA (Polyméthacrylate de méthyle). « Afin de produire le signal lumineux infrarouge utilisé pour véhiculer

l'information, les fibres en silice sont dopées sur une longueur de plusieurs mètres, en terres rares, comme l'erbium (Er3+) », expliquent Christophe Labbé et Julien Cardin du CIMAP. Les scientifiques ont démontré que la quantité de lumière infrarouge produite par des ions Er3+, soumis à un rayon laser UV, est multipliée par dix, lorsqu'ils sont mélangés, dans le PMMA, à des « clusters » de molybdène bon marché réalisés par des chercheurs de l'ISCR. Cette association permettrait en outre de réduire les quantités d'erbium nécessaire, un métal cher et dont l'utilisation est jugée polluante. Si les détails du phénomène mis en évidence restent encore incompris, il pourrait, à l'avenir, ouvrir la voie à une génération de sources lumineuses plastiques, façonnables à volonté.

Vahé Ter Minassian

- **Fibre optique** : fil en verre ou en plastique permettant de transporter une onde lumineuse, qui, modulée en intensité, véhicule des informations.



Notes :

1. ENSICAEN-Université de Caen-CNRS-CEA.
2. Institut des sciences chimiques de Rennes UMR CNRS-Université de Rennes.



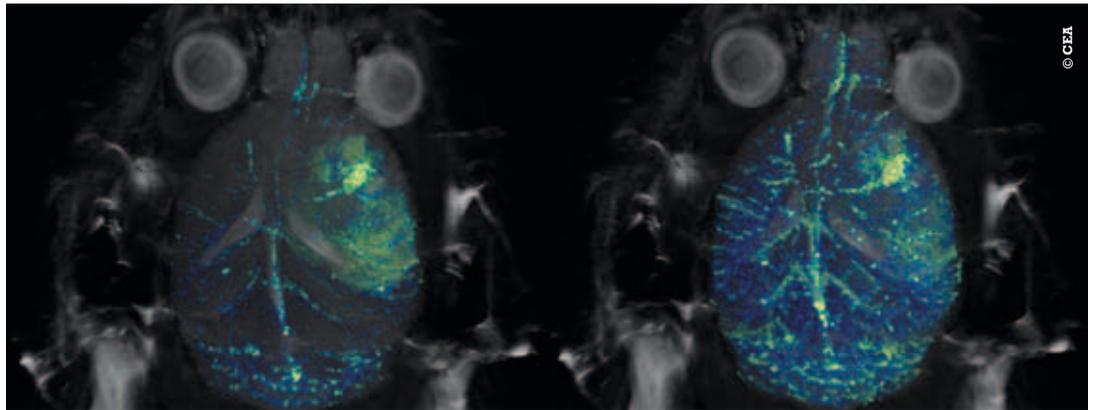
CEA-Iramis

L'Institut rayonnement et matière de Saclay rassemble sept laboratoires du CEA, en partenariat avec l'École Polytechnique, le CNRS et l'ENSICAEN. Il mène des recherches fondamentales en nanosciences et systèmes complexes pour les énergies et les technologies pour l'information et la santé.

BIOTECHNOLOGIES

DES BACTÉRIES À FORT POTENTIEL ATTRACTIF!

Certaines bactéries ont la capacité de répondre au champ magnétique terrestre. Une faculté intéressante pour les chercheurs du CEA-IBEB qui parviennent à percer le secret de la production de minuscules cristaux de magnétite. Les propriétés des nano-aimants de ces bactéries laissent présager de multiples applications dans les domaines de l'imagerie, du traitement des cancers ou encore de la bio-dépollution.



© CEA

Reconstitution de la vascularisation de cerveaux de souris, mise en évidence par injection de nano-cristaux de magnétite.

Les bactéries magnétotactiques ont cela d'original qu'elles sont capables de synthétiser des nano-aimants. Il s'agit plus précisément de nano-cristaux de magnétite qui, alignés le long d'un filament d'actine, agissent comme l'aiguille d'une boussole et permettent à la bactérie de répondre au champ magnétique terrestre. Ces nano-cristaux sont composés d'oxygène et de fer sous deux états : Fe II (réduit) et Fe III (oxydé). Reste à savoir comment la bactérie produit ces éléments, notamment le Fe III qui est quasiment insoluble. David Pignol, chef de laboratoire au CEA-IBEB à Cadarache et son équipe viennent de démontrer pour la première fois l'implication de la protéine MamP : en étudiant sa structure, ils ont découvert qu'elle présentait un site de fixation du Fe II et qu'elle était capable de l'oxyder en Fe III et même de le stabiliser. Un résultat qui a été confirmé *in vitro* en observant la production d'un précurseur de magnétite par la protéine MamP à partir uniquement de Fe II.

peuvent réagir au champ magnétique de l'appareil. Pour ce faire, des bactéries magnétotactiques ont été cultivées puis cassées pour en extraire les nano-cristaux et les injecter dans une souris afin d'imager la vascularisation de son cerveau. « Forts de ce résultat, nous souhaitons à présent investiguer la possibilité de greffer une fonction biologique à la surface des nano-aimants pour les adresser directement à une cible, comme des cellules cancéreuses. » précise David Pignol. Autre application possible : la biodépollution. En équipant directement les bactéries magnétotactiques d'une enzyme dégradant des agents polluants ou d'un système de fixation de métaux lourds, celles-ci pourraient traiter des effluents et être ensuite récupérées par aimantation.

Amélie Lorec



CEA-IBEB

L'institut de biologie environnementale et biotechnologie étudie les mécanismes d'adaptation aux stress environnementaux, aux polluants métalliques et aux rayonnements ionisants. Ses recherches portent également sur la production de molécules à forte valeur ajoutée.

• **Précurseur** : substance dont dérivent une ou plusieurs autres substances par transformations biochimiques.

Notes :

1. Centre de neuro-imagerie en champ intense au CEA de Saclay.
2. Dans le cadre du projet ANR MEFISTO.

Des propriétés intéressantes à plus d'un titre

Plusieurs applications biotechnologiques sont envisagées. En partenariat avec Neurospin¹, les scientifiques mènent une étude² préclinique sur l'utilisation de ces nano-aimants comme agent de contraste en IRM puisqu'ils

TEXTO

Tamaris fait vibrer l'habitat individuel

Forte de son expertise dans la gestion du risque sismique pour les installations nucléaires, la Direction de l'énergie nucléaire du CEA met ses compétences au service de l'habitat individuel. Elle a été sollicitée par l'Institut FCBA¹, porteur du projet SISBAT financé par l'ANR, pour réaliser des essais sismiques sur sa plateforme expérimentale Tamaris. Il s'agit de tester la tenue au séisme de deux maisons, l'une à ossature bois et l'autre à murs maçonnés, chacune avec une toiture en charpente industrialisée en bois. Objectif : développer un outil d'analyse fiable de la vulnérabilité sismique de ce type d'habitat. Ces essais doivent permettre de récupérer des données expérimentales pour valider la modélisation. La maison à ossature bois a été testée en septembre ; la seconde, actuellement en construction à Tamaris, le sera en décembre prochain. Ce projet multipartenaires² vient consolider le positionnement de Tamaris comme plateforme expérimentale européenne leader sur la gestion du risque sismique.

Notes :

1. Forêt Cellulose Bois-construction Armeublement.
2. FCBA, CSTB, CEA, BRGM, 3S-R, LaMI, LMT, Université de Shizuoka, SCIBO, MiTEK, AGINCO.

MICROÉLECTRONIQUE

LES ÉTIQUETTES ÉLECTRONIQUES FONT FORTE IMPRESSION

L'interconnexion entre les objets passe par le développement de technologies permettant de graver des étiquettes électroniques sur tous types de supports souples (papier, plastiques...). Les chercheurs du CEA-Iramis ont mis au point un procédé économique et écologique d'impression à froid, qui intéresse les industriels.

« **P**lusieurs dizaines de milliards d'objets seront connectés dans les années à venir, constituant un marché faramineux : l'Internet des objets » se réjouissent Pascal Viel et Thomas Berthelot, chimistes au CEA-Iramis. Pour être « connecté », un objet doit porter, au minimum, une étiquette électronique (RFID par exemple) permettant de le relier à une base de données ou à une page web. Cette étiquette, il faut l'implanter sur un support souple, comme du papier ou un polymère, avec des procédés très peu coûteux de type **roll to roll**. Or, aujourd'hui, les pistes conductrices imprimées – par projection d'encre contenant des nanoparticules métalliques – nécessitent un chauffage important pour souder les nanoparticules. Il y a donc un compromis à trouver entre la température de recuit, la conductivité atteinte et la nature du substrat, ce qui exclut *de facto* les plastiques les moins coûteux. C'est là qu'intervient le savoir-faire du laboratoire de Saclay.

L'adaptation d'une technologie déjà brevetée

En 2007, l'équipe brevetait le procédé Graffast® de métallisation de surface à froid¹. Mais pour passer de la surface pleine au trait, il a fallu adapter la technique qui comporte désormais plusieurs étapes. Une imprimante

projette des gouttelettes de réactif qui se fixent sur le support puis se polymérisent sous l'effet de la lumière ; la piste ainsi formée reçoit le métal dans un bain de sels de cuivre (par exemple) à faible température. Résultat : une adhésion et une conductivité maximales, sans chauffage, avec une « simple » imprimante à jet d'encre. « C'est un procédé **bottom-up**, donc sans gaspillage de matière première ni déchet à recycler » ajoute Thomas Berthelot. Breveté en 2013, le procédé s'applique aux antennes RFID, aux cartes à puces, aux cartes SIM et aux connexions souples en général. « Des industriels sont intéressés et nous devons être réactifs car le marché ne va pas nous attendre » conclut Pascal Viel.

Patrick Philipon



CEA-Iramis

L'Institut rayonnement et matière de Saclay rassemble sept laboratoires du CEA, en partenariat avec l'École Polytechnique, le CNRS et l'ENSICAEN. Il mène des recherches fondamentales en nanosciences et systèmes complexes pour les énergies et les technologies pour l'information et la santé.

• **Roll to roll** : procédé continu où une bande de support souple est déroulée, traitée (imprimée, perforée, enrobée, etc.) puis ré-enroulée. C'est le modèle classique de l'imprimerie offset.

• **Bottom-up** : procédé qui consiste en un ajout de matière sur un support, à partir de l'assemblage de ses constituants élémentaires à l'échelle la plus fine (atome par atome) ; contrairement au procédé *top-down* qui en retire à un bloc (par exemple la photolithographie ou l'usinage du métal).

Note :

1. Procédé commercialisé depuis par la start-up du CEA Pegastech.

Montage artistique d'une antenne RFID (en jaune) sur la photo optique des pistes métalliques (en cuivre) réellement réalisées sur une feuille flexible de polyéthylène téréphtalate.



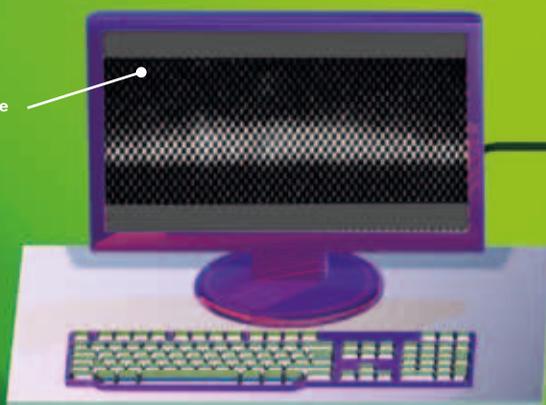
LE MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE EN TRANSMISSION

Le microscope électronique en transmission (MET) permet d'étudier la structure et la composition chimique de la matière. Son utilisation en mode « balayage » consiste à déplacer sur la surface d'un échantillon un flux focalisé d'électrons et d'enregistrer sur des détecteurs les électrons qui ont interagi avec la matière lors de leur traversée de l'échantillon (changement de trajectoire, perte d'énergie...). Ces dernières années, ce dispositif a atteint des résolutions records grâce aux correcteurs d'aberration des lentilles électromagnétiques. Explications...

Balayage électronique à l'échelle atomique

Focalisé à l'aide de lentilles électromagnétiques, un faisceau d'électrons balaye l'échantillon point par point. Grâce à des correcteurs d'aberration des lentilles, la sonde électronique, partie du faisceau la plus fine, peut atteindre 50 pm de diamètre ! Ainsi, la résolution du microscope est inférieure à l'Angstrom (distance entre les atomes) : le faisceau peut passer entre les atomes et l'on obtient une image à l'échelle atomique de la matière. L'échantillon préparé est très fin (de 1 à 100 nm) pour permettre aux électrons de le traverser.

Image de la structure atomique



Infographie : Fabrice Mathé - textes : Amélie Lorec

Image de la structure

Un détecteur annulaire, placé sous l'échantillon, recueille les électrons qui ont été diffusés sur de grands angles par la matière. Synchronisée avec le balayage du faisceau, l'intensité recueillie par le détecteur est alors traduite, point par point, en image. Lorsque le faisceau interagit avec un atome lourd : une grande partie de ses électrons voit sa trajectoire fortement déviée sur l'anneau du détecteur. Sur l'image, un point clair apparaît. En revanche, si le faisceau interagit avec un atome plus léger : les électrons sont plus faiblement déviés et le détecteur en collecte moins. À l'image, cela se manifeste par un point plus sombre. L'image à l'échelle atomique est ainsi formée par un contraste chimique, les atomes lourds apparaissant plus brillants que les atomes légers.

Spectromètre de la composition chimique

Les électrons qui passent au milieu du détecteur annulaire continuent leur trajectoire jusqu'au spectromètre installé sous la colonne du microscope. Ce dernier mesure alors la perte d'énergie du faisceau par rapport à son énergie initiale de 300KeV. Cette différence est ensuite retranscrite sous forme de spectre pour connaître la composition chimique des atomes sondés, puis de l'échantillon entier.

Lentilles électromagnétiques

Faisceau d'électrons

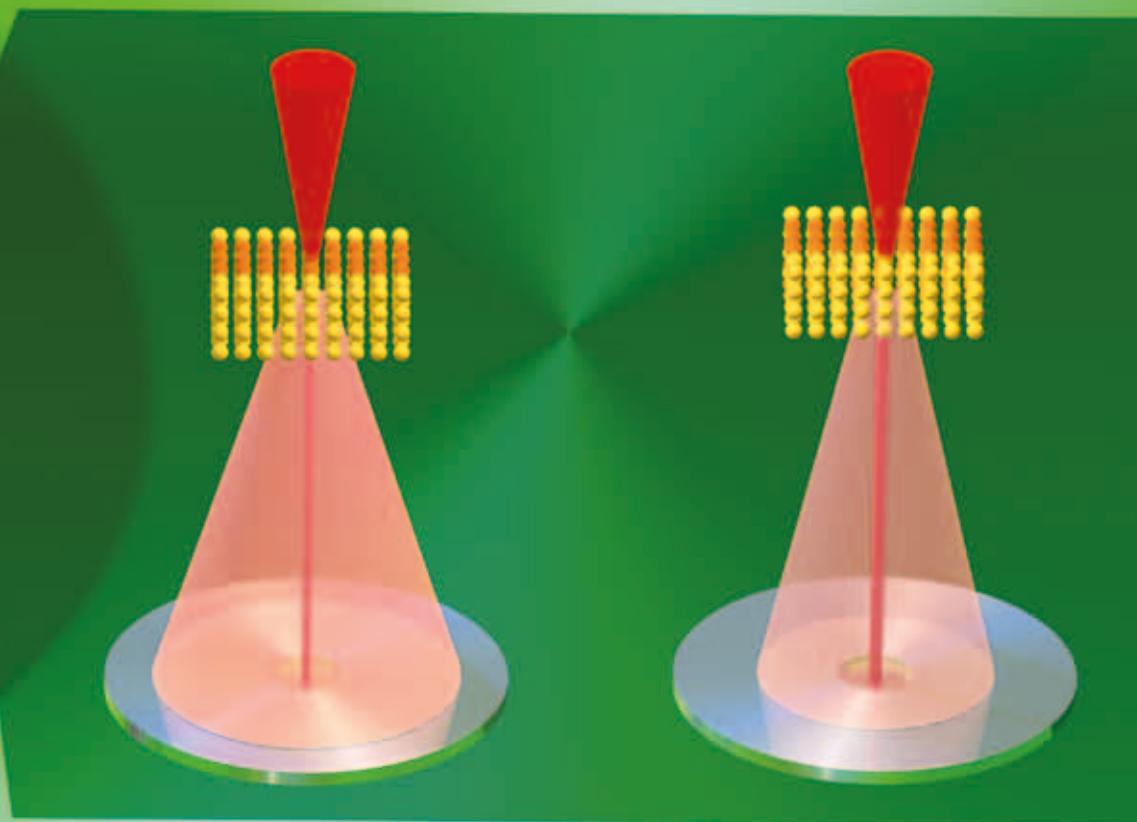
Correcteur d'aberration des lentilles

Échantillon

Détecteur annulaire

Écran fluorescent

Spectromètre



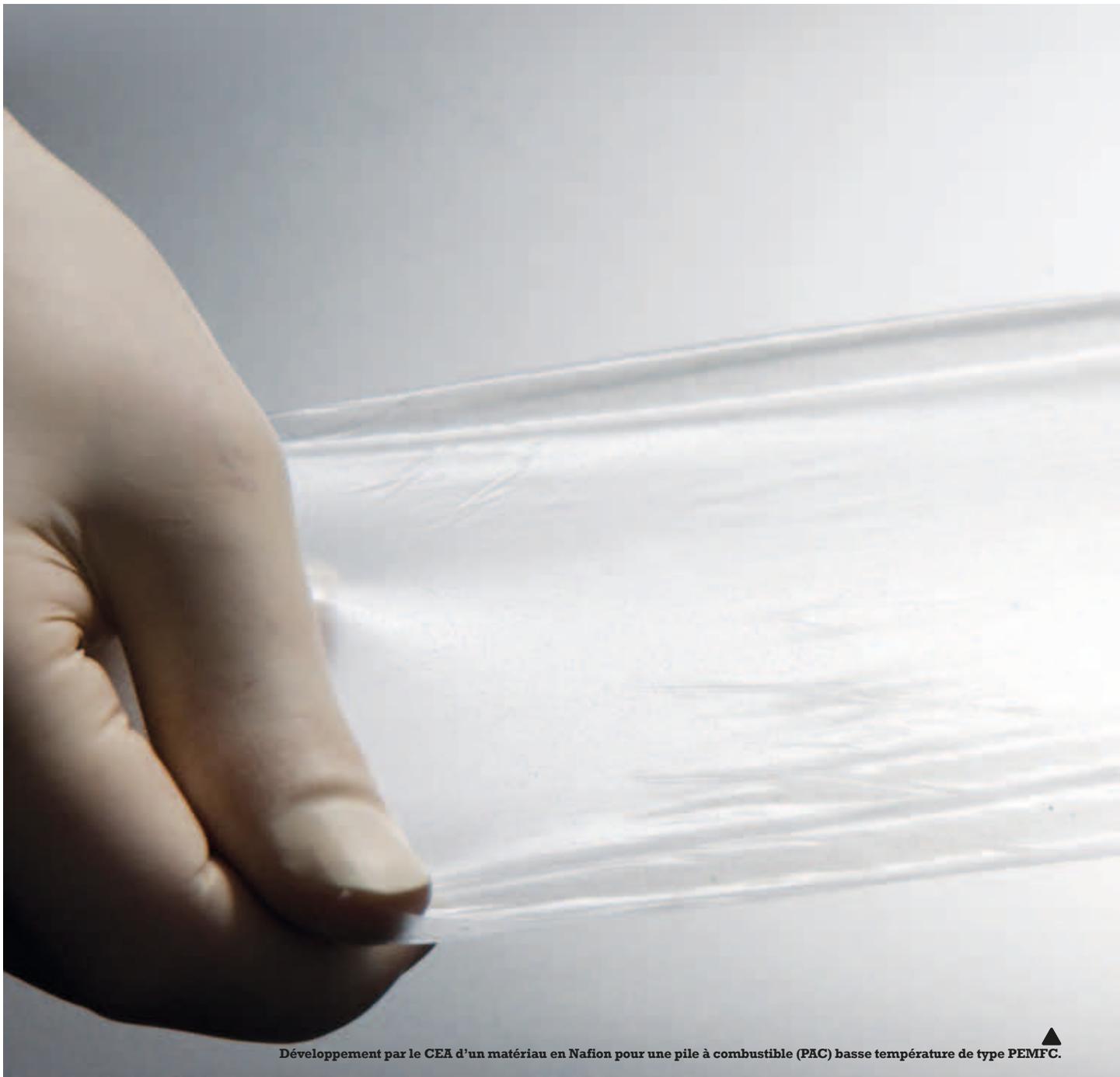
Interaction électrons/atome lourd

Interaction électrons/atome léger

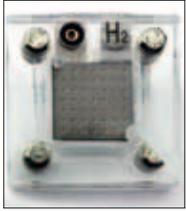
À savoir

En raison de sa très haute résolution, ce type de microscope est extrêmement sensible aux perturbations extérieures : champs magnétiques, vibrations mécaniques, fluctuations thermiques... Pour éviter que les mesures ne soient impactées, il est confiné dans un caisson qui l'isole de son environnement.

DANS L'INTIMITÉ DES PAC



Développement par le CEA d'un matériau en Nafion pour une pile à combustible (PAC) basse température de type PEMFC. ▲



Objet à la fois simple et complexe, la pile à combustible (PAC) est promise à un bel avenir. Les progrès réalisés ces dernières années ouvrent la porte à de multiples applications dans les domaines des transports, de la téléphonie ou de la production d'électricité. Demeurent toutefois des verrous à lever pour en assurer la durabilité et la compétitivité. Grâce à sa plateforme de nanocaractérisation à Grenoble, le CEA dispose de tout un arsenal de technologies de pointe et bénéficie de sa proximité avec les Très grands instruments de recherche ESRF et ILL. Autant d'outils pour percer les secrets les plus intimes de la matière en descendant à l'échelle du nanomètre. *Dossier réalisé par Amélie Lorec*

LE PAC(K) TOUT COMPRIS DU CEA

**PERCER LES SECRETS
DE L'ÂME... À L'ÉCHELLE
ATOMIQUE!**

**INTERVIEW
OLIVIER LEMAIRE**
La PNFC: un voyage au cœur de la matière

LE PAC(K) TOUT COMPRIS DU CEA

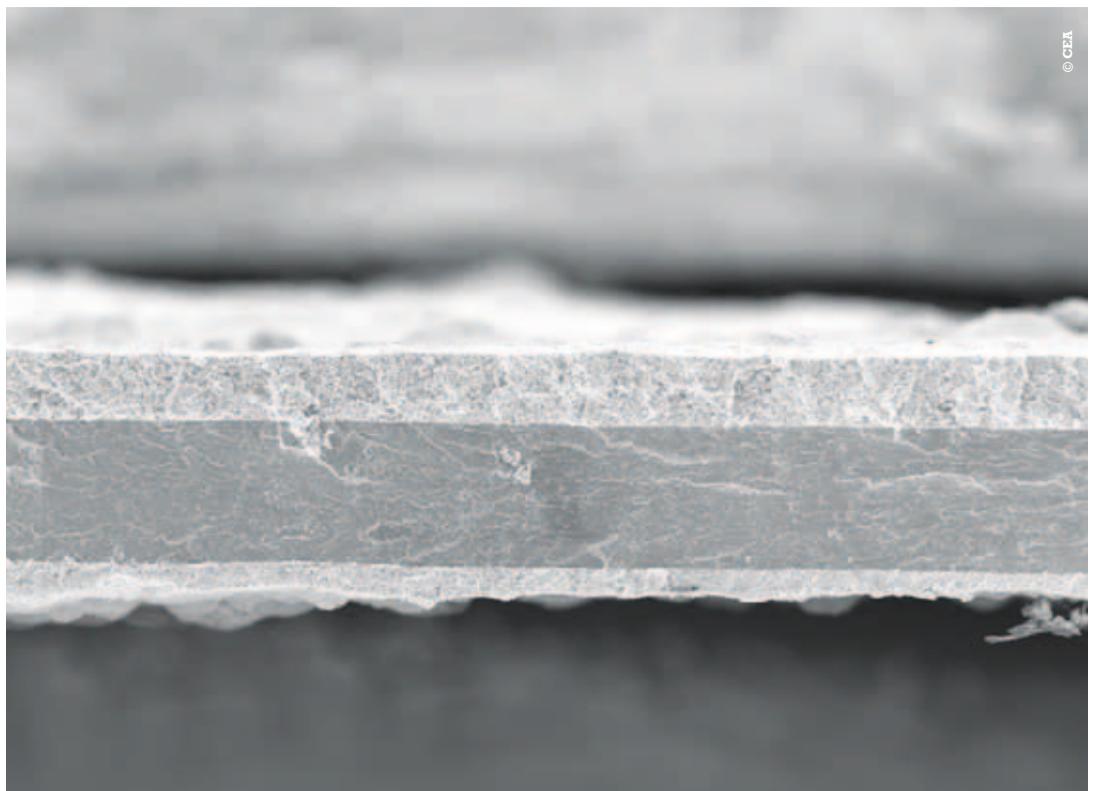


Image obtenue en microscopie à balayage d'une membrane de PEMFC entourée de ses deux couches actives.

Plus compactes, plus réactives, supportant mieux les cycles arrêt-démarrage, les piles à combustibles (PAC) à basse température présentent de nombreux atouts, qui en font des candidates idéales pour de multiples applications. Encore faut-il en optimiser la durabilité et la compétitivité. Un enjeu que le CEA entend bien relever, grâce aux nombreuses compétences qu'il maîtrise, notamment en nanocaractérisation.

Convertir une énergie chimique en énergie électrique à partir d'hydrogène et d'oxygène, avec de l'eau pour unique produit : voici le principe de fonctionnement de la pile à combustible, ou PAC comme on l'appelle dans le jargon scientifique. Il en existe plusieurs types qui se différencient notamment par la nature de l'électrolyte[•], qui définit la température et le mode de fonctionnement de la pile, et de fait, ses applications. Au CEA, nombreuses sont les recherches menées sur cette technologie, en privilégiant le développement d'une pile « basse température » à membrane échangeuse de protons, PEMFC¹ (voir encadré). « Cette PAC a connu des développements très importants au CEA ces 15 dernières années » précise Laurent Antoni, chef de département au CEA-Liten. Et ce, en raison des avantages qu'elle présente : un système

compact, un temps de démarrage court et une bonne tenue aux cycles fréquents arrêt-démarrage, par comparaison aux technologies dites à haute température.

Une maîtrise des PAC de A à Z

En découlent de nombreuses applications comme le « stationnaire » (groupes électrogènes, couplage aux énergies renouvelables...), le « nomade » (téléphone, ordinateur) et surtout le transport, où la PEMFC est une candidate idéale, aussi bien pour les marchés de niche que pour ceux de masse (voir encadré). Dès lors, les Directions de la Recherche Technologique, des Sciences de la Matière, des Applications Militaires et des Sciences de la Vie du CEA allouent des forces vives aux recherches sur ces PEMFC, tel que l'explique Laurent Antoni : « Nous

• **Électrolyte** : élément chargé de véhiculer les ions.

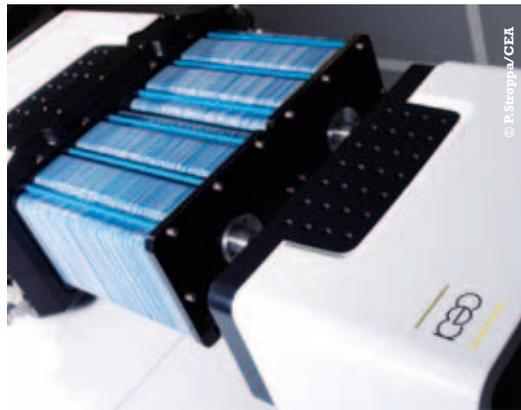
nous positionnons à tous les stades de leur développement : modélisation des composants ou systèmes pour proposer de nouvelles architectures ; conception des composants pour la fabrication de prototypes et la réalisation des tests de fonctionnement ; caractérisation des composants pour contrôler leur mise en forme, comprendre le comportement des matériaux après usage au niveau atomique et vérifier leur conformité aux modèles. » Des démonstrateurs sont également réalisés pour effectuer des tests de performances et de durabilité, soit en interne avec le voilier Zéro CO₂ créé en 2010, soit lors de partenariats comme celui avec PSA Peugeot Citroën qui a donné naissance à la pile GENEPAC en 2006.



◀ PAC du voilier Zéro CO₂.

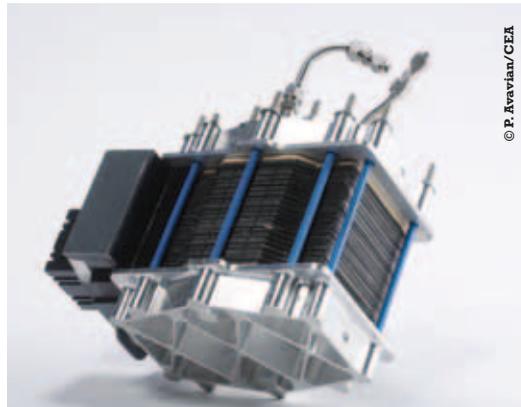
Une plateforme d'excellence, pour aller au cœur de la matière

Toute cette chaîne de compétences est bien utile pour relever les nombreux défis de la PAC. Des solutions restent en effet à trouver pour améliorer la synthèse et le stockage de l'hydrogène, tout en réduisant les coûts ; et, au sein de la pile, pour obtenir des réactions électrochimiques plus efficaces et une meilleure circulation des fluides. L'objectif à terme est de développer des PAC durables et compétitives. « La pile à combustible est un objet simple et complexe à la fois » admet Olivier Lemaire, chef de laboratoire au CEA-Liten, « simple, de par son fonctionnement et sa maturité ; complexe, car son développement demande des compétences pluridisciplinaires, et de nombreuses incertitudes subsistent notamment sur sa perte de performance au cours du temps ». L'un des enjeux est donc d'assurer la durée de vie des composants.



◀ Pile GENEPAC issue du partenariat CEA/PSA Peugeot Citroën.

Or, c'est désormais à l'échelle nanométrique, voire en deçà, que la matière doit être scrutée pour comprendre la dégradation des composants. Cette discipline, appelée « nanocaractérisation », est devenue l'un des cœurs de métiers du CEA, grâce à sa plateforme de nanocaractérisation (PFNC). Créée en 2006 sur le centre de Grenoble et pilotée par les instituts Inac, Léti et Liten du CEA, elle est dotée des meilleurs outils au monde et bénéficie de sa proximité avec les Très Grands Instruments de Recherche ESRF² et ILL³, tous deux installés sur le polygone scientifique de Grenoble et membres de GIANT⁴. Support pour les projets internes du CEA, elle est également accessible aux partenaires académiques et industriels dans le cadre de programmes de collaboration. De quoi sensiblement progresser dans l'intimité des PAC...



◀ PAC ayant équipé le véhicule participant à la course Ecomarathon Shell.

LA PAC, PASSAGÈRE DE CHOIX DES VEHICULES ÉLECTRIQUES

La PAC est une alternative aux moyens de propulsion actuels car elle réduit les émissions de CO₂ et de particules polluantes, et diminue les nuisances sonores. On distingue trois façons de l'intégrer dans un véhicule électrique : tout hydrogène (full power), la pile alimente directement le moteur électrique ; hybride, la pile fonctionne en complément d'une batterie ; prolongateur d'autonomie (range extender), avec une petite pile qui recharge la batterie de la voiture. Ces deux derniers axes de recherche sont très porteurs au CEA. Des plans de mobilité électrique sont déjà déployés en Grande-Bretagne et en Allemagne où circulent 15 bus équipés⁵. « Le marché de l'hydrogène et des PAC décolle en raison de l'offre commerciale qui s'étouffe à l'international. En France, si le lancement a été plus timide, il est sur la bonne voie notamment avec le récent consortium "Mobilité Hydrogène France" qui réunit 25 partenaires, dont le CEA, des acteurs publics, privés, régionaux, nationaux et internationaux comme Nissan » précise Laurent Antoni. Son but : établir des scénarios de déploiements synchronisés de véhicules et de stations hydrogène⁶.

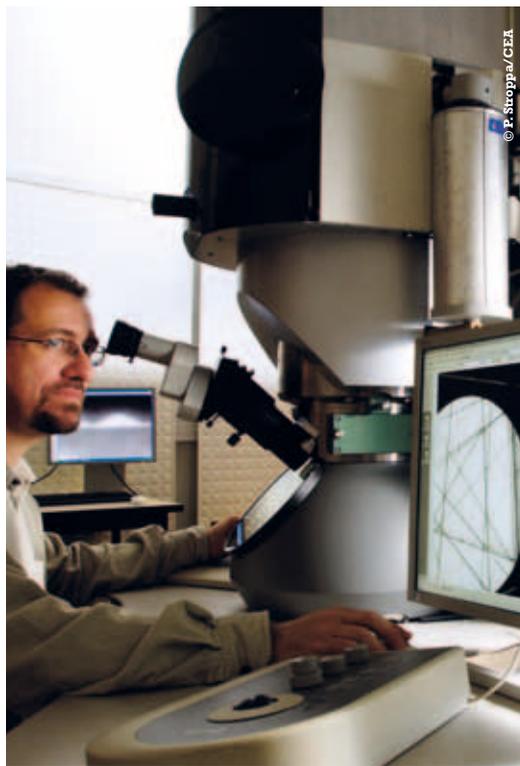
La présence du CEA dans ce consortium et dans l'association AFHYPAC⁷ repose sur une expertise et un savoir-faire de longue date. Le CEA, qui a toujours cru au potentiel des PAC, s'est rapidement positionné, en parallèle des objectifs de transport de masse, sur des marchés de niche pour tester ses prototypes pour drones militaires, engins agricoles, chariots élévateurs... Une activité qui a porté ses fruits au sein de nombreux partenariats avec de grands acteurs industriels comme Air Liquide, Areva ou la startup SymbioFuelcell.

Notes :

1. Proton Exchange Membrane Fuel Cell.
2. European Synchrotron Radiation Facility.
3. Institut Laue-Langevin.
4. Grenoble innovation for advanced new technologies. Campus d'innovation, initié par le CEA, regroupant 8 institutions grenobloises et rassemblant 5000 étudiants, 6000 emplois dans la recherche et 6000 emplois industriels.
5. Avec une projection à 50 bus et une centaine de voitures pour l'Allemagne d'ici 2015.
6. Les résultats de cette étude, financée en partie par l'Union Européenne dans le cadre du projet HIT, Hydrogen Infrastructure for Transport, seront publiés fin 2013.
7. Association française de l'hydrogène et des piles à combustible.

PERCER LES SECRETS DE L'ÂME... À L'ÉCHELLE ATOMIQUE !

Les performances de la PAC sont intimement liées à la structure et à la chimie des matériaux qui composent son assemblage membrane-électrode, AME. Pour mieux les analyser, le CEA peut compter sur des équipements de pointe sans commune mesure. Des outils qui renseignent notamment sur la durabilité des matériaux composites des catalyseurs...



Microscope électronique en transmission. ▶

« **G**âce à la plateforme de nanocaractérisation (PFNC) du CEA et aux Très Grands Instruments de Recherche ESRF et ILL, nous profitons d'une mutualisation inédite d'outils lourds de caractérisation : microscopie électronique, diffraction des rayons X, analyse par faisceau d'ions focalisés... (voir frise). Nous pouvons ainsi étudier, à partir d'échantillons, les structures, les morphologies, ainsi que les propriétés cristalline et chimique des composants des piles à membrane échangeuse de protons, PEMFC (voir encadré) » détaille Gérard Gébel, Directeur de recherche au CEA-Liten. Avec ces données et les résultats des tests de fonctionnement effectués sur la pile entière, un même phénomène, comme le vieillissement ou la dégradation des matériaux, peut être compris à différentes échelles pour améliorer les matériaux et les protocoles de fonctionnement des PAC.

De l'importance de la préparation de l'échantillon

L'assemblage membrane-électrodes (AME), le cœur de la PAC, est un composant déterminant pour la performance d'une pile. Il s'agit de déposer, de part et d'autre de la membrane, une encre constituée de particules de carbone liées par un polymère qui conduit les ions H⁺ et supportant des nanoparticules de platine (Pt) jouant le rôle de catalyseurs. Maîtriser la structure de ce matériau composite à l'échelle du nanomètre est indispensable pour garantir les performances de la pile tout en utilisant

NANOCARACTÉRISATION : UN LARGE PANEL DE COMPÉTENCES SUR LA PFNC DU CEA

PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

Les matériaux ou assemblages de matériaux doivent être très fins pour être correctement observés, notamment en microscopie en transmission pour laisser passer les électrons.

ANALYSE DE SURFACE

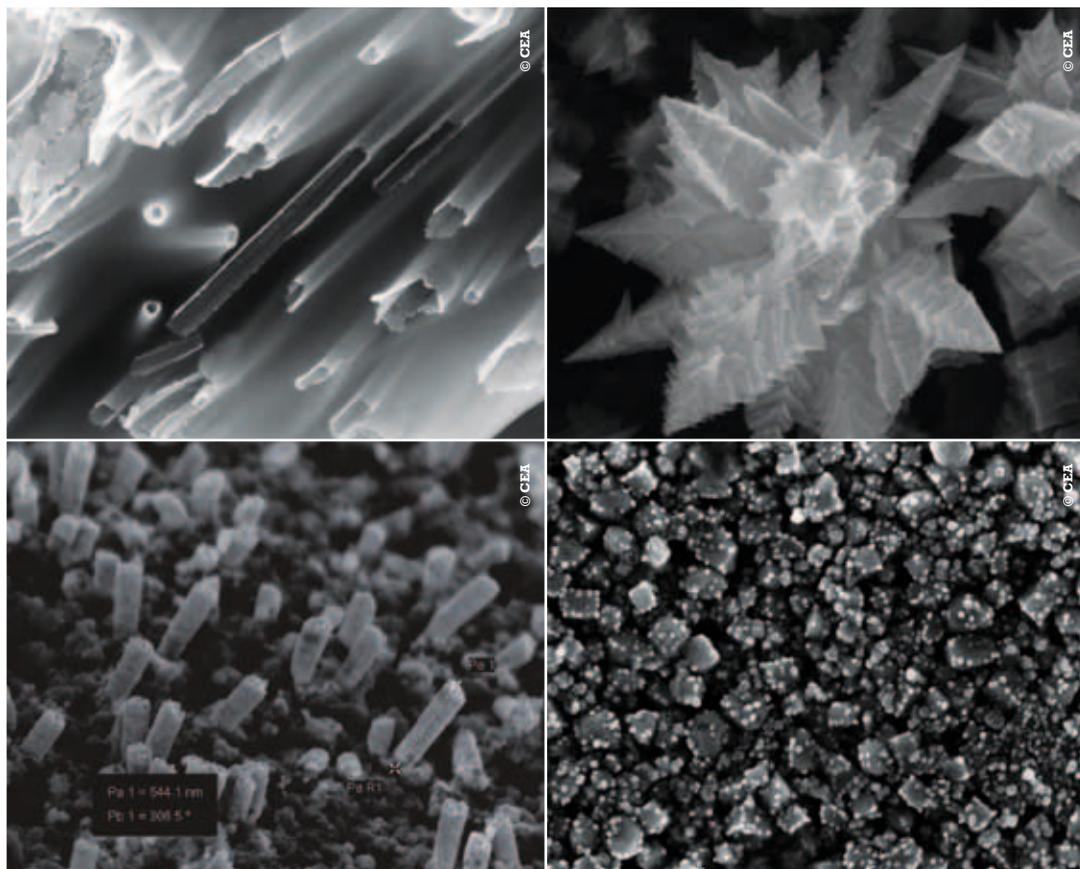
Mesure de la vitesse des électrons émis par les 10 premiers nanomètres de l'échantillon excité par rayon X ou par électron (spectroscopie Auger). Cela permet de caractériser les atomes situés à la surface d'un corps et de préciser la nature de leurs liaisons.

ANALYSE PAR FAISCEAU D'IONS FOCALISÉS

Étude par spectroscopie de l'émission des ions d'un échantillon soumis à un bombardement ionique ou laser pour analyser sa composition avec une très grande sensibilité (ppm, voire ppb) et une résolution en profondeur (50 nm latéralement).

MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE

Envoi sur l'échantillon d'un faisceau d'électrons pour former une image, obtenir un cliché de diffraction ou un spectre d'énergie. Technologie aux différentes « variétés » : imagerie ultra-résolution, précession électronique, holographie, spectroscopie, tomographie (caractérisation en 3D à l'échelle atomique).



Images obtenues en microscopie à balayage de différentes nanostructures de catalyseurs en platine.

le minimum de Pt, métal onéreux. Les chercheurs ont donc recours à la microscopie électronique pour l'étudier. La première étape, avant toute observation, est de découper dans l'AME, conçue sur la ligne-pilote du CEA, une lame mince ne dépassant pas 100 nanomètres d'épaisseur ! « Au CEA-Liten, nous avons beaucoup progressé dans ces méthodes de préparation des échantillons au cours des dix dernières années. Nous avons mis en place une technique empruntée à la biologie qui permet de procéder à des coupes extrêmement fines sans abîmer ou déchirer les matériaux. Cela nous donne la possibilité d'observer l'AME sur la tranche » se réjouit Laure Guétaz, microscopiste au CEA-Liten. De cette façon, il est possible de distinguer clairement la structure des couches actives et des couches de diffusion situées de part et d'autre de la membrane.

Les mille et un visages des particules, en résolution nanométrique

Les échantillons sont ensuite analysés à différentes échelles en utilisant soit des microscopes à balayage dont la résolution est le nanomètre, soit les microscopes en transmission, les plus performants, qui permettent l'observation de la

matière à l'échelle atomique. La taille et la structure des particules de platine qui accélèrent les réactions dans les électrodes apparaissent alors distinctement. Une donnée qui est essentielle puisque du calibre de ces nanoparticules dépend l'adsorption des molécules d'O₂ et donc l'efficacité du cœur de pile. Si elles sont trop grosses, leur surface totale par gramme de Pt est moins importante et l'efficacité du catalyseur diminuée. Or, après plusieurs milliers d'heures de fonctionnement de la pile en mode cyclé, ces particules doublent de volume, ce qui explique la perte de performance. Pour pallier cette dégradation, les scientifiques cherchent de nouveaux catalyseurs plus performants et plus résistants. Ainsi des catalyseurs multi-métalliques, par exemple à base de platine et de cobalt, ont été développés. Malgré des résultats encourageants, il apparaît que, après utilisation de la pile, le cobalt a tendance à se dissoudre à la surface des nanoparticules... De fait, d'autres voies de synthèse de catalyseurs menant à des nanostructures différentes telles que des nanofils, nanotubes, nanocubes ou nanosphères sont explorées pour diminuer la part de Pt, tout en conservant les performances. Un des enjeux forts dans le développement des PAC.

• **Adsorption** : phénomène par lequel des atomes ou des molécules de gaz ou de liquides se fixent sur une surface solide.

ANALYSE PAR RAYONS X

Diffusion de rayons X haute brillance de laboratoire ou de rayonnements X des synchrotrons, en particulier de l'ESRF sur la matière pour l'analyse chimique ou structurale, la cartographie de la texture ou la mesure des déformations cristallines dans les nanostructures.

RÉSONANCE MAGNÉTIQUE

Exploration de la matière jusqu'aux structures moléculaires en mesurant l'absorption de la radiation de radiofréquence par un noyau atomique dans un champ magnétique intense.

OPTIQUE

Mesure d'un large éventail de propriétés telles que la transmission et la réflexion optique, l'épaisseur de couches minces, l'indice optique, la porosité, l'identification de liaisons chimiques, les contraintes, la composition... par spectrophotométrie, ellipsométrie, luminescence...

MICROSCOPIE EN CHAMP PROCHE

à effet tunnel ou à force atomique, utilisation d'une sonde locale pour imager les matériaux à partir de la détection des ondes confinées au voisinage de leur surface. Technique qui permet de compenser la diffraction, une des limitations de la microscopie optique.

Observer sans toucher à l'intégrité des composants

Si ces techniques de nanocaractérisation livrent des données déterminantes pour progresser dans l'optimisation des composants des PEMFC, elles n'en demeurent pas moins « destructives ». En effet, la fabrication de l'échantillon implique de démonter le système ! Pourtant, certaines études nécessitent des méthodes de mesures non intrusives pour ne pas toucher à l'intégrité des composants et parasiter l'observation de leur comportement. C'est le cas du suivi de la répartition de l'eau dans le cœur de pile. Les chercheurs ont besoin de s'intéresser à cet élément crucial sur une technologie complète et en fonctionnement. « Pour cela, il nous fallait des instruments de caractérisation avec des sources de rayonnement très puissantes pour pouvoir traverser et observer toutes les couches de la PAC sans les isoler. Comme nous ne possédons pas ces moyens, nous nous sommes rapprochés de l'ESRF et de l'ILL à Grenoble, et du LLB à Saclay, pour réaliser, *in operando*, des expériences

• **In operando** : locution latine signifiant « en conditions réelles d'utilisation », c'est-à-dire dans l'environnement réel (température, courant, pression, etc.) lié à une application.



Cellule de PAC spécialement adaptée à son observation par rayons X sur l'ESRF.

de diffusion des rayons X et de neutrons » indique Gérard Gébel. Pour accéder à des résolutions spatiales et temporelles encore plus fines, il a fallu concevoir des cellules spécialement adaptées à ces observations non invasives. « En comparant les résultats obtenus sur les deux instruments, nous avons ainsi pu étudier la dynamique de l'eau et comprendre la répartition hétérogène de ce liquide, son comportement au passage du courant et son influence sur les mécanismes de dégradation des composants » explique Arnaud Morin, ingénieur-chercheur au CEA-Liten. Une première mondiale !

Ces études d'échantillons à différentes échelles et diverses dimensions apportent des données très précieuses sur les composants de la PEMFC et déterminantes pour l'orientation des recherches à venir aux objectifs bien définis : optimiser la durabilité des systèmes PAC, parvenir à une fabrication au coût compétitif et pouvant faire l'objet d'un transfert industriel.



Instrument de l'ESRF permettant l'étude de la structure et de la morphologie de nanoparticules par diffusion de rayons X.

LA PILE À COMBUSTIBLE À MEMBRANE ÉCHANGEUSE DE PROTONS

La PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) est un dispositif qui convertit à basse température (entre 0 °C et 80 °C) l'énergie chimique contenue dans l'hydrogène en électricité et en chaleur. De l'extérieur vers l'intérieur, elle est composée de :

- deux plaques monopolaires en carbone ou composite, l'une pour alimenter la cathode (pôle positif) en oxygène ou en air, l'autre pour alimenter l'anode (pôle négatif) en hydrogène ;
- deux électrodes qui produisent le courant électrique. Lieu des réactions électrochimiques, elles permettent la production et l'utilisation des électrons, mais également la consommation des réactifs et la fabrication des produits. Réactions électrochimiques qui nécessitent la présence d'un catalyseur en raison de la basse température de fonctionnement des PEMFC ;
- une membrane échangeuse de protons en polymère. Elle joue le rôle d'électrolyte, c'est-à-dire qu'elle bloque le passage des électrons mais laisse passer les ions H+. Avec les électrodes, appelées également couches actives, cette membrane constitue le « cœur de pile » ou AME (assemblage membrane électrodes).



INTERVIEW

Olivier Lemaire,
 chef du laboratoire des composants pour piles à combustibles,
 électrolyseurs et de modélisation au CEA-Liten

LA PNFC : UN VOYAGE AU CŒUR DE LA MATIÈRE

Pilotée par trois instituts du CEA, la plateforme de nanocaractérisation du CEA est un outil unique en son genre, notamment grâce à des équipements parmi les meilleurs au monde. Olivier Lemaire, copilote de ce centre de haute investigation de la matière, en présente les principaux aspects.

Qu'est ce qui a motivé la création de la PFNC ?

Sur le site du CEA de Grenoble existait un arsenal important d'instruments de caractérisation, réparti sur l'ensemble des laboratoires, notamment pour les besoins en micro-électronique du CEA-Léti. Or, les techniques évoluant et devenant de plus en plus coûteuses, il devenait difficile pour chaque laboratoire de continuer à s'équiper. C'est pourquoi en 2006, à l'initiative de Jean Therme, Directeur de CEA-Tech, la plateforme de nanocaractérisation a été pensée et créée sur le Campus de Minatéc à Grenoble. Pilotée par les instituts Inac, Léti et Liten du CEA, elle permet non seulement une mutualisation de gros équipements de caractérisation à l'échelle nanométrique et de compétences, mais aussi de financer l'acquisition de nouveaux outils toujours plus performants. Aujourd'hui, la PFNC ce sont près de 80 chercheurs et techniciens, environ 40 équipements lourds sur 2500 m² de laboratoires, avec un budget annuel d'investissement compris entre 3 et 4 millions d'euros. Un parc qui sert aussi bien à la recherche fondamentale, qu'à la recherche appliquée et à l'industrie.

En quoi la PFNC est unique ?

Alors que d'autres plateformes sont très spécialisées, la PFNC est une des seules au monde qui permette d'observer des échantillons sur une échelle allant de l'ångström au millimètre, en passant par le nanomètre. Ainsi, nous pouvons répondre à tous les besoins en développement de micro et nano technologies. Pour y parvenir, le CEA a su faire évoluer ce domaine et développer

de nouvelles techniques. Prenons l'exemple de la PAC : sur les 15 dernières années les dimensions des couches de composants sont passées de 200 à 20 microns et les matériaux utilisés sont devenus de plus en plus sophistiqués. Il a donc fallu adapter les analyses pour fournir des informations plus complexes. Cela s'illustre par notre tout dernier microscope électronique en transmission, Titan Ultimate, qui permet de réaliser des analyses chimiques de matériaux en 3D jusqu'à l'échelle atomique avec une résolution inférieure à 0,1 nanomètre grâce à des correcteurs d'aberration. On ne savait pas faire ça, il y a 5 ans !

Qu'en est-il de la collaboration avec les TGIR ?

Le polygone scientifique de Grenoble abrite également les Très Grands Instruments de Recherche ESRF et ILL, et c'est une chance pour nous ! Le synchrotron ESRF permet l'accès à une des sources de rayons X les plus puissantes au monde sur une trentaine de lignes, tandis que l'ILL met à disposition des faisceaux de neutrons extrêmement brillants alimentant quelque 40 instruments. Ces TGIR sont tous deux de remarquables exemples de coopération scientifique internationale puisqu'ils sont mis à disposition des chercheurs et des industriels de tous pays, tous domaines confondus : biologie, chimie, technologie, physique nucléaire, science des matériaux, etc. Nos équipes y travaillent d'ailleurs régulièrement, ce qui démontre une certaine reconnaissance de la qualité de nos recherches par les comités de programmes de l'ESRF et de l'ILL.

Propos recueillis par Amélie Lorec

LE CEA DANS LES MÉDIAS

QUAND LE NUCLÉAIRE SAUVE L'ART

ÇA M'INTÉRESSE/1^{er} OCTOBRE 2013

« À Grenoble, un bateau qui a séjourné 2000 ans dans le Rhône a été restauré aux rayons gamma et présenté au public » : ainsi débute le reportage consacré au laboratoire Arc-Nucléart du CEA. Spécialisé dans le traitement des objets archéologiques en bois, or, cuir ou fibres, il mise sur des technologies de pointe comme l'irradiation au cobalt 60 qui permet de détruire champignons et bactéries. « Rien à craindre, prévient le mensuel, un objet irradié n'est pas radioactif »!

Restoration d'un petit navire de commerce datant du VI^e siècle avant J.-C.



SENSIBILISER LES ROBOTS AU TOUCHER

LA RECHERCHE/1^{er} OCTOBRE 2013

Le mensuel présente les nouveaux dispositifs qui améliorent la sensibilité au toucher des robots, notamment la peau artificielle. Si aucune technologie ne permet encore de satisfaire toutes les exigences remplies par une peau biologique, les robots accomplissent déjà certaines tâches : « ils peuvent saisir des objets de façon assez précise, comme attraper un œuf sans le casser, à condition qu'ils en connaissent à l'avance les propriétés telles que le poids, la raideur ou la rugosité » indique Moustapha Hafez, chef de laboratoire au CEA.



Peau souple tactile connectée sur un doigt robotique.

UNE APPLICATION POUR GÉRER SA BATTERIE

L'USINE NOUVELLE/3 OCTOBRE 2013

Gérer la charge de sa voiture depuis son smartphone ? C'est bientôt possible tel que l'annonce l'hebdomadaire. La société Akka Technologies lance une application qui permet à un utilisateur de démarrer ou d'arrêter la charge à distance et même de la programmer pour un futur déplacement. De quoi économiser de l'énergie quand la voiture est inutilisée pendant une longue période. Ce concept a été développé dans le cadre du projet européen Artemis Pollux auquel participe le CEA-Leti.

L'INNOVATION EST D'ABORD PORTÉE PAR LE MANAGEMENT

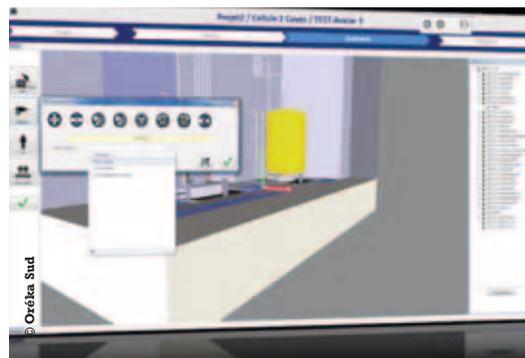
LES ÉCHOS/17 OCTOBRE 2013

Comment optimiser les relations entre la recherche et l'industrie ? Une question que pose le quotidien à Laurent Mallier, Directeur du CEA-Leti. « Nous réussissons un partenariat lorsque nous entrons directement en relation avec l'équipe produit. Nous sommes ainsi confrontés aux problématiques de production, marketing, distribution et pouvons voir les applications directes de l'innovation... » indique-t-il en insistant sur le rôle du management pour diffuser dans l'entreprise la culture d'innovation.

SIMULER EN 3D LE DÉMONTAGE D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE

01 NET/1^{er} OCTOBRE 2013

La société Oréka Sud commercialise, courant octobre, le logiciel d'ingénierie DEMPlus. Intégrant les dernières briques technologiques développées par le CEA, il simule en trois dimensions la maintenance d'une centrale nucléaire et ses phases de démantèlement. « Ces processus très complexes et longs à mettre en œuvre pourront désormais être programmés à l'avance pour une meilleure gestion des délais ainsi que des moyens humains et financiers à déployer », explique le magazine en ligne.



KIOSQUE



Homme vs machine

Ce livre renferme six courtes fictions qui se déroulent dans un futur proche et tentent d'imaginer les limites et les dérives possibles de la science. Des androïdes qui se substituent aux humains pour servir à table, pour jouer au foot... bref, un monde sans compétition: est-ce possible? Ce recueil intrigue, inquiète mais fait réfléchir. Si un logiciel pouvait vous certifier que le « oui » dit au mariage est pour la vie, seriez-vous prêt à vous équiper d'un casque plein d'électrodes pour agrémenter votre robe de mariée ou votre beau costume?

Le dernier fado de l'androïde et autres histoires de science exotique. Hugues Bersini. Éditions Belin. 17 €

L'union fait la force

En s'inspirant de la situation constatée en France et de bonnes pratiques étudiées dans d'autres pays, les auteurs de cet ouvrage proposent des pistes innovantes pour une meilleure préparation et gestion collective des crises. En cinq chapitres, ils expliquent comment impliquer davantage la société civile, mais aussi la nécessité d'utiliser les nouvelles technologies et médias sociaux pour une communication optimale. Enfin, ils insistent sur l'importance de la sortie post-crise pour tirer profit de ce qui a été appris et mieux préparer l'avenir.

Face aux crises courage, changeons! Confiance et solidarité: les conditions de réussite en gestion de crise. Fondation nationale Entreprise et Performance. La documentation française. 15 €



Comment ça marche ?

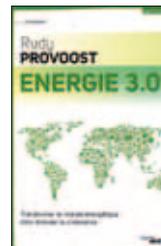
Voici un livre incontournable pour les curieux de tout âge! Il comporte 20 fiches d'expériences faciles à réaliser, avec du matériel que l'on a souvent à portée de main dans une maison. Ainsi, vous pourrez extraire votre ADN, observer un mirage, faire décoller une mini-fusée... Chaque manipulation est accompagnée de textes explicatifs des phénomènes physiques observés et de références à l'histoire des sciences. Des notions clés comme la pression, la poussée d'Archimède, le frottement... vous sembleront plus claires.

Faire léviter de l'eau et autres expériences ébouriffantes. Florian Briant. Éditions Belin. 21 €

Transformation du monde énergétique

Comment satisfaire la consommation énergétique d'une population qui devrait atteindre 9 milliards d'êtres humains d'ici 2050? La transition énergétique devrait résoudre un ensemble de défis importants qui interrogent le fonctionnement global de notre société. L'auteur, expert des questions liées à la transformation et à l'innovation, raconte ce changement qui est en pleine accélération et permettra à chacun de bénéficier d'une offre sur-mesure, adaptée à ses besoins et ses moyens.

Énergie 3.0. Transformer le monde énergétique pour stimuler la croissance. Rudy Provoost. Éditions Cherche Midi. 19 €



SUR LE WEB

VERS UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE AUTONOME

Un réseau électrique présentant plus d'énergies renouvelables, moins de CO₂ et une meilleure efficacité énergétique, tels sont les objectifs européens à atteindre en 2020! Et les équipes du CEA à l'Ines s'y attellent à travers, entre autres, des recherches sur la mobilité électrique. Venez en savoir plus dans cette nouvelle vidéo de la série « C'Est A venir ».

www.cea.fr/videos



IL NOUS PARLE DE MARS...

Les récents résultats sur la composition du sol martien ont vu le jour en grande partie grâce au dispositif ChemCam, embarqué sur le rover Curiosity. Sur ce site, on apprend qui l'a conçu, comment il marche, notamment grâce à la technologie LIBS du CEA, et ce qu'il apporte comme données.

Photos et vidéos viennent agrémenter l'information...
<http://www.msl-chemcam.com>

HIGGS HIGGS HIGGS HOURRA

François Englert et Peter W. Higgs sont lauréats du prix Nobel de physique 2013 pour avoir prédit l'existence d'une particule élémentaire impliquée dans le mécanisme fondamental qui confère une masse aux particules. À cette occasion, cette vidéo propose des témoignages de chercheurs du CEA qui ont contribué à la découverte de ce « boson de Higgs » sur le LHC.

<http://irfu.cea.fr/Phocea/Video/index.php?id=220>





LE PLATEAU
ESPACE D'EXPOSITION RÉGION RHÔNE-ALPES

LYON - CONFLUENCE | TRAM T1 - MONTROCHET
DU MARDI AU VENDREDI DE 11H À 18H
SAMEDI ET DIMANCHE DE 11H À 19H

DU 13.09.2013
AU 05.01.2014

LES FANTÔMES DE LA LIBERTÉ

TERRITOIRES ET EXPÉRIMENTATIONS
LAURENT MULOT



Rhône-Alpes Région
Rhône-Alpes
www.rhonealpes.fr

LES FANTÔMES DE LA LIBERTÉ - TERRITOIRES ET EXPÉRIMENTATIONS

Lyon. Le Plateau. Du 13 septembre 2013 au 5 janvier 2014

La 12^e Biennale d'Art Contemporain de Lyon accueille l'œuvre de l'artiste français Laurent Mulot, « Les fantômes de la liberté ». Jeu de croisement entre art, territoires, sciences, conte... elle se découpe en quatre expositions, dont *Aganta-Kairos* pour laquelle Thierry Stolarczyk, physicien au CEA, a apporté sa vision scientifique... Le samedi 14 décembre, ce dernier participera à une soirée débat sur le thème « Art, science et philosophie » autour d'*Aganta kairos*, en compagnie de Laurent Mulot.