

les défis du cea

Le magazine de la recherche et de ses applications

193

Octobre 2014



▶ **GRAND ANGLE**

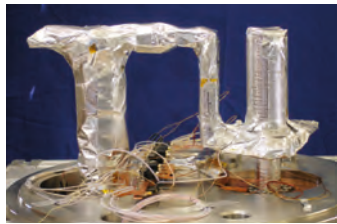
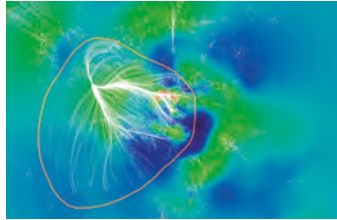
NUCLÉAIRE : DES MATÉRIAUX FAITS POUR DURER !

▶ **COUP DE PROJECTEUR**

**LANIAKEA,
NOTRE SUPER-CONTINENT
EXTRAGALACTIQUE**

▶ **TOUT S'EXPLIQUE**

LA SUPRACONDUCTIVITÉ



14 GRAND ANGLE
Des matériaux faits pour durer. La sûreté, la durée de vie et la performance des centrales actuelles et futures sont étroitement liées aux matériaux du nucléaire. Pour les optimiser et en concevoir de nouveaux, les chercheurs s'appuient sur un solide retour d'expériences et des installations uniques au monde.



03 ACTUALITÉ

06 COUP DE PROJECTEUR

Laniakea, notre super-continent extragalactique.

08 À LA POINTE

Dans l'intimité 3D du récepteur à sérotonine 08

Détecteur intelligent : pas de surprise au volant 09

Des algues championnes pour dépolluer 09

Des terres rares qui refroidissent les mesures spatiales 10

Un supercondensateur dopé au silicium 11

12 TOUT S'EXPLIQUE

La supraconductivité.



22 À VOIR, À LIRE, À ÉCOUTER

Le CEA dans les médias 22

Kiosque 23

Sur le Web 23

Erratum

Une erreur s'est glissée en page 9 du numéro 192 des *Défis du CEA* dans l'article consacré au décryptage du génome du chromosome 21 du blé tendre. Les chercheurs du CEA sont ainsi parvenus à identifier les 7700 gènes du chromosome 3B et non 700 gènes comme nous avons pu l'écrire...

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.



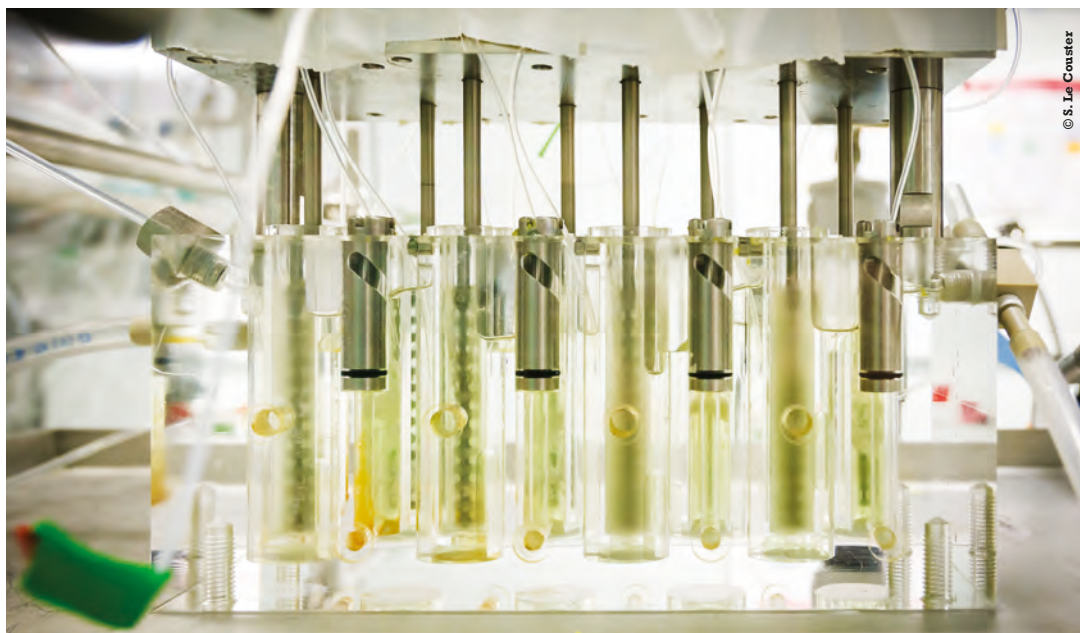
Éditeur Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, R. C. S. Paris B77568019 | **Directeur de la publication** Xavier Clément | **Rédactrice en chef** Aude Ganier | **Rédactrice** Amélie Lorec | **Ont contribué à ce numéro** Mathieu Grousson, Esther Leburgue et Vahé Ter Minassian | **Comité éditorial** Andrew Chilton, Alexandra Bender, Vincent Coronini, Claire Abou, Elizabeth Lefevre-Remy, Sophie Martin, Brigitte Raffray, Emanuelle Volant, Philippe Laporte | **Iconographie** Micheline Bayard | **Infographie** Fabrice Mathé | **Photo de couverture** P. Stroppa / CEA | **Diffusion** Lucia Le Clech | **Conception et réalisation** www.rougeviv.fr | N°ISSN 1163-619X | Tous droits de reproduction réservés. **Ce magazine est imprimé sur du papier PEFC BVS, issu de forêts gérées durablement. Imprimerie Abelia.**

RECHERCHE ACADÉMIQUE

UN INSTITUT EUROPÉEN D'HYDROMÉTALLURGIE AUX PORTES DE MARCOULE

Le Parc régional d'activités économiques (PRAE) Marcel Boiteux, implanté aux portes du centre CEA de Marcoule, a été inauguré le 17 juillet 2014. À cette occasion, Christophe Béhar, directeur de l'Énergie nucléaire (DEN), et Christian Bourquin, Président de la région Languedoc-Roussillon ont signé un accord de partenariat permettant le lancement de la création de l'Institut européen d'Hydrométallurgie (IEH) en ce lieu. Portée par la DEN avec douze partenaires académiques et industriels européens, cette structure mutualisée permettra le développement de procédés pour l'extraction et le recyclage de métaux stratégiques (rares et non substituables). Aussi, le

projet prévoit-il la mise en place d'un réseau européen de recherche académique en minéralogie et en métallurgie extractive, d'ici la fin de l'année 2014 ainsi que des plateformes pilotes de qualification de procédés opérationnelles à partir de 2016. La région Languedoc-Roussillon soutient financièrement une partie du projet et en retour, le centre CEA de Marcoule contribuera à créer de la valeur et de l'emploi. L'IEH permet de valoriser, hors du nucléaire, une expertise et des compétences uniques en chimie séparative acquises par la DEN dans le domaine du nucléaire.



◀ Batterie de mélangeurs-décanteurs pour valider un procédé d'extraction sélective de l'uranium.

VALORISATION

CINQ START-UP INNOVANTES RÉCOMPENSÉES

Cinq start-up issues des recherches du CEA sont récompensées, parmi 110 lauréats, par le **Concours mondial de l'innovation de la Commission Innovation 2030**. Sont ainsi à l'honneur : la société Verseau qui propose une technologie de recyclage des terres rares contenues dans les déchets Hi-tech ; l'entreprise Nanomakers innovante dans les nanopoudres de silicium ; la start-up NAWATechnologies et ses dispositifs de stockage intégrés à des éléments de structures de véhicules ou de systèmes énergétiques ; la société EnerBee qui industrialise un générateur d'énergie issue du mouvement, à partir de capteurs autonomes et sans fil ; et enfin l'entreprise Prestodiag et ses travaux dans le domaine de

la détection rapide de bactéries présentes dans le sang. À travers ce concours, l'État investit 300 millions d'euros dans « sept ambitions » pour le développement futur de la France. Voici ces domaines définis par la Commission Innovation 2030, créée en avril 2013 et présidée par Anne Lauvergeon : stockage de l'énergie ; Recyclage des métaux ; Valorisation des richesses marines ; Protéines végétales et chimie du végétale ; Médecine individualisée ; Silver économie, l'innovation au service de la longévité ; La valorisation des données massives (Big Data). Les appels à projets de ce concours sont ouverts à des sociétés, petites ou grandes, françaises ou étrangères, souhaitant s'implanter en France.

RELATIONS INTERNATIONALES

GESTION DES DÉCHETS NUCLÉAIRES ET RÉGIME MONDIAL DE RESPONSABILITÉ CIVILE DISCUTÉS À L'AIEA

La 58^e Conférence générale de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) s'est déroulée à Vienne du 22 au 26 septembre 2014. Bernard Bigot, Administrateur général du CEA et chef de la Délégation française y a prononcé la déclaration française devant les représentants des 162 États membres de l'Agence. Le CEA était également présent en marge de la conférence lors d'échanges et d'événements. Ainsi, Frédéric Journès, directeur des Relations internationales du CEA et Gouverneur pour la France auprès de l'AIEA, a participé au *side-event* relatif au régime mondial de responsabilité civile nucléaire. Christophe Béhar, directeur de l'Énergie

nucléaire au CEA, est intervenu lors d'une réflexion pour déterminer comment les stratégies actuelles de gestion des déchets radioactifs doivent être adaptées pour répondre aux besoins futurs. Des stratégies qui ont été présentées sur le stand de « l'équipe de France du nucléaire » dédié aux axes de recherche novateurs menés sur les réacteurs de 4^e génération et sur le stockage géologique profond des déchets de haute activité. Par ailleurs, un accord de coopération scientifique et technique dans le domaine des utilisations pacifiques de l'énergie nucléaire a été paraphé entre le CEA et le Comena (Commissariat à l'énergie atomique algérien).

SHOWROOM

LE SAVOIR-FAIRE DU CEA EN DÉMANTÈLEMENT NUCLÉAIRE DÉTAILLÉ À L'INFODEM



▶ Espace InfoDEM situé dans la nef de l'ancien réacteur G1.

Enjeux, stratégie, programmes, R&D, métiers, outils et méthodologies... le CEA propose un lieu unique dédié à l'information sur l'assainissement et le démantèlement des installations nucléaires : l'espace InfoDEM. Le CEA a en effet acquis une expérience sans équivalent dans ce domaine à travers les grands chantiers qu'il conduit. Sont présentés entre autres des robots d'intervention, des dispositifs innovants pour la mesure et la cartographie radiologique des lieux à démanteler ainsi qu'une salle d'immersion de simulation en 3D. Inauguré le vendredi 19 septembre sur le centre de Marcoule, l'espace infoDEM est à la fois un lieu d'exposition pour le grand public et un lieu d'information technologique à destination des étudiants et personnels en formation. Par ailleurs, il constitue une première vitrine technologique pour le Pôle de valorisation des sites industriels (PVS), récemment créé autour du site de Marcoule et soutenu par la Région Languedoc-Roussillon pour contribuer à promouvoir l'offre française en matière d'assainissement/démantèlement.

TEXTO

La simulation a sa maison

La Maison de la simulation a été inaugurée le 15 septembre 2014, en présence de Bernard Bigot, Administrateur général du CEA et d'Alain Fuch, Président du CNRS. Créé en 2011 sur le campus de Saclay, ce laboratoire commun a pour objectif de favoriser l'accès et l'utilisation efficace par la communauté scientifique d'un parc de supercalculateurs de classe mondiale, en particulier ceux déployés dans le cadre de GENCI et du projet Européen PRACE. Il favorise ainsi l'émergence en France d'une communauté du calcul intensif et développe les synergies fortes entre chercheurs et ingénieurs d'équipes pluridisciplinaires : informaticiens du calcul intensif, spécialistes du traitement numérique et experts des domaines scientifiques visés. Objectif : concrétiser les avancées scientifiques attendues grâce au calcul haute performance (HPC). Ses initiatives sont tournées à la fois vers les communautés déjà utilisatrices des grands moyens de calcul mais également vers de nouveaux champs d'applications. La Maison de la simulation regroupe cinq partenaires, dont le CEA.

Technologie de



omicile, Habitat connecté,
nouveaux services urbains



INTERVIEW

Tiana Delhome,
Directrice du Programme Technologies
de Liaison de l'IRT Nanoelec



© Nanoelec

PTL: TROIS LETTRES POUR...

Créer du lien et mieux innover : telle est la motivation du Programme technologies de liaison, porté par l'IRT Nanoelec. Tiana Delhome, qui le pilote depuis 2012, revient sur les objectifs du programme de la plateforme mise à disposition des partenaires.

Qu'est-ce que le PTL ?

Démarré en 2012¹ dans le cadre de l'IRT Nanoelec, le programme Technologies de Liaison a pour objectif d'aider les entreprises à intégrer des technologies micro et nanoélectroniques dans des innovations. Trois secteurs applicatifs sont concernés : habitat, santé à domicile et transports connectés (applications dédiées smart city, nouvelles mobilités urbaines ; « silver économie »)... Dans ce but, le PTL regroupe huit partenaires fondateurs² qui couvrent toute la chaîne de valeur : fournisseurs de composants, intégrateurs, opérateurs & systémiers. D'un côté, nous sommes en mesure de valoriser les technologies du futur comme les expertises pluridisciplinaires de nos partenaires, de l'autre, nous en proposons l'accès à de nouveaux partenaires souhaitant en bénéficier pour concevoir, développer et tester de nouvelles fonctionnalités pour leur produit existant et à venir.

Le PTL implique-t-il de nouvelles infrastructures ?

Pour conduire ces activités de R&D des plateformes dédiées à nos trois secteurs applicatifs ont été construites. Une plateforme *outdoor*, occupant près de 2 500 m² sur le centre CEA de Grenoble, a été achevée cet été. Elle comprend un espace de développement permettant le passage des idées aux maquettes et un espace d'expérimentation pour tester la fonctionnalité des démonstrateurs en conditions proches du réel avant leur déploiement. Ce dernier espace reconstitue un quartier de ville avec

habitats, routes, parking, trottoirs, carrefours communicants... L'infrastructure est modulable pour reconfigurer des situations d'usage en fonction de chaque projet ; les besoins pour des dispositifs de communication d'un véhicule avec des piétons, n'étant pas les mêmes que ceux pour tester des éclairages communicants.

Ces espaces sont-ils déjà actifs ?

Pour le moment, l'espace d'expérimentation teste et sert les projets de R&D des fondateurs. Cela concerne par exemple le système de détection intelligente d'obstacles pour la conduite autonome développé par l'Inria et le CEA-Leti [voir page 9], ou le concept de bureau connecté amené par Schneider Electric. Parti du constat que dans les *open space*, les réglages de température, lumière et ventilation ne tiennent pas compte des sensibilités de chacun, ce bureau permet de gérer le confort de proximité en négociation avec les systèmes du bâtiment. Les essais du dispositif ayant été probants, nous sommes en train de convaincre un industriel de valoriser ces développements dans ses produits. Nous recherchons également des partenaires offrant des ouvertures vers de nouveaux marchés, qui ne soient pas déjà occupés par les fondateurs comme celui de la santé et l'assistance aux personnes. En parallèle, nous menons des travaux sur des solutions technologiques interconnectées hétérogènes ou encore l'interopérabilité, ayant abouti au dépôt de six brevets.

Propos recueillis par Amélie Lorec

IRT NANO ELEC

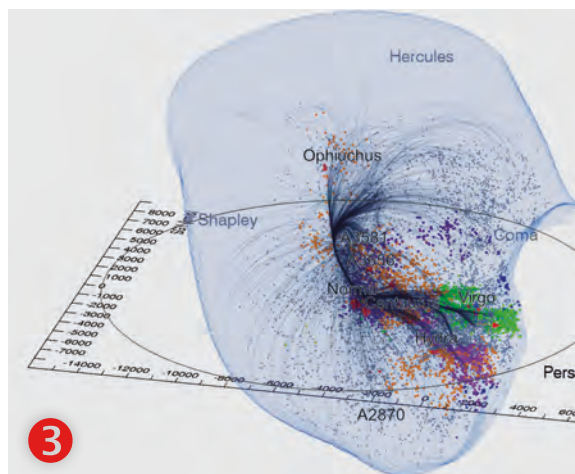
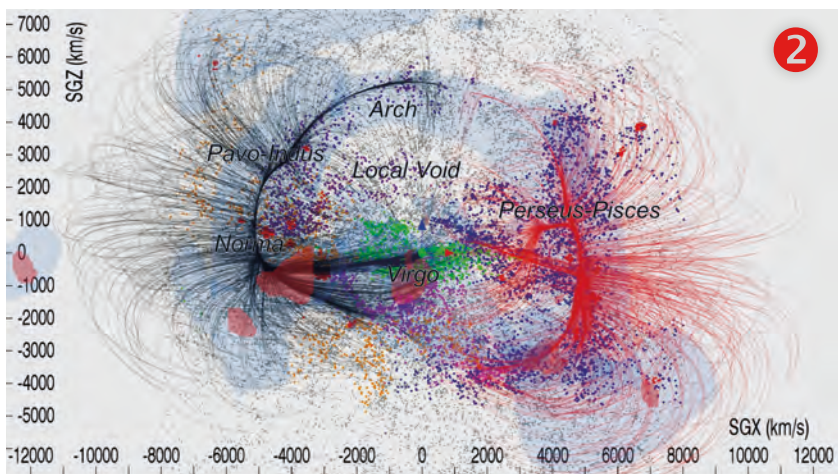
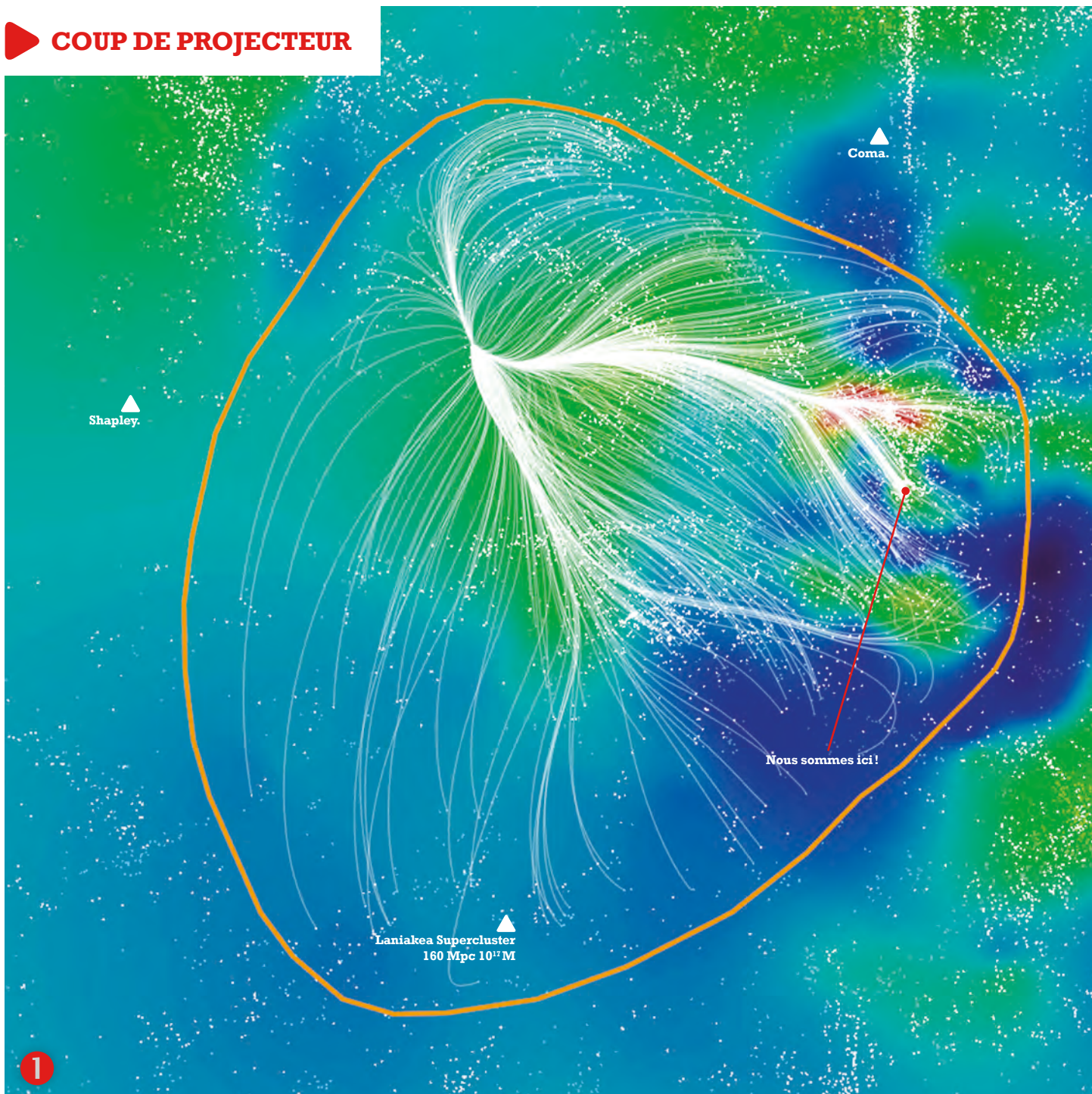
Dans le cadre du programme d'Investissements d'Avenir, l'Institut de recherche technologique nanoélectronique (IRT Nanoelec) réunit 18 partenaires privés et publics pour conduire un programme de développement et de diffusion technologique dans le domaine des NTIC au bénéfice des entreprises de tous les secteurs. L'IRT Nanoelec vise deux objectifs : hisser la R&D au meilleur niveau mondial pour développer les technologies d'intégration 3D et de photonique sur silicium ; développer de nouveaux produits ou applications s'appuyant sur la connectivité entre les objets. Un programme spécifique est destiné aux PME/ETI et leur permet d'accéder à des modules de formation ainsi qu'à des briques technologiques pour enrichir leurs produits ou en développer de nouveaux.

Pour plus d'information, visitez le site web www.irtnanoelec.fr

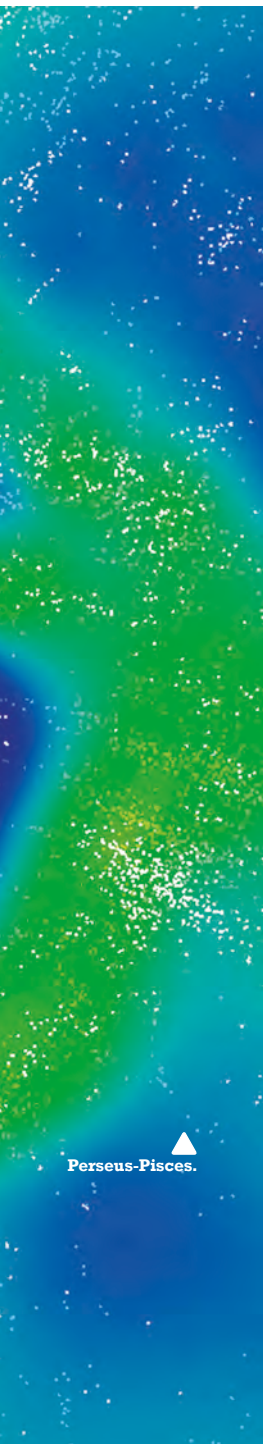
Notes :

1. Financé à 50 % par l'ANR et 50 % par les partenaires et utilisateurs.

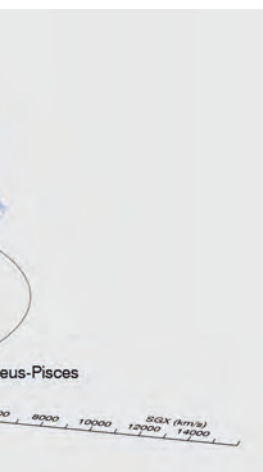
2. 8 sur les 21 qui composent l'IRT : CEA-Leti, Université Joseph Fourier, Inria, STMicroelectronics, Schneider Electric, Bouygues, Cofely Ineo et Brunet.



▲ Visualisation du Laniakea (1), notre super-continent. Ce résultat est issu des observations et calculs des vitesses gravitationnelles et des directions des différentes galaxies qui ont permis de définir ses contours (directions noires) (2 et 3) mais pas encore ceux d'autres super-continentes (directions rouges) (2).



Perseus-Pisces.



LANIAKEA, NOTRE SUPER-CONTINENT EXTRAGALACTIQUE

Où vivons-nous ? Une équipe internationale¹ impliquant le CEA-Irfu a trouvé la réponse, en mettant en évidence les frontières du super-continent extragalactique au sein duquel flotte la Voie lactée, notre propre galaxie. Un résultat qui a fait la Une de la prestigieuse revue Nature le 4 septembre dernier.

Un « petit » morceau d'univers de 500 millions d'années-lumière[•] de long, comptant pas moins de 100 000 grandes galaxies comme la nôtre et plus d'un million de petites et moyennes. Voici Laniakea, « horizon céleste immense » en hawaïen, premier super-continent extragalactique à être défini et cartographié. Pour y parvenir, les astrophysiciens ont constitué un catalogue unique de 8000 galaxies, renseignant non seulement leur position mais surtout leur vitesse... « En effet, les positions des galaxies conduisent à définir des réseaux dont les frontières sont mal définies. Nous en connaissons des centaines de millions mais nous ne savons pas précisément comment elles sont connectées. Tout au plus avons-nous une vision 3D de l'Univers... Avec la connaissance de leur vitesse gravitationnelle[•], hors expansion de l'Univers^{•2}, nous entrons dans le règne de la 4D » explique Hélène Courtois, de l'Institut de physique nucléaire et de l'Université de Lyon qui a lancé ce projet en 2006.

Des flots de galaxies

Dans l'Univers, les galaxies évoluent groupées en amas, à différentes vitesses (la nôtre va à 630 km/s). Ces amas se rassemblent en super-amas, sorte de super-continent, où se concentre la matière et qui sont entourés de régions vides. C'est précisément ce qu'ont pu calculer les astrophysiciens grâce à une méthode inédite traitant les données dynamiques accumulées avec les télescopes les plus performants, terrestres et spatiaux. Ils ont ainsi pu dresser les contours de Laniakea, à l'instar de géographes définissant un paysage de bassins-versants, constitué de reliefs où s'écoulent des rivières. Mais ici, les flots de galaxies sont guidés par la gravitation qu'elles, et la matière noire, exercent les unes sur les autres. « C'est la première vision de notre super-continent extragalactique qui ait un sens physique », s'enthousiasme la spécialiste.

Un grand bassin d'attraction 4D

Pour donner corps à ces calculs et observations, les astrophysiciens ont utilisé le logiciel de visualisation astronomique élaboré par Daniel Pomarède du CEA-Irfu. « J'étais avec Brent Tully, l'un des co-auteurs, lorsque nous avons vu ce bassin d'attraction apparaître à l'écran. Il s'est écrié : nous avons découvert notre superamas de galaxies », se souvient-il. La découverte clôt de plus le mystère dit du Grand attracteur. En 1987, les astronomes constatent que notre galaxie et ses voisines sont comme aspirées dans une direction... vers laquelle il semble pourtant n'y avoir rien de spécial pour les attirer. Réponse aujourd'hui : le Grand attracteur n'existe tout simplement pas en tant qu'objet astrophysique. Mais plutôt un fleuve de galaxies dévalant une pente gravitationnelle : la Laniakea !

Matthieu Grousson

• **Année-lumière** : unité utilisée en astronomie, égale à la distance que parcourt la lumière dans le vide en une année, soit environ 9461 milliards de kilomètres...

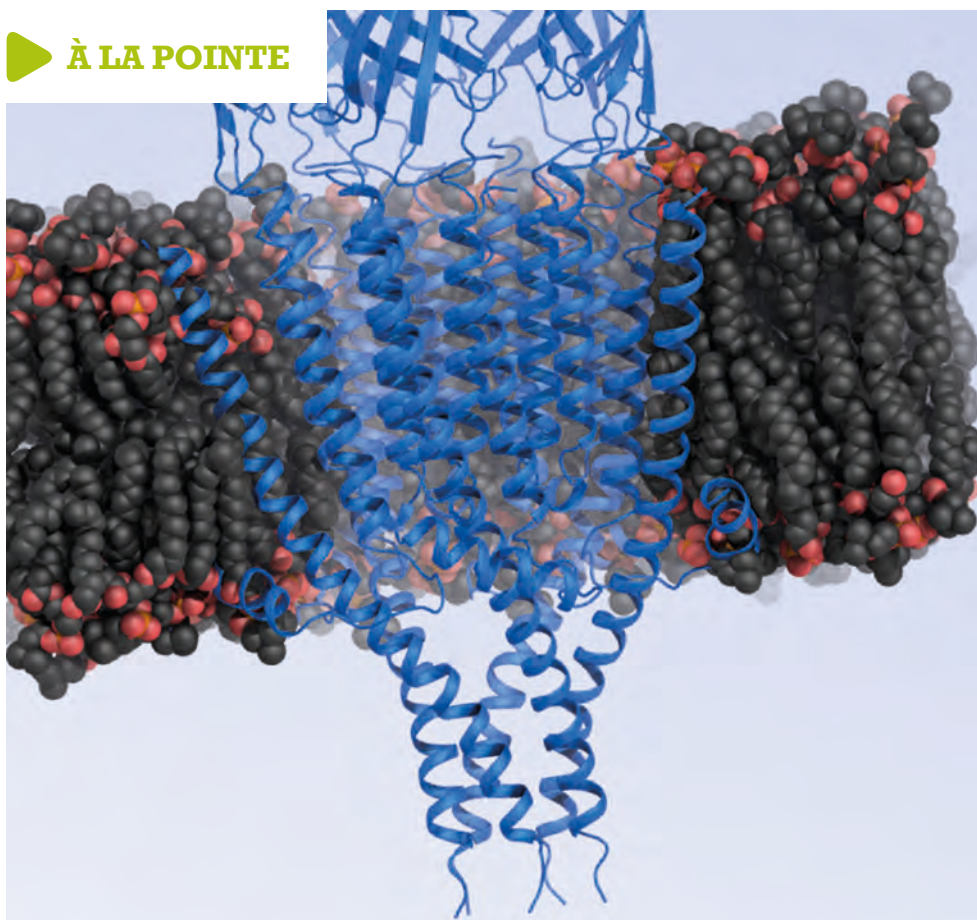
• **Vitesse gravitationnelle** : vitesse résultant exclusivement de la gravitation ressentie par un objet, phénomène causant l'attraction de corps massifs entre eux.

• **Expansion de l'Univers** : phénomène qui, à grande échelle, fait s'éloigner les uns des autres les composants de l'Univers (galaxies, amas...).

Notes :

1. Université d'Hawaï (Brent Tully)/Université Claude Bernard Lyon 1 et Institut de Physique nucléaire (Hélène Courtois)/Université d'Hebron (Yehuda Hoffman) et CEA-Irfu (Daniel Pomarède).

2. Dans l'expansion, toutes les galaxies s'éloignent les unes des autres, à une vitesse proportionnelle à leur distance (loi de Hubble). La gravitation peut l'emporter sur l'expansion si les galaxies sont suffisamment proches les unes des autres. Ce n'est pas le cas sur les pourtours du Laniakea mais cela peut l'être dans certaines de ses régions internes.



▲
Vue du récepteur à sérotonine (bleu) dans la membrane cellulaire (noir).

• **Récepteur de neurotransmetteur :** protéine enchâssée dans la membrane de la cellule-cible.

• **Sérotonine :** neurotransmetteur jouant un double rôle d'hormone et de neuromédiateur du système nerveux central, à l'instar de l'adrénaline, de la noradrénaline ou de l'histamine.

• **Protéolyse :** décomposition de protéines en plusieurs morceaux sous l'action d'enzymes.

• **Acides aminés :** éléments de base des protéines.

Notes :

1. Travaux publiés dans la revue Nature [21 août 2014].

2. Cette famille de récepteurs dis « Cys-loop » comprend également les récepteurs GABA, cibles du valium, et les récepteurs à l'acétylcholine, cibles de la nicotine.

3. Travail mené avec l'EPFL et la start-up Theranox.

BIOLOGIE STRUCTURALE

DANS L'INTIMITÉ 3D DU RÉCEPTEUR À SÉROTONINE

Grâce aux neurotransmetteurs, les signaux électriques se propagent d'un neurone à l'autre, via leurs récepteurs. Pour la première fois, des chercheurs de l'IBS révèlent la structure intégrale d'un récepteur à sérotonine d'un mammifère¹. Un récepteur qui se trouve être la cible de médicaments contre la nausée induite par les chimiothérapies ou les anesthésies.

L'influx nerveux passe de cellules en cellules, grâce à des neurotransmetteurs agissant sur les récepteurs de la cellule-cible. Ces derniers comportent des canaux ioniques qui laissent entrer ou sortir des ions du neurone dès qu'un neurotransmetteur se fixe. Un signal électrique est ainsi créé!

Si la fonction de ces récepteurs est bien connue chez les mammifères, leur structure moléculaire ne pouvait être explorée qu'à partir d'homologues de bactéries. C'était sans compter sur une équipe de l'IBS qui révèle, en 3D, la structure d'un récepteur à sérotonine²...

Isoler la protéine et la stabiliser pour pouvoir l'étudier

« Jusqu'à présent, pour les récepteurs de mammifères, il était compliqué d'obtenir des échantillons de qualité. Pour ce type de récepteurs², une partie de la protéine est trop désordonnée pour être étudiée. Ensuite, il fallait trouver la bonne technique pour stabiliser la protéine avant de l'analyser par cristallographie », détaille Hugues Nury de l'IBS. Un à un, les obstacles ont été dépassés. Les biochimistes³ ont fait produire la protéine *in vitro* par des cellules de mammifère puis ont été capables de conserver la majeure partie du récepteur grâce à la protéolyse³ limitée. Enfin, ils ont eu recours à des dérivés d'anticorps de lamas pour la stabiliser rendant ainsi possible son étude par cristallographie.

Un vestibule dans la cellule

Leur technique a permis de révéler la position et l'organisation des acides aminés³, tel que le présente Hugues Nury. « Ce récepteur à sérotonine est constitué de trois parties : le domaine extracellulaire où se fixe la sérotonine ; le canal ionique enchâssé dans la membrane cellulaire ; et le domaine intracellulaire, propre aux mammifères, dans lequel s'organise la sortie des ions. » Cette dernière partie n'avait jamais été vue des scientifiques et se présente comme un vestibule orné de cinq fenêtres fermées par des boucles flexibles. De quoi investiguer davantage cette protéine, en explorer d'autres et envisager des applications pharmacologiques. Le récepteur à sérotonine est en effet la cible de médicaments anti-nauséeux utilisés lors des chimiothérapies.

Esther Leburgue



L'institut de biologie structurale a pour vocation de développer cette discipline qui représente un champ de recherche capital pour la compréhension des mécanismes biologiques fondamentaux. C'est une unité mixte CEA/CNRS/Université Joseph Fourier.

DÉTECTEUR INTELLIGENT : PAS DE SURPRISE AU VOLANT

Détecter un obstacle en mouvement et anticiper son déplacement : une aide précieuse pour les automobilistes qui pourrait éviter bien des accidents. Développé par les chercheurs du CEA-Leti, le système sera bientôt testé sur une Zoé électrique.

Un piéton aperçu sur le trottoir s'apprête à traverser derrière un bus en stationnement... Voici une situation que tout automobiliste peut craindre et qui demande une extrême vigilance ! Une équipe du CEA-Leti, en collaboration avec l'Inria, a développé un système embarqué pour automobile qui permet la détection d'obstacles dans un environnement dynamique, y compris ceux occultés quelques secondes. « Dans un premier temps, l'Inria a mis au point l'intégration de capteurs avec une puissante station de travail logée dans le coffre d'une voiture. Par la suite, nous avons œuvré à sa miniaturisation en intégrant les algorithmes sur une carte multi-cœurs de la société STMicroelectronics » explique Diego Puschini, ingénieur au CEA-Leti. Ce défi était indispensable à l'installation du circuit sur un véhicule

intelligent. Et il a été relevé ! Pas plus gros qu'une pièce de 1 euro, le nouveau système à 69 cœurs offre une grande puissance de calcul pour une consommation équivalente à celle d'un téléphone portable (2 à 4 cœurs). Soit près de 10 fois moins que ce qui existe actuellement sur le marché.

Bientôt un prototype

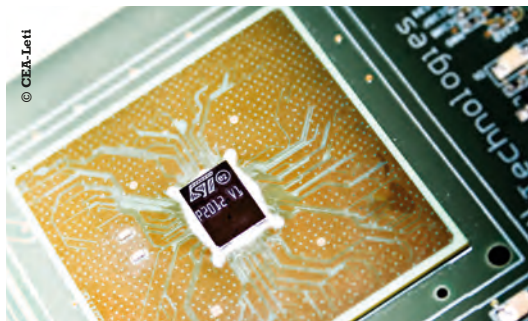
Ce projet de perception dynamique d'obstacles pour une « conduite autonome » a vu le jour en 2013 dans le cadre du Programme Technologies de Liaison (PTL) de l'IRT Nanoelec (voir p. 5). « Aujourd'hui, nous poursuivons les travaux en améliorant, notamment, les capteurs et les logiciels d'interprétation de ces informations. Prochainement nous implémenterons l'ensemble du circuit sur une voiture électrique Zoé » précise Diego Puschini. Des résultats prometteurs sur ce prototype permettront de proposer ce produit pour équiper automobiles, bus, trams, trains, ou encore drones...

Amélie Lorec



CEA-Leti

Le laboratoire d'électronique et de technologies de l'information est un centre de recherche appliquée en microélectronique et en technologies de l'information et de la santé. Au sein du campus d'innovation Minatec à Grenoble, il est une interface entre le monde industriel et la recherche.



▲ Circuit utilisé pour la brique technologique de perception dynamique d'obstacles.

DES ALGUES CHAMPIONNES POUR DÉPOLLUER

Découvertes dans les piscines d'entreposage de combustibles usés d'installations nucléaires, deux souches de microalgues font l'objet de brevets déposés par le CEA-IRTSV. Enjeu : épurer les effluents chargés en métaux et capturer directement dans la biomasse ces éléments stratégiques pour l'industrie de haute technologie.

« Pour résister aux stress radiatifs de plus de 20 kGy et aux stress nutritifs et métalliques, deux microalgues du genre *Coccomyxa* (*C. actinabiotis* et *C-IR3-4C*) captent plus de 90 % des radionucléides¹ présents dans leur environnement » confirme Corinne Rivasseau du CEA-IRTSV dans le cadre d'une étude menée avec l'Institut Laue Langevin et le CNRS. Ces algues présentent par ailleurs des propriétés de captage non-sélectif de métaux de type terres rares, tels que Gadolinium, Néodyme, Europium ou Terbium sous différentes formes chimiques en solution². À l'heure où les lanthanides[•] sont devenus des métaux stratégiques pour leurs applications dans les objets industriels de haute technologie, la mise en œuvre de procédés d'extraction ou de recyclage utilisant le vivant

peut s'avérer très complémentaire des procédés physico-chimiques actuels. Une perspective qui a motivé le dépôt de deux brevets par le CEA.

Aude Ganier



CEA-IRTSV

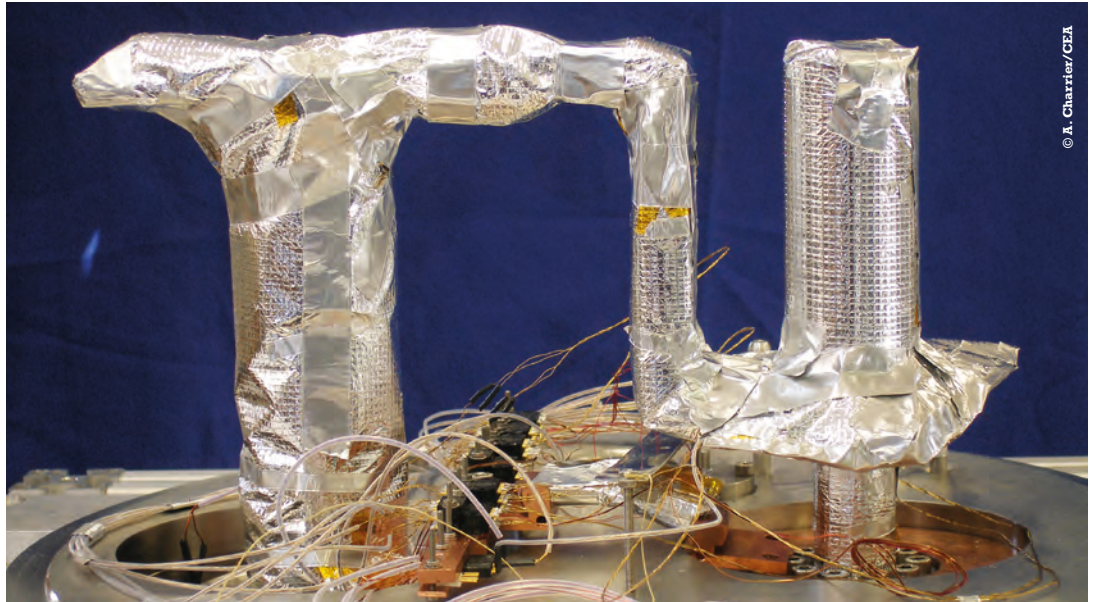
L'institut de recherches en technologies et sciences pour le vivant s'appuie sur un ensemble de plateaux technologiques modernes pour analyser la diversité et la complexité du vivant. À ces fins, il coordonne les programmes d'unités mixtes CEA/Université Joseph Fourier/CNRS/Inserm/INRA.

• **Lanthanides** : nom générique des éléments des terres rares, dotés de propriétés chimiques très voisines, et dont le premier des 15 éléments est le lanthane.

Notes :

- ²³⁸U, ¹³⁷Cs, ¹¹⁰mAg, ⁶⁰Co, ⁵⁴Mn et ⁶⁵Zn.
- Preuve de concept valorisée par le fonds de maturation de CEA-DSV.

Source froide extérieure (à gauche) reliée, via des liens thermiques (au centre), au cryoréfrigérateur (à droite), le tout recouvert de MLI (Multi Layer Insulation System).



© A. Charrier/CEA

CRYOGÉNIE

DES TERRE RARES QUI REFROIDISSENT LES MESURES SPATIALES

Pour éviter les mesures parasites, des instruments embarqués dans les satellites sont dotés d'un système de refroidissement à l'hélium liquide. Problème : ce consommable s'épuise. Les chercheurs du CEA-Inac ont mis au point un cryo-réfrigérateur à base de terres rares, plus performant et moins gourmand.

• **k** : kelvin, unité du système international de température thermodynamique.

• **Spatialisable** : qui répond aux contraintes de poids, de fiabilité et de volume des systèmes embarqués sur satellite.

• **Chaleur spécifique** : capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie (la chaleur).

Notes :

1. Travaux réalisés dans le cadre d'une thèse cofinancée par le CEA et le CNES.
2. Advanced Telescope for High ENergy Astrophysics est une des futures grandes missions de l'Agence Spatiale Européenne.

Pour l'observation de rayonnements infrarouges lointains ou X, certains instruments de mesure embarqués à bord de satellites sont refroidis avec de l'hélium liquide. Limite du système : le réservoir de ce consommable finit par se vider, c'est ce qui a d'ailleurs causé la fin de la mission Herschel en 2013.

Pour allonger la durée de vie de tels instruments, une équipe du CEA-Inac¹ a développé un petit cryo-réfrigérateur **spatialisable**² permettant de remplacer ce bain d'hélium. Leur stratégie a été de travailler sur le régénérateur. « *Ce milieu poreux, élément clé de la machine qui stocke et libère l'énergie du gaz (ici l'hélium) durant un cycle thermodynamique, est classiquement formé de matériaux comme l'inox* » explique Aurélia Charrier, doctorante au CEA-Inac. « *Mais à basse température sa chaleur spécifique³ s'effondre, et donc sa capacité de stockage.* »

Record battu, avec une température de 3,8k*

Afin de pallier ce point, les scientifiques ont développé et testé différents matériaux présentant des anomalies de chaleur spécifique à basse température permettant un meilleur stockage d'énergie. Les plus performants, à base de terres rares, ont ensuite été disposés dans le régénérateur selon différentes combinaisons fonction du gradient de température souhaité dans la gamme 4K – 20K. Résultat : le cryo-réfrigérateur modifié a pu atteindre une température minimale de 3,8K, record mondial, et il a pu délivrer une puissance de refroidissement de 15 mW à 4,5K en partant d'un pré-refroidissement à 20K ! Cette « brique » technologique sera par la suite incorporée à un système complet et pourrait équiper, entre autres, la mission Athena², dont le lancement est prévu en 2028...

Amélie Lorec

TEXTO

Le LANIE accrédité par l'AIEA

Le CEA-DEN reçoit une accréditation de l'AIEA pour son Laboratoire de développement Analytique Nucléaire Isotopique et Élémentaire. Il intègre ainsi le réseau NWAL de l'AIEA, dédié aux analyses d'échantillons dans le cadre de ses activités de contrôle. Au sein du CEA-DEN, le LANIE dispose en effet d'une expertise de haut niveau en analyse isotopique de haute précision sur des combustibles usés et des matériaux irradiés. Celle-ci va de la recherche la plus fondamentale, avec le développement de méthodologies analytiques innovantes, jusqu'à leur déploiement opérationnel. Fort de ses compétences, le LANIE a proposé sa candidature à l'AIEA. La procédure de qualification aura duré presque trois ans pour une accréditation qui atteste du niveau d'excellence mondial du CEA-DEN dans ce domaine.

NOUVELLES TECHNOLOGIES POUR L'ÉNERGIE

UN SUPER-CONDENSATEUR DOPÉ AU SILICIUM

La prochaine rupture technologique pour alimenter les voitures électriques, les téléphones portables ou autres composants microélectroniques pourrait bien voir le jour dans les laboratoires du CEA-Inac. Pas à pas, les chercheurs ont développé un dispositif qui emprunte au supercondensateur et à la batterie : un pseudo-supercondensateur !

Batteries et supercondensateurs sont complémentaires : « Quand une voiture démarre, elle a besoin de beaucoup d'énergie rapidement, c'est le rôle du supercondensateur, explique Saïd Sadki, chercheur au CEA-Inac. Pour aller loin et rouler longtemps, elle tire l'énergie d'une batterie. » Ce faisant, les équipes de l'Inac sont parvenues à la création d'un hybride qui garantit puissance, autonomie et durée de vie.

En 2009, en discutant avec des collègues spécialistes de la croissance de structures de silicium¹ et d'autres, experts de l'électrochimie², Saïd Sadki a eu le déclic : « *hautement dopé*^{*}, le silicium devient un conducteur capable de stocker des charges. » Une thèse a pris le relais pour mettre au point un supercondensateur avec des électrodes en silicium plutôt qu'en carbone, tel que choisi habituellement. « *L'avantage du silicium, c'est qu'il est utilisable en microélectronique* », précise Saïd Sadki.

Une nano-forêt de silicium sur les électrodes

Les chercheurs ont donc conçu un supercondensateur composé de deux électrodes de silicium hautement dopé de 1 cm² qui se font face, baignant dans un électrolyte^{*}. Pour en optimiser la capacité^{*}, proportionnelle à la surface des électrodes, les scientifiques ont fait pousser des nanofils et des nano-arbres de silicium hautement dopé sur les supports de silicium. Les résultats vont *crescendo* : de 6 µF/cm² pour un dispositif constitué d'électrodes de silicium hautement dopé nues, à 440 µF/cm² avec l'ajout de nanofils, et 900 µF/cm² lorsque ce sont des nano-arbres. « *La puissance se rapproche de celle des supercondensateurs en carbone tout en présentant une bonne autonomie caractéristique des batteries*, résume Saïd Sadki. *C'est un pseudo-supercondensateur.* »

Pour peaufiner leur résultat, les chercheurs ont ensuite modifié l'électrolyte à la faveur d'un liquide ionique fourni par une société allemande. Leur supercondensateur assure aujourd'hui jusqu'à 8 millions de cycles, quand les produits à base de carbone peinent à atteindre le million. Désormais, une autre thèse s'intéresse au design des électrodes, notamment pour démultiplier leur surface et gagner encore en capacité...

Esther Leburgue



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.

• **Dopage** : opération qui consiste à introduire, dans un matériau, des atomes d'un autre élément.

• **Électrolyte** : milieu ou solide placé entre les électrodes permettant le déplacement des ions.

• **Capacité** : valeur mesurant le nombre de charges qu'un dispositif peut accumuler puis relarguer. Elle s'exprime en farad (F).

Notes :

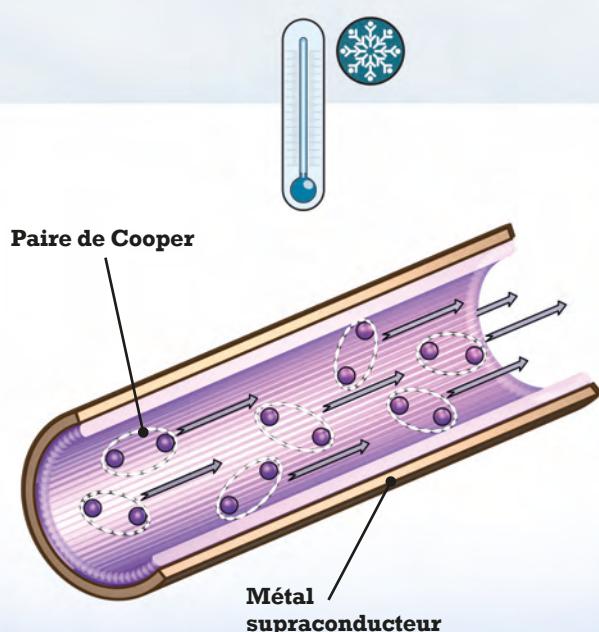
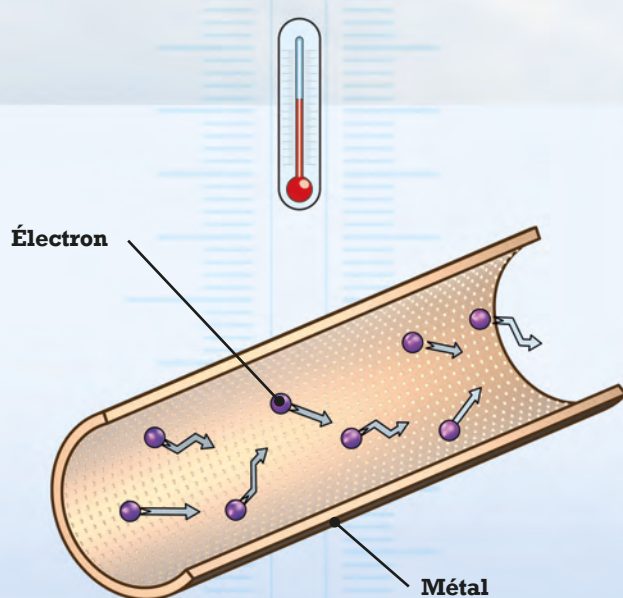
1. Laboratoire SP2M du CEA-Inac.

2. Laboratoire SPram, unité mixte de recherche CEA-Inac/CNRS/Université Joseph Fourier.

▲ **Fonctionnalisation de nanofils de silicium par un polymère conducteur à base de PEDOT.**

LA SUPRACONDUCTIVITÉ

Faire léviter un train ou avoir des câbles électriques beaucoup plus puissants pour le transport du courant ? C'est possible grâce à la supraconductivité : à très basses températures (en dessous de 138 Kelvin, soit - 135 Celsius), certains matériaux voient leurs propriétés macroscopiques électriques et magnétiques changer. Ce phénomène apparaît chez la plupart des métaux (exceptés les métaux nobles : cuivre, argent, or...) ou alliages métalliques et s'explique à l'échelle microscopique, grâce à la physique quantique. Découvert en 1911, il demeure l'un des sujets de recherche les plus étudiés au monde tant il est difficile à maîtriser.



PERTE DE RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE

À température ambiante

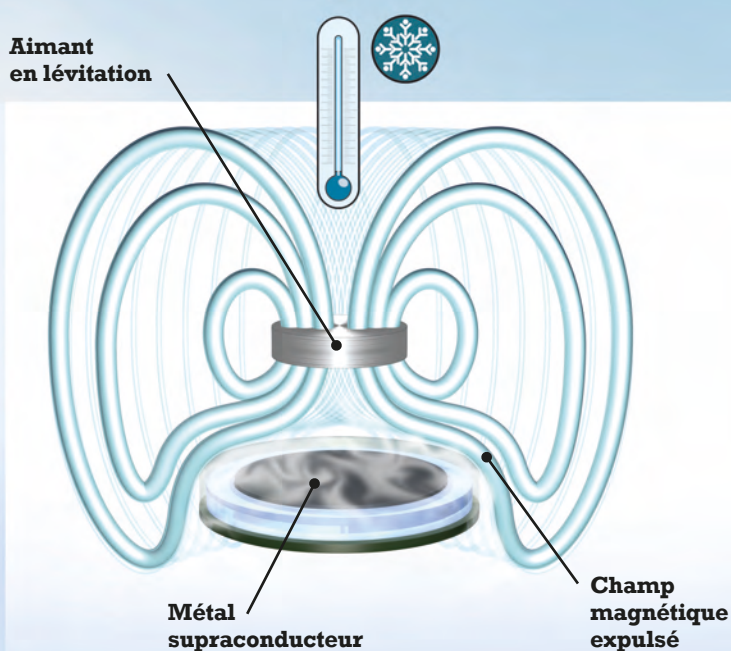
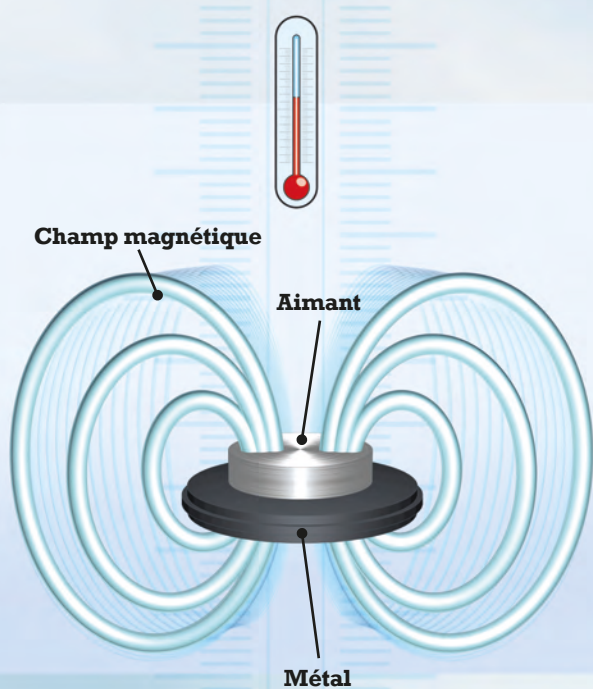
Les électrons d'un métal se comportent comme des ondes indépendantes les unes des autres. Dès qu'elles rencontrent un défaut, ou que l'un des atomes du métal vibre, ces ondes sont facilement perturbées et déviées. Certains électrons cèdent alors une partie de leur énergie au métal, qui s'échauffe, (effet Joule) et sont ralentis : c'est la résistance électrique.

À très basse température

Le métal devient supraconducteur : ses électrons s'associent par paire (paires de Cooper) qui se superposent pour former une seule grande onde collective, le condensat. Comparable à un banc de poissons au mouvement collectif harmonieux, il occupe tout le matériau et est insensible aux défauts : la résistance électrique disparaît totalement. Dans un anneau supraconducteur, un courant électrique peut donc circuler indéfiniment, sans perte d'énergie.

À SAVOIR

La température critique (T_c), température à laquelle la supraconductivité apparaît, varie en fonction de la composition chimique et de la structure cristalline du matériau. Dans le cas des supraconducteurs dits conventionnels (grande majorité), elle reste inférieure à 40 Kelvins, soit $-233\text{ }^\circ\text{C}$, et nécessite un refroidissement à l'hélium liquide (rare et coûteux). Il existe toutefois des supraconducteurs à haute T_c comme les cuprates, découverts en 1986 (T_c jusqu'à 138K, soit $-135\text{ }^\circ\text{C}$), qui peuvent être refroidis à l'azote liquide, plus accessible. Comprendre les mécanismes microscopiques de la supraconductivité de ces matériaux est un enjeu majeur de la Physique moderne.



EXPULSION DU CHAMP MAGNÉTIQUE

À température ambiante

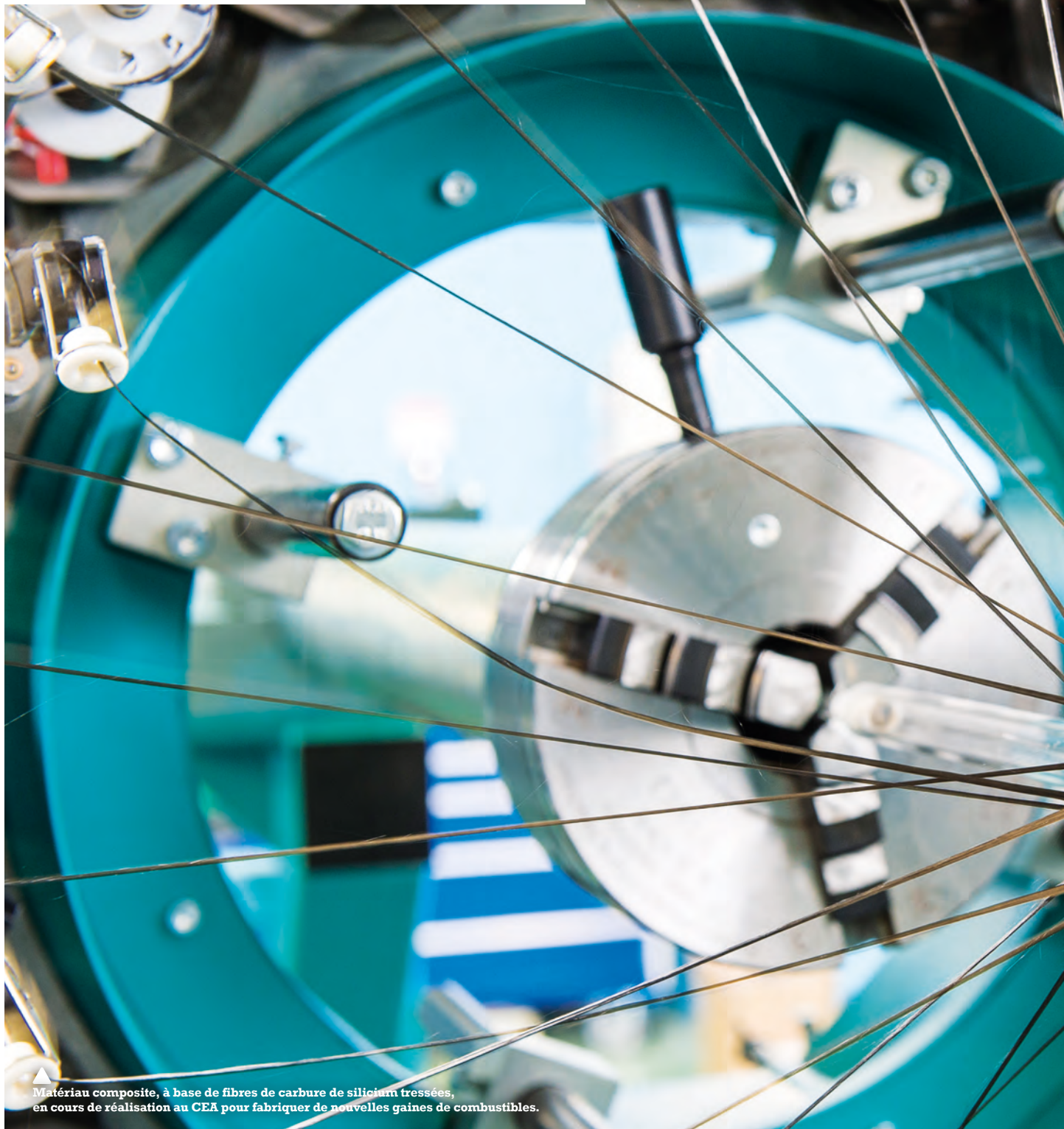
Les métaux non magnétiques sont traversés par les champs magnétiques (comme celui créé par un aimant) qui interagissent peu avec la matière.

À très basse température

Les métaux supraconducteurs expulsent les champs magnétiques qui ne peuvent plus pénétrer à l'intérieur: il s'agit de l'effet Meissner. Une force s'exerce alors entre le supraconducteur et l'aimant. Dans certains supraconducteurs (type II), l'expulsion est imparfaite et entraîne une lévitation stable de l'aimant.

APPLICATIONS

La supraconductivité est étudiée et appliquée dans de nombreux domaines: imagerie médicale (IRM); énergie: bobine supraconductrice pour le stockage, câbles supraconducteur pour faire circuler une densité électrique 1 000 fois plus importante que celle des câbles classiques (en cuivre) et sans échauffement; électro-aimants et confinement magnétique pour les accélérateurs de particules; télécommunications; transport: train qui lévite à plusieurs centimètres au-dessus de ses rails grâce à de puissants champs magnétiques; créés par des bobines supraconductrices.



▲ Matériau composite, à base de fibres de carbure de silicium tressées, en cours de réalisation au CEA pour fabriquer de nouvelles gaines de combustibles.

DES MATÉRIAUX FAITS **POUR DURER**

LES MATÉRIAUX À L'ÉPREUVE DU NUCLÉAIRE

VIEILLISSEMENT SOUS SURVEILLANCE

DES NERFS D'ACIER POUR LES CENTRALES DU FUTUR



Fortes températures, irradiations, contraintes mécaniques, environnements corrosifs : les matériaux des centrales nucléaires sont soumis à des conditions extrêmes. Ainsi, la garantie de la sûreté, de la durée de vie et des performances des réacteurs actuels, tout comme la conception et la qualification de matériaux adaptés aux contraintes spécifiques des systèmes nucléaires du futur, constituent les principaux enjeux du CEA dans le domaine des matériaux du nucléaire. Pour cela, les chercheurs s'appuient sur un solide retour d'expériences, des compétences et des installations uniques au monde.

Dossier réalisé par Vahé ter Minassian

LES MATÉRIAUX À L'ÉPREUVE DU NUCLÉAIRE

Les matériaux ? Ils jouent un rôle essentiel dans le domaine du nucléaire. D'eux dépendent, en effet, la sûreté des centrales, leur durée de vie et même leurs performances ! À Saclay, les chercheurs de la direction de l'Énergie nucléaire (CEA-DEN) étudient, développent et qualifient une grande diversité de matériaux (alliages métalliques, matériaux composites, oxydes...) utilisés dans les réacteurs actuels et futurs, grâce à des équipements uniques au monde.

Gaines enfermant le combustible, structures internes les maintenant en place et cuve du réacteur n'ont aucun secret pour les équipes du CEA-DEN dont la tâche va bien au-delà d'un classique travail de développement industriel. En effet, explique Pascal Yvon, chef du DMN¹ du CEA-DEN : « un cœur de réacteur n'est pas une installation comme les autres. En son sein, les pièces ne subissent pas seulement des sollicitations mécaniques, thermiques et chimiques comme dans une unité industrielle conventionnelle ; elles sont également irradiées par les neutrons qu'émet le combustible lors de la réaction de fission. Et ces neutrons agissent sur les matériaux en modifiant leur

composition et leur structure interne. Ils sont ainsi susceptibles de conduire à des déformations des composants du cœur ou de les rendre moins résistants aux chocs et à la corrosion. En tous les cas, ils peuvent profondément changer leurs propriétés ! »

Prévoir le comportement des alliages

D'où l'objectif ambitieux du CEA-DEN d'élaborer une science à même de prévoir le comportement des alliages métalliques soumis à un tel environnement. Et cela, sur des durées pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines d'années concernant les aciers des cuves (un composant

DES PLATEFORMES EXPÉRIMENTALES ET DES LABORATOIRES CHAUDS UNIQUES AU MONDE

• **Cellules chaudes :** enceintes conçues pour manipuler les matériaux irradiés en toute sûreté, grâce à des bras robotisés et à la protection de parois en plomb et de hublots en verre de plomb de 70 à 80 cm d'épaisseur.

Notes :

1. Mise en service en 2009 au DMN sur le centre de Saclay et au Centre de spectrométrie nucléaire et de spectrométrie de masse UMR (CEA/CNRS/Université Paris-Sud).
2. En service depuis 1959 sur le centre de Saclay.
3. Les gaines des crayons passent d'abord au Laboratoire Atalante du CEA à Marcoule pour être séparées du combustible.
4. Conçues par le CEA en 2011 puis 2013.



Le CEA-DEN dispose d'un ensemble d'installations de recherche constamment renouvelées pour les maintenir au meilleur niveau expérimental.

Dans le domaine de l'étude du comportement des matériaux, la plateforme JANNuS¹ permet d'irradier des matériaux par des flux de particules chargées produites par ses accélérateurs. Le dommage balistique et la création d'hélium et d'hydrogène y sont ainsi reproduits simultanément. De même, le laboratoire chaud LECI² reçoit directement des échantillons de structures métalliques irradiées³ en provenance des réacteurs industriels ou de recherche (comme le réacteur Osiris) pour les tester et les expertiser. Et ce, grâce à des cellules chaudes⁴ dont les dernières ont été mises en service en 2005.

Dans le cadre des études sur les réacteurs de 4^e génération, particulièrement le projet de démonstrateur technologique Astrid, deux installations dédiées, CORRONa et CORRONa²⁴ permettent de réaliser des essais d'exposition de matériaux à du sodium liquide, aux températures, vitesses de fluide et chimie du sodium représentatives et strictement contrôlées.

◀ **Manipulation en téléopération dans les cellules chaudes de la ligne M du LECI.**



◀ **Éprouvettes servant à l'évaluation du comportement mécanique d'un tube en acier.**

impossible à remplacer une fois installé). Mener à bien ce projet dont dépendent la sûreté et l'exploitation des centrales nécessite de procéder par étapes. Cela suppose, dans un premier temps, d'acquérir une bonne connaissance des caractéristiques des matériaux employés en termes de microstructure, de résistance, de **ductilité** et de corrosion. Il s'agit ensuite d'identifier les modifications qu'induisent les neutrons sur ces aciers, alliages de zirconium et autres composites, grâce à des tests réalisés sur de grands outils expérimentaux qui simulent leur vieillissement sous irradiation. En effet, les neutrons changent la composition chimique (transmutation ou création d'hélium et d'hydrogène par réactions nucléaires) ou, par « effet balistique », éjectent certains atomes de leurs emplacements, créant un brassage important d'atomes. Enfin, il faut également pouvoir modéliser l'ensemble de ces phénomènes, de l'échelle atomique jusqu'à l'évaluation de leurs effets sur une installation.

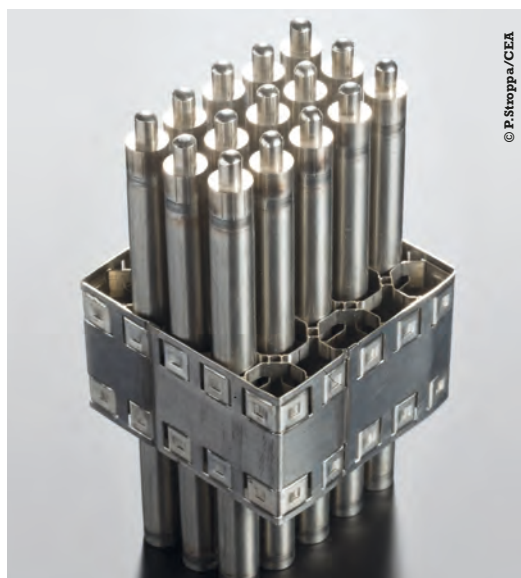
Au cœur des réacteurs actuels...

Deux missions orientent l'action du CEA-DEN en la matière. La première se manifeste par un soutien au parc de réacteurs actuels à la demande d'industriels, par exemple dans le cadre de l'élaboration des dossiers réglementaires qu'EDF doit constituer auprès de l'ASN² tous les dix ans pour prolonger la durée de fonctionnement des centrales. Il peut s'agir de réaliser des études sur le vieillissement des aciers des cuves en partie courante ou sur des endroits particuliers (soudures, zones affectées thermiquement...); ou de rassembler des données afin d'aboutir à une meilleure planification de certaines opérations de maintenance particulièrement lourdes à mettre en œuvre, comme le changement à intervalles réguliers des vis de cloisonnement du cœur. « Autre exemple, en ce qui concerne les gaines de combustible, première **barrière de confinement** d'un réacteur, l'objectif est d'augmenter leur durée d'utilisation en fonctionnement normal et d'améliorer leur sûreté dans l'éventualité d'une situation accidentelle, notamment en cas de perte de réfrigérant faisant suite à une rupture du circuit primaire du réacteur », explique Pascal Yvon.

...Et de ceux de demain

Tournée vers l'avenir, la seconde mission du CEA-DEN est de mener les recherches sur les systèmes nucléaires de 4^e génération. Ses efforts se concentrent sur deux filières de réacteurs, toutes deux dites à neutrons rapides (RNR) :

une filière refroidie au sodium (RNR-Na); l'autre refroidie au gaz (RNR-G), dans une option à plus long terme. Or, les conditions régnant dans le cœur de ce type d'installations sont très différentes de celles des réacteurs à eau sous pression (REP) du parc actuel. Plus fortes températures, fluides de refroidissement aux propriétés chimiques distinctes, neutrons de différentes énergies. C'est, au bout du compte, à diverses problématiques que sont confrontés les scientifiques du DMN et du DPC³, lesquels bénéficient de l'expérience acquise sur les RNR ayant déjà fonctionné dans le monde (près de 400 « années/réacteur », dont 100 en opérations industrielles). Les équipes travaillent, d'une part, à évaluer plus précisément la tenue et le vieillissement des matériaux de structure. Et ce, dans l'objectif de pouvoir justifier une durée de fonctionnement de 60 ans pour ces installations futures. D'autre part, elles s'efforcent de mettre au point de nouvelles gaines de combustible adaptées, en attendant de les tester sur le projet de démonstrateur technologique de RNR-Na Astrid, actuellement en phase d'étude et dont le CEA-DEN est maître d'ouvrage. Pour répondre à ces enjeux, il s'agit de qualifier les matériaux sur des plateformes expérimentales instrumentées dédiées et de développer une modélisation prédictive de leur comportement. Un travail de longue haleine mais une condition *sine qua non* de la réussite dans ces missions. ●



◀ **Portion d'assemblage combustible.**

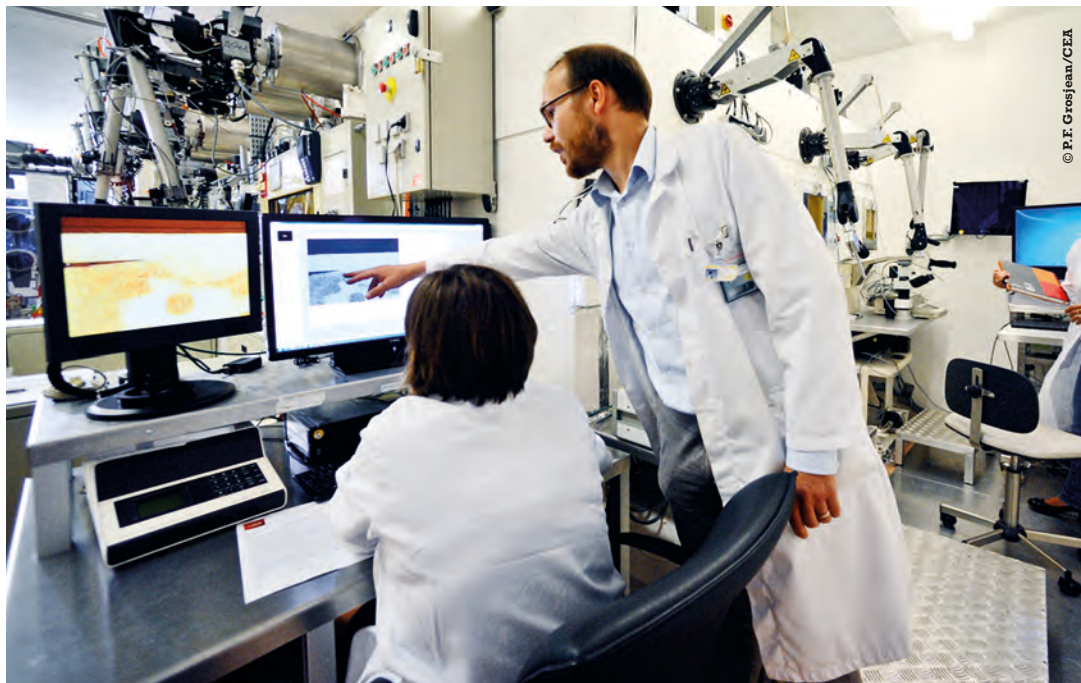
● **Ductilité** : capacité d'un matériau à se déformer plastiquement avant rupture.

● **Barrière de confinement** : la radioactivité d'un réacteur nucléaire est confinée par trois barrières physiques : la gaine de combustible, l'enveloppe du circuit primaire (circuit de refroidissement primaire et cuve) et l'enceinte de confinement (bâtiment en béton entourant tous les éléments du réacteur).

Notes :

1. Département des Matériaux pour le nucléaire.
2. Autorité de sûreté nucléaire.
3. Département de Physico-chimie.

Analyses métallographiques
de matériaux irradiés
en ligne Isidore du LECL.



© P.F. Grosjean/CEA

VIEILLISSEMENT SOUS SURVEILLANCE

S'assurer du bon vieillissement des matériaux composant les parties inamovibles des réacteurs et améliorer la sûreté et la performance des autres, comme les gaines de combustible : tel est l'objectif des recherches du CEA-DEN dans le domaine des centrales de seconde génération qui composent le parc actuel d'EDF.

• **Zirconium** : métal très transparent aux neutrons thermiques avec une bonne résistance à l'oxydation en présence d'eau.

• **Acier inoxydable austénitique** : famille d'acier contenant du chrome 18% (élément qui améliore la résistance à la corrosion) et du nickel (8 à 10%), présentant une grande aptitude à la déformation et une très bonne résistance à la corrosion.

• **Acier ferritique faiblement allié** : famille d'acier à faible teneur en carbone (inférieur à 0,1%), comportant 11 à 14% de chrome et pas de nickel, qui dispose d'une bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation haute température.

« **L**e cœur d'une installation nucléaire est un ensemble hétérogène d'équipements dont chacun constitue un sujet d'études pour les spécialistes des matériaux » rappelle Benoît Tanguy, chef de projet au DMN¹ du CEA-DEN. On y trouve, d'abord, les gaines, ces longs tubes fermés en leurs extrémités où sont insérées les pastilles de combustible. « Elles sont faites en alliage de zirconium ». Puis viennent les « structures internes », ces pièces métalliques, cloisons, renforts et autres vis qui servent à les maintenir. « Ceux-là sont en acier inoxydable austénitique ». Enfin, il y a la cuve du réacteur, de 330 à 450 tonnes selon le palier : « elle est élaborée dans un acier ferritique faiblement allié mais est protégée de la corrosion sur sa face interne par un revêtement en acier inoxydable austénitique ». De ces trois constituants du cœur, seuls les assemblages combustibles sont régulièrement changés par EDF, lorsque le combustible usé est retiré pour être remplacé par du neuf. Structures internes et cuves, installées dès la construction du bâtiment sont elles, excepté le cas de quelques vis,

conçues pour rester à demeure. Certaines sont en place dans les premiers REP 900 MWe depuis 37 ans !

Accélérer le vieillissement des matériaux pour mieux le modéliser

Mais sont-elles en état de supporter une éventuelle prolongation de la durée d'exploitation des centrales ? L'une des missions du DMN est d'apporter les éléments scientifiques permettant de répondre à cette question. Tous les dix ans, chaque réacteur fait l'objet du dépôt d'un dossier auprès de l'ASN pour justifier qu'il pourra fonctionner la décennie suivante. « Le CEA intervient alors pour donner aux exploitants les éléments techniques nécessaires concernant la cuve et les internes ». Le principe est d'acquiescer des données matériaux sur le vieillissement de ces pièces, par exemple par des irradiations expérimentales permettant d'évaluer leurs propriétés au bout de cinquante ans. À la demande d'EDF, les équipes ont commencé à rassembler des données pour l'échéance suivante : celle des soixante

ans ! Il s'agit ensuite de vérifier que les propriétés des matériaux des cuves n'évoluent pas au point de remettre en cause l'intégrité de ces dernières en cas d'accident. « Nous devons produire des modèles décrivant comment les propriétés des aciers irradiés vont évoluer au cours de ces 60 ans » Comment ? Par l'expérience ! Afin de reproduire les sollicitations que le matériau subit à l'intérieur d'un cœur, les chercheurs vieillissent de manière accélérée en le soumettant, dans le réacteur Osiris à Saclay, à un flux de neutrons dix à vingt fois supérieur à celui qu'il subit en réalité. Puis, au sein du LECl (voir encadré page 29), ils caractérisent les propriétés mécaniques et les microstructures de ces échantillons. « À cela s'ajoute toute une batterie de tests conduits sur des métaux non-irradiés par des neutrons. Ils peuvent être réalisés sur l'installation JANNuS, du DMN ou en collaboration avec des collègues d'autres départements du CEA-DEN¹. Le but étant de résoudre un problème particulier comme la tenue mécanique des aciers ou leur résistance à la corrosion. »

Anticiper l'usure normale des matériaux

Au-delà de sa contribution aux dossiers réglementaires des exploitants de centrales, le DMN mène d'autres études. Il peut s'agir de vérifier que le vieillissement d'échantillons dans des réacteurs expérimentaux est représentatif de ce qui se passera à long terme en réacteur REP. Ou, plus prosaïquement, de fournir des données qui faciliteront le remplacement des vis des internes qui peuvent céder sous la combinaison des sollicitations mécaniques, corrosion et fragilisation par les neutrons. D'où des campagnes périodiques lancées par EDF pour en remplacer certaines ; et d'autres recherches pour mieux comprendre le phénomène et anticiper le moment de leur rupture. Enfin, le DMN s'intéresse également à la problématique du gonflement. « Il nous faut regarder si des irradiations pendant plus de 40 ans entraînent un gonflement des internes de REP, comme cela se produit dans les réacteurs à neutrons rapides (RNR), et trouver, le cas échéant, le moyen de limiter ce phénomène. »

Étudier leur comportement en cas d'accident

Quant aux recherches sur les gaines, elles visent l'amélioration des performances et de la manœuvrabilité des réacteurs. Elles portent également sur leur comportement en cas d'accident pour des raisons évidentes de sûreté. « L'un des objectifs est de trouver des solutions pour limiter les dégâts occasionnés au réacteur par la perte du réfrigérant suite à la formation d'une brèche dans le circuit primaire », explique Jean-Christophe Brachet, expert international



© P.F. Grosjean/CEA

◀ **Essai de rupture de gaine par corrosion sous contrainte induite par l'iode (en haut) et essai d'éclatement, réalisés dans les cellules chaudes du LECl.**

au CEA-DEN, en illustrant par l'accident nucléaire de Fukushima Dai-ichi lors duquel les gaines n'ont pas résisté à l'élévation en quelques minutes de la température du cœur jusqu'à 1 000 °C. « Les gaines voient leur pression interne augmenter brusquement. Elles peuvent alors éclater puis, si les systèmes de refroidissement sont inopérants (ce qui fut malheureusement le cas à Fukushima), se fragmenter en formant avec le combustible qu'elles renferment un magma radioactif très difficile à refroidir : le corium. Par ailleurs, l'alliage en zirconium dont elles sont faites s'oxyde, libérant de l'hydrogène qui favorise le risque d'explosion. D'où l'idée de faire en sorte que les gaines puissent maintenir leur intégrité durant quelques heures à quelques dizaines d'heures supplémentaires et, pour cela, qu'elles s'oxydent le moins vite possible » détaille l'expert. Deux types de solutions ayant conduit à des dépôts de brevet font ainsi l'objet d'un examen de la part du CEA-DEN. La première consiste à déposer, sur les gaines actuelles en alliage de zirconium, un revêtement à base de chrome à même de diviser par dix à vingt leur vitesse d'oxydation dans un tel environnement. La seconde, davantage en rupture technologique et donc à une échéance à plus long terme, vise à fabriquer de nouvelles gaines en ayant recours à un matériau conçu à l'origine pour les réacteurs de la quatrième génération : un matériau composite, à base de fibres de carbure de silicium tressées, présentant une couche intercalaire métallique pour assurer l'étanchéité. ●

Notes :

1. Département des Matériaux pour le nucléaire.
2. Département de Physico-chimie (DPC) et département de Modélisation des systèmes et structures (DM2S).



© P. S. Koppa/CEA

◀ **Opération de tressage sur mandrin pour la fabrication d'une gaine en matériau composite.**

DES NERFS D'ACIER POUR LES CENTRALES DU FUTUR

Développer les matériaux des réacteurs du futur à neutrons rapides est l'autre enjeu des chercheurs du CEA-DEN qui bénéficient déjà d'un retour d'expériences¹. Il s'agit dès lors de concevoir les matériaux qui opéreront en toute sûreté et performance, notamment ceux confinant les combustibles ou ceux en regard du fluide caloporteur sodium. Les aciers ODS apparaissent d'excellents candidats.



Filage à chaud de gaines en acier ODS sur la chaîne de fabrication du CEA-DEN à Saclay.

Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) constituent la filière de référence des réacteurs à neutrons rapides de 4^e génération. Dans ce cadre, le CEA-DEN est maître d'ouvrage d'un projet de démonstrateur technologique appelé Astrid, actuellement en phase de conception. Or, soulignent Jean-Luc Béchade et Yann de Carlan, chef de laboratoire et responsable d'études sur les aciers hautes performances au CEA-DEN : « la mise en place de cette nouvelle filière, en intégrant les critères de la 4^e génération, est un défi pour la science des matériaux ». Fluide caloporteur aux propriétés chimiques différentes (du sodium liquide à la place de l'eau des REP du parc actuel), températures du cœur élevées (400 à 650 °C, contre 325 °C), neutrons plus énergétiques. Dans les futurs réacteurs, les matériaux seront soumis

à des sollicitations plus sévères que celles auxquelles ils sont confrontés dans les installations actuelles. À tel point que, le plus souvent, de nouveaux matériaux doivent être utilisés ! Ceci motive les recherches « amont » conduites par les équipes du CEA-DEN en vue d'identifier de nouveaux métaux et céramiques, ainsi que les travaux menés dans le but de les qualifier sur des plateformes expérimentales dédiées à cette intention.

De nouveaux alliages encore plus résistants

Un exemple ? Les gaines renfermant les pastilles de combustible ! Dans les REP, elles sont faites en alliage de zirconium. Dans les premiers assemblages du cœur d'Astrid, elles seront en acier austénitique. Sauf que, expliquent Jean-Luc Béchade et Yann de Carlan : « les



© P.F. Grosjean/CEA

Études de corrosion de matériaux en milieu sodium sur la plateforme CORRONa2 du CEA-DEN à Saclay.

neutrons rapides produits par les RNR-Na peuvent créer des cavités dans ces alliages, lesquels finissent par « gonfler », c'est-à-dire augmenter en volume ». Résultat : les gaines en acier austénitique d'Astrid devront être changées tous les « 100/120 dpa » alors que le combustible à l'intérieur de ces gaines ne sera pas complètement épuisé. Partant de ce constat, les chercheurs se sont lancés en 2007 dans le développement de la filière d'un nouveau matériau capable de mieux résister aux effets cumulés de l'irradiation et de la forte température : celle des aciers ODS². Conçue dans les années 1960, cette famille d'alliage base fer, carbone, chrome et autres éléments minoritaires, supporte mieux ce type de sollicitations grâce aux nanoparticules d'oxyde d'yttrium qui y sont dispersées. Aujourd'hui, il s'agit non seulement d'identifier la nuance³ de référence pour les études mais aussi d'évaluer certaines de ses caractéristiques sur l'installation JANNuS (voir page 29). Une étape indispensable avant de pouvoir passer à la phase suivante : la mise au point d'un procédé de fabrication transférable à un industriel et la qualification du matériau sous irradiation par des neutrons. Alors les aciers ODS pourront prendre la relève des aciers austénitiques.

Fabriqué, assemblé et testé au CEA

Pour atteindre ces objectifs, le CEA-DEN s'est équipé d'une chaîne de fabrication de ces aciers ODS, en tout point semblable à celle que l'on trouverait dans une vraie installation de « métallurgie des poudres ». Mécanosynthèse par broyage des poudres dans un attriteur⁴, consolidation à 1 100 °C par « extrusion à chaud » ou par « compaction isostatique », forage des tubes et transformation à chaud et à froid, permettent à ces chercheurs de produire, chaque année, une dizaine de ces gaines. Des gaines à qui on demandera d'être 1,5 fois plus résistantes à l'irradiation par les neutrons rapides que celles en acier austénitique ! La microstructure de ces nouveaux matériaux étant spécifique⁵, des outils d'analyse de très haute technologie doivent être utilisés pour les caractériser. Ainsi le CEA-DEN a contribué au développement de la ligne de lumière MARS⁶ du Synchrotron Soleil pour des caractérisations fines avant mais surtout après irradiation. Il s'agit de vérifier que les nano-oxydes restent stables après passage en réacteur et qu'ils permettent toujours, même sous fort flux

de neutrons, de renforcer le matériau. Les expériences en cours sont d'ailleurs très concluantes. Enfin, comme ces matériaux ne peuvent être soudés par des moyens classiques⁶, de nouvelles techniques d'assemblage par soudage résistance ou par soudage friction ont été développées par les chercheurs⁶.

La corrosion à l'étude

Au-delà des contraintes d'irradiations et de fortes températures, les matériaux des RNR-Na devront aussi résister à la corrosion. Certes, au regard de l'eau utilisée de nos jours comme fluide caloporteur des REP, le sodium liquide s'avère un fluide moins agressif. « À ceci près qu'en pratique, il contient toujours des impuretés, du carbone ou de l'oxygène dissous qui peuvent, suite à des phénomènes d'oxydation et de carburation, dégrader les surfaces des équipements du cœur et au bout du compte avoir une incidence sur la durée de fonctionnement de l'installation », expliquent Fabrice Legendre et Raphael Robin, chef de service et chef de laboratoire au CEA-DEN. Les scientifiques voudraient qualifier les matériaux face à ce risque, déterminer les produits issus de leur corrosion afin de dimensionner au mieux les « pièges à froid » qui seront chargés dans les futurs réacteurs de purifier le sodium liquide. Deux plateformes de R&D ont été construites dans ce but à Saclay, les boucles « CORRONa », constituées de séries de boîtes à gants, maintenues sous une atmosphère inerte d'argon, couplées à des « pots » contenant plusieurs litres de sodium liquide chauffés jusqu'à 650 °C. En exposant, durant quelques milliers d'heures, des échantillons dans ce fluide chaud et en les caractérisant finement avec des outils optiques adaptés, l'équipe réalise toutes sortes d'expériences statiques, hydrodynamiques ou tribologiques⁷. Utilisés dans des modèles ou pour les affiner, ces résultats permettent de prédire le « vieillissement » de ces alliages par la corrosion sur plusieurs dizaines d'années et asseoir le dimensionnement des composants en conséquence. Une dizaine de nuances de métaux, soit des centaines d'échantillons, a ainsi été déjà testée. Un matériau, l'acier 316 LN, est d'ailleurs retenu comme « matériau de référence » pour les cuves et internes des futurs réacteurs à caloporteur sodium de la 4^e génération. ●

● **dpa, déplacement par atome** : unité utilisée pour quantifier le dommage d'irradiation.

● **Nuance** : terme désignant la proposition des différents métaux composant un type d'acier.

● **Attriteur** : appareil dans lequel le broyage de la matière est réalisé par écrasement des particules entre des billes mises en mouvement.

● **Tribologie** : science qui étudie les phénomènes de frottement susceptibles de se produire entre deux systèmes matériels en contact, immobiles ou animés de mouvements relatifs.

Notes :

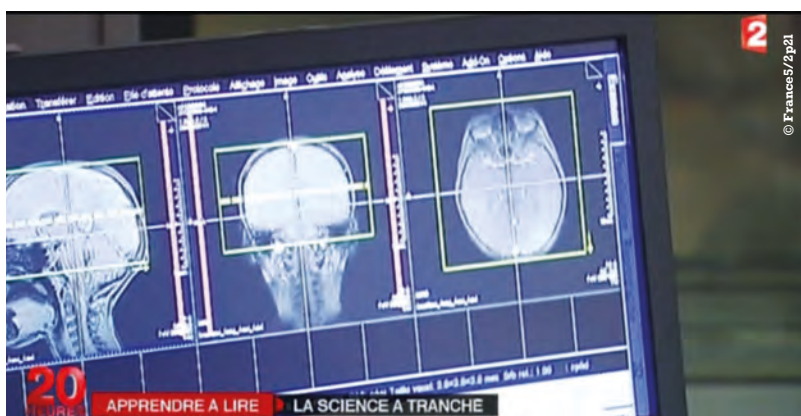
1. Voir article 1.
2. Oxyde Dispersion Strengthened.
3. La déformation à haute température est plus faible et la recombinaison des défauts d'irradiation plus importante.
4. Ligne conçue et financée en partie par le CEA.
5. Le passage des matériaux à l'état liquide, lors du soudage, « effaceraient » leur nanostructure.
6. Ces techniques, développées et mises en œuvre au DM2S, permettent de souder ces aciers à l'état solide.

LE CEA DANS LES MÉDIAS

ÉDUCATION : LA LECTURE, QUEL APPRENTISSAGE

JOURNAL DE 20 H, FRANCE 2 /
15 SEPTEMBRE 2014

Lecture syllabique ou globale : quel est le meilleur apprentissage ? Des journalistes de *France 2* sont allés chercher une réponse à Neurospin, centre de recherche de la direction des Sciences du vivant du CEA sur le cerveau. En suivant par imagerie l'activité du cerveau d'enfants lors de tests de lecture, des chercheurs, dont Karla Monzalvo, docteur en sciences cognitives du CEA, ont démontré la présence d'un circuit de lecture dans l'hémisphère gauche. Un circuit qui suit le même principe que la méthode syllabique !



« IL FERA HUIT DEGRÉS DE PLUS CERTAINS ÉTÉS »

LE JOURNAL DU DIMANCHE /
7 SEPTEMBRE 2014

« *L'évolution globale du climat est, à mes yeux, une raison majeure de faire la transition énergétique* », telle est la conclusion de Jean Jouzel, climatologue du CEA, après la remise du rapport « Le climat de la France au XXI^e siècle », élaboré sous sa direction, à la ministre de l'Écologie Ségolène Royal. Hausse des températures, gaz à effet de serre, vagues de chaleur, déluge... L'occasion pour le journal de recueillir les résultats de ce rapport qui annonce une France plus chaude et plus arrosée quel que soit le scénario retenu parmi ceux élaborés par le GIEC.

PRIMO1D LÈVE 3 M€

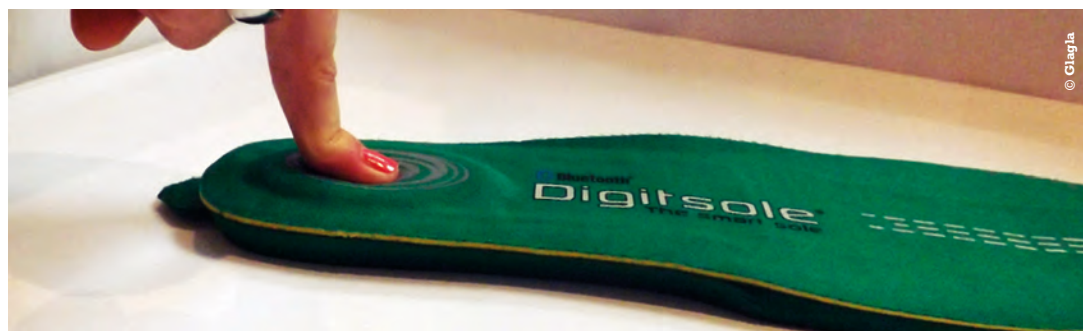
BREF RHÔNE-ALPES / 10 SEPTEMBRE 2014

La jeune société Primo1D, issue du CEA-Leti, réalise sa première levée de fonds. Sofimac Partners, Rhône-Alpes Création, Viveris Venture et un *pool* de *business angels* abondent à hauteur de 3M€. Un soutien qui permettra à l'entreprise de lancer la pré-industrialisation de sa technologie E-Thread, pour l'incorporation de puces électroniques dans les textiles ou plastiques. Emmanuel Arène, PDG de Primo1D, confie à l'hebdomadaire que l'entreprise prévoit « de mettre en place une petite ligne de micro-mécanique d'ici fin 2015 ».

LES CHAUSSURES DU FUTUR ONT DES IDÉES SOUS LA SEMELLE

AFP / 13 SEPTEMBRE 2014

Un partenariat entre l'entreprise Glagla, marque de chaussures ultralégères, et le CEA a permis de développer une semelle connectée et interactive ! Son secret : elle renferme une carte électronique et une résistance cachées sous la plante des pieds. Pesant une centaine de grammes, elle s'adapte à toutes les chaussures pour réchauffer les pieds, mais aussi calculer la distance parcourue, la vitesse, le positionnement, l'altitude... Des informations transmises sur une application smartphone, précise l'agence.



IL A CHANGÉ LA VIE DES MALADES DE PARKINSON

LA CROIX / 10 SEPTEMBRE 2014

Le quotidien dresse le portrait d'Alim-Louis Benabid. Neurochirurgien au CHU de Grenoble, ce dernier, avec un homologue américain, est distingué par la Fondation Lasker pour ses travaux sur la maladie de Parkinson : il a mis au point la technique dite de « simulation cérébrale profonde » qui permet d'améliorer les troubles moteurs d'un malade résistant au traitement à la dopamine. Un résultat obtenu sur la plateforme de Clinatex, centre de recherche biomédicale qu'il a lancé en 2011 sur le centre CEA de Grenoble.

KIOSQUE



Le monde marin à travers ses animaux

Petit nouveau de la collection, ce livre invite à explorer les mers, les océans, et leurs profondeurs à la recherche des créatures les plus extraordinaires qui peuplent le monde sous-marin : cachalot, pieuvre géante, grand requin blanc, dauphin... Les rabats se déplient pour découvrir les animaux aquatiques les plus étranges dans un format exceptionnel ! Les gigantesques êtres marins prennent vie, dans leur milieu naturel, au fil d'illustrations 3D au réalisme étonnant. Des pages pleines d'informations et de données passionnantes pour les 6 à 12 ans.

Le livre géant des animaux de la mer. Mary Greenwood et Peter Minister. Gallimard jeunesse. 16 €

Chroniques matinales...

Que peut raconter un physicien chaque jeudi, à 7 h 17, sur France Culture ? Étienne Klein, également docteur en philosophie de sciences à la tête du Laboratoire de recherches sur les sciences de la matière du CEA, a un art bien à lui d'observer la réalité qui nous entoure. Il taquine nos façons de parler (« *inverser la courbe du chômage* »), explique une loi physique célèbre et pourtant méconnue ($E = mc^2$), défait des vulgates (« *tout est relatif* »)... En lisant chaque chronique de six minutes, il est enfin possible de tout comprendre !

Le Monde selon Étienne Klein. Éditions Équateurs Essais et France Culture. 15 €



La mémoire : la fonction énigmatique du cerveau...

Chacun assimile et stocke en permanence des informations. Pourtant, nous ne sommes pas tous égaux dans cette faculté à mémoriser, sans que cela puisse tout à fait s'expliquer. Écrits par des chercheurs neuropsychologues, cet ouvrage explore cette fonction complexe qu'est la mémoire. Faisant appel à différentes zones du cerveau, elle paraît si familière mais s'impose pourtant encore comme un des grands mystères de notre temps.

e-book : La mémoire, en 40 pages. Francis et Marie-Loup Eustache. Uppr. 4,49 €

Le vide, évidemment

Conjuguant la puissance de la science et le souffle de la poésie, l'auteur, qui fut astrophysicien et directeur de recherche au CEA, parvient à rendre intelligibles les concepts les plus abstraits et les théories les plus ardues de la cosmologie et de la physique quantique. Gravité quantique, inflation éternelle, entropie et temps, univers multiples, horizons... dix chapitres au travers desquels le vide quantique fleurit en particules élémentaires puis, en un clin d'œil cosmique, se déploie en « plurivers »...

Du vide et de l'éternité. Michel Cassé. Éditions Odile Jacob. 25,90 €



SUR LE WEB

ANIMATION

« DATATION PAR LE CARBONE 14 »

La datation par le carbone 14 permet d'estimer l'âge de vestiges archéologiques, peintures rupestres, sédiments... Son principe : utiliser les propriétés de décroissance radioactive de l'isotope ^{14}C , atome présent dans toute matière organique et dans les carbonates. Cette technique est utilisée pour dater des objets de quelques centaines d'années à 50 000 ans environ.

www.cea.fr/jeunes/meditaheque/animation



LE RECYCLAGE DES COMBUSTIBLES USÉS POUR LES FUTURS RÉACTEURS À NEUTRONS RAPIDES DE 4^e GÉNÉRATION

Les futurs réacteurs à neutrons rapides de 4^e génération pourront recycler indéfiniment l'uranium et le plutonium. Par ailleurs, ils utiliseront les stocks de matières issus des combustibles usés qui ne peuvent plus alimenter les centrales actuelles. Au CEA, des scientifiques travaillent sur la mise au point de procédés adaptés à la dissolution des combustibles usés de ces réacteurs du futur.

www.cea.fr/jeunes/meditaheque/video

THE LANIAKEA SUPERCLUSTER OF GALAXIES

Ce blog en anglais est consacré à la présentation du super-continent extragalactique, découvert par une équipe internationale impliquant le CEA-Irfu et au sein duquel flotte la Voie lactée, notre propre galaxie. Ces résultats, qui ont fait la Une de la prestigieuse revue *Nature* le 4 septembre dernier, prennent notamment vie dans une vidéo, également disponible en 3D.

<http://irfu.cea.fr/laniakea>





cité de la réussite

le forum des débats culturels, économiques, scientifiques et politiques



8 & 9 NOV. 2014 **À LA SORBONNE**

PROGRAMME ET INSCRIPTIONS CITEDELAREUSSITE.COM

2 JOURS 50 DÉBATS 150 PERSONNALITÉS

LA CITÉ DE LA RÉUSSITE

Paris. Université Paris-Sorbonne. 8 et 9 novembre 2014.

« La cité de la réussite » engage le débat et donne à entendre les opinions les plus audacieuses ! L'audace est en effet le thème de cette nouvelle édition qui propose, sur deux jours, 50 conférences confrontant les points de vue de 150 intervenants. Artistes, chefs d'entreprise, écrivains, historiens, philosophes, responsables politiques et scientifiques partageront leurs visions sur des enjeux majeurs. Un événement qui pourra compter sur la présence de personnalités du CEA, dont l'Administrateur général du CEA et le Directeur de CEA Tech.