

les défis du cea

Le magazine de la recherche et de ses applications

208

Juin 2016

TOUT
S'EXPLIQUE

Supplément détachable
sur la **phytoremédiation**

02

L'INTERVIEW

◆ François Gauché décrypte les missions de la Direction de l'énergie nucléaire du CEA ◆

04

ACTUALITÉ

◆ André Brahic, 1942-2016 ◆
Win-MS s'exporte aux États-Unis ◆
La Corse accueille le premier itinéraire électrique 100 % solaire ◆
Les pionniers du numérique pour l'Internet des objets ◆

07

SUR LE VIF

◆ Connectram, quand le virtuel se superpose au réel ◆
La liaison carbone-soufre comme au cinéma ◆ Une molécule peut en booster une autre ◆

09

LE POINT SUR

◆ Le calcul quantique à base de spin ◆

19

SCIENCES EN BREF

◆ Du froid souffle le chaud... et fait monter le niveau ◆ Les microparticules ondulent au rythme des percussions ◆ Un catalyseur à la structure inattendue ◆ Un nouvel étalon à l'export ◆ La corrosion passée, présente et à venir ◆ La bosse des maths ◆ Vers une détection des maladies du cuivre ◆ Diagnostic multi-usages ◆

23

KIOSQUE



10

DOSSIER

Démantèlement

Maestro, maître des milieux hostiles



FRANÇOIS GAUCHÉ,

*Directeur de l'Énergie
nucléaire (DEN) du CEA*

Soutenir la R&D du parc nucléaire aujourd'hui et demain

Arrivé à la tête de la Direction de l'énergie nucléaire (DEN) du CEA en février dernier, François Gauché revient sur les grandes missions de cette direction. Soutien R&D aux exploitants pour le parc actuel et pour les futures générations de réacteurs, les opérations d'assainissement-démantèlement, pilotage de grands projets nationaux ou internationaux, les défis ne manquent pas!

Propos recueillis par Aude Ganier

L'énergie nucléaire, en quelques mots ?

Depuis plusieurs décennies, l'énergie nucléaire fournit à notre pays un avantage compétitif significatif. Étant fortement décarbonnée, elle vaut par ailleurs à la France d'être parmi les pays européens les moins émetteurs de CO₂ par kilowatt heure produit. De même, et l'on oublie parfois de le mentionner, cette industrie émet une pollution atmosphérique très faible, par rapport, par exemple, aux usines qui fonctionneraient

avec du charbon. Au-delà de la sécurité d'approvisionnement, l'énergie nucléaire représente ainsi un bénéfice important pour notre société.

La mission du CEA et de la Direction de l'énergie nucléaire (DEN) en son sein est d'apporter un soutien de R&D au parc nucléaire actuel et de contribuer au développement du parc futur, dans un environnement exigeant des contraintes réglementaires et budgétaires croissantes.

Quelles sont les grandes missions de la Direction de l'énergie nucléaire (DEN) du CEA ?

Notre R&D se positionne sur deux plans temporels. D'une part, nous apportons un soutien à nos partenaires industriels, principalement EDF et Areva, ainsi qu'à d'autres, y compris à l'international, auxquels nous proposons expertise et programmes de R&D pour leur parc d'installations nucléaires actuelles et en cours de construction. Nos programmes couvrent un très grand domaine de R&D, aussi bien pour les réacteurs que pour le cycle du combustible associé, et comportent un important effort de développement d'outils de simulation numérique correspondants.

Nous travaillons également pour le compte de la propulsion nucléaire, en soutien aux chaufferies nucléaires de la marine nationale. D'autre part, nous nous projetons sur le plus long terme, avec nos partenaires industriels, dans les futures

génération de réacteurs nucléaires et de cycles du combustible. Par exemple, nous accompagnons EDF dans l'optimisation des réacteurs à eau pressurisée comme l'EPR et dans la réflexion sur les petits réacteurs modulaires SMR¹. Nous étudions également les réacteurs de quatrième génération, en particulier ceux à neutrons rapides refroidis au sodium. Nous pilotons ainsi les études de conception d'un démonstrateur technologique appelé Astrid. Et ce, tout en poursuivant veille et R&D sur l'ensemble des autres concepts, car nous devons être en mesure d'apporter notre expertise au gouvernement sur toutes les technologies intéressantes de cette 4^e génération (plomb, sels fondus, thorium, etc.).

Les opérations d'assainissement-démantèlement et la R&D associée constituent un autre volet important de l'activité de la DEN. Historiquement, le CEA a exploité un grand nombre d'installations nucléaires qui sont ou vont être arrêtées et qu'il faut donc assainir et démanteler. Il s'agit là d'un gros programme, difficile car certaines opérations sont techniquement très complexes et non standards, pour lequel les autorités de sûreté civile et de Défense ont demandé au CEA de réexaminer sa stratégie globale, avec des enjeux notamment en termes de priorisation des opérations et de stratégie de gestion des déchets. Nous avons lancé une réflexion pour définir une organisation des activités d'assainissement-démantèlement dans la DEN qui soit plus efficace en particulier dans la maîtrise des coûts et des délais.

Le pilotage de grands projets est également un axe fort des activités de la DEN...

En effet, pour mener à bien nos missions, nous avons besoin de grands outils expérimentaux. Ainsi, la DEN est aujourd'hui maître d'ouvrage du réacteur expérimental RJH, actuellement en construction à Cadarache, et mène les études de conception du démonstrateur technologique de réacteurs de

quatrième génération, Astrid. D'autres installations expérimentales doivent être renouvelées car certaines arrivent en fin de vie après plus de 40 années de service. Cela concerne certains laboratoires chauds (dans lesquels on manipule des objets irradiés) et maquettes critiques (réacteurs de très faible puissance dans lesquels sont réalisées des expériences de neutronique). Cette démarche concerne également des installations dites de service, comme celles d'entreposages des matières nucléaires ou de traitement des déchets. L'objectif est de disposer d'ici quelques années d'un outil de R&D rénové pour les cinquante prochaines années.

Comment garantir une R&D de haut niveau, dans le contexte budgétaire contraint et avec les constantes de temps inhérentes à l'énergie nucléaire ?

Nos programmes requièrent une excellence scientifique qu'il est important de stimuler dans un contexte parfois très contraint. L'introduction, par l'Administrateur général du CEA, d'une vision par segments scientifiques nous invite à nous questionner sur notre stratégie scientifique, afin de la rendre plus claire et cohérente et de l'exprimer sur le long terme.

Si on prend la simulation numérique par exemple, il va s'agir de concevoir les outils de calcul et de validation expérimentale qui seront les plus pertinents et les plus performants dans les 10 à 20 prochaines années. Cette échelle de temps impose un ressourcement scientifique exigeant. Et c'est l'un des enjeux majeurs à la DEN pour les prochaines années.

L'activité de la direction de l'énergie nucléaire du CEA est également internationale...

En effet, dans les limites prévues par les accords internationaux, nous coopérons avec la plupart des pays

dotés de programmes nucléaires civils car il est très important de pouvoir mettre en commun nos idées et nos approches de R&D voire de mutualiser les installations. Le programme RJH illustre par exemple cette dimension, avec de nombreux pays partenaires, tout comme le programme Astrid qui réunit autour de lui 18 industriels français et internationaux.

Vous avez été élu à la Présidence du Forum International Génération IV, en quoi consistera votre mission ?

Cette élection intervient dans le cadre de la présidence tournante du Forum international Génération IV entre les États-Unis, le Japon et la France. Cette organisation intergouvernementale² fédère treize membres³ pour qu'ils puissent partager des résultats de R&D autour des six systèmes de réacteurs de quatrième génération sélectionnés en 2002⁴.

Aujourd'hui, de nouvelles perspectives se présentent pour renforcer cette dynamique de collaboration. Avec les trois vice-présidents, nous allons nous concentrer sur trois enjeux. Le premier concerne la sûreté avec deux objectifs le renforcement des relations entre les autorités de sûreté et leurs appuis techniques, et l'édition de critères partagés par tous. Des réflexions et concertation ont déjà commencé sous l'égide du *Committee on Nuclear Regulatory Activities* (CNRA) de l'OCDE. Le deuxième volet relève de la pénétration des systèmes de quatrième génération sur les marchés de l'énergie, secteur en transformation profonde. Enfin, dernier chantier, celui du rapprochement du Forum Génération IV avec toutes les autres instances internationales, AIEA, AIE, OCDE... s'intéressant au domaine de l'énergie et du nucléaire en particulier.

Notes :

1. *Small modular reactors*.

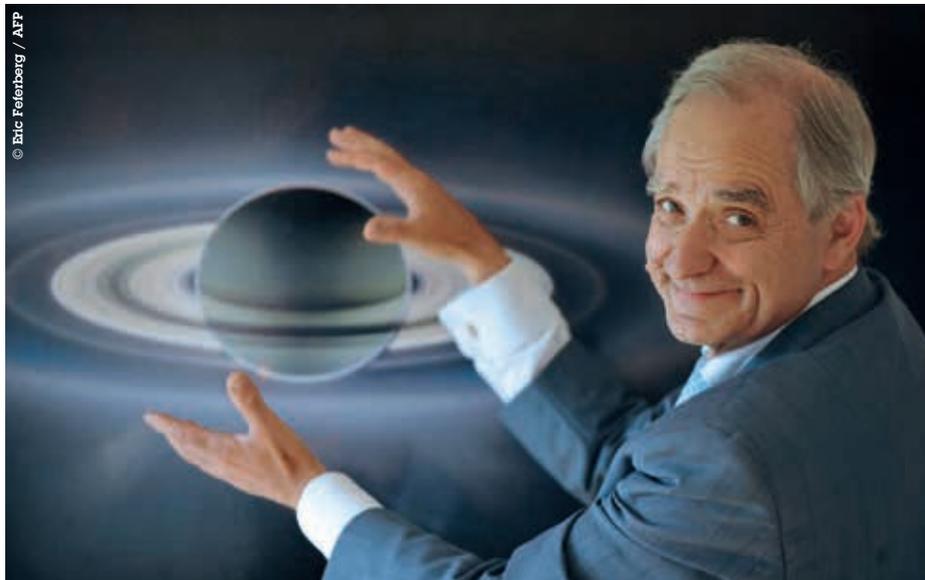
2. Initiée en 2001 par les États-Unis et la France.

3. Afrique du Sud, Canada, Chine, Corée du Sud, États-Unis, Euratom, France, Japon, Royaume-Uni, Russie, Suisse ; avec l'Argentine et le Brésil qui sont membres non-actifs.

4. Filières de réacteurs à neutrons rapides (RNR) refroidis au gaz, sodium et plomb ; 3 filières à neutrons thermiques avec les réacteurs à eau supercritique (RESC), à très haute température (RHT) et à sels fondus (RSF).

Hommage

André Brahic, 1942-2016



Ce 15 mai 2016, il s'en est allé rejoindre les étoiles, les planètes et peut-être l'astéroïde 3 488 qui porte son nom. André Brahic, chercheur à l'observatoire de Paris puis au CEA, et professeur à l'Université Paris Diderot, est un astrophysicien mondialement connu et reconnu.

Spécialiste de l'exploration du système solaire par les sondes spatiales, son œuvre n'est pas des moindres : il a notamment développé le premier modèle numérique des anneaux de Saturne, et co-découvert les anneaux de Neptune dont il baptisa trois des quatre arcs « Liberté-Égalité-Fraternité ». « Culture-Recherche-Éducation » est cet autre triptyque qui a motivé ce grand humaniste, passionné et passionnant, gourmand et généreux. André Brahic a toujours eu à cœur de partager ses connaissances dans un enthousiasme contagieux sinon légendaire. Il s'en est allé, dans une nouvelle sonde, percer le mystère de son dernier ouvrage paru en 2015 : *Terres d'Ailleurs : sommes-nous seuls dans l'univers ?*

Le CEA vient de perdre l'un de ses grands hommes. André Brahic était un grand porteur de savoir et un inlassable passeur de science (...). Les innombrables hommages publiés (...) attestent du rayonnement du scientifique et du caractère exceptionnellement charismatique de l'homme.

Daniel Verwaerde, Administrateur général du CEA

Homme de culture et de conviction, André Brahic a porté haut les couleurs de l'Université en érigeant la culture et l'enseignement des sciences comme un rempart à l'obscurantisme et à la violence. (...) Il aura su communiquer à tous ceux qui l'ont croisé son enthousiasme pour la recherche scientifique (...). D'un dévouement sans faille pour ses étudiants, il aura ouvert à nombre d'entre eux les voies de l'astrophysique.

Sébastien Charnoz et Cécile Ferrari, astrophysiciens au CEA, anciens thésards et très proches collaborateurs d'André Brahic

DATES CLÉS

1974

Chercheur à l'Observatoire de Paris.

1975

Établissement du premier modèle dynamique et collisionnel des anneaux de Saturne.

1978

Professeur à l'Université Paris-Diderot.

1981

Membre des équipes scientifiques des sondes Voyager 1, puis 2.

1984

Co-découverte, avec William Hubbard, des anneaux de Neptune, et confirmation de leur existence en modifiant le programme de vol de la sonde Voyager, en 1989.

1990

L'astéroïde 3 488 est baptisée « Brahic », sur proposition de l'astrophysicien Ted Bowell.

1991

Membre des équipes scientifiques de la sonde « Cassini », jusqu'en 2021...

1997

Fondateur de l'équipe « Gamma-Gravitation » au sein du service d'astrophysique de l'Irfu du CEA.

2000

Prix Carl-Sagan pour l'excellence en communication publique en planétologie, décerné par l'Union américaine d'astronomie.

2005

Fondateur du laboratoire Astrophysique Interactions Multi-échelles (Université Paris Diderot/CNRS/CEA).

2006

Prix Jean-Perrin de popularisation scientifique, décerné par la Société française de Physique.

2015

Nommé chevalier de la Légion d'honneur par la présidence de la République française.

Inauguration

Itinéraire électrique 100 % solaire

Après Bastia, Drive'Eco inaugure sa deuxième station électrique à Ajaccio, préfigurant ainsi le premier itinéraire électrique 100 % solaire. « Parasol » est un concept de station de recharge solaire de véhicules électriques et hybrides, voué à se déployer sur l'ensemble de l'île – tous les 50 km – pour que la Corse devienne la première région où l'on peut « rouler 100 % solaire, en toute liberté ».

Filiale de Corsica Sole, la start-up Drive'Eco a en effet imaginé avec le Liten, institut de CEA Tech, un système intelligent de 88 panneaux photovoltaïques situés sur les 150 m² de la toiture de la station (designée avec Peugeot). Les modules solaires atteignant une puissance maximale 29 kWh, une batterie lithium-ion de 8 kWh est intégrée au système pour stocker l'énergie et alimenter, jour et nuit, les huit bornes de recharge de chaque station. L'une des innovations réside dans le fait que si l'électricité solaire produite est en surcharge par rapport aux capacités de stockage, elle est alors réinjectée dans le réseau... De plus, l'intégration d'algorithmes de pilotage en réseau des stations, couplés à des logiciels de prévision (météo, usages...), assurera au concept une autoproduction à 100 % solaire.



Station de recharge solaire de Drive'Eco à Bastia.



Valise de diagnostic de câbles de WIN MS.

© Eric Feterberg / AFP

Valorisation

Win-MS s'exporte aux États-Unis

Spécialisée dans le diagnostic de réseaux de câbles par réflectométrie depuis 2012, la start-up du CEA Win-MS a déjà séduit les marchés aéronautiques d'Europe, d'Asie et du Moyen-Orient. Son outil innovant, l'AERO Smart-R KIT, fait aujourd'hui l'objet d'une commande en dix exemplaires par Delta TechOps, le plus gros acteur de maintenance MRO d'Amérique du Nord et le troisième mondial. Cette solution de haut niveau intégrera les centres mondiaux de maintenance du groupe, afin d'aider les équipes à localiser rapidement et précisément un défaut sur les faisceaux de câbles des avions. Développée au List, institut de CEA Tech, elle est actuellement la seule à pouvoir détecter et localiser des défauts, permanents ou intermittents, sans démonter les nombreux composants pour réaliser l'inspection. Le temps d'intervention est ainsi divisé par cinq, réduisant les immobilisations des appareils, augmentant la productivité de la maintenance électrique et évitant le remplacement inutile des composants. Les premiers échanges entre Win-MS et Delta TechOps ont été initiés par le French Tech Hub, filiale de Paris Région Entreprises, qui accompagne l'entrée sur le marché américain des PME innovantes françaises à fort potentiel de croissance.

Recherche partenariale

Les pionniers du numérique pour l'Internet des objets

Un nouvel accord de R&D vient renforcer la collaboration du CEA et d'Intel. Si le domaine du calcul haute performance (HPC) est particulièrement concerné, notamment en vue de répondre en commun aux appels à projet du programme-cadre européen H2020, d'autres thématiques sont au cœur de ce partenariat : Internet des objets (IoT), technologies RF, communications sans fil à très haute vitesse, sécurité des composants silicium.

« Nous attendons avec impatience les importantes innovations et les découvertes à venir de cette collaboration » a indiqué le vice-président et directeur général d'Entreprise and HPC Platform Group d'Intel, Raj Hazara. En effet, l'accord d'une durée de cinq ans minimum porte sur le co-développement de technologies numériques. Au programme : mise au point de dispositifs électroniques de basse consommation et de nouveaux matériaux pour progresser dans leur miniaturisation et adaptabilité, augmentation de la vitesse d'échanges de systèmes de communication sans fil, intégration des objets connectés... De fait, et tel que l'a exprimé la directrice du Leti, institut de CEA Tech, Marie-Noëlle Séméria : « cette collaboration marque la reconnaissance du Leti, comme l'un des acteurs les plus innovants d'Europe dans le domaine de l'IoT et dans les technologies à la base du cloud computing et des big datas. »

Réalité augmentée

Connectram, quand le virtuel se superpose au réel

À travers les vitres de leur tramway, les Bordelais découvrent en réalité augmentée l'histoire de leur ville, les futurs projets, les correspondances avec d'autres modes de transport... Voici Connectram, une première mondiale technologique signée Keolis Bordeaux Métropole, Axyz et CEA Tech. par Aude Ganier



La précision des images est remarquable, au pixel près (...), une première mondiale dans la vision 3D temps réel.

Serge Rimlinger, chef de département de la PRTT CEA Tech Aquitaine.

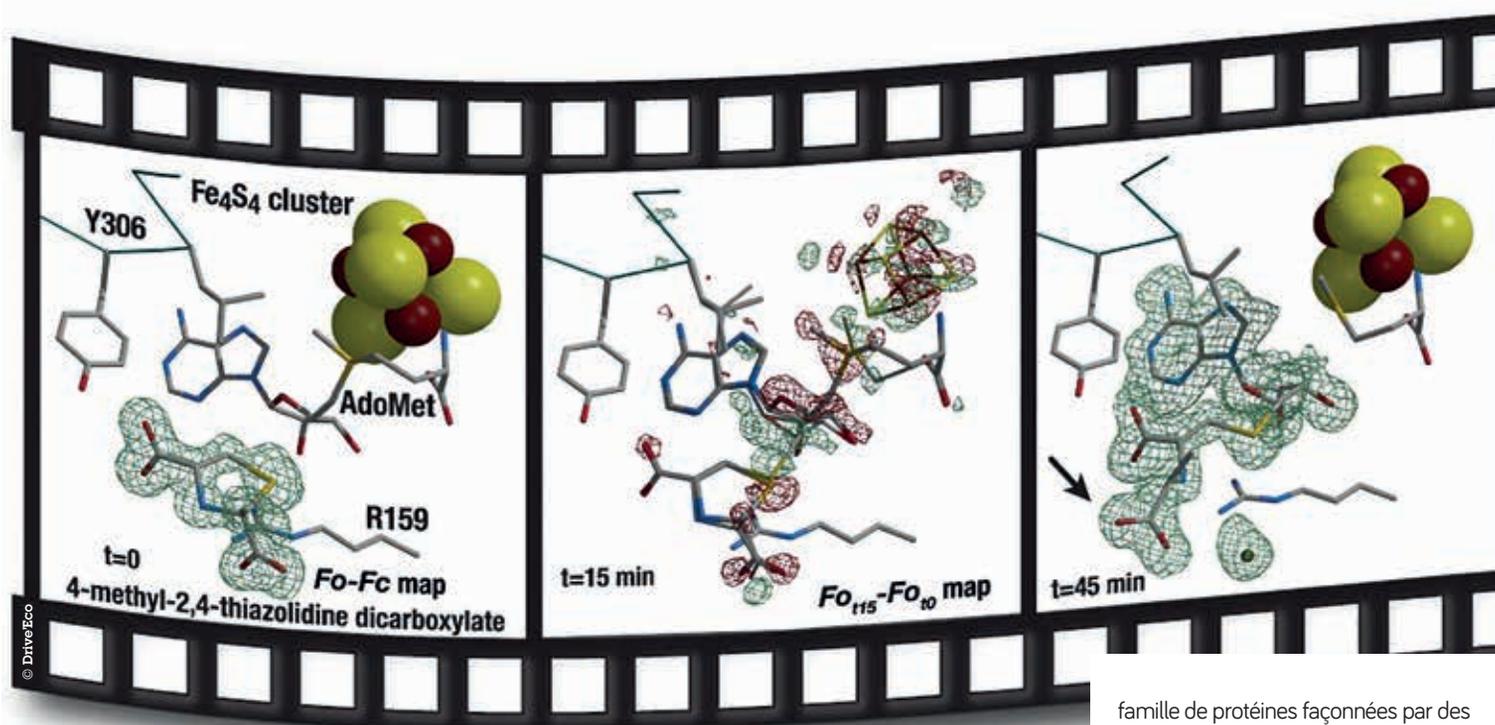
Concept Connectram.

Soudain, les informations apparaissent sur les vitres du tramway : disponibilités des vélos VCub au prochain arrêt, horaires de la gare Saint-Jean, découverte du futur quartier Euratlantique... Cette scène bien réelle a été expérimentée pendant un mois entre deux stations de la ligne C du tramway de Bordeaux. Aujourd'hui, Connectram est déployé sur toute la ligne et le sera bientôt sur l'ensemble du réseau bordelais. En quoi consiste ce dispositif de réalité augmentée ? Certaines vitres du tramway ont été remplacées par des écrans qui diffusent en temps réel les images de l'extérieur tel qu'il serait vu à travers une vitre classique, avec l'ajout d'informations incrustées. Pour cela, le système compte, outre une caméra, des capteurs de positionnement ainsi que différents modules algorithmiques de cartographie, de localisation et de fusion. « Les équipes du List, institut de CEA Tech, ont considérablement optimisé les algorithmes du système avec des briques technologiques pour résoudre de nombreuses contraintes et obtenir un rendu réel des images filmées » indique Serge Rimlinger, chef de département de la PRTT¹ CEA Tech Aquitaine² qui a opéré la connexion entre les différents acteurs du projet.

La bonne information, au bon moment, au bon endroit

En effet, la réalité augmentée de Connectram n'a de sens que s'il n'y a aucune discontinuité entre l'environnement perçu sur la « vitre-écran » et la réalité. « Les logiciels de cartographie et de géolocalisation ont un défaut majeur : ils dérivent dans le temps. La vitesse du tramway complique également l'acquisition des données réelles et l'incrustation des informations virtuelles. Il a fallu faire de la fusion de données pour positionner la bonne information au bon moment et au bon endroit » explique Serge Rimlinger. Par ailleurs, les chercheurs ont dû contourner les problèmes de luminosité, variable en fonction de l'heure, des saisons, des environnements (exposition, végétation, hauteur des bâtiments, etc.). « À l'arrivée, la précision des images est remarquable, au pixel près, ce qui constitue une première mondiale pour une vision 3D temps réel dans le cadre d'une mobilité » conclut le responsable, pour qui cette aventure illustre parfaitement l'esprit des PRTT de CEA Tech : assurer le transfert du savoir et du savoir-faire, de l'amont à l'aval d'un projet innovant. ♦

Notes:
1. Plateforme régionale de transfert technologique du CEA, concept implanté à partir de 2012 dans différentes localités (Nantes, Bordeaux, Toulouse, Metz et Lille).
2. Région Aquitaine Limousin Poitou-Charentes.



famille de protéines façonnées par des millions d'années d'évolution, elle est mise à profit pour produire de nombreux cofacteurs et vitamines et aussi pour activer des protéines, réparer l'ADN endommagé.

Biochimie

La liaison carbone-soufre comme au cinéma

Une équipe de biologistes de l'IBS réalise le premier film du détail d'une réaction chimique prometteuse et difficile à contrôler : la formation d'une liaison carbone-soufre.

par Mathieu Grousson

Chimie radicalaire

Chimie des radicaux libres, espèces chimiques possédant plusieurs électrons non appariés sur sa couche externe, obtenus par rupture de liaisons chimiques.

Qu'elle serve d'intermédiaire réactionnel pour la synthèse de composés organiques ou qu'elle confère des propriétés intéressantes à certaines molécules d'intérêt pharmaceutique, la liaison entre un atome carbone et un atome de soufre a tout de l'union miraculeuse. Difficile à réaliser, elle est un véritable casse-tête pour le chimiste. Il existe pourtant une voie prometteuse qui fait appel à la **chimie radicalaire**. Cette chimie permet de surmonter certaines barrières de réaction en produisant des intermédiaires très réactifs, même si ceux-ci la rendent difficile à contrôler.

Ce casse-tête, Yvain Nicolet de l'IBS en dévoile les teneurs. Avec son équipe, il est parvenu à réaliser le premier « film » de la formation d'une liaison carbone-soufre par chimie radicalaire. Pour ce faire, il s'est intéressé à une protéine baptisée HydE, championne de la chimie radicalaire : appartenant à une très grande

Une description à l'échelle des électrons

Dans des conditions expérimentales contrôlées, les biochimistes ont introduit une molécule de thiazolidine, qui contient deux liaisons carbone-soufre, dans le site réactionnel d'HydE. Ils ont ensuite fourni à l'ensemble l'énergie nécessaire aux réactions. Résultat : en combinant une analyse aux rayons X (complétée par des mesures de résonance magnétique nucléaire et d'activité en solution) à des calculs théoriques, les scientifiques sont parvenus à décrire, à l'échelle des électrons, le détail de la réaction radicalaire de formation et de brisure d'une liaison carbone-soufre. « Ce résultat est obtenu dans le contexte très complexe de molécules biologiques. Pour autant, la mise en évidence de la manière dont les molécules se déplacent dans le site actif de HydE, au cours du temps, pour casser des liaisons carbone-soufre et en former de nouvelles dans des réactions de chimie radicalaire, offre une vision concrète de ce type de réactions très difficiles à maîtriser et à reproduire », explique Yvain Nicolet. De quoi inspirer les chimistes pour enfin tirer parti des promesses de la chimie radicalaire pour la formation de liaisons carbone-soufre. ♦

Essais cliniques

Une molécule peut en booster une autre

Avec 10 000 cas par an en France, la narcolepsie est une maladie orpheline invalidante entraînant notamment des accès de sommeil imprévisibles au cours de la journée. Aujourd'hui, les traitements contre cette pathologie sont insuffisants. C'était sans compter sur les travaux très prometteurs de Theranexus, start-up du CEA.

par Amélie Lorec

Améliorer l'efficacité et la sécurité de certains traitements à visée neurologique et psychiatrique : c'est la mission que s'est donnée Theranexus, société essaimée du CEA en 2013 par deux scientifiques issus de la recherche sur les infections à prions. Comment ? Tout d'abord elle sélectionne un médicament de référence d'une pathologie dans laquelle les besoins médicaux demeurent insatisfaits. Puis, elle le combine avec une molécule, également commercialisée, capable de moduler l'activité de petites protéines (connexines gliales) impliquées dans la communication entre cellules. Une stratégie qui porte ses fruits, comme le démontrent les récents résultats obtenus autour de son premier programme dans la narcolepsie :

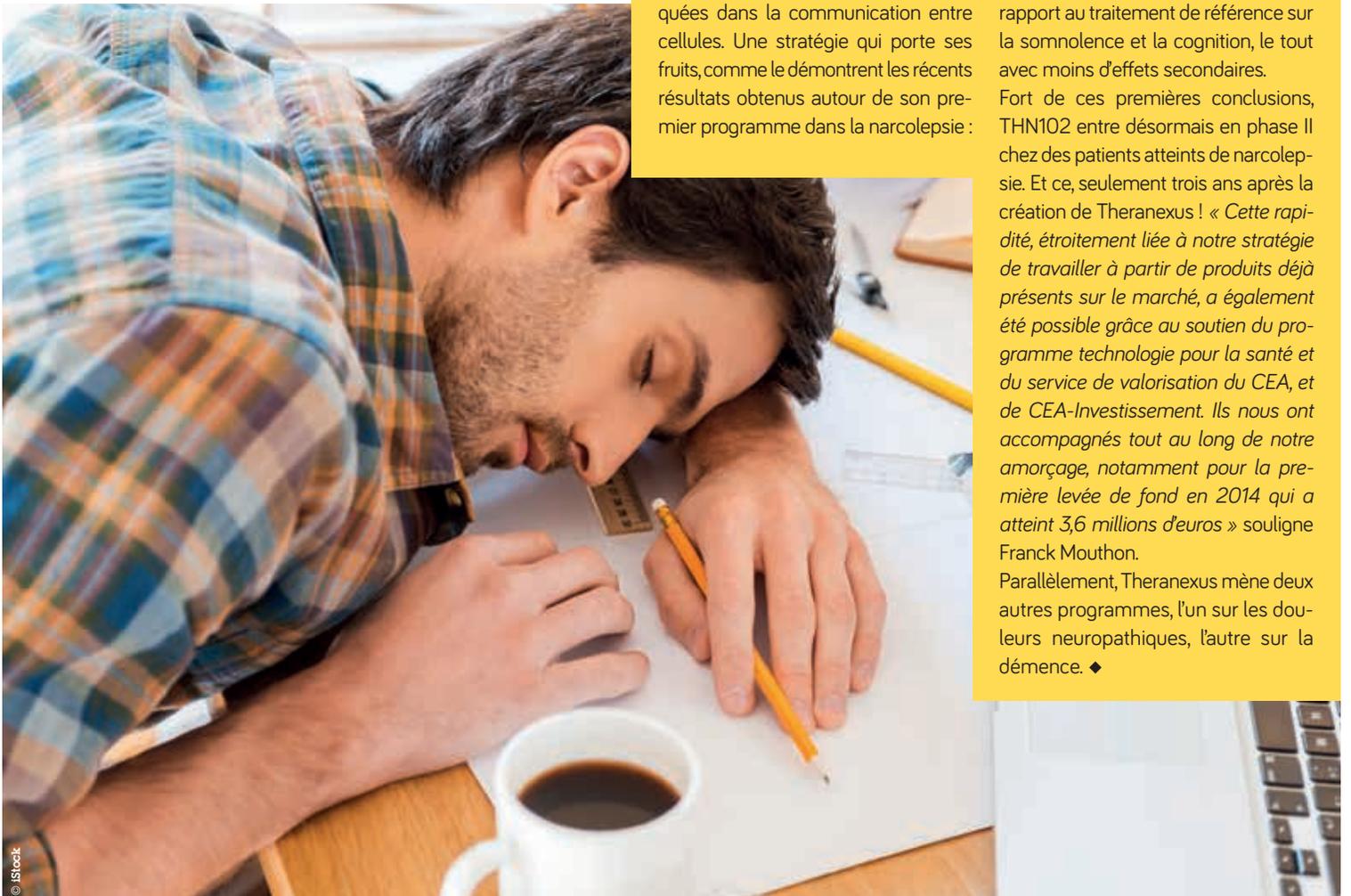
« dans ce programme notre produit THN102 associe le modafinil, traitement classique de cette pathologie luttant contre la somnolence, à la flécainide, molécule initialement utilisée contre l'arythmie » explique Franck Mouthon, président de Theranexus. « Après obtention de résultats très satisfaisants sur des modèles animaux de la maladie, nous avons établi une preuve de concept de l'efficacité et de la sécurité du médicament dans le cadre d'une étude clinique de phase I sur 20 volontaires sains privés de sommeil ».

Cap sur la phase II

Cet essai clinique, réalisé en collaboration avec l'institut de recherche biomédicale des armées, sous financement de la DGA, a en effet mis en évidence une supériorité du produit THN102 par rapport au traitement de référence sur la somnolence et la cognition, le tout avec moins d'effets secondaires.

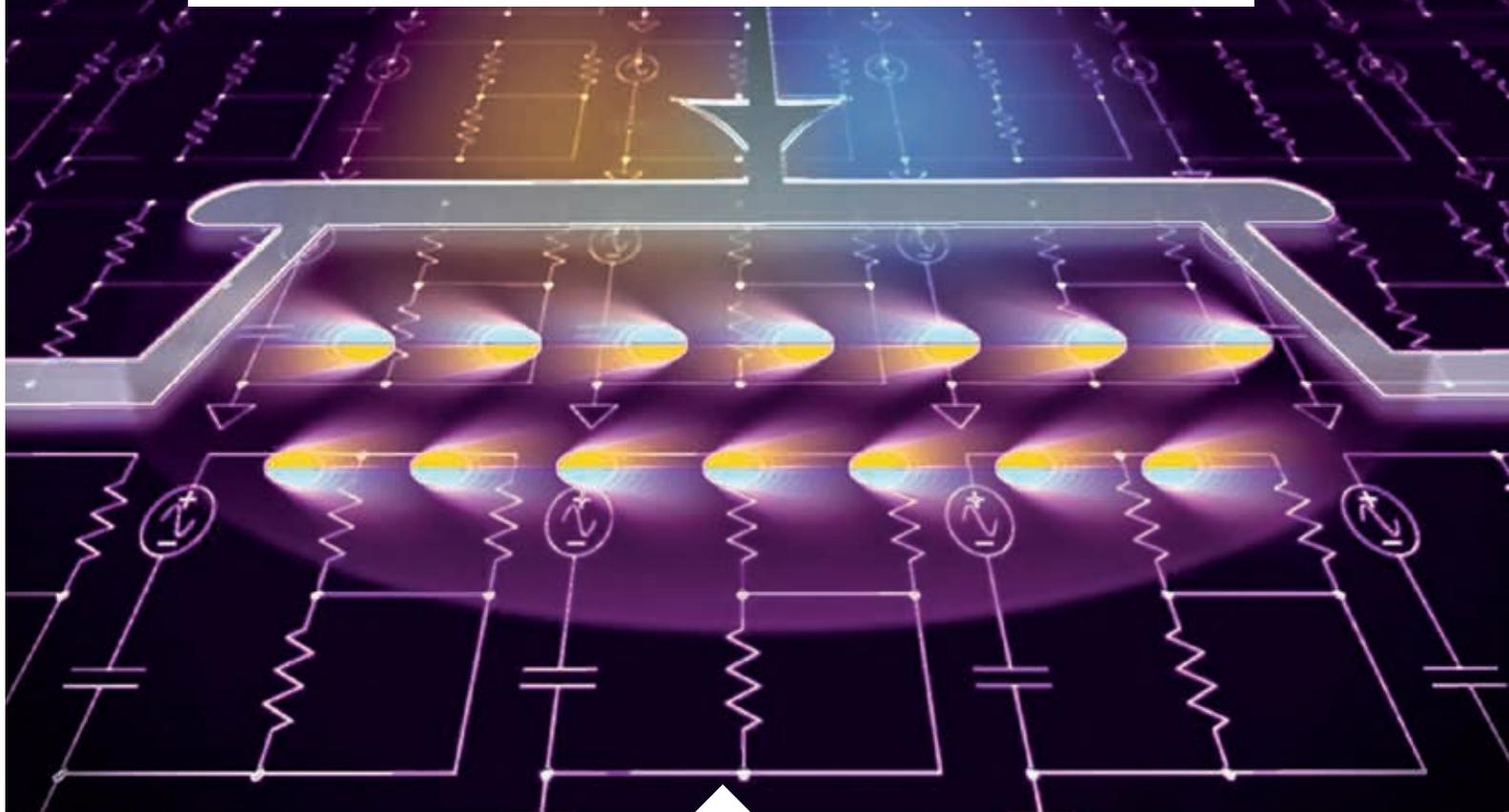
Fort de ces premières conclusions, THN102 entre désormais en phase II chez des patients atteints de narcolepsie. Et ce, seulement trois ans après la création de Theranexus ! « Cette rapidité, étroitement liée à notre stratégie de travailler à partir de produits déjà présents sur le marché, a également été possible grâce au soutien du programme technologie pour la santé et du service de valorisation du CEA, et de CEA-Investissement. Ils nous ont accompagnés tout au long de notre amorçage, notamment pour la première levée de fond en 2014 qui a atteint 3,6 millions d'euros » souligne Franck Mouthon.

Parallèlement, Theranexus mène deux autres programmes, l'un sur les douleurs neuropathiques, l'autre sur la démence. ♦



Pionnier d'une discipline aujourd'hui mondiale, le groupe Quantronique du CEA s'intéresse à une propriété des électrons, leur spin, pour ouvrir une voie originale vers le calcul quantique. Au-delà de la manipulation des spins, les chercheurs parviennent désormais à en contrôler la « relaxation ». Un exploit à suivre...

par Fabrice Demarthon



Le calcul quantique à base de spin

Aujourd'hui, l'électronique repose entièrement sur une propriété physique de l'électron, sa charge électrique. Dans les ordinateurs par exemple, des myriades de composants élémentaires manipulent les charges pour traiter les informations. Demain, c'est le spin (voir encadré page 11), une autre propriété de l'électron, qui sera mise à profit. Elle est déjà largement utilisée en **spintronique**, par ailleurs bien développée au CEA, pour la réalisation de capteurs ou des applications dans le stockage magnétique de l'information. Le spin de l'électron pourrait également servir de support de l'information, et ainsi mener à des calculateurs quantiques d'une puissance inégalée. Reste que le chemin vers l'avènement du calcul quantique à base de spin semble encore long, tant leur manipulation individuelle apparaît hors de portée.

Une première étape vers ce Graal vient toutefois d'être franchie par le groupe quantronique¹ de l'Institut Iramis du

CEA, en collaboration avec les groupes de John Morton de l'University College London et de Thomas Schenkel de l'Université de Berkeley en Californie. Pour la première fois, les chercheurs ont réussi à contrôler la « relaxation » d'un nombre très restreint (environ 10 000) de spins électroniques, c'est-à-dire leur retour à l'équilibre après qu'ils aient été excités, à l'intérieur d'une cavité microscopique. Explications...

Sans plus attendre...

Lorsqu'un système quantique (par exemple le spin d'un électron dit « spin électronique ») passe dans un état d'énergie élevée par rapport à l'énergie moyenne attendue à la température où il se trouve, il revient naturellement à l'équilibre au bout d'un certain temps. La libération de ce trop-plein d'énergie – appelée relaxation – peut alors prendre diverses formes, notamment l'émission d'un photon (grain de lumière). Seulement voilà, dans l'espace ♦♦♦

Spintronique

Technique également appelée électronique de spin, qui exploite la propriété quantique du spin des électrons dans le but de traiter l'information.

Note :

1. Groupe du CEA fondé il y a 30 ans pour étudier le champ de l'information quantique, alors pionnier mondial et suivi depuis par d'autres instituts.



Dispositif du CEA pour exciter le spin d'un électron.

Notre projet vise à détecter et manipuler des spins électroniques (...). En y travaillant, nous sommes parvenus à franchir ce premier pas de la relaxation contrôlée des spins.

Patrice Bertet du groupe Quantronique du CEA



libre d'un système quantique, le taux d'émission spontanée d'un photon par un spin électronique excité est extrêmement faible : un seul photon émis tous les 30 000 ans ! Et il l'est encore plus pour le spin d'un noyau atomique, dit « spin nucléaire ». Dans son cas, le temps de relaxation dépasse tout bonnement l'âge de l'Univers. Ce phénomène, connu depuis longtemps, est une sacrée épine dans le pied des physiciens qui veulent mettre en œuvre le calcul quantique en utilisant des photons pour coupler des spins. « D'autres processus de relaxation existent comme ceux induisant l'émission d'un phonon². Mais ce phénomène n'est pas intéressant pour le calcul quantique car les phonons ne sont pas contrôlables. Le photon, lui, peut se propager dans le circuit et agir sur un autre spin, ce qui couplerait les deux spins et réaliserait une **porte logique élémentaire utilisable pour le calcul quantique** » détaille Patrice Bertet, membre du groupe Quantronique.

Pour que les photons prennent le dessus (sans attendre 30 000 ans !), il existe heureusement une parade. En 1946, le physicien américain Edward Mills Purcell, pionnier de la **résonance magnétique nucléaire** (RMN), établit que le temps de relaxation d'un spin par émission de

photon pouvait être considérablement raccourci, à condition que celui-ci soit placé dans une cavité. C'est l'« effet Purcell » selon lequel la rapidité de l'émission spontanée dépend de la taille de la cavité et de sa « qualité » : plus elle sera petite, moins il y aura de pertes d'énergie internes et plus le photon sera émis rapidement. En 1983, le Français Serge Haroche, co-lauréat du prix Nobel de physique 2012, est parvenu à observer cet effet Purcell pour des atomes. Aujourd'hui, cet effet est notamment utilisé pour concevoir des sources de photons uniques. Et le groupe Quantronique vient de l'employer pour contrôler directement la relaxation de spin électronique !

Pas de déperdition d'énergie et une petite cavité...

« Notre projet de recherche financé par l'European Research Council vise, à long terme, à pouvoir détecter et manipuler des spins électroniques individuels à l'aide de micro-ondes, indique le physicien. Et c'est en y travaillant que nous sommes parvenus à franchir ce premier pas de la relaxation contrôlée des spins. » Concrètement, comment cet exploit a-t-il été réalisé ? En guise de cavité, les chercheurs ont utilisé un circuit en aluminium appelé circuit LC, déposé sur un substrat de silicium dopé au bismuth (élément qui piège les électrons dont le spin pourra être manipulé). Ce circuit LC, bien connu des élèves en électronique, est un système peu dissipatif (c'est-à-dire qu'il entraîne peu d'échanges d'énergie ou de matière avec son environnement) qui peut maintenir longtemps des oscillations électriques, tout comme un diapason maintient des oscillations mécaniques de ses branches. Pour la manipulation des spins, le circuit comprend un « condensateur C » formé de deux « peignes » imbriqués et reliés en parallèle par un simple fil d'aluminium de seulement 5 microns de large qui forme la « bobine L ».

Le choix de l'aluminium s'est vite imposé à l'équipe de l'Iramis. Ce métal a l'avantage d'être supraconducteur à très basse température : il ne présente quasiment aucune déperdition d'énergie, comme l'impose l'une des conditions de l'effet Purcell. Par ailleurs, l'équipe maîtrise bien son utilisation pour réaliser des circuits quantiques depuis déjà de nombreuses années. « Nos processus de fabrication laissent la surface du substrat intacte, explique Patrice Bertet. Nous évitons ainsi une éventuelle perturbation du bismuth. » C'est en effet dans le substrat que sont localisés les spins nécessaires à l'expérience. Ils sont portés par des atomes de bismuth qui ont été implantés en faible nombre dans du silicium 28 par le groupe de l'université de Berkeley. Patrice Bertet détaille les raisons de ces choix : « Le silicium 28 est un isotope stable du silicium qui a la particularité de ne pas posséder de spin nucléaire (spin du noyau atomique). Le signal des spins électroniques n'est donc pas perturbé. Quant au bismuth, sa structure énergétique très particulière permet, pour l'exciter, de lui appliquer des champs magnétiques faibles, l'aluminium ne supportant pas les champs forts. » Pour mener l'expérience, le dispositif est placé dans une

Résonance magnétique nucléaire

Méthode spectroscopique d'analyse de la matière, fondée sur les propriétés magnétiques de certains noyaux atomiques : dans un champ magnétique intense un échantillon acquiert une aimantation nucléaire qui est détectée par sa résonance avec un champ magnétique électromagnétique. Une de ses applications, notamment en médecine, est l'imagerie par résonance magnétique (IRM).

Note :
2. Mouvement collectif des atomes dans le cristal.

Porte logique

Circuit électronique permettant de réaliser les opérations de logique combinatoire, « synonyme » d'opérations.

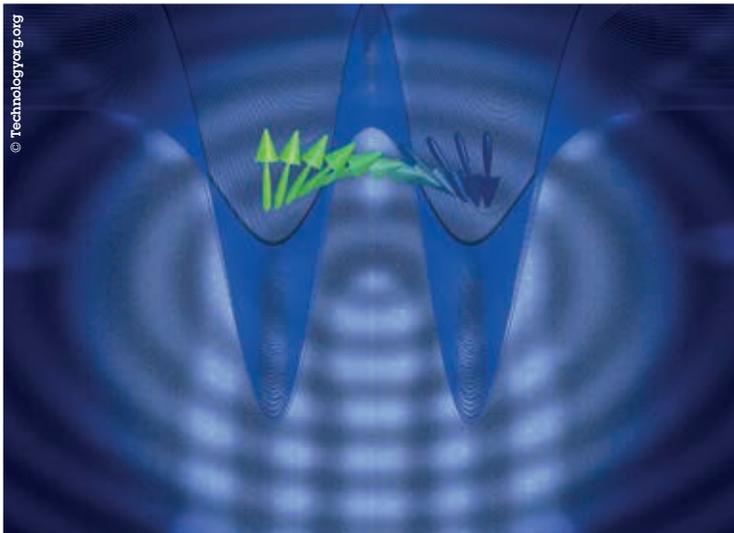
enceinte à vide et porté à une température de seulement 20 millikelvins, très proche du zéro absolu (-273,15 °C). Il est également soumis à un champ magnétique statique. Des impulsions micro-ondes sont alors envoyées vers le dispositif, à une fréquence correspondant à la fréquence de résonance du circuit, qui réagit en produisant un champ électromagnétique oscillant autour du fil d'aluminium. Les spins portés par les atomes de bismuth situés juste sous le fil sont alors fortement confinés. La seconde condition de l'effet Purcell, à savoir une cavité de taille réduite, est remplie !

Le temps de la relaxation

Reste à mesurer le temps de relaxation des spins excités par les impulsions micro-ondes. Pour cela, l'équipe dispose d'un spectromètre ultra-sensible, développé au laboratoire. En variant la fréquence des impulsions, les chercheurs ont pu moduler le temps de relaxation, passant de 1 seconde à la fréquence de résonance, à 1 500 secondes à la fréquence la plus éloignée. Ainsi, non seulement les chercheurs ont réussi à inventer une sorte de bouton « reset » pour remettre à l'équilibre rapidement les spins électroniques mais ils ont aussi élaboré une méthode pour faire varier à l'envi ce temps de retour !

L'exploit ouvre de belles perspectives. Plusieurs techniques d'analyse dans le domaine de la spectroscopie³, permettant d'analyser très finement des échantillons de toutes sortes, pourraient en bénéficier lorsque la relaxation trop lente du spin les limite. « Pour mener certaines expériences, il est parfois nécessaire d'attendre une demi-heure entre deux prises de mesures, explique Patrice Bertet. Raccourcir le temps de relaxation, comme nous l'avons fait, faciliterait les analyses. » Mais ce que les chercheurs ont véritablement en ligne de mire, c'est le développement d'un résonateur électrique de moins de 100 nanomètres de large. Leur objectif : réduire le temps de relaxation à la milliseconde, augmenter la sensibilité du détecteur pour, enfin, mesurer des spins individuels. La condition *sine qua non* pour que l'information quantique à base de spin prenne véritablement son envol. ♦

Note :
3. Spectroscopie par résonance paramagnétique électronique.



Qu'est-ce que le spin ?

Le spin est une propriété des systèmes quantiques, que ce soient les particules élémentaires comme l'électron ou le photon, ou les noyaux des atomes. Elle les caractérise, au même titre que leur masse ou leur charge électrique. Elle ne peut prendre que des valeurs discrètes, entières ou non. Ainsi, le spin de l'électron vaut 1/2, celui du photon 1, celui du noyau atomique du bismuth 9/2, etc. Le concept de spin a été introduit dans les années 1920 par les physiciens hollandais Samuel Goudsmit et George Uhlenbeck, alors seulement âgés d'une vingtaine d'années. À cette époque, alors que la physique quantique en est à ses balbutiements, plusieurs expériences, comme l'effet Zeeman anormal qui apparaît lorsque le système est soumis à un fort champ magnétique, demeurent difficiles à interpréter. La seule manière de réconcilier ce que les chercheurs observent dans leurs laboratoires et la théorie est d'introduire un nouveau « nombre quantique », une caractéristique que ses découvreurs associent à un moment cinétique intrinsèque à la particule ; un peu comme si elle tournait sur elle-même (même si l'analogie avec un système classique en rotation est inexacte, la particule étant si petite qu'elle devrait tourner (spin en anglais) à une vitesse supérieure à celle de la lumière, ce qui est impossible). D'où le nom de « spin » associé à cette propriété.



Réfrigérateur développé au CEA pour circuit quantique.



Télemanipulation du bras-robot Maestro via son bras-maître.

Démantèlement

Maestro, maître des milieux hostiles

P.14
Maestro, le bras droit du CEA pour le démantèlement

P.17
Deux chantiers tests pour faire ses preuves

P.19
La découpe laser, une révolution

Impossible pour l'homme d'intervenir, même dûment protégé, dans le milieu très contaminant de certaines installations nucléaires. Alors, dans le cadre du programme de démantèlement de certaines de ses installations, le CEA a dû concevoir un outil inédit : le bras robot Maestro.

Fruit de plus de vingt ans de R&D menée avec des équipes de l'Ifremer et de la société Cybernetix, Maestro opère depuis 2015 sur deux chantiers pilotes du CEA à Marcoule. Il pourrait intéresser d'autres secteurs...

par Patrick Philippon

Maestro, le bras droit du CEA pour le démantèlement

Dans le cadre des programmes d'assainissement-démantèlement de ses installations nucléaires arrêtées, le CEA a développé un robot démanteleur unique au monde. En collaboration avec la société Cybernetix, cette prouesse technologique est également une aventure industrielle.

Operateur historique, le CEA doit démanteler, dans les années à venir, vingt-deux installations nucléaires de natures extrêmement variées. Certaines sont par endroits trop irradiantes pour qu'interviennent des travailleurs humains, même dûment protégés. D'où le besoin d'un robot capable d'opérer dans des milieux fortement radioactifs, de géométries complexes, et parfois à l'aveugle. C'est ainsi qu'est né Maestro. Tout a commencé en 1995. Le CEA et l'Ifrermer s'associent alors à la société Cybernetix, spécialiste de la robotique en milieu hostile, pour lancer le développement d'un bras téléopérable à six degrés de liberté – soit une capacité de mouvements équivalente à celle du bras humain. Il s'agira d'un bras hydraulique – au rapport poids/puissance plus favorable qu'une version électrique – muni d'électronique « durcie » contre la radioactivité et pouvant manipuler des charges de cent kilos. Fabriqué en titane, il possédera des vérins servocommandés et une géométrie extérieure simple pour faciliter la décontamination. « Nous avons insisté pour qu'il soit pourvu du retour d'effort, afin que l'opérateur "sente" ce qu'il fait et puisse réagir, par exemple s'il bute sur



Le bras maestro.

un tuyau imprévu. Cela n'existait pas sur le marché à l'époque » se souvient Yves Soulabaille, chef du laboratoire de la simulation et des techniques de démantèlement de la Direction de l'énergie nucléaire du CEA (CEA-DEN), qui a supervisé le développement de Maestro. « Le premier prototype, achevé en 1998, est encore en service sur un des ROV¹ de l'Ifrermer » affirme Jean-Sébastien Cug, responsable de l'unité Monitoring et robotique à Cybernetix.

Un procédé complet

Plus qu'un bras, aussi sophistiqué soit-il, Maestro est un procédé complet. En effet, au bras « esclave » qui compte de nombreux outils (voir encadré p. 16) s'ajoutent un bras « maître » (celui qui manipule le pilote), un logiciel de contrôle/commande reliant les deux, et un « superviseur » qui permet au pilote de voir et maîtriser ce qu'il fait. Par ailleurs, le robot embarque sa propre centrale hydraulique ainsi qu'un multiplexeur chargé de centraliser les

Note :

1. Un ROV (*remotely operated vehicle*) est un sous-marin télécommandé, conçu pour des missions d'observation ou de travail.

données issues de tous ses composants (logiciels et divers capteurs). Il s'agit en effet de réduire autant que possible le diamètre de « l'ombilic », ce cordon reliant le robot à l'extérieur et qui doit normalement faire passer eau, air comprimé, fluide hydraulique, électricité et signaux. « Plus il est gros et rigide, plus il pose de problème sur les chantiers » affirme Yves Soulabaille. Un problème encore plus aigu lorsque le robot doit intervenir dans des enceintes closes pour des raisons de radioprotection.

Il y a donc le bras esclave, développé avec Cybernetix, le bras « maître » conçu avec Haption, une *spin-off* du CEA, et, pour relier les deux, un logiciel de contrôle-commande provenant directement de l'institut List de CEA Tech. Grâce à lui, le bras esclave se déplace comme l'indique l'opérateur et peut suivre une trajectoire prédéterminée (pour une découpe répétitive par exemple) ou combiner les deux modes. Quant au logiciel superviseur développé par Cybernetix, le CyXpro®, il fournit à l'opérateur un monitoring en trois dimensions et en temps réel, ainsi qu'une aide au pilotage (les caméras ne voient pas toujours tout dans les milieux très encombrés). Ce logiciel intègre aussi un module anti collision, réalisé également à l'institut List, qui permet de créer une « enveloppe » virtuelle autour des pièces à protéger. « Lorsque le premier prototype de bras est arrivé en 1998, nous l'avons immédiatement relié au logiciel de commande afin de faire de la téléopération assistée par ordinateur, en vue de le qualifier pour différents procédés de découpe (torche à plasma, scie, disquuse, etc.) » précise Yves Soulabaille. L'opération est alors entrée dans une nouvelle phase et Cybernetix a commencé à développer la version industrielle de Maestro. Le CEA a testé la tête de série, sortie en 2001, pour ses performances mécaniques et sa résistance à l'ambiance radioactive, grâce à un irradiateur de Saclay. Une fois cette qualification achevée, en 2003, la suite s'imposait d'elle-même : il fallait placer Maestro en situation réelle, autrement dit, lancer un chantier pilote (voir l'article suivant). « Nous avons choisi



Opérateur manipulant Maestro sur une « maquette inactive ».

de démanteler une cellule blindée de l'atelier pilote de Marcoule (APM), et commencé à monter les dossiers pour l'Autorité de sûreté » explique Yves Soulabaille.

La longue préparation des chantiers

Préparer un chantier de démantèlement est une opération de longue haleine. Pour gagner du temps, le CEA a développé un outil unique au monde : une salle de réalité virtuelle, dite « immersive », située à Marcoule. Un logiciel créé conjointement entre des équipes du List et de la DEN permet d'y « placer » toutes sortes d'équipements, et même des intervenants virtuels, pour reproduire à l'identique, en 3D, la structure à démanteler. Elle est munie d'un poste complet de téléopération (bras maître, baies de contrôle-commande, etc.), identique à celui qu'occupera le pilote sur le terrain. L'ensemble permet de valider des concepts technologiques, de préparer des scénarios opératoires – pas seulement pour le démantèlement : on peut imaginer l'aménagement d'une nouvelle usine par exemple – et de former les pilotes du futur chantier. « En complément de ces simulations 3D, des essais sur une maquette réelle à échelle 1 ont également été réalisés » explique Yves Soulabaille. C'est

Nous avons immédiatement relié le premier prototype de bras au logiciel de commande afin de faire de la téléopération assistée par ordinateur.

Yves Soulabaille du CEA-DEN

pourquoi une reproduction à l'identique (mais non radioactive) de la cellule à démanteler a été hébergée dans un hall d'essais du site de Marcoule, sur laquelle le procédé Maestro a été installé et testé. « L'association de la réalité virtuelle et d'essais en inactif permet de valider des points ciblés pour la qualification, soit des équipements télé-opérés, soit des modes opératoires ; en insistant de plus en plus sur le virtuel pour alléger la phase "essai inactif" » estime le chercheur. Enfin, si le bras Maestro est standardisé, il doit en général intervenir dans des environnements uniques. C'est pourquoi il faut, à chaque chantier, développer et valider un porteur adapté. C'est ainsi que le bras esclave est suspendu à un porteur sur rails – développé également par Cybernetix à partir de 2007 – dans la cellule de l'APM, installé au bout d'un bras télescopique pour le démantèlement de l'usine de traitement des combustibles usés de Marcoule (UP1), ♦♦♦

(voir article suivant), ou porté par un engin à chenille ou un pont pour les futurs chantiers de démantèlement à Fontenay-aux-Roses.

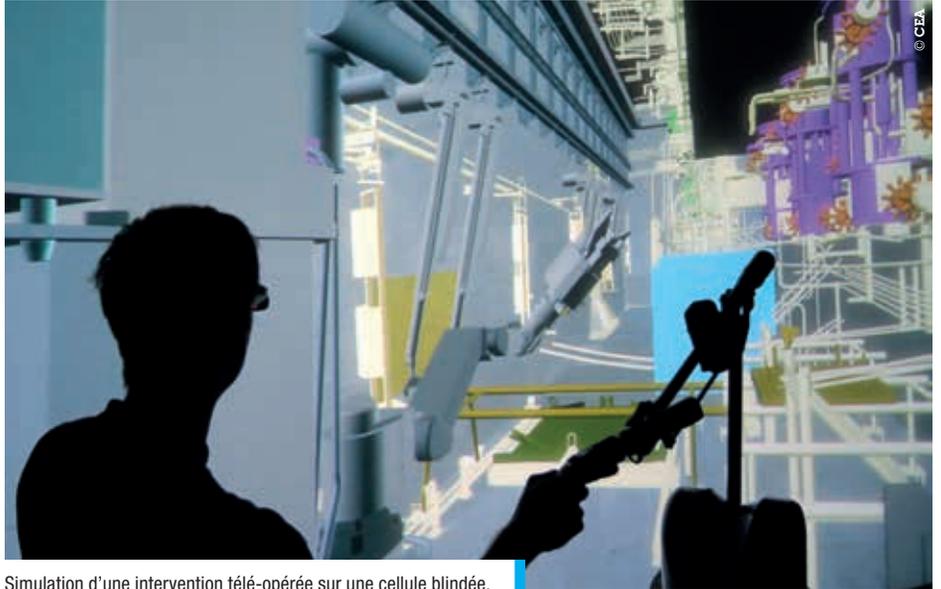
Une aventure industrielle

« Après l'accord de partenariat initial de 1995, nous en avons signé un autre en 2008 qui a constitué le départ de la phase industrielle proprement dite. Nous avons alors commencé la production des bras pour l'APM, l'usine UP1 et le chantier de Fontenay-aux-Roses » se souvient Jean-Sébastien Cuq². « Nous sommes actuellement en discussion pour un autre accord destiné à poursuivre ce travail en commun et améliorer encore les performances industrielles du procédé » ajoute Cyril Moitrier, chef de la cellule Métier et études techniques pour l'assainissement-démantèlement au CEA-DEN, en charge des relations avec Cybernetix. Cet expert souligne la dimension industrielle « du Maestro », insistant sur les efforts de standardisation mis en œuvre depuis plus de trois ans pour mutualiser la gestion des pièces de rechange, les modes opératoires, les formations ; et pour améliorer la maîtrise technique en intégrant le retour d'expérience d'un chantier à un autre. « Maestro n'est plus seulement un équipement unique, il est aussi un véritable procédé innovant permettant de transformer une partie de l'installation en colis de déchets

Note :
2. Un troisième accord a été signé en 2011, cette fois-ci avec Technip... qui venait d'intégrer Cybernetix.

Exutoires

Sites dédiés au traitement des déchets.

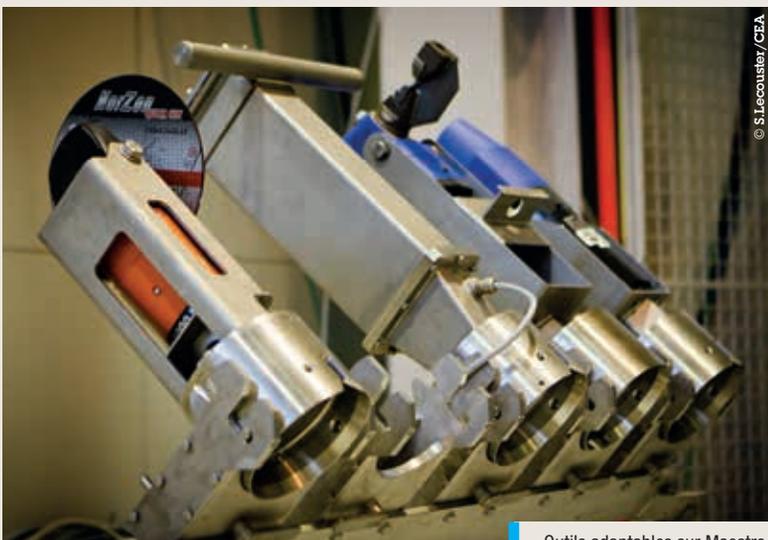


Simulation d'une intervention télé-opérée sur une cellule blindée.

compatibles avec les **exutoires** » explique-t-il. « L'outil doit être transparent pour l'opérateur, renchérit Jean-Sébastien Cuq. À nous, Cybernetix, de fournir le robot, le porteur spécifique, les outils, la maintenance, la formation des opérateurs. » Cyril Moitrier précise que cette démarche industrielle s'accompagne d'une recherche permanente de performance (cadence de production, maintien en condition opérationnelle et fiabilité) : « nous devons contribuer, au travers de ces performances, à la sécurisation des coûts et des plannings de nos projets de démantèlement, tout en

maintenant un haut niveau d'exigence en sûreté. »

Cybernetix, qui produit Maestro sous licences (une licence du CEA-DEN pour le procédé global et plusieurs de CEA Tech pour des briques technologiques), prévoit d'en fabriquer un ou deux par an pendant une dizaine d'années pour les seuls besoins du CEA. « De plus, nous sommes évidemment en contact avec d'autres opérateurs nucléaires, français ou étrangers, par exemple avec le Japon concernant le démantèlement de Fukushima » précise Jean-Sébastien Cuq. ♦



Outils adaptables sur Maestro.

Les outils de Maestro

Un bras n'a guère d'utilité s'il ne porte pas d'outil. Maestro dispose donc de toute une panoplie d'outils électriques qui se « branchent » directement sur le bras, sans fil (un gros avantage pour le travail en milieu encombré) : perceuse, visseuse, scie, grignoteuse, disqueuse... le tout, avec un système unique de changement d'outils.

Le CEA a également développé, avec la société Hydr'am, une cisaille hydraulique autonome. À cela s'ajoutent des outils de mesure (sondes, gamma caméras, caméras optiques...). « Et on fait tout ce qu'on veut puisque le bras est muni d'une pince qui peut ramasser un outil comme une goujonneuse » précise Yves Soulabaille. Pour le chantier de l'APM, il a même fallu concevoir un outil capable de percer un tuyau et d'aspirer l'éventuel effluent qu'il contient. Sans compter la tête de découpe laser (voir page 19) conçue pour le chantier UP1...

Deux chantiers tests pour faire ses preuves

Actuellement, Maestro est à l'œuvre sur deux chantiers du site CEA de Marcoule : le démantèlement de l'Atelier Pilote de Marcoule (APM), qui représente son premier test en situation, et celui de l'Usine de traitement des combustibles usés de Marcoule (UPI), qui constitue un passage à l'échelle industrielle. L'occasion d'accumuler de l'expérience pour la suite et, éventuellement, pour d'autres secteurs industriels...

« Une petite usine de La Hague ». C'est ainsi que Gérard Hauser, chef de l'Atelier Pilote de Marcoule (APM) à la Direction de l'énergie nucléaire du CEA (CEA-DEN) décrit l'installation qu'il dirige, dont le démantèlement a été décidé en 1997. Démarré en 1962, l'APM comprend une trentaine de cellules de haute activité, cinq chaînes blindées et 230 « boîtes à gants ». Le tout était destiné à qualifier et valider les procédés de traitement des combustibles et de vitrification des produits de fission. Autant dire que

ces enceintes ont « vu » des matériaux extrêmement radioactifs et sont pour la plupart hautement irradiantes et contaminées. « Ces équipements de R&D, tous uniques, sont beaucoup plus complexes et difficiles à démanteler que les installations de production. Pour accumuler de l'expérience, le CEA a ainsi choisi une de ces cellules comme chantier pilote » explique Gérard Hauser.

« La cellule 414 comporte des procédés de centrifugation, de filtration et de décantation, tous télé-opérés et reliés par cinq kilomètres de

tuyauterie ; le tout dans une enceinte de 20 x 5 x 6 mètres, avec des débits de dose atteignant 2,5 Gray/heure par endroits interdisant des interventions dans la cellule et nécessitant des opérations à distance avec des équipements télé-opérés. Il fallait tout enlever ! » résume Jean-Michel Bart, chef de projet et responsable du démantèlement de l'APM au CEA-DEN. Pour accéder à la cellule, le bras Maestro est suspendu à un porteur réutilisant les rails du système initial de téléportage. Ce dernier, qui actionnait les différents appareils de la cellule puisqu'il n'était pas question d'y pénétrer, était adapté pour les opérations d'exploitation ou de maintenance de la cellule mais pas pour des opérations de démantèlement.

APM : un baptême du feu dûment préparé

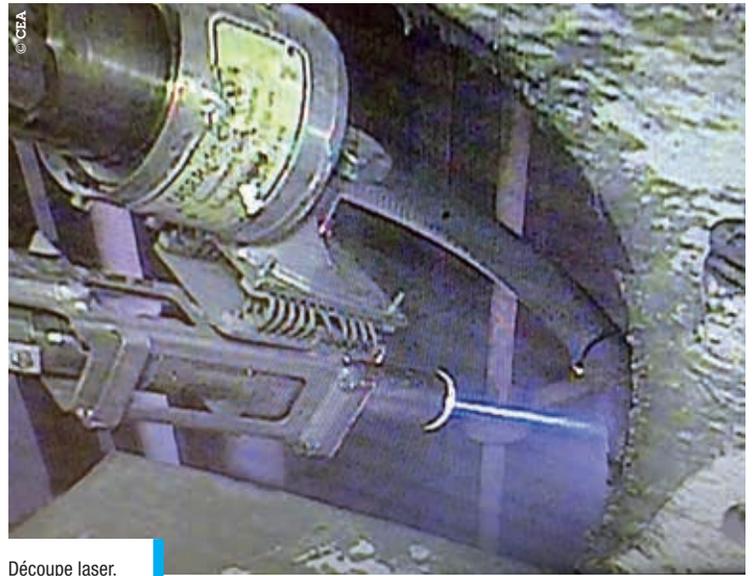
« En l'absence de précédent, l'Autorité de sûreté a exigé des conditions de travail plus restrictives pour donner son autorisation » se souvient Gérard Hauser. Après la démonstration initiale de sûreté, le chantier a vu se succéder une phase de préparation, qui consistait à enlever divers équipements mobiles de l'enceinte (là encore, avec des autorisations de l'Autorité de sûreté), puis le démontage du système initial de téléportage, un engin de plus d'une tonne, enfin l'installation de Maestro, en janvier 2015. « Nous avons eu quelques surprises, inévitables lorsqu'on installe un équipement neuf sur des structures anciennes, qui ont un peu « bougé » avec le temps. Nous nous sommes fait quelques « chaleurs » sourit Gérard Hauser. Après une phase de tests, Maestro s'est mis au travail, dans un premier temps pour identifier les « points chauds » puis, à partir de juin 2015, pour repérer et graver toutes les tuyauteries et vérifier qu'elles étaient vides. La découpe proprement dite n'a commencé ♦♦♦



Bras Maestro utilisé pour le démantèlement d'une cellule blindée.



Découpe laser du sommet d'une cuve de dissolution de l'UP1.



Découpe laser.

qu'en décembre. Les opérations ont été confiées à la société Nuvia. « *Nous voulions démontrer qu'un opérateur industriel pouvait utiliser Maestro* » explique Jean-Michel Bart. Les pilotes de Nuvia, qui opèrent toujours par paires, ont été dûment formés sur une maquette échelle 1 de la cellule installée à Hera (Marcoule). Le procédé Maestro sera utilisé dans la cellule 414, jusqu'à l'élimination de tous les points irradiant ; le démantèlement se poursuivra ensuite « au contact ». Sur la base de l'expérience acquise, il est prévu de démanteler d'autres cellules de l'APM selon ce même procédé. Le démantèlement complet de l'APM devrait durer jusqu'en 2035. « *En effet, aucune cellule n'étant identique aux autres, il faudra repenser à chaque fois le porteur et les modes opératoires* », explique Jean-Michel Bart. Sur les quelque 9 000 tonnes de déchets prévues, une centaine est tellement active qu'elle exige l'intervention d'un Maestro. De fait, il y en aura sans doute plusieurs en fonctionnement simultané dans l'APM.

UP1 : une première mondiale

Démarrée en 1958, l'usine de traitement des combustibles usés de Marcoule, dite UP1, a été arrêtée en 1997. Il s'agit d'une installation industrielle, avec le gigantisme que cela suppose : la première pièce à laquelle

Maestro s'attaque, une cuve de dissolution, ou « dissolvant », mesure 4 mètres de haut pour 2 de diamètre. Sa paroi en uranium (un alliage très dur) peut atteindre 5 centimètres d'épaisseur. Samuel Blanchard, responsable du démantèlement d'UP1, en explique la difficulté : « *outre la taille des équipements à découper, il faut intervenir dans un environnement à la fois très radioactif et exigü. Pour combiner agilité et puissance de découpe, il a fallu doter Maestro d'un système laser, ce qui fait du chantier une première mondiale* » (voir encadré). La société Onet ayant emporté l'appel d'offres en 2011, la formation de ses pilotes s'est étalée jusqu'en 2013 à la salle « immersive ». « *Onet nous a apporté sa vision d'industriel qui se projette en tant qu'utilisateur du bras pendant plusieurs années : l'importance de la performance, de la durabilité (nous avons détecté de nouveaux modes de défaillance). Nous avons aussi simplifié certains contrôles pour les adapter au geste de l'opérateur* » souligne Samuel Blanchard.

Fin 2014, les essais sur maquette froide, exigés par l'Autorité de sûreté, s'achevaient dans une usine des environs de Saint-Étienne. « *La première pièce du Maestro démonté à Saint-Étienne est arrivée sur le site le 12 mai 2015, en avance sur les délais grâce à une bonne préparation* »

se félicite Samuel Blanchard. Le 16 décembre, Maestro effectuait sa première découpe laser. Le premier dissolvant devrait être totalement découpé fin 2016, avant que Maestro, remonté, ne s'attaque au second qui devrait être achevé fin 2019. « *Ce chantier exceptionnel utilise trois technologies issues de notre laboratoire : le bras Maestro, l'intégration d'un système de découpe laser, ainsi que la salle immersive* » souligne Yves Soulabaille.

Des retours d'expérience à valoriser

Les chantiers APM et UP1 se chevauchant, il revient aux équipes de CEA-DEN d'animer les échanges d'expérience entre les deux. « *Les premiers éléments de retour d'expérience, attendus d'ailleurs par les autorités de sûreté, sont déjà collectés et seront disponibles dès cette année* » précise Cyril Moitrier. « *Nous poursuivons une logique d'industrialisation, par exemple en mettant en place une politique de pièces de rechange avec Cybernetix, affirme Samuel Blanchard. Après les dissolvants viendront quatre évaporateurs et une dizaine de cuves, rien que pour UP1. Nous pensons à des renforcements du bras, il faudra également l'adapter à des milieux encore plus irradiants.* » Il s'agit donc d'une véritable démarche d'amélioration

continue qui est mise en œuvre pour préparer ces futurs chantiers.

« En tant que donneur d'ordres, même nos spécifications sont en constante évolution » ajoute Cyril Moitrier. Cela s'est concrétisé d'ailleurs, depuis 2013, par un rapprochement inédit entre les filières industrielles Démantèlement et Spatial : « envoyer un robot sur Mars ou dans une cellule de très haute activité à Marcoule, est finalement une approche assez similaire ! » précise-t-il. Un accord de partenariat a donc été signé en 2015 entre le CEA et la start-up toulousaine Eléments pour croiser les expériences des deux filières et consolider le référentiel utile à la conception et à l'utilisation des robots en milieu hostile, dont le Maestro est un des fers de lance emblématique.

Cette démarche s'intègre dans la dynamique du Pôle de valorisation des sites industriels (PVSI) créé en juin 2014 pour participer à la structuration d'une filière industrielle française d'excellence dans le démantèlement. La promotion des synergies entre le secteur nucléaire et d'autres domaines industriels est également l'une de ses missions. ♦

La découpe laser, une révolution

Le chantier du démantèlement de l'Usine de traitement des combustibles usés UPI de Marcoule est le théâtre d'une première mondiale...

« C'est une révolution » n'hésite pas à lancer Samuel Blanchard lorsqu'il évoque l'utilisation du laser pour découper une cuve de dissolution, le « dissolvant », de l'usine UPI. Certes, la découpe au laser, même télé-opérée, n'est pas une nouveauté dans l'industrie mais elle n'a jamais été appliquée dans un environnement hautement radioactif. Outre la précision de coupe et les faibles émissions d'aérosols et de scories, le laser présente l'avantage de ne pas exercer de contrainte mécanique sur le bras porteur. « Les contraintes et vibrations des outils classiques (disqueuses, cisailles) provoquent des casses, ou au moins des arrêts du bras pour maintenance. Le taux de productivité avec le laser est sans commune mesure : le dissolvant sera découpé en une cinquantaine d'heures cumulées » se réjouit l'expert.

Pour cela, Onet utilise une source laser du commerce et une tête de découpe développée par les équipes du CEA-DEN à Saclay. « Celles du commerce sont refroidies par eau et exigent une précision importante de positionnement pour découper correctement. Les équipes ont conçu une tête refroidie par air et capable de découper tout aussi efficacement quelle que soit sa position entre 5 et 50 mm de l'objet » explique Yves Soulabaille. Le laboratoire de Saclay a construit un prototype, industrialisé ensuite avec la société française ARO et fabriqué depuis par la société suédoise Permanova.

Faire admettre cette solution n'a pas été sans difficulté, comme s'en souvient Samuel Blanchard : « il a fallu combattre des a priori négatifs sur les risques d'incendie ou de dispersion de radionucléides. Il fallait tout justifier auprès des autorités de sûreté. L'autorisation, survenue mi-2014, a représenté une étape importante. » ♦

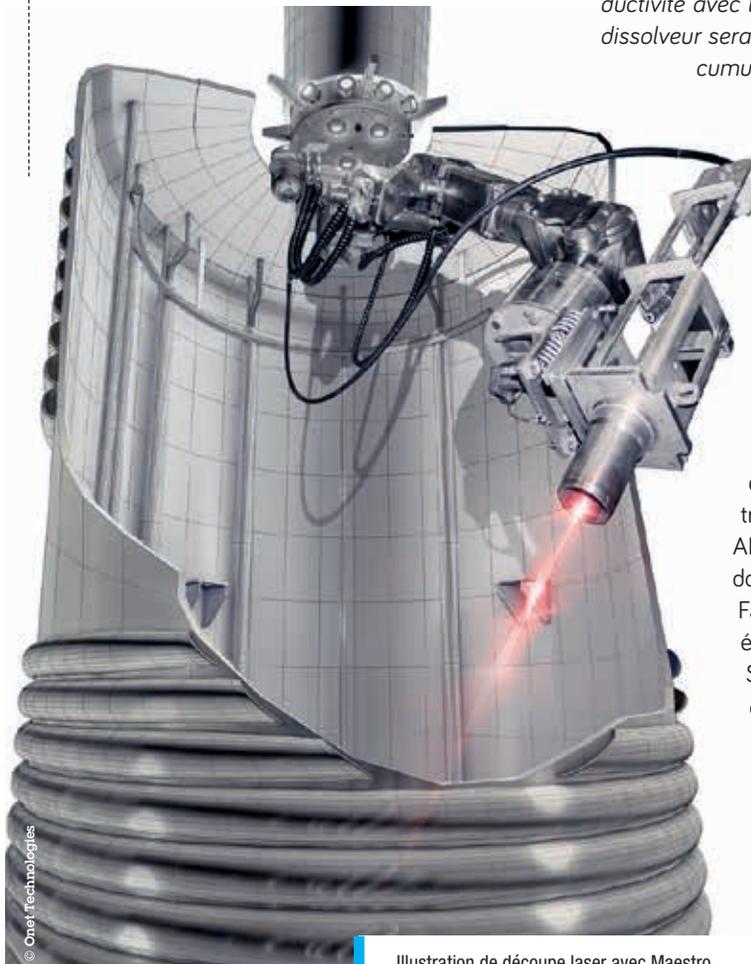


Illustration de découpe laser avec Maestro.

LSCE

Laboratoire des sciences du climat
et de l'environnement

Leti/CEA Tech

Laboratoire des micro & nanotechnologies
et leur intégration dans les systèmes

Big/CEA

Institut de recherche et de biotechnologies de
Grenoble



Climatologie

Du froid qui souffle le chaud... et fait monter le niveau

La poursuite, au rythme actuel, des émissions de gaz à effet de serre (GES) au cours du siècle entraînerait une augmentation de l'intensité des tempêtes et une accélération de la montée du niveau des mers, jusqu'à plusieurs mètres en 50 à 150 ans. Telle est la conclusion d'une nouvelle étude, pilotée par le **LSCE**, portant sur le risque de déstabilisation des calottes polaires¹. Des simulations numériques, couplées à des observations de l'évolution climatique actuelle et à des reconstitutions des variations climatiques passées, réévaluent l'impact d'une accélération de la fonte du Groenland et de l'Antarctique. En gros : la poursuite des émissions actuelles de GES induirait un refroidissement de la surface de la partie Ouest de l'océan Antarctique et un réchauffement des régions tropicales. Ce déséquilibre augmenterait les précipitations, entraînant une plus grande stratification de l'océan et un réchauffement de surface qui favoriserait la fonte des glaces flottant aux marges des calottes polaires. Cette modification des gradients de température de l'atmosphère aurait aussi un impact sur l'intensité des tempêtes... en plus de celui sur le niveau des mers. AG

Note :
1. Publiée sur le site *Atmospheric Chemistry and Physics*

Microfluidique

Les microparticules ondulent au rythme des percussions

Manipuler des microparticules sans les toucher : un défi pour bon nombre d'applications ! Si des techniques optiques sont utilisées, elles tendent à échauffer la matière. Une équipe du **Leti**, avec l'Université Grenoble Alpes, s'intéresse aux vibrations sonores et élabore un nouveau procédé de manipulation.

Le son est en effet capable d'exercer des forces à distance et de mettre en route des écoulements dans un fluide. Ainsi, pour déplacer et agencer des microbilles selon des motifs définis, les chercheurs ont développé un analogue de tambour musical avec une « peau » en silicium de 6 microns d'épaisseur et 1 mm de diamètre. En guise de baguettes, ils y ont déposé un matériau **piézoélectrique** dont ils contrôlent les fréquences de résonance, lesquelles sont autant de voies tracées pour les microbilles. AG

Piézoélectrique

Propriété d'un matériau de se déformer lorsque lui est appliqué un champ électrique.



Déplacement de microbilles par vibrations sur matériau piézoélectrique.

Hydrogène

Un catalyseur à la structure inattendue

Candidat comme substitut du platine dans la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, le sulfure de molybdène amorphe dévoile les secrets de sa structure cristalline à une équipe du **Big**!. Les scientifiques découvrent en effet que ce catalyseur est un polymère de coordination basé sur des motifs de trimères d'ions (et non de dimères comme il était pensé jusqu'ici!) connectés par des ligands disulfures.

Alors que le sulfure de molybdène intéresse déjà l'industrie par ses atouts technologiques et son abondance, ces résultats ouvrent la voie à l'optimisation rationnelle de cette classe de matériaux pour la production d'hydrogène par réduction des protons. AL

Note :
1. Avec l'Institut des sciences moléculaires de Marseille et l'université franco-vietnamienne.

Dosimétrie

Un nouvel étalon à l'export



Chambre d'ionisation à cavité.

Le Laboratoire national Henri Becquerel du List réalise un instrument étalon primaire pour son homologue roumain. La chambre d'ionisation à cavité développée permettra à ce laboratoire de métrologie d'établir, directement, une référence dosimétrique dans son faisceau de photons de césium 137 pour l'étalonnage des dosimètres de ses clients. Cette action s'inscrit dans la démarche de diffusion du savoir-faire du List en instrumentation dosimétrique vers les laboratoires européens. AG



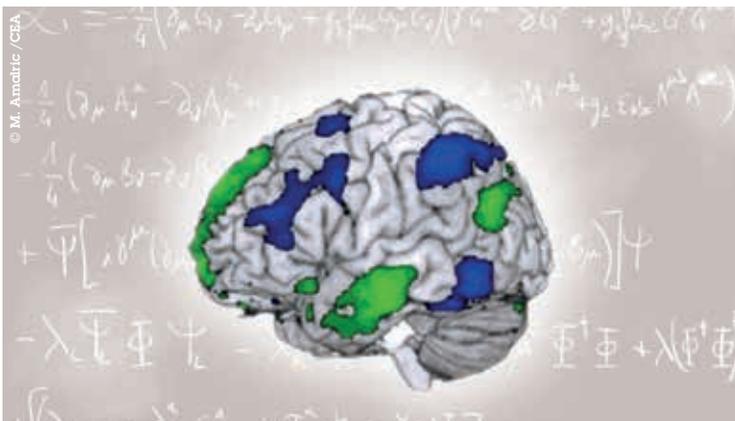
Déchets radioactifs

La corrosion passée, présente et à venir

Utiliser des produits de corrosions issus d'objets archéologiques ferreux pour étudier l'évolution des déchets radioactifs sur le long terme. Voici ce que des chercheurs CEA de l'Iramis et de la DEN ont eu l'idée de faire¹. « Parce qu'il est envisagé de stocker en milieu géologique profond les colis de déchets radioactifs vitrifiés, après les avoir placés dans des sur-conteneurs en acier, nous devons connaître leur comportement dans le temps. Jusqu'ici, nos expériences en laboratoire consistaient à mettre le verre nucléaire en contact avec du fer métallique ou des produits "de synthèse" de corrosion du fer » explique Philippe Dillmann de l'Iramis. L'exploitation d'éléments ferreux corrodés depuis le XV^e siècle sur un site archéologique permet d'étudier l'interaction du verre avec un matériau plus proche de ce que seront les vrais produits de corrosion en conditions de stockage.

« Nous avons démontré qu'un flux de fer important était susceptible de déstabiliser la couche d'altération ("gel") qui protège la surface du verre, en réagissant avec le silicium qu'elle contient. Dans le cas des produits de corrosion archéologiques, la réactivité du fer avec le silicium semble plus faible et les réactions localisées uniquement à la surface du gel » précise le chercheur. AL

Note :
1. En collaboration avec l'Andra.



Zones impliquées dans le langage (vert) et dans les mathématiques (bleu).

Neurosciences

La bosse des maths

En pleine réflexion, le cerveau d'une quinzaine de mathématiciens a été étudié par IRM fonctionnelle par des chercheurs de NeuroSpin et du Collège de France. Ces derniers ont ainsi identifié les aires cérébrales impliquées dans le raisonnement mathématique de haut niveau. Par ailleurs, ils ont démontré que ce réseau du cerveau est non seulement différent de celui du langage, mais qu'il existe avant l'apprentissage des mathématiques à l'école pour se développer ensuite avec l'éducation reçue. AL

Big/CEA
Institut de recherche et de biotechnologies de Grenoble

Inac/CEA
Institut nanosciences et cryogénie

Leti/CEA Tech
Laboratoire des micro & nanotechnologies et leur intégration dans les systèmes

Diagnostic

Vers une détection des maladies du cuivre

En s'inspirant de l'activité d'une protéine bactérienne, des scientifiques du **Big** et de l'**Inac** conçoivent une nouvelle technique de mesure du taux de cuivre dans les cellules. Celle-ci repose sur une série de réactions en cascade : la sonde piège le cuivre, un acide aminé contenu dans la sonde est excité, un **lanthanide**, lui-aussi présent dans la sonde, est à son tour excité et émet une fluorescence. À terme, cet outil permettrait un diagnostic plus précoce et une meilleure prise en charge de patients atteints de la maladie de Wilson ou du syndrome de Menkes¹. AL

Lanthanide

Éléments terres rares dont le numéro atomique est compris entre 57 et 71.

Note :

1. Maladies génétiques entraînant un excès de cuivre dans l'organisme, pour la première, et un déficit pour la seconde.

Valorisation

Diagnostic multi-usages



Dispositif installé à la Grotte de Maldidier.

Après le diagnostic médical en milieu hospitalier, l'instrument Microprep du **Leti** pourrait révolutionner le monde de la paléoclimatologie. Cette plateforme nomade de préparation automatisée de prélèvements pour analyse ADN par PCR a été adaptée à l'identification d'échantillons paléontologiques dans la grotte Maldidier (Dordogne). Elle a ainsi permis de déterminer formellement l'origine de **coprolithes** vieux de 30 000 ans comme provenant d'une espèce de hyène des cavernes très recherchée. Et cela, en temps réel, alors que les archéologues attendent souvent des semaines le résultat de leur fouille auprès de laboratoires. Simple d'utilisation, Microprep est accessible à tous, il suffit d'adapter les consommables aux différents types d'échantillons. AG

Coprolithes

Excréments minéralisés, fossilisés.



ANDRÉ BRAHIC, SEIGNEUR DES ANNEAUX !

« L'homme est parvenu à sortir de son berceau, la Terre, pour aller à la découverte de l'Univers qu'il a désormais les moyens d'explorer »... L'époque est en effet exceptionnelle depuis l'exploration spatiale, car elle a permis d'en apprendre beaucoup plus sur notre système solaire et son origine, en une génération qu'en quarante siècles. Et ce grâce à des spécialistes passionnés tel André Brahic qui, du monde merveilleux de Saturne aux confins de l'Espace, est parvenu à dévoiler l'univers comme on ne l'avait jamais vu et à aborder de grandes questions : d'où venons-nous ? Sommes-nous seuls dans l'Univers ? Les réponses de l'astrophysicien sont celles du scientifique et de l'humaniste qui a toujours œuvré à la diffusion des savoirs, comme lors de ces quatre moments magistraux à consulter sur Internet.

Découvrez quelques conférences d'André Brahic

« **Saturne et ses anneaux** ». Conférence cyclope du CEA de Saclay Novembre 2009 • <http://bit.ly/1XrKsmB>

« **Enfants du Soleil, histoire de nos origines** ». Conférence à l'Université de Nantes / Juin 2012 • <http://bit.ly/25bE31s>

« **Quelques dernières nouvelles d'un jeune univers : Du monde merveilleux de Saturne aux confins de l'Espace** ». Conférence à l'Université de Bretagne Sud / Avril 2014 • <http://bit.ly/1TRQIEp>

« **Sommes-nous seuls dans l'Univers ?** ». Conférence à l'Université Libre de Bruxelles / Mars 2016 • <http://bit.ly/1qvHD7b>



Abonnement gratuit

Vous pouvez vous abonner sur : <http://cea.fr/defis> 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.**

DU RÉACTEUR NUCLÉAIRE AU CYCLE DU COMBUSTIBLE, AUJOURD'HUI ET DEMAIN

Bernard
Boullis



Nicolas
Devictor



Savez-vous que les combustibles nucléaires usés sont recyclés après leur utilisation en réacteur ? Pourquoi et comment s'effectue ce recyclage ? Peut-on aller plus loin avec une nouvelle génération de réacteur nucléaire ? Quelle est la contribution du CEA dans la recherche et développement menés sur ces réacteurs du futur, en particulier sur le projet Astrid ? Retrouvez les réponses à toutes ces questions dans deux interviews vidéos de Bernard Boullis, Directeur des programmes sur le cycle des combustibles nucléaires, et Nicolas Devictor, chef du programme réacteurs de 4^e génération, au CEA.

<http://www.cea.fr/go/energie-nucleaire>

Téléchargez également les infographies des *Défis du CEA* :

- Les filières et générations de réacteurs nucléaires
<http://bit.ly/1TXYYQO>
- Les procédés du cycle du combustible nucléaire
<http://bit.ly/1ZfwuU2>

WNE

World Nuclear Exhibition

Du 28 au 30 juin 2016,
au Bourget, à Paris

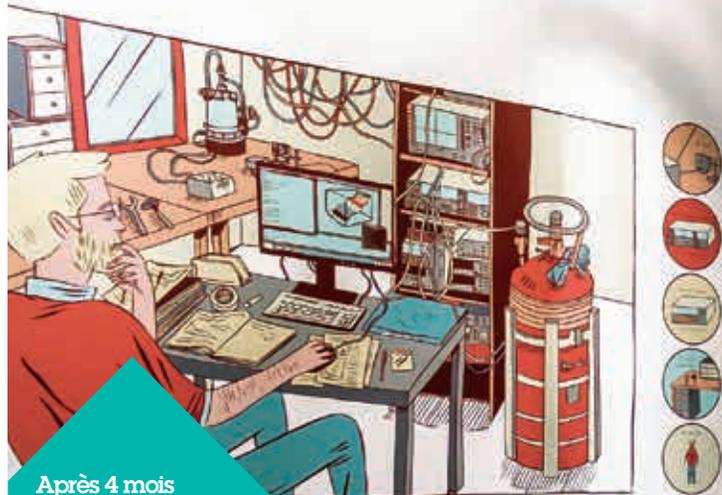
Venez consulter le programme de cet événement mondial de référence de la filière énergie nucléaire sur le site :

<http://www.world-nuclear-exhibition.com/fr/>



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 en chef adjointe Amélie Lorec | Ont contribué à ce numéro: Fabrice Demarthon, Mathieu Grousson et Patrick Philippon | Comité éditorial Stéphanie Delage, Alexandra Bender, Hélène Burlet, Elizabeth Lefevre-Remy, Sophie Martin, Brigitte Raffray, Françoise Poggi et Isabelle Dellis | Iconographie Micheline Bayard | Infographie Fabrice Mathé | Photo de couverture P.Dumas / CEA | Diffusion Lucia Le Clech | Conception et réalisation www.grouperougevit.fr | N°ISSN 1163-619X | Tous droits de reproduction réservés. Ce magazine est imprimé sur du papier Satimat, issu de forêts gérées durablement. Korus Imprimerie.

E DE MANIP



Après 4 mois en immersion dans un laboratoire de physique, l'illustratrice Héloïse Chochois en livre les coulisses dans une BD et une exposition aussi drôles, attachantes que concrètes.



Palais
DÉCOUVERTE

INFILTRÉE CHEZ LES PHYSICIENS

Exposition | Jusqu'au 31 août 2016

Palais de la découverte | Paris

<http://bit.ly/1ApU5TG>