

les défis du cea

Le magazine de la recherche et de ses applications

203

Décembre 2015
Janvier 2016

TOUT
S'EXPLIQUE

Supplément détachable sur
les filières et générations
de réacteurs

02

L'INTERVIEW

◆ Pierre-Damien Berger et Nicolas Puget, artisans de la collaboration CEA Tech / Rossignol ◆

04

ACTUALITÉ

◆ La vitrine du calcul haute performance ◆ Premier défi relevé pour le pré-exascale ◆ Aux commandes du GIF ◆ Dans le top 100 mondial de l'innovation ◆

06

SUR LE VIF

◆ Maxi wafer pour micro capteur à prix mini ◆ Des batteries qui ne manquent pas de sel ◆ H5N1 : une protéine très en « forme » ◆

09

LE POINT SUR

◆ La technologie FDSOI ◆

19

SCIENCES EN BREF

◆ Un code caméléon pour une sécurité sans faille ◆ Maladie d'Alzheimer : la voie du cholestérol ◆ Chauffer à point nommé ! ◆ Booster la réalité pour plus d'efficacité ◆ Une meilleure dosimétrie pour la radiothérapie interne ◆ Vers une apnée mieux surveillée ◆ À chaque cellule sa microcapsule ◆ La Voie lactée fait des bulles ◆ Deux antennes dans un boîtier ◆ Analyses radiologiques à domicile ! ◆ La gageure d'un transistor CMOS mono-électron ◆

23

KIOSQUE



12

DOSSIER

Le nucléaire fait son tri sélectif

PIERRE-DAMIEN BERGER,

responsable Grands comptes
CEA Tech

&

NICOLAS PUGET,

responsable R&D Rossignol

© I. Godart/CEA



Réinventer le ski et imaginer les sports d'hiver de demain

L'annonce a créé le buzz dans le monde du sport français : le leader mondial du ski, Rossignol, lance une collaboration de cinq ans avec CEA Tech. Couloirs d'un partenariat prêt à gravir les sommets de l'innovation made in France!

Propos recueillis par Aude Ganier

Quels sont les enjeux respectifs d'un tel partenariat ?

Nicolas Puget : Rossignol veut réinventer le ski et imaginer les produits des sports d'hiver de demain ! Pour cela, nous ambitionnons de dépasser les simples innovations incrémentales

pour proposer des produits qui amèneront de véritables ruptures. Nous visons notamment des premières mises sur le marché, avant même la fin de notre partenariat avec CEA Tech, prévu pour durer cinq ans.

Pierre-Damien Berger : Ce partenariat s'inscrit dans la mission de CEA Tech qui est de créer de l'innovation technologique pour améliorer la compétitivité des entreprises, produire de la valeur et des emplois pérennes en France. Précisément, avec Rossignol, il s'agit de réaliser les prochains sauts technologiques majeurs du secteur des sports d'hiver pour donner à ses produits encore plus d'avance sur le marché. Nous sommes dans une approche résolument gagnant-gagnant : d'une part, permettre à Rossignol de trouver

un vecteur d'innovation ; d'autre part, valoriser notre offre technologique dans les champs d'application de l'industriel. Et, avec ce type de partenariat, nous progressons sur nos technologies et procédés.

Pourquoi Rossignol s'est-il tourné vers CEA Tech ?

N.P. : La réputation de CEA Tech en termes de compétences et d'expertise nous a séduits. Tout comme sa réactivité et sa proximité : le centre de R&D de Rossignol se situant à Moirans, dans le bassin Grenoblois, nous ne sommes qu'à vingt minutes les uns des autres ! Je connaissais bien le CEA puisque Rossignol était partenaire, entre 2005 et 2009, de la plateforme collaborative Ideas Laboratory, lieu d'échange collectif entre industriels et ingénieurs du CEA notamment pour interroger et concevoir les futurs usages des technologies. Le fait que les équipes de CEA Tech soient tournées vers cette dimension « usage » était aussi un argument de poids. Aujourd'hui, il s'agit d'un partenariat exclusif. Nous avons exposé nos

Nous pourrons tester sur le terrain les développements en mettant à contribution les athlètes.

Nicolas Puget, Rossignol



problématiques de R&D et avons pu interagir directement avec les experts du CEA. Nous sommes passés à un stade supérieur de collaboration que nous n'avions jamais menée auparavant.

P.-D. B. : À CEA Tech, nous sommes organisés pour investiguer différentes filières applicatives telles que le sport. Nous devons donc nous assurer que les « grands » et « petits » de ce domaine puissent bénéficier de nos savoir-faire et de nos compétences. Cela consiste à diffuser les possibilités offertes par nos technologies et, surtout, à comprendre comment les acteurs réagissent aux niveaux local, national (via par exemple les plateformes régionales de transfert technologique (PRTT) de CEA Tech) et international. C'est pourquoi j'avais déjà échangé à plusieurs reprises avec Nicolas Puget, lorsqu'il contribuait à Ideas'Lab. Puis, lors d'une discussion en 2014, les choses sont allées très vite : en à peine huit mois, nous avons défini le cadre partenarial autour de deux grands domaines (matériaux et capteurs), identifié différents pré-projets et lancé de premiers projets.

Nous avons signé la convention du partenariat le 21 juillet dernier. Elle s'inscrit dans la logique des contrats que nous engageons au CEA. Si l'accord n'est pas toujours confidentiel, le contenu l'est systématiquement. Ensuite, en termes de propriété intellectuelle, il y a deux cas de figure assez classiques. Soit la solution apportée à la problématique de l'industriel est développée en commun, et il y a une copropriété ; soit l'invention résulte d'un brevet du CEA, auquel cas il en est le seul propriétaire et peut céder à l'industriel une licence d'exploitation exclusive.

Comment va se dérouler votre collaboration ?

N. P. : Comme l'a dit Pierre-Damien Berger, la collaboration a commencé bien avant la signature de la convention. Nous avons eu de premières phases d'investigation pour sélectionner des pistes d'innovation, définir des feuilles de route technologique. Une trentaine de personnes de Rossignol va s'impliquer progressivement : ingénieurs,

techniciens, équipes marketing... Mais, actuellement, ce sont surtout les chercheurs du CEA qui ont les mains dans le cambouis ! Ensuite, nous pourrions tester sur le terrain le fruit de leurs développements en mettant à contribution les athlètes que nous sponsorisons. La compétition, du moins les entraînements, est un laboratoire d'essais permanents qui permet de repousser les limites et de comprendre tous les phénomènes en jeu. Cette particularité est une chance pour nous. Et c'est l'ADN de Rossignol que de concrétiser des innovations au top niveau afin de les décliner pour le grand public.

P.-D. B. : Nous avons des objectifs très concrets pour les six premiers mois, jusqu'à la fin de cette année. Les ingénieurs du CEA (Leti et Liten) travaillent déjà sur les capteurs et les matériaux. De nombreuses réunions ont eu lieu, y compris au sein de nos laboratoires pour que les experts de Rossignol observent et contribuent aux premiers résultats. De même, nous nous rendons régulièrement dans leurs installations pour nous familiariser avec les processus, les

Les choses sont allées très vite : en à peine huit mois, nous avons défini le cadre partenarial.

Pierre-Damien Berger, CEA Tech

machines et la matière première qu'est une planche de ski ou de snowboard. La proximité dont parlait Nicolas Puget est en effet très facilitante.

Parallèlement, nous préparons les prochains plannings de recherche 2016 et 2017, épaulés notamment par la direction de l'Innovation ouverte de CEA Tech. Et nous ne nous interdisons rien en termes de créativité et de nouveaux concepts. Les équipes du CEA-List seront ainsi de la partie pour augmenter les possibilités d'innovation... ♦

www

www.rossignol.com
www.ceatech.fr
www.ideaslaboratory.com



Salon

La vitrine du calcul haute performance

Comme chaque année, le CEA a participé au salon international *Supercomputing*, du 15 au 20 novembre, à Austin (Texas). L'occasion de présenter un panel de ses activités de R&D dans le domaine de la simulation numérique et du calcul haute performance (HPC) et de ses applications en simulation numérique. Et ce, aussi bien pour la Défense avec le supercalculateur Tera, que pour l'industrie et la recherche au sein du Très grand centre de calcul (TGCC), deux installations du centre DAM-Île-de-France.

Le lancement du supercalculateur pré-exaflopique Tera 1000 (cf article ci-contre), développé avec Atos/Bull a été particulièrement mis en valeur, sur les deux stands voisins du CEA et d'Atos. Le HPC européen, auquel le CEA participe activement dans le cadre du programme Horizon 2020 de la Commission européenne, était aussi très visible cette année à Supercomputing. Pour rappel, ce programme finance aussi le centre d'excellence européen EoCoE¹, dédié aux applications énergétiques du HPC et piloté par la Maison de la Simulation² du plateau de Saclay.

Notes :

1. Energy-oriented Centre of Excellence.
2. CEA, CNRS, Inria, Universités Paris-Sud et Versailles-Saint-Quentin.

Installation

1^{er} défi relevé pour le pré-exascale

La première tranche de TERA 1000 a été livrée par la société Atos/Bull sur le centre CEA-DAM de Bruyères-le-Châtel. Ce supercalculateur délivre une puissance de calcul de 2,6 petaflops (2,6 millions de milliards d'opérations par seconde) pour une consommation électrique de 1 MW. Il permet de diviser par cinq la consommation électrique de son prédécesseur TERA 100, tout en doublant sa puissance de calcul. La seconde tranche de Tera 1000 sera mise en service en 2017 et fournira alors une puissance théorique de calcul de 25 petaflops, avec une performance énergétique 20 fois meilleure que celle de TERA 100. D'ores et déjà, une armoire de cette seconde tranche a été livrée et délivre 1/4 de la puissance de Tera 100 pour 1/100^e de sa consommation électrique. Ce prototype répond au défi majeur de l'efficacité énergétique en l'améliorant d'un facteur 25 par rapport à Tera 100. Les besoins du CEA liés aux programmes de Défense nécessitent en effet la mise en œuvre à l'horizon 2020 d'un calculateur « Exascale », c'est-à-dire capable d'exécuter plus d'un milliard de milliards d'opérations par seconde. Pour concevoir ce supercalculateur, la maîtrise de la performance énergétique est un défi majeur dont TERA 1000 vient de lever un premier verrou.

2,6
petaflops

PUISSANCE DE CALCUL
DE LA PREMIÈRE TRANCHE
DE TERA 1000.



Gouvernance

Aux commandes du GIF



Christophe Béhar

Au 1^{er} janvier 2016, le Directeur de l'énergie nucléaire du CEA, Christophe Béhar, deviendra Président du Forum international génération IV. Élu le 30 octobre 2015 par les treize partenaires¹, il dirigera pendant deux ans les activités de ce Forum, établi en 2000 pour promouvoir le nucléaire du futur et piloter la R&D relative aux systèmes de 4^e génération.

« Renforcer l'implication des industriels dans les travaux du Forum pour une meilleure adéquation avec les besoins du marché ; travailler plus étroitement avec les autorités de sûreté nucléaire ; mieux définir les phases de démonstration des différentes technologies étudiées » : telles sont les priorités soulignées par le Directeur de l'énergie nucléaire du CEA afin que les six filières de réacteurs étudiées puissent satisfaire aux exigences de durabilité, sûreté, compétitivité économique et résistance à la prolifération. Parmi ces technologies, celle des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) choisie par la France qui a confié au CEA le pilotage du projet de démonstrateur technologique Astrid.

Propriété intellectuelle

Dans le Top 100 mondial de l'innovation

Pour la cinquième année consécutive du classement Thomson Reuters, lancé en 2010, le CEA figure parmi les 100 organismes de recherche ou groupes industriels les plus innovants au monde. Avec Alcatel-Lucent, Alstom, Arkema, le CNRS, l'IFPEN, Safran, Saint-Gobain, Thales et Valéo, il permet à la France de se hisser à la troisième place mondiale (avec 10 organisations sélectionnées), derrière les États-Unis (35) et le Japon (40), et devant l'Allemagne (4).

Les 100 organisations les plus innovantes représentent 11 pays dont la répartition renseigne sur les trois forces innovantes en présence: suprématies asiatique (44 organisations) et américaine (36) devançant l'Europe (20).

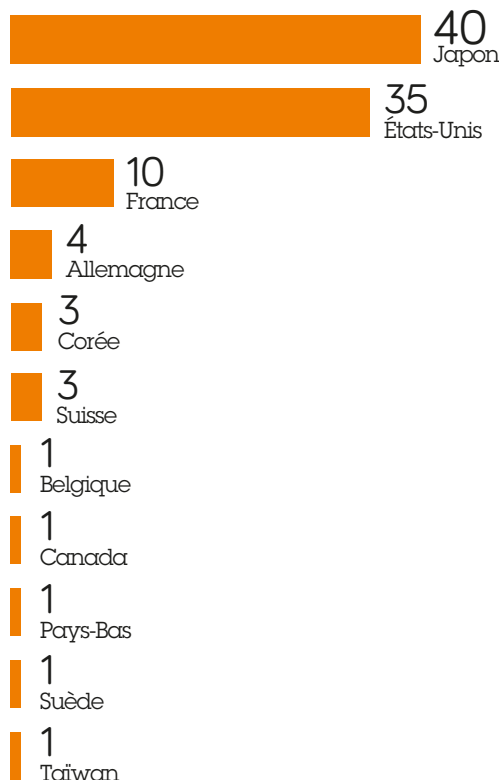
Le classement Top 100 *Global Innovators* de Thomson Reuters est calculé à partir du volume de brevets détenus par les organisations, du taux de brevets acceptés comparé au volume déposé, ainsi que de la portée géographique et de l'influence en termes de citations de ces brevets.

Pour rappel, avec 558 brevets publiés en 2014, le CEA est le premier organisme de recherche français et européen en la matière.

Note :

1. Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, Corée du Sud, Chine, États-Unis, France, Japon, Royaume-Uni, Russie, Suisse ainsi que l'organisation Euratom.

Classement des pays en fonction du nombre d'organisations



DU 6 AU 9 JANVIER CONSUMER ELECTRONICS SHOW (LAS VEGAS)

Le CES est le rendez-vous incontournable de l'électronique grand public, organisé par la Consumer Electronics Association. L'année dernière, la présence française a été remarquée avec plus de 160 entreprises qui incarnent la dynamique de la filière de l'Internet des objets (IoT). Cette année encore, les experts de CEA Tech accompagneront leurs partenaires industriels.

DU 26 AU 28 JANVIER ASSISES EUROPÉENNES DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE (DUNKERQUE)

Auprès d'élus, d'entreprises, d'associations, de techniciens et même du grand public, le CEA assistera aux Assises de l'énergie qui affirmeront aujourd'hui leur ouverture à l'international. Cet événement sera le premier temps fort européen de l'après COP21, dédié aux territoires et à leurs actions. Des séances plénières donneront par ailleurs la parole à de nombreuses collectivités étrangères venues débattre et témoigner sur la transition énergétique.

DU 27 AU 29 JANVIER CONGRÈS ERTS (TOULOUSE)

Rendez-vous international des systèmes embarqués, l'ERTS pourra compter sur la présence des ingénieurs du CEA-List. Ce salon rassemble depuis huit ans les acteurs académiques, industriels et scientifiques d'un domaine technologique aux nombreuses applications stratégiques : exploration spatiale, aéronautique, automobile, télécommunications, santé, défense et industrie du futur.



Plus la taille du wafer
augmente, plus le coût
de fabrication unitaire
du MEMS diminue.

Jean-Philippe Polizzi du CEA-Leti



Microélectronique

Voici une étape supplémentaire dans la massification du marché des MEMS, ces microsystèmes électromécaniques déjà largement présents dans nos véhicules, téléphones portables, tablettes ou manettes de jeux. Une équipe du CEA vient de démontrer la faisabilité de la fabrication de ces capteurs à partir de plaques de silicium de 300 mm de diamètre. En ligne de mire ? La réduction des coûts !

Devenus incontournables pour l'industrie, l'aéronautique, la sécurité, le médical et les applications grand public (notamment l'Internet des objets **IoT**), la plupart des MEMS sont en silicium. C'est le cas également des capteurs basés sur le concept M&NEMS¹, technologie de rupture inventée au CEA-Leti qui permet de réunir sur une même puce tous les axes de mesure (accéléromètre, gyromètre, magnétomètre, capteur de pression... et bientôt microphone). En France, ils sont aujourd'hui produits par la société Tronics, essayée du CEA-Leti, à partir de plaques ou « wafer » de silicium de 150 mm de diamètre.

Des wafers XXL pour des capteurs à moindre coût

« Au niveau mondial, le format le plus avancé est 200 mm. Or, plus la taille du wafer augmente, plus le coût de fabrication unitaire du MEMS diminue. Et le surcoût lié à l'utilisation d'un plus grand diamètre est faible par rapport à l'augmentation du nombre de composants par wafer » indique Jean-Philippe Polizzi qui, avec ses collègues, a voulu appliquer au secteur des MEMS ce changement d'échelle déjà utilisé avec succès par l'industrie de la microélectronique. Ils en ont vérifié la faisabilité en mettant en œuvre une ligne expérimentale de production sur wafers 300 mm. « L'opération est complexe et minutieuse. Les M&NEMS sont par exemple constitués d'un corps d'épreuve au sein duquel est installée une nano-jauge, c'est-à-dire une poutre mobile large de 250 nanomètres. Leur fabrication nécessite pas moins de 100 étapes » explique l'ingénieur. Qu'à cela ne tienne ! Les pionniers de la microélectronique ont réussi, sur l'une des plateformes technologiques du CEA à Grenoble, à produire plusieurs dizaines de milliers de capteurs, à raison d'environ 40 000 par wafer.

À n'en pas douter, cette première mondiale, tout type de MEMS ou M&NEMS confondus, ouvre des perspectives intéressantes, notamment en matière d'intégration de ces dispositifs les uns avec les autres sur un même système. ♦

IoT

Internet of Things. Espace applicatif issu de l'extension de la virtualité d'Internet aux objets physiques. Leur interconnexion, notamment celle des capteurs permet une meilleure compréhension et gestion des environnements : maisons, villes et véhicules intelligents.

Note :

1. Micro & Nano Electro Mechanical System.

Maxi wafer pour micro capteurs à prix mini!

Une nouvelle perspective pour réduire les coûts de fabrication d'accéléromètres M&NEMS : les chercheurs du CEA-Leti démontrent qu'il est possible de les réaliser sur des plaques de 300 mm de silicium. De quoi accompagner l'essor de l'Internet des objets (IoT).

par Vahé Ter Minassian

Stockage d'énergie

Des batteries qui ne manquent pas de sel

Qu'est ce qui pourrait être aussi performant et moins cher qu'une batterie lithium-ion? Des chercheurs du CNRS et du CEA-Liten innovent avec du sodium, pour une alternative révolutionnaire...

par Fabrice Demarthon

18650

Format de la cellule d'une batterie, soit un cylindre de 18 mm de diamètre et de 65 mm de longueur.

Note :

1. Batteries lithium fer phosphate graphite

Première mondiale: des chercheurs du CEA-Liten et du CNRS développent une batterie de type sodium-ion (Na-ion) dans l'un des formats le plus commun au monde, le « 18650 ». Une innovation qui pourrait avantageusement remplacer les batteries lithium-ion (Li-ion), format 18650, utilisés dans les ordinateurs portables, outils sans fil, vélos électriques...

« L'intérêt du sodium par rapport au lithium est double, explique Loïc Simonin, ingénieur du CEA-Liten. Il est beaucoup plus abondant sur Terre : avec 23 600 ppm (parties par million), il s'agit du 6^e élément le plus répandu dans la croûte terrestre, alors que le lithium n'est que 33^e avec seulement 20 ppm. Ensuite, il est disponible partout alors que le lithium est concentré principalement en Amérique du Sud et en Asie. » La faible abondance et la forte concentration géographique du lithium ont fait de lui un matériau potentiellement

critique en terme de sécurité d'approvisionnement et de coût. D'autant qu'avec le boom de l'électronique portable et les prévisions de croissance du marché du véhicule électrique et des énergies renouvelables intermittentes, la demande devrait croître fortement. Le remplacer par du sodium pourrait donc faire baisser le prix des batteries, ce que semblent confirmer des études préliminaires initiées au CEA. Et ce n'est pas là le seul avantage de la nouvelle batterie Na-ion : « notre technologie nous permet de remplacer le cuivre utilisé dans les batteries Li-ion par de l'aluminium, matériau moins cher et plus répandu », indique Loïc Simonin.

De l'idée au prototype

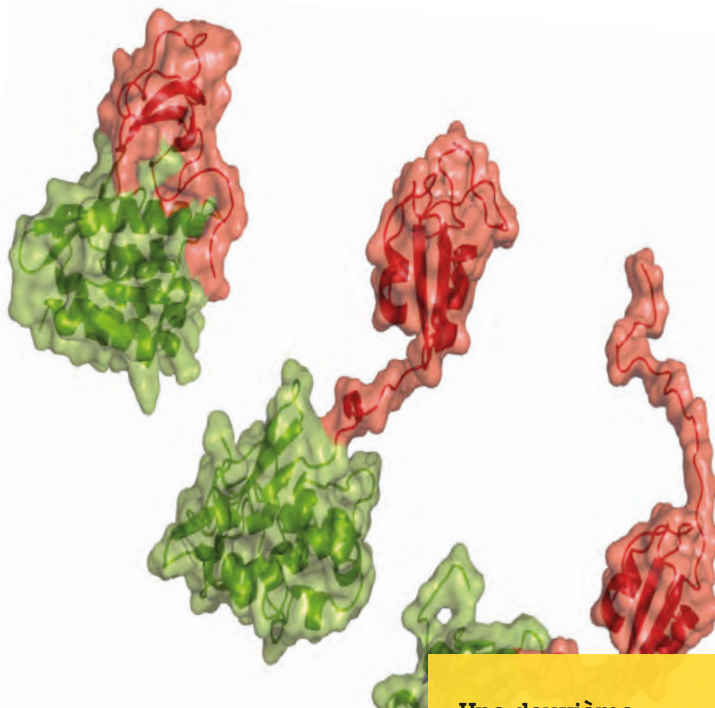
Il n'aura fallu que 18 mois aux chercheurs pour passer de l'idée au prototype avancé. « Le sodium et le lithium sont très proches chimiquement et nous avons pu bénéficier de toutes les connaissances accumulées sur les batteries Li-ion au cours des dernières années », précise l'ingénieur. Très rapidement, les batteries Na-ion « made in France » ont montré qu'elles pouvaient concurrencer les batteries Li-ion LFP/G¹ commerciales, tant en matière de puissance que de durée de vie. Ce qui augure de bonnes choses pour la suite : cinq brevets ont déjà été déposés par les équipes du CEA et du CNRS qui réfléchissent maintenant à la meilleure manière de valoriser cette réussite. ♦



H5N1 : une protéine très en « forme »

Alors que plusieurs cas de grippe aviaire H5N1 sont détectés en France, des chercheurs progressent dans la compréhension du mécanisme de réplication de ce virus. La clé réside dans la structure d'une protéine impliquée dans le processus.

par Fabrice Demarthon



C'est en 1997 à Hong Kong que, pour la première fois des humains, étaient infectés et tués par le virus de la grippe du poulet H5N1. Hautement pathogène, ce virus s'est depuis propagé chez les volailles (principalement en Asie, également en Europe, Afrique et Amérique), constituant une sérieuse menace tant pour la santé animale qu'humaine avec un taux de mortalité de 60 % chez l'homme. Mieux appréhender sa physiologie s'avère donc primordial. Dans ce contexte, la découverte récente par une équipe internationale impliquant l'IBS est une percée importante. Les chercheurs ont en effet observé qu'une partie de la polymérase du virus pouvait prendre deux formes, ou conformations. L'une dite « fermée » permettant à la **polymérase** de fonctionner et donc aux particules virales d'être synthétisées ; l'autre, « ouverte », identifiée pour la première fois à cette occasion, servant au transport de la protéine vers l'intérieur du noyau de la cellule infectée, où se déroulent la réplication et donc la multiplication du virus.

Une deuxième configuration identifiée grâce à la résonance magnétique nucléaire

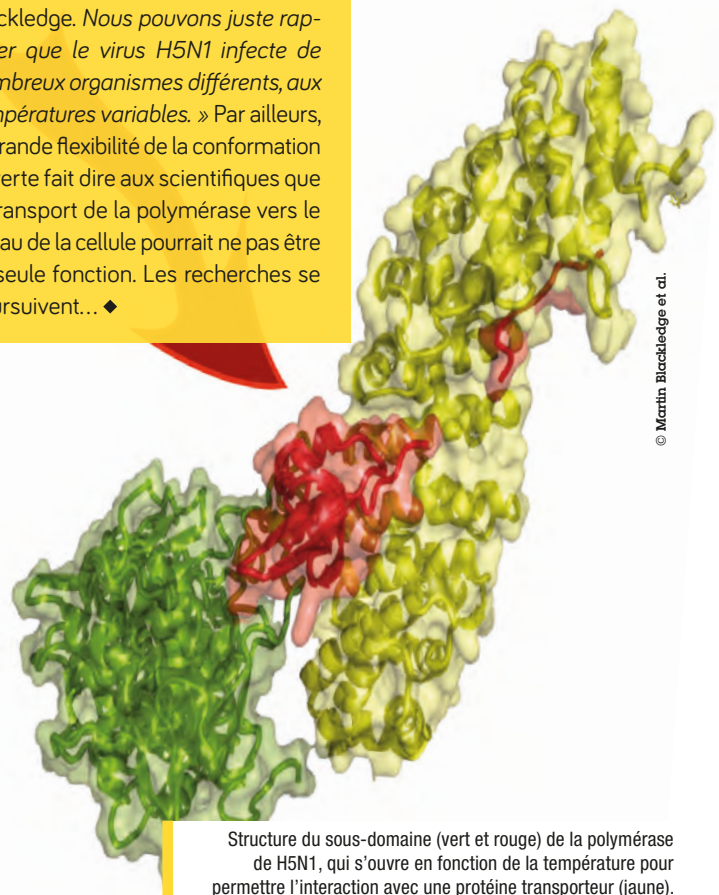
« La conformation fermée de ce sous-domaine de la polymérase, appelé 627-NLS, était connue depuis quelques années grâce à la cristallographie, explique Martin Blackledge, chercheur CEA de l'IBS. L'analyse de cette structure montrait bien qu'elle était capable de participer à la réplication du virus dans le noyau de la cellule, le rôle premier de la polymérase. En revanche, nous ne voyions pas comment elle pouvait permettre l'entrée de la polymérase dans le noyau. » Pour le découvrir, il a fallu utiliser d'autres techniques de biologie structurale, notamment la résonance magnétique nucléaire (RMN). Moins précise pour déterminer la structure, cette méthode permet toutefois d'étudier la « dynamique conformationnelle » des protéines en solution, c'est-à-dire dans un environnement bien plus proche de la réalité que celui des cristaux solides de la cristallographie. « Nous avons ainsi pu observer la deuxième forme, totalement inédite, et montrer que cette conformation permet à la polymérase d'entrer dans le noyau cellulaire afin de jouer son rôle de réplicateur viral » indique le chercheur.

Le rôle de la température

L'équipe internationale a également découvert que le changement de conformation, de « fermée » à « ouverte », dépendait de la température ambiante. « Nous ne savons pas expliquer ce lien entre température et conformation, admet Martin Blackledge. Nous pouvons juste rappeler que le virus H5N1 infecte de nombreux organismes différents, aux températures variables. » Par ailleurs, la grande flexibilité de la conformation ouverte fait dire aux scientifiques que le transport de la polymérase vers le noyau de la cellule pourrait ne pas être sa seule fonction. Les recherches se poursuivent... ♦

Polymérase

Protéine virale nécessaire à la réplication du virus.

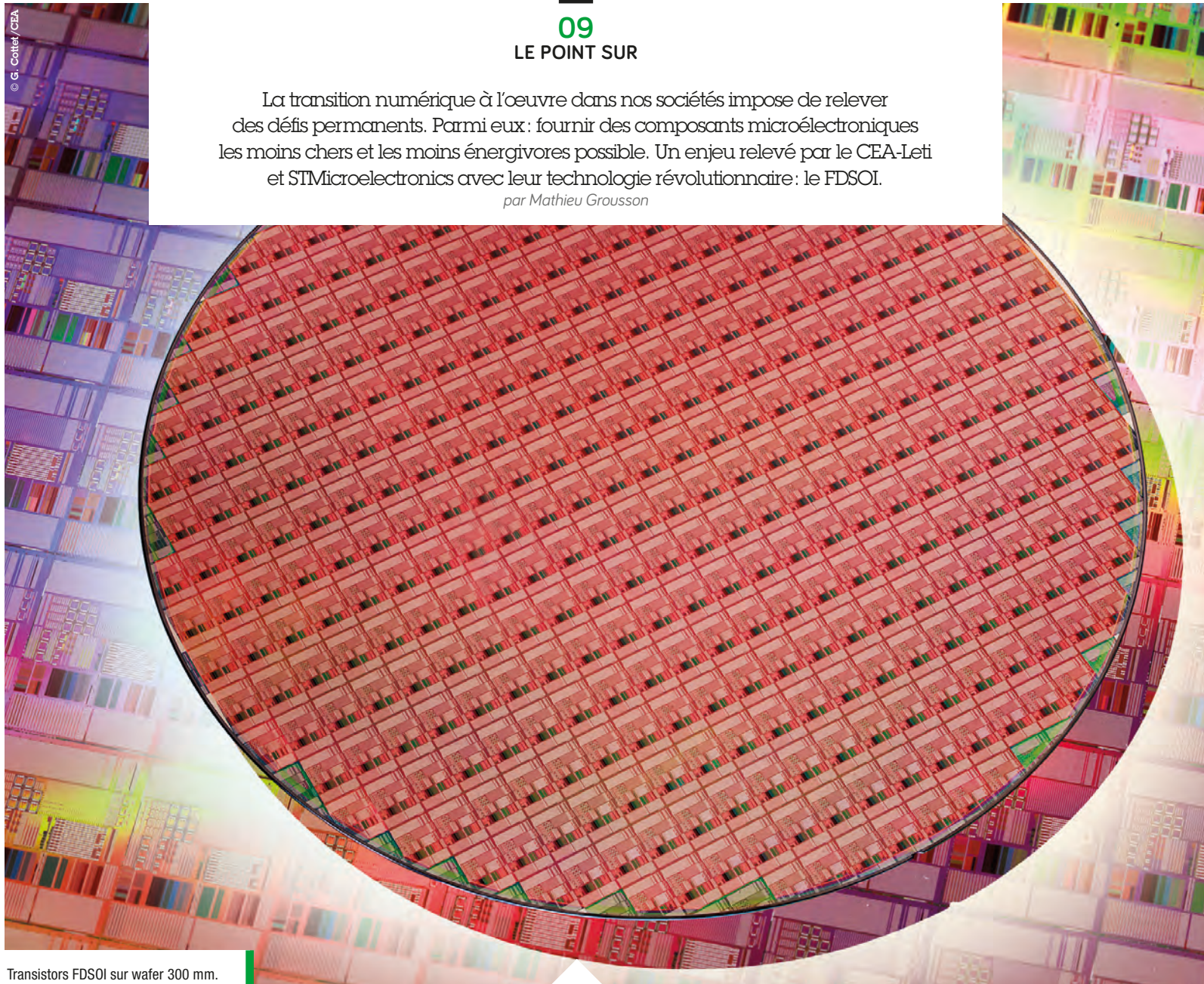


Structure du sous-domaine (vert et rouge) de la polymérase de H5N1, qui s'ouvre en fonction de la température pour permettre l'interaction avec une protéine transporteur (jaune).

© Martin Blackledge et al.

La transition numérique à l'œuvre dans nos sociétés impose de relever des défis permanents. Parmi eux : fournir des composants microélectroniques les moins chers et les moins énergivores possible. Un enjeu relevé par le CEA-Leti et STMicroelectronics avec leur technologie révolutionnaire : le FDSOI.

par Mathieu Grousson



Transistors FDSOI sur wafer 300 mm.

La technologie **FDSOI**

Depuis les années 1970, l'industrie des **puces électroniques** suit une loi implacable : le nombre de transistors, élément de base de tout circuit intégré, doit doubler tous les deux ans pour augmenter les performances de ces puces. C'est la loi de Moore, du nom du cofondateur du géant américain de l'électronique Intel¹, qui l'a énoncé en 1965 pour une raison bien simple : des transistors plus petits sont synonymes de processeurs plus rapides, moins chers et moins gourmands en énergie. En un mot, la miniaturisation est le gage de performances toujours renouvelées et de profits croissants. Pour autant, au tournant des années 2000, dès lors que la taille des transistors atteint environ 50 nanomètres, les spécialistes ont dû faire face à une réalité tout aussi implacable : l'augmentation des fuites de courants électriques au niveau de la porte (grille) des transistors. Concrètement, les caractéristiques électriques de ces composants ont

commencé à dévier avec, pour conséquence, une difficulté croissante de les contrôler industriellement.

Pour que ne soit pas contredite la loi de Moore, le monde de la microélectronique a dû entamer une révolution. Au CEA-Leti, en collaboration avec STMicroelectronics, elle a pris le nom de « FDSOI », pour *Fully depleted Silicon on Insulator*. Il s'agit d'une technologie fondée sur la réalisation de transistors sur un film de silicium ultra-mince, reposant sur une couche d'oxyde de silicium isolante en lieu et place du traditionnel silicium massif. Et elle présente un sérieux avantage, celui de réduire de 40 % la consommation en énergie des puces électroniques. Aujourd'hui, les deux partenaires sont, non seulement parvenus à valider la pertinence et la faisabilité technique de cette option mais, également, à l'industrialiser. Au point que le FDSOI pourrait bien devenir, en témoigne désormais l'intérêt des poids lourds de la microélectronique, un sérieux concurrent de la technologie « FinFET » d'Intel, leader du secteur. ♦♦♦

Puce électronique

Circuits formés par l'intégration de microprocesseurs (micro-ordinateurs) gravés par photolithographie dans des tranches d'un métal semi-conducteur, le silicium.

Note :
1. Inventeur en 1971 du premier microprocesseur : une unité de calcul de 4 bits, cadencée à 740 kHz et intégrant 2 300 transistors.



Avec le FDSOI, l'idée était de proposer une alternative plus simple, moins chère et surtout moins énergivore

Olivier FAYNOT, chef de service au CEA-Leti



SOI, la génération « films minces »

Une chose est sûre, la technologie des « films minces » (ou SOI) est dans l'ADN des pionniers de la microélectronique grenobloise (pour ne pas dire française). Précisément, sa genèse remonte à des travaux réalisés au CEA il y a une trentaine d'années dans deux domaines. D'une part, l'implantation d'ions dans la matière (dans le cadre de l'étude du comportement des matériaux sous irradiation) ; d'autre part, l'adhésion moléculaire qui permet d'assembler naturellement deux matériaux sans recours à une colle.

Au début des années 1990, ces travaux ont permis à Michel Bruel, alors ingénieur au CEA-Leti, d'inventer une technologie de fabrication inédite pour la découpe, à l'échelle atomique, de couches ultra-minces de silicium oxydé en surface. Cette technologie, basée sur l'implantation d'ions légers au sein du silicium, est le « *Smart Cut™* » désormais exploité par Soitec, start-up essayée du CEA-Leti. Pour cause, elle permet d'obtenir *in fine* des couches de silicium sur oxyde, de très grande qualité et dont l'épaisseur est contrôlée de quelques nanomètres à quelques microns, collées sur un substrat de silicium. « *Ce procédé unique, dont la mise en œuvre est possible avec des technologies standards de la microélectronique, a ouvert la voie à la production à grande échelle de plaques de silicium sur isolant de très haute qualité* », explique Thomas Signamarcheix, ingénieur au CEA-Leti. Avantage : la possibilité d'y façonner des composants microélectroniques

qui, parce qu'isolés de leur substrat, minimisent intrinsèquement les pertes électriques.

Dans les années suivantes, un écosystème technologique et industriel complet autour du SOI s'est alors bâti avec différents partenaires tels, évidemment, Soitec mais aussi Texas Instruments, STMicroelectronics, AMD ou encore IBM. « *Il était très important pour nous de démontrer que nous pouvions contrôler toute la chaîne de valeur, et proposer une plateforme technologique complète pour la production de milliards de transistors sur films minces de silicium sans défauts* », analyse Olivier Faynot, ingénieur et chef de service au CEA-Leti.

L'institut a ainsi connu de belles réussites, puisqu'un très grand nombre de processeurs des consoles de jeux ont été produits sur films minces, de même que la quasi-totalité de certains composants qui équipent désormais les smartphones. Pour autant, difficile d'affirmer que cette technologie « films minces » a envahi le marché de la microélectronique : « *si elle présente de nombreux avantages, ces applications ne représentent qu'une infime fraction du marché* », relativise Thomas Signamarcheix. En effet, difficile de rivaliser avec les technologies classiques **CMOS** sur silicium massif pour lesquelles les salles blanches des **fonderies** ont été conçues. « *Jusqu'à un certain point, le gain en performance n'était pas suffisant pour que, même nos partenaires historiques, franchissent le pas à grande échelle en adaptant la conception de leurs composants* », admet Olivier Faynot.

Mais, dans le courant des années 2000, la taille des transistors a franchi la barre fatidique des quelques dizaines de nanomètres ; format au-delà duquel les pertes électriques sur silicium massif sont inconciliables avec les contraintes industrielles et économiques. La loi de Moore imposait à nouveau une rupture : « *au-delà du **noëud** 32 nanomètres, il a fallu se tourner vers d'autres architectures* » illustre Maud Vinet, chef de laboratoire au CEA-Leti.

CMOS

(Complementary Metal Oxide Semiconductor) Technologie ou procédé standard de fabrication des dispositifs semi-conducteurs.

Fonderie

Dans l'industrie microélectronique, entreprise spécialisée dans la fabrication des dispositifs semi-conducteurs ou des puces électroniques.

Noëud

Représente une génération technologique donnée.

POURQUOI LE CEA est un leader de la microélectronique ?

Pour les besoins de ses recherches sur l'énergie nucléaire, CEA s'est doté dans les années 1960 de compétences en microélectronique; notamment pour les systèmes de contrôle-commande de ses réacteurs expérimentaux. Ce savoir-faire, progressivement acquis, a donné lieu à l'essaiage de la première start-up du CEA, en 1972, EFCIS. Spécialisée dans les circuits intégrés, elle devient en 1982 une filiale de Thomson, lequel fusionne en 1987 avec l'italien SGS pour donner STMicroelectronics. Aujourd'hui, le CEA demeure un leader mondial en la matière.

Une nouvelle architecture basse consommation

Dans ce contexte, Intel propose en 2011 la technologie FinFET, véritable changement de paradigme en microélectronique : dans un transistor classique, les charges électriques circulent dans un canal planaire déposé sur un substrat ; à l'inverse, dans un transistor FinFET, ce canal est constitué d'un fil d'épaisseur nanométrique suspendu et ainsi immunisé contre les fuites de courant électrique. Comme le détaille Olivier Faynot, « ce type de transistors permet de très bonnes performances en vitesse. En revanche, le compromis vitesse/consommation énergétique n'est pas optimal pour les applications nomades. De plus, leur réalisation nécessite de sculpter le silicium en 3D, ce qui entraîne une révision totale des méthodes de conception. » Ainsi, la même année, STMicroelectronics et le CEA-Leti optent pour une solution toute différente. « L'idée était de proposer une alternative plus simple et moins chère », se souvient l'ingénieur.

localisés sur les composants afin d'engendrer la « fameuse » polarisation face arrière. De même, il fallait repenser l'ensemble des **portes logiques** de façon à les adapter à une large gamme de fonctionnement. Tout comme il restait à certifier les méthodes de contrôle global pour arbitrer dynamiquement le point de fonctionnement des circuits et vérifier que, même à très basse tension électrique, le comportement de chaque composant était bien celui attendu.

L'alliée de l'Internet des objets

Parmi ses réalisations, le CEA-Leti compte en particulier le modèle numérique Leti-UTSOI. Grâce à lui, le fonctionnement des composants est simulé pour réaliser la bibliothèque de cellules à partir desquelles sont ensuite pensés les circuits et les processeurs dans leur ensemble. « C'est clairement le modèle le plus performant actuellement disponible sur le marché », précise Olivier Faynot. De quoi *in fine* présenter en 2014 le circuit FRISBEE, capable de fonctionner sous des tensions comprises entre 400 millivolts et 1,3 volt et à des fréquences allant de 400 mégahertz à 2,5 gigahertz. « Nous avons montré que des processeurs en technologie FDSOI, pour une performance donnée, permettaient 30 % d'autonomie supplémentaire par rapport aux produits concurrents », ajoute Fabien Clermidy, ingénieur au CEA-Leti.

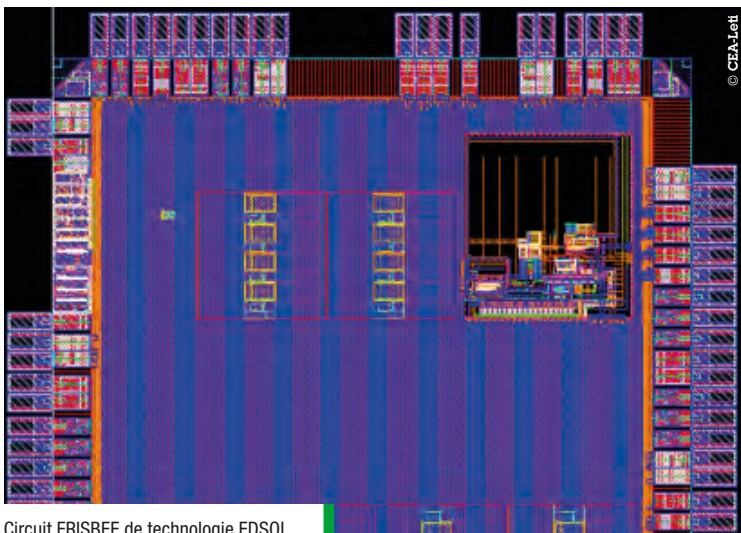
Les marchés visés par les promoteurs du FDSOI sont clairement ceux de l'électronique mobile : smartphones, tablettes, et surtout, les nouveaux objets nomades intelligents, telles montres connectées, caméras embarquées... Et pour ces objets, la question de la consommation est désormais cruciale. « Or, les processeurs FinFET, bien que plus performants sur le strict plan de la vitesse, achoppent sur la question de l'énergie », considère Thomas Signamarcheix. Et, à échéance de quelques années, il est fort probable que le FDSOI inonde le marché via l'avènement de l'Internet des objets (**IoT**), un univers naissant dans lequel ces objets connectés, devenus intelligents, auront « conscience » de leur environnement et pourront échanger des informations et prendre des décisions. Les géants de la microélectronique ne s'y sont pas trompés. Ainsi, dans sa version 28 nanomètres, le FDSOI se trouve désormais dans le catalogue de STMicroelectronics et Samsung. Quant au fondeur GlobalFoundries, il est désormais sous contrat avec le CEA-Leti pour, bientôt, offrir à ses clients le FDSOI en 22 nanomètres. « Face au FinFET, le FDSOI est dans la position du challenger, analyse Olivier Faynot. Mais, au regard de l'évolution du marché, il est tout à fait possible que d'un positionnement de niche, cette technologie finisse par prendre d'importantes parts de marché. » Afin de s'y préparer, le CEA-Leti travaille désormais à étoffer son offre sur les nœuds 28 et 22 nanomètres. Tout en phosphorant déjà sur les étapes suivantes à 10 et 7 nanomètres. De quoi garantir à la loi de Moore de beaux jours devant elle ! ♦

Porte logique

Assemblage de transistors permettant de réaliser une opération logique.

IoT

(Internet of Things) Espace applicatif issu de l'extension de la virtualité d'Internet aux objets physiques désormais connectés.



Circuit FRISBEE de technologie FDSOI

De fait, contrairement au FinFET, le FDSOI demeure une architecture planaire ; d'où des procédés de fabrications proches de ceux développés pour le silicium massif, de même qu'un design de circuits apparenté. Mais, surtout, les spécialistes entendent tirer parti d'une propriété que seuls possèdent les transistors FDSOI : par polarisation électrique de la couche isolante placée sous celle de silicium, dite « polarisation face arrière », il est possible de moduler à la demande le compromis vitesse/consommation ; et c'est précisément ce qui permet d'adapter au plus fin la consommation en énergie des circuits en fonction des opérations à réaliser. « Cette flexibilité est clairement le fer de lance du FDSOI », confirme Thomas Signamarcheix.

Pour capitaliser concrètement les avantages de cette « technologie en couche mince FDSOI **28 nm** », le nombre des personnes impliquées chez les deux partenaires est tout simplement multiplié par 10 ! Car l'enjeu, pour le CEA-Leti et STMicroelectronics, était bien de développer tous les composants nécessaires à la réalisation d'un circuit (plus d'une vingtaine), en particulier les générateurs de tension

28 nm

Dimension générique des composants FDSOI, de plus en plus petit et évoluant vers du 22 nm, alors que les composants traditionnels sont compris entre 180 et 45 nm.

© L. Zilberman/CEA



Coupe d'un conteneur de 870 litres de déchets de faible et moyenne activité à vie longue.

Le nucléaire fait son tri sélectif

P.14

Quand le CEA
gère ses propres
déchets

P.17

À chaque déchet
sa filière

Comme tous les exploitants d'installations nucléaires, le CEA est responsable de ses déchets radioactifs. Il lui appartient de les traiter, puis de les conditionner conformément aux dispositions légales de protection de l'environnement et des personnes.

Cela, afin de les expédier vers les sites de stockage définitifs ou pour les entreposer sur ses propres sites en attente d'évacuation définitive.

Toutes ces opérations sont réalisées sous la surveillance de l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) et de l'Autorité de sûreté nucléaire Défense (ASND).

par Patrick Philippon

Quand le CEA gère ses propres déchets



Laboratoire d'enrobage pour la R&D sur les déchets.

© P. Dumais/CEA

Exploitant nucléaire historique, le CEA se mobilise sur l'ensemble de la chaîne logistique et R&D de la gestion de ses déchets radioactifs. Des programmes complexes sont alors déployés, impliquant caractérisation, gestion des flux, traçabilité, transport, traitement et conditionnement.

Vie courte

Période radioactive d'un déchet inférieure à 31 ans.

Colis de déchets

Ensemble constitué du contenu (déchets) immobilisé dans une matrice (verre, béton, bitume) placée dans un conteneur (métal, béton).

Vitrification

Incorporation des déchets radioactifs dans une matrice de verre pour les confiner, sur le long terme, de manière sûre.

Note :

1. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs.

Parmi les principaux exploitants nucléaires français (avec Areva et EDF), le CEA se distingue par l'extrême diversité de ses déchets nucléaires. Tout d'abord, son parc d'installations en démantèlement (22 actuellement) est appelé à générer un volume important de gravats et autres matériaux, à 80 % conventionnels (non radioactifs) ou très faiblement radioactifs (TFA). Ensuite, les activités de R&D de ses laboratoires engendrent des déchets technologiques (verreries, instruments contaminés, tenues...) de faible ou moyenne activité à **vie courte** (FA et MA-VC), généralement en petites quantités. De même, les études conduites pour développer des matériaux nucléaires ou des procédés pour le recyclage des matières, dans des cellules blindées, entraînent des déchets de moyenne activité à vie longue (MA-VL). « Le CEA opère également des réacteurs de recherche mais leurs combustibles usés ne constituent pas un déchet car ils contiennent des matières valorisables. Ils sont ainsi recyclés dans l'usine Areva de La Hague... » souligne Laurence Piketty, qui dirige la Direction de l'assainissement et du démantèlement nucléaire (DADN) au CEA-DEN. Enfin, comme le précise Thierry Advocat, chef du programme « Gestion des flux de

déchets et matières » au CEA-DEN, « ayant développé le nucléaire militaire et civil en France, le CEA hérite d'installations historiques qu'il faut traiter ». Il entend par là l'ensemble des déchets MA-VL et FA-VL produits par les anciennes installations du cycle du combustible, et, pour partie, entreposés sur site sans avoir subi des opérations de traitement/conditionnement en **colis de déchets**. Ces objets MA-VL (boues, gaines d'assemblages combustibles, etc.) constituent un enjeu majeur, en particulier en termes de R&D appliquée. Il faut y ajouter quelque 3 000 colis de déchets de haute activité (HA), ayant fait l'objet d'un traitement de conditionnement par **vitrification** entre 1978 et 2012, entreposés dans une installation dédiée à Marcoule. Ce sont d'ailleurs pratiquement les seuls colis de déchets HA du CEA qui, contrairement à EDF, en produit très peu.

Une logistique assistée par ordinateur

Pour des raisons de cohérence, le CEA-DEN prend en charge une large part de la gestion opérationnelle de l'ensemble des déchets radioactifs du CEA. Selon leur nature, les colis de déchets conditionnés sont, soit dirigés vers les sites de stockage de l'Andra¹ (voir encadré page 15); soit, pour les déchets à vie longue, entreposés à Marcoule ou à Cadarache en attendant que l'Andra mette en service des centres adaptés. La loi (voir encadré page 16) impose que les déchets de fonctionnement et de démantèlement soient traités et conditionnés, et que les déchets MA-VL produits avant 2015 soient conditionnés d'ici 2030. Pour suivre toute la chaîne logistique des déchets, le CEA a développé un ensemble d'outils logiciels. Première étape, l'inventaire constitue une obligation légale, les exploitants fournissant les données à l'Inventaire National

publié par l'Andra tous les trois ans. « La reprise des déchets historiques pour traitement, conditionnement, ou simple entreposage à l'issue de la fin de vie des installations anciennes d'entreposage, représente une opportunité de mettre à jour voire de compléter des données radiochimiques de l'inventaire. Les méthodes de caractérisation ont évolué et permettent parfois de quantifier certains radionucléides à des niveaux de concentration faibles, jadis inatteignables » ajoute Thierry Advocat.

Actuellement, les chantiers de démantèlement produisent des déchets TFA évacués vers les sites de stockage exploités par l'Andra ; le reste provenant de la R&D. Ces proportions s'inversent pour les déchets FMA. « Le flux est relativement constant mais nous savons gérer les pics (comme celui au début des années 2010 lors du démantèlement des installations

grenobloises), ne serait-ce qu'en construisant à l'avance les installations d'entreposage sur nos sites » explique Cécile Richet, qui supervise le transport des déchets et l'interface avec l'Andra.

De la R&D pour anticiper...

Pour le compte du CEA, le CEA-DEN assume une part essentielle de la R&D et des opérations nécessaires pour mettre au point des filières de traitement (voir article suivant). « Quand nous n'avons pas de technique disponible, nous faisons de la R&D après avoir examiné les opportunités de traitement existantes chez les autres opérateurs tels que Areva et Sododei » explique Thierry Advocat.

La réflexion commence très en amont dans les installations nucléaires du CEA, par la mise en œuvre d'un **zonage déchets**. « L'ASN et l'ASND ont intégré dans la réglementation applicable

à la gestion des déchets ce travail à la source pour prévenir et réduire la production et la nocivité des déchets. Depuis une vingtaine d'années, nous avons diminué la production globale de déchets et savons mieux les trier » explique Marie-Paule Elluard, responsable des installations de traitement et d'entreposage du CEA-DEN. Vient ensuite la caractérisation, qui n'est pas une mince affaire au CEA dont les déchets, souvent d'activité faible,

WWW
ASN
www.asn.fr
Lois 28 juin 2006 & 13 juin 2006 (TSN)
www.legifrance.gouv.fr
PNGMDR
www.asn.fr/Informers/Dossiers/La-gestion-des-dechets-radioactifs
Andra
www.agence-nationale-recherche.fr

Depuis une vingtaine d'années, nous avons diminué la production globale de déchets et savons mieux les trier.

Marie-Paule Elluard, responsable des installations de traitement et d'entreposage du CEA-DEN



Conteneurs pour l'entreposage de sub-surface de longue durée et le stockage de déchets (MAVL).

sont formés d'un mélange de matériaux de nature physico-chimique diverse. Il a par exemple fallu améliorer les limites de détection de certains radionucléides comme l'iode 129 et le chlore 36, très mobiles dans l'eau et donc jugés pénalisants par l'Andra - l'eau étant le principal « ennemi » du stockage des déchets radioactifs. Par sûreté, l'Andra considère que, lorsque les appareils de mesure n'en « voient » pas dans un colis, celui-ci en contient une quantité égale à la limite inférieure de détection. « En réalité il y en a beaucoup moins. ♦♦♦

Zonage déchets

Distinction, dans une installation, entre les zones à production possible de déchets nucléaires, et les zones à déchets conventionnels (non radioactifs) dont l'absence de radioactivité est toutefois contrôlée.

L'Andra, un interlocuteur incontournable

Destinataire final de tous les déchets radioactifs produits en France, l'Andra prend en charge sur ses centres de stockage des colis répondant à des spécifications strictes. Au travers de conventions et/ou contrats avec les exploitants nucléaires, elle réalise des audits dans les installations de traitement/conditionnement des déchets et sur l'ensemble de la filière de production, pour assurer la maîtrise de la qualité des colis. Cela, en complément par exemple des contrôles et surveillances réalisés en interne au CEA. L'envoi des colis vers les sites de l'Andra obéit à une autre convention générale dont les modalités d'application sont régulièrement renégociées entre l'Andra et les trois grands producteurs de déchets afin, entre autres, de coordonner les flux et les conditions d'acceptation.

Pour sa part, le CEA expédie chaque année environ 14000 m³ de déchets TFA vers le Cires¹ et de 3 à 4000 m³ de déchets FMA-VC vers le CSA². Enfin, comme le précise Thierry Advocat « en tant que producteur de déchets, le CEA finance, avec EDF et Areva, le développement et l'exploitation des centres de l'Andra, actuels comme ceux, futurs, qui devront accueillir tous les colis de déchets HAMA-VL et FA-VL actuellement entreposés dans des installations dédiées. »

Notes :

1. Centre industriel de regroupement, d'entreposage et de stockage à Morvilliers dans l'Aube.
2. Centre de stockage de l'Aube, à Soullaines.

Nous avons donc tout intérêt à améliorer la sensibilité des détecteurs. Finalement nous l'avons augmenté d'un facteur 30 à 50, ce qui est un gros atout pour la démonstration de sûreté de nos colis » souligne Thierry Advocat.

... conditionner et traiter

Le cœur des activités est évidemment de traiter et conditionner les déchets de manière à réduire les volumes, immobiliser les radionucléides au sein d'une matrice pour les confiner. La R&D porte, à la fois sur l'accompagnement de l'opérabilité des filières existantes et l'extension de leur domaine de fonctionnement, et sur la mise au point de nouvelles filières de traitement/conditionnement. Par exemple, bien que la robustesse des colis HA vitrifiés soit déjà démontrée sur des dizaines de milliers d'années, les recherches se poursuivent sur le comportement à long terme des verres : tenue à l'eau, résistance à l'auto-irradiation, stabilité thermique, interaction avec l'argile du futur site de stockage géologique Cigéo²... « Nous atteignons aujourd'hui des niveaux de démonstration très élevés, d'ailleurs reconnus par les avis de l'ASN, de l'IRSN³ et de la CNE⁴ » affirme Thierry Advocat. Cet effort se justifie notamment par le fait que les colis de déchets vitrifiés contiennent 98 % de l'activité

Notes :
2. Centre industriel de stockage géologique, situé à Bure (Meuse/Haute Marne). C'est le futur centre de stockage profond des déchets de haute et moyenne activité à vie longue.

3. Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.

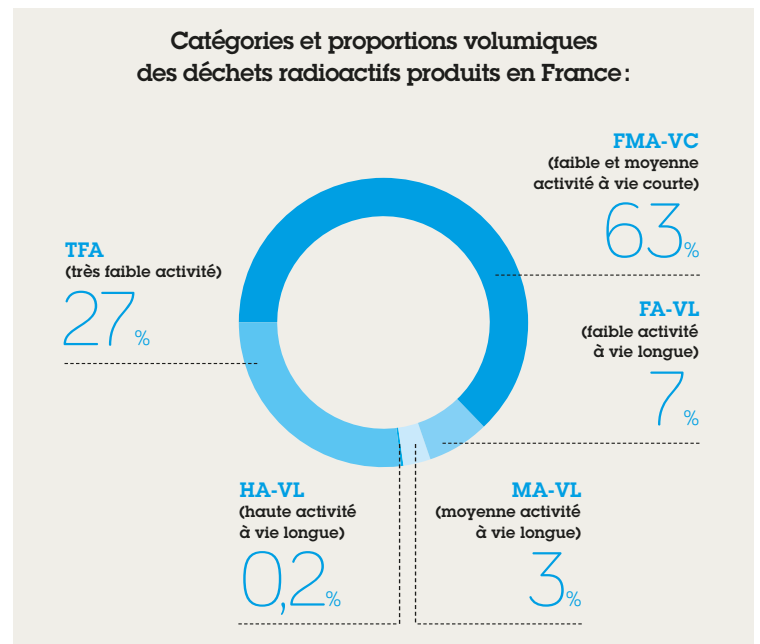
4. Commission nationale d'évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et déchets radioactifs.

5. Arrêté en 2010, Phénix est un réacteur à neutrons rapides construit en 1968 à Marcoule.

Corium

Magma d'éléments métalliques et minéraux résultant de la fusion du cœur d'un réacteur.

Catégories et proportions volumiques des déchets radioactifs produits en France :



radiologique de tous les déchets issus des activités nucléaires en France. La définition de nouvelles filières de gestion et de solutions adaptables aux procédés réels part d'exigences de sûreté. Par exemple, « tant de siècles de résistance pour une matrice immobilisant les déchets dans leurs fûts métalliques ». De même, les équipes du CEA-DEN étudient la cinétique de résistance des colis en béton vis-à-vis de la carbonatation par le CO₂ de l'atmosphère afin de retarder son vieillissement. Il faut parfois examiner le cas de certains déchets « exotiques » comme les liquides organiques corrosifs, les boues insolubles ou les déchets contenant du mercure (TFA voire FMA-VC représentant des volumes faibles). Le CEA a également mis au point un procédé de traitement du sodium, fluide caloporteur de Phénix⁵, afin de le rendre non réactif vis-à-vis de l'air et de l'eau.

Une R&D valorisée hors CEA

Si le CEA crée des outils pour ses besoins propres, il a également vocation à développer des solutions pour la filière nucléaire dans son ensemble. L'Andra en est l'un des principaux bénéficiaires, que cela soit pour la définition des colis ou le développement de concepts techniques des ouvrages des deux futurs centres de stockage : Cigeo pour les colis HA-VL et MA-VL et un site en sub-surface également en

cours de définition pour les colis FA-VL (déchets miniers radifères, graphite des anciens réacteurs, boues bitumées). En témoignent, par exemple, la conception, la réalisation et la mise en place en septembre 2014, par le CEA-DEN, d'un bouchon de scellement argileux sur une maquette à échelle réelle représentative d'une galerie de Cigeo. Areva et EDF sont les premiers partenaires industriels du CEA qui travaille aussi avec des acteurs étrangers comme Engie (Belgique), Sellafield LTD (Grande-Bretagne), Hitachi (Japon)... « Notre technique de découpe laser pilotée à distance a donné lieu, en 2015, à une première étude de faisabilité pour le traitement du corium de la centrale de Fukushima Daïchi, à l'issue d'un appel à projet international » indique par exemple Christine Georges, chef du programme « R&D pour l'assainissement-démantèlement » au CEA-DEN.

Autre preuve de la pertinence de cette R&D : dix des douze thèmes retenus en juillet 2015 à l'occasion de l'appel à projets « Optimisation de la gestion des déchets radioactifs de démantèlement » de l'Andra, lancé via l'ANR et financé par les Investissement d'Avenir, impliquent des équipes CEA (dont huit relevant de CEA-DEN). Une deuxième édition de cet appel a été lancée en novembre 2015. ♦

Cadres réglementaires

La loi-programme du 28 juin 2006, « relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs », fixe le cadre général : options de stockage, rôle et financement de l'Andra, obligations des producteurs de déchets. Elle se décline en Plans nationaux de gestion des matières et des déchets radioactifs. Le PNGMDR 2013-2015 intègre les exigences de la directive européenne du 19 juillet 2011.

La loi du 13 juin 2006 « relative à la transparence et à la sécurité en matière nucléaire » a, entre autres dispositions, renforcé le rôle de l'ASN, qui a un droit de regard sur les aspects techniques, humains et financiers de la gestion des déchets. Le CEA détient également des déchets d'activités militaires (à Marcoule notamment), qui relèvent de la surveillance exercée par l'Autorité de Sûreté Nucléaire Défense (ASND).

À chaque déchet, sa filière

Selon leur nature, les déchets suivent différentes filières de traitement et de conditionnement. Dans tous les cas, il s'agit de réduire autant que possible leur volume, d'immobiliser les radionucléides et d'opposer une barrière physique aux rayonnements.

Effluents liquides, résidus solides, émetteurs de radioactivités diverses, matériaux compressibles ou non, se prêtant ou non à l'incinération : autant de types de déchets qui exigent chacun un traitement particulier. Le CEA a donc développé les filières techniques et construit les installations de traitement/conditionnement et d'entreposage nécessaires. Certaines, ayant aujourd'hui plus d'un demi-siècle, doivent être rénovées ou remplacées pour répondre

aux nouvelles exigences de sûreté et de radioprotection. « *L'objectif est de répondre à la réglementation, mais aussi de mutualiser les coûts d'investissement et d'exploitation lorsque c'est possible, et bien sûr de s'adapter au flux de déchets* » explique Marie-Paule Elluard, responsable des 22 installations (INB ou ICPE) de ce parc. Le détail des filières dépend de l'activité et de la période des déchets. Ceux à vie courte sont en général envoyés au CIREs ou au CSA de l'Andra. Par

exemple, les gravats TFA qui représentent le plus gros volume, sont placés dans des caissons ou des big-bags de chantier, de manière la plus compacte possible, et envoyés au Cires après contrôle radiologique. Les déchets FMA-VC exigent des traitements et conditionnements plus poussés. Les objets solides (ferrailles, verreries, tenues, tuyaux, pompes, filtres...) peuvent être placés dans des conteneurs ou, lorsque c'est possible, préalablement compactés et immobilisés dans une matrice cimentaire remplissant les fûts. « *Certains objets comme les bombes aérosol ou les flacons contenant des liquides, sont interdits au pressage et au stockage* » précise Marie-Paule Elluard. Les matériaux homogènes (poudres, boues de concentration des effluents liquides, etc.) sont quant à eux directement inclus à la matrice, de type ciment ou bitume, par malaxage. Les colis de déchets à vie longue (HA, MA et FA) du CEA sont actuellement entreposés sur ses sites. Parmi eux, les déchets peu irradiants, traités à Cadarache, sont compactés en galettes incluses dans un colis dans lequel est injectée une matrice cimentaire de blocage. Les colis sont ensuite entreposés dans l'installation Cedra. Les objets hautement irradiants, actuellement en entreposage d'attente dans les installations où ils ont été produits, seront entreposés de façon centralisée dans l'installation Diadem (Marcoule). Ils seront pour cela placés dans des conteneurs en inox, pour décroissance radioactive. Dans cinquante ans, ils seront repris, inclus dans une matrice et dirigés, selon leur activité résiduelle, soit vers un stockage de surface (pour les FMA-VC), soit vers Cigeo (MA-VL). ♦♦♦



Études du comportement à long terme des colis de déchets à haute activité.

Quelques exemples

Déchets incinérables : un détour par Centraco

Les déchets incinérables (gants, combinaisons, solvants organiques, résines) FMA-VC sont réduits en cendres à l'usine Centraco (centre nucléaire de traitement et de conditionnement), afin de diminuer leur volume et les rendre acceptables sur les sites de l'Andra. Situé à Marcoule, cet incinérateur appartient à la Socodei (société pour le conditionnement des déchets et des effluents industriels), filiale à 100 % d'EDF. Les cendres sont ensuite mêlées à une matrice ciment puis conditionnées en fûts qui partent, selon leur activité, vers les centres de l'Andra.

Boues bitumées : un chantier emblématique

Les effluents liquides FMA, MAVL générés par les opérations de recyclage du combustible usé de l'usine UP1 de Marcoule étaient traités chimiquement pour coprécipiter les radionucléides. Les sels de coprécipitation résultant formaient des boues activées qui étaient malaxées à chaud avec du bitume, lequel était ensuite coulé dans des fûts métalliques... Environ 60 000 fûts ont été entreposés dans des casemates de béton à Marcoule. L'état de certains de ces fûts (oxydés, parfois déformés) et l'évolution de la réglementation des entreposages, imposent le reconditionnement de tous ces colis. Ils sont repris par télémanipulation et insérés dans des « sur-fûts » en acier inoxydable, puis placés dans l'entreposage intermédiaire polyvalent (EIP, mis en service en 2000 à Marcoule).

Au passage, certains d'entre eux font l'objet de microprélèvements par carottage, et les échantillons sont envoyés au laboratoire pour analyse physico-chimique.

Il s'agit, avec les nouveaux outils de caractérisation développés par le CEA-DEN, de mieux mesurer les radionucléides qu'ils contiennent et préciser leur composition chimique. « Depuis le début des années 2000, les équipes du CEA-DEN ont assuré la maîtrise d'ouvrage des opérations de reprise d'environ 12 000 fûts sur les 60 000 » précise Thierry Advocat.

Diadem : un entreposage ad hoc

Le site historique du CEA, Fontenay-aux-Roses, accueillait jusqu'en 1995 les activités de recherche dans le domaine du retraitement des combustibles nucléaires, du plutonium, des transuraniens, des déchets et de leur caractérisation.

Les cellules blindées de ses installations ont donc vu passer des matériaux très hautement radioactifs.

Leur démantèlement produit aujourd'hui des déchets d'activité moyenne à vie longue. Incompressibles, ils sont conditionnés dans des conteneurs en acier. En attendant l'ouverture future de Cigéo, il faut les entreposer. Ces colis étant très irradiants, le CEA-DEN a dû concevoir et construire une installation spéciale, Diadem, où toutes les manipulations, de la réception à l'entreposage, s'effectuent à distance par des moyens téléopérés. Après une enquête publique favorable, et avec l'autorisation de l'ASN, sa construction a commencé en mai 2015 à Marcoule. Outre ces déchets, Diadem recevra tous ceux fortement irradiants du CEA (notamment ceux de Phénix) et entrera en service en 2018.

Déchets magnésiens : un ciment haute performance

Construits à partir de 1955, et arrêtés entre 1968 et 1984, les réacteurs G1, G2 et G3 de Marcoule appartenaient à la filière uranium naturel-graphite-gaz (UNGG). Leurs assemblages combustibles étaient constitués de barreaux d'uranium contenus dans des gaines de magnésium. Aujourd'hui, ces gaines vides sont entreposées dans des fosses bétonnées de l'usine UP1, qui retraitait les combustibles usés.

Plus de 1 600 tonnes de tubes de magnésium irradié attendent d'être traités. La R&D porte en particulier sur la définition et la réalisation d'une matrice en ciment qui immobilisera ces déchets moyennement radioactifs. Les nouvelles formulations à l'étude sont celles d'un matériau minéral « géopolymère » base d'aluminosilicates de sodium.

Elles ont montré leur capacité à réduire très fortement l'aptitude à la corrosion du magnésium, et donc la production d'hydrogène lors de la fabrication.

Cybersécurité



Un code caméléon pour une sécurité sans faille

Le polymorphisme de code informatique consiste à changer son apparence pour compliquer voire empêcher le piratage ! C'est là toute la stratégie visée par la technologie de génération dynamique de code, développée au CEA-List, qui modifie ce même code pendant son exécution, tout en conservant l'intégrité de ses propriétés fonctionnelles.

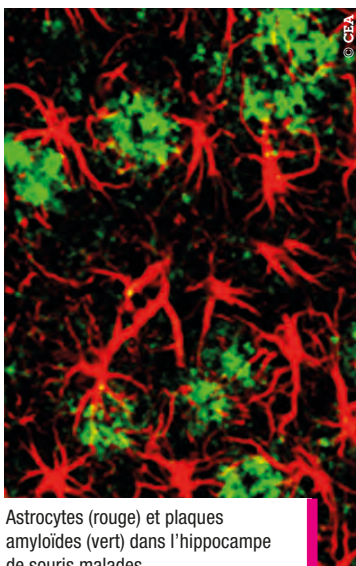
Les évaluations expérimentales de cette solution montrent une robustesse augmentée d'un facteur supérieur à 200 par rapport à un système classique, avec un faible coût de mis en œuvre ! Par ailleurs, la technologie est parfaitement adaptée aux petites plateformes matérielles, disposant de peu de ressources de calcul et de mémoire, comme celles du marché de l'Internet des objets. Elle peut également s'appliquer à des plateformes embarquées plus puissantes (smartphones et tablettes), ainsi qu'aux serveurs. AL

Note :
1. Opérateur de réseau de chaleur grenoblois

Efficacité énergétique

Chauffer à point nommé!

« Notre stratégie est d'améliorer la maîtrise des températures à injecter sur le réseau de chaleur, sans que cela nuise au confort des usagers, explique Philippe Papillon du CEA-Liten. Il s'agit d'anticiper les besoins d'énergie à tous moments de la journée et en fonction des saisons, et de tenir compte de la dynamique de propagation de la chaleur sur le réseau. » Pour y parvenir, une équipe du CEA-Liten, avec la CCIAG¹, a mis au point un logiciel d'analyse d'informations (via des capteurs de débit et de température) et de contrôle des actionneurs (pompes, générateurs additionnels). Le dispositif est actuellement testé sur un simulateur numérique composé d'un échantillon représentatif de 26 consommateurs. Une validation en environnement réel suivra prochainement. AG



Astrocytes (rouge) et plaques amyloïdes (vert) dans l'hippocampe de souris malades.

Thérapie génique

Maladie d'Alzheimer : la voie du cholestérol

Le métabolisme du cholestérol cérébral est perturbé dans la maladie d'Alzheimer (MA). C'est ce que vient de démontrer une équipe de recherche française¹.

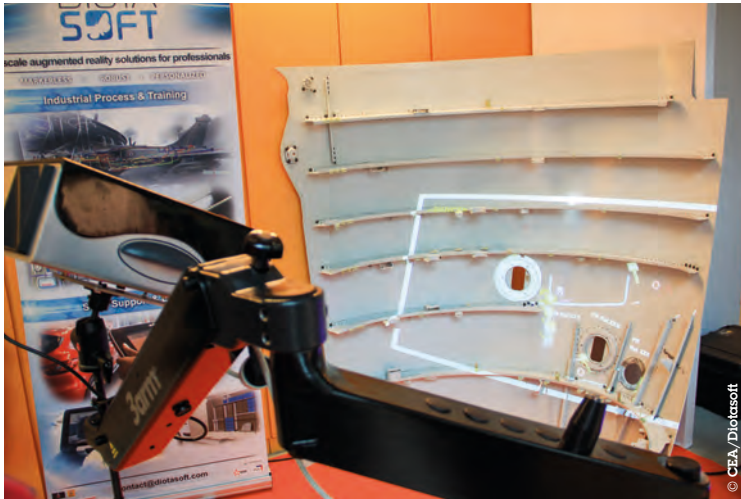
Pour ce faire, les scientifiques ont surexprimé, par injection d'un vecteur de thérapie génique dans des modèles de rongeur, l'enzyme CYP46A1 capable d'éliminer le cholestérol en excès. « Elle le transforme en 24-hydroxy-cholestérol, une forme soluble qui lui permet de franchir librement la barrière hématoencéphalique » précise Nathalie Cartier, coordinatrice de ces travaux au CEA-I2BM. En augmentant l'efflux de cholestérol hors du cerveau, les modèles rongeurs, présentant des plaques amyloïdes ou l'accumulation de protéines Tau, les deux lésions typiques de la MA, ont vu leur état s'améliorer : rétablissement de la mémoire et des fonctions synaptiques...

Ces résultats permettent d'envisager une approche de thérapie génique chez des patients atteints d'une forme précoce et sévère de la MA. « Afin de proposer un essai clinique à moyen terme chez les patients, nous poursuivons les dernières étapes de validation du vecteur clinique et du protocole neurochirurgical » conclut Sandro Alves, chef de projet au CEA-I2BM. AL

Note :

1. Inserm / CEA / Université Paris-Sud.

Usine du futur

Booster la réalité
pour plus d'efficacité

Diotasoft, start-up essaimée du **CEA-List**, propose une nouvelle technologie logicielle en réalité augmentée. Précise et robuste, elle permet de superposer des informations virtuelles sur une scène réelle, sans ajout de marqueurs visuels. Grâce à un recalage précis et en temps réel entre ces deux informations, un opérateur peut ainsi visualiser les opérations à effectuer soit sur des dispositifs d'affichage (tablette, PC ou lunettes de réalité augmentée), soit directement projetées sur un objet. Destinée au secteur industriel, cette technologie est capable de se connecter directement aux systèmes d'information industriels (*plug and play*) et de s'intégrer à des dispositifs matériels standards. AL

Oncologie

Une meilleure
dosimétrie pour
la radiothérapie
interne

L'yttrium-90 est un radionucléide utilisé pour traiter les tumeurs du foie par radiothérapie interne sélective. Mais la connaissance de son activité dans les flacons fournis aux hôpitaux avant injection présente une incertitude relative de 10 %. Un chiffre que les chercheurs du **CEA-List** ont réussi à diminuer de moitié ! Comment ? En mettant au point une procédure de dissolution chimique complète des microsphères marquées à l'yttrium-90. La solution contenue dans les flacons est alors homogène, permettant une mesure d'activité plus précise. Les hôpitaux peuvent ainsi bénéficier d'un meilleur étalonnage des instruments pour la mesure de l'activité des microsphères injectées aux patients. AL

Microélectronique

Vers une apnée mieux surveillée



Vecteur hydrogène

Tension sous contrôle

Introduire des micro-instrumentations dans les piles à combustibles (PAC) ? Des équipes du **CEA-Liten** démontrent que c'est possible en intégrant un circuit électronique entre les plaques bipolaires d'une PAC au cours de l'étape d'assemblage. La maîtrise de la technologie PEMFC et du micro-usinage sur substrat souple ont permis l'intégration optimale de ce circuit de **transposition de tension**, récemment breveté par le CEA. Les chercheurs envisagent à présent l'impression directe de tels circuits électroniques sur les plaques ou sur les assemblages-membranes-électrodes (AME) de la PAC. AG

Transposition de tension

Circuit transmettant les données de tension de chaque cellule de la PAC sur le signal d'impédance de tout l'empilement.

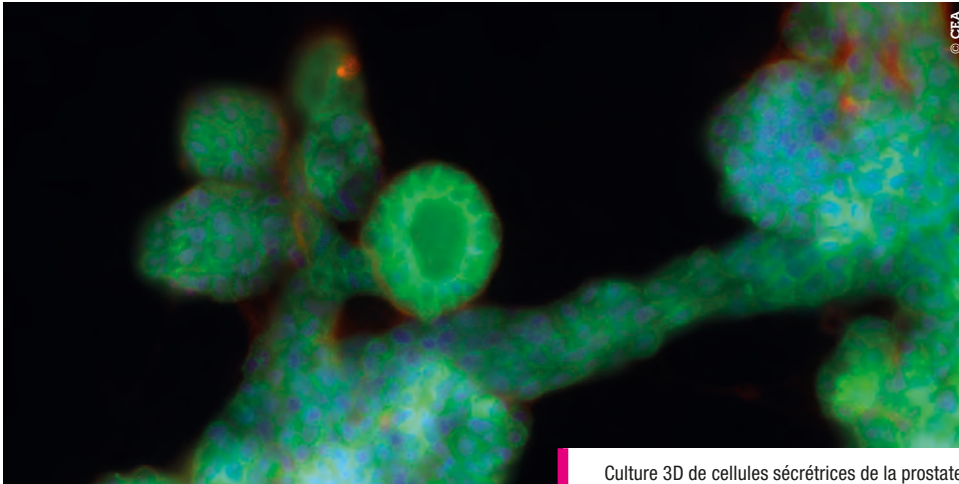
Améliorer le diagnostic et le suivi à l'hôpital des personnes souffrant d'apnée du sommeil ? Cela sera bientôt possible grâce au « Patch santé » développé par **CEA Tech**.

Sur un support de 4 x 5 cm et 3 mm d'épaisseur, les chercheurs réussissent à placer des capteurs pour mesurer l'oxygénation du sang et l'activité cardiaque. Ce dispositif intégré, beaucoup moins invasif que les outils actuels, est souple pour s'adapter à la physiologie du patient et ainsi suivre en temps réel ses constantes. De plus, il est de faible consommation.

À terme, un capteur de CO₂ sera également intégré sur le patch, pour une utilisation à domicile. AL

Culture cellulaire

À chaque cellule sa microcapsule



Culture 3D de cellules sécrétrices de la prostate.

Étudier la prolifération et la différenciation d'une seule cellule : voici ce qu'une équipe du CEA-IRTSV est parvenue à faire en développant une nouvelle technique microfluidique de culture d'**organoïdes** en 3D. Celle-ci repose sur des microcapsules, ou microgoutelettes, de 200 microns de diamètre à l'intérieur desquelles il est possible de cultiver, de façon maîtrisée, une ou plusieurs cellules. « *Les méthodes classiques de culture 3D aujourd'hui utilisées sont performantes, mais limitées par la croissance anarchique des cellules dans le milieu explique Xavier Gidrol, chercheur au CEA-IRTSV. En permettant plus de contrôle, notre technique offre alors des modèles d'études de l'humain plus précis et plus proches de la réalité physiologique du tissu.* » Avec ces microcapsules, les scientifiques ont déjà pu isoler et étudier une cellule sécrétrice de la prostate : « *nous souhaitions savoir si une cellule unique contenait l'information nécessaire pour générer à elle seule un acinus, structure pluricellulaire et différenciée où sont produites les sécrétions. Et la réponse est oui !* » conclut le chercheur. Cet outil va donc impacter la compréhension du vivant tant sur le plan fondamental, par exemple pour l'étude des cellules-souches et du développement, que sur le plan appliqué, notamment dans le domaine pharmaceutique. AL

Organoïdes

Structure ressemblant à un organe.

Supernovæ

Corps résultant de l'explosion d'étoiles massives.

Trou noir

Corps dont le champ gravitationnel très intense empêche la matière et les rayonnements de s'en échapper.

Astrophysique

La Voie lactée fait des bulles

Superbulles, lobes, filaments : les gaz extrêmement chauds du cœur de la Voie lactée ont des structures variées qui témoignent d'épisodes d'activité très intense. Pour les traquer, le satellite XMM-Newton de l'EsA sonde l'Univers dans le domaine d'énergie de 0,1 à 12 keV, correspondant à des gaz portés à plusieurs millions de degrés. Plus d'une centaine de ses observations sont aujourd'hui compilées dans un atlas inédit par une équipe internationale associant des chercheurs du CEA-Irfu. De précieuses voire inédites informations sont ainsi mises à la disposition de la communauté scientifique. « *Nous avons notamment découvert des superbulles de plusieurs dizaines d'années-lumière qui ont sans doute été produites par plusieurs supernovæ. Cela peut être interprété comme le produit de l'activité passée intense du trou noir supermassif central de la galaxie* » indique l'astrophysicien Andrea Goldwurm. AG

Télécommunication

Deux antennes dans un boîtier

Pari tenu ! Des chercheurs du CEA-Leti ont su optimiser les antennes des **paggers** de TPL Systèmes en intégrant deux standards de communication dans un seul appareil, tout en conservant la forme de celui-ci. Plus discrètes et moins gênantes pour l'utilisateur, les antennes sont par ailleurs deux fois plus performantes. Une telle prouesse technique a nécessité le développement d'un banc spécifique de mesure radiofréquence/optique pour les antennes ultraminiaturisées. Cet équipement comprend une **chambre anéchoïque** pour mesurer précisément les propriétés des antennes à relativement basse fréquence, ici 400Mhz et 900/1800Mhz. AL

Pager

Terminal portatif pour la réception de messages envoyés par radio fréquence.

Chambre anéchoïque

(ou chambre sourde) Salle d'expérimentation dont les parois absorbent les ondes sonores ou électromagnétiques pour empêcher les échos pouvant perturber les mesures.



© CEA/TPL Systèmes

Caractérisation

Analyses radiologiques à domicile !



« Flexibles et réactifs, ils ont été conçus pour répondre aux besoins accrus en analyse de radioactivité d'échantillons de sols de sites pollués, notamment lors de chantiers d'assainissement » : c'est ainsi que Vincent Goudeau, ingénieur de la Direction des sciences du vivant du CEA, décrit les laboratoires mobiles qu'il a développés. Ce sont des conteneurs transportables équipés de matériel de préparation chimique, de spectromètres (alpha, gamma) et d'un compteur à scintillation liquide pour effectuer des caractérisations radiologiques *in situ*. Le transport d'échantillons vers des laboratoires extérieurs est alors évité, ce qui permet de maîtriser les coûts et les délais imposés. Ces laboratoires mobiles font l'objet d'une licence d'exploitation avec la société Eichrom, spécialisée dans la mesure directe et la radiochimie. En ce moment utilisés sur des chantiers d'assainissement du site CEA de Fontenay-aux-Roses, ils peuvent aussi s'adapter à d'autres types de besoins, notamment l'analyse de l'amiante. AL

Nanoélectronique

La gageure d'un transistor CMOS mono-électron

Réaliser des transistors à un électron de quelques nanomètres, au cœur même d'un CMOS : ce défi, personne ne l'a relevé. Sauf des chercheurs de CEA-Inac et du CEA-Leti qui livrent un transistor inséré dans un fil de silicium de 3,4 nm de diamètre¹. De plus, il fonctionne depuis les basses températures jusqu'à l'ambiante. « Ce type de transistor pourrait faire chuter la consommation des circuits et être utile comme détecteur, pompe à électron, mémoire ou dans un processeur quantique » envisage Marc Sanquer du CEA-Inac. AG

CMOS
(Complementary Metal Oxide Semiconductor)
Technologie standard de fabrication de composants électroniques.

Note:
¹. Publié dans Nanoletters.



CHANGER LE QUOTIDIEN

100
innovations
qui vont
changer
votre vie
Préface
de Philippe Starck.
Éditions Dunod.
19,90 €

Recevoir un SMS parfumé ; lire en direct les pensées de son chien ; essayer une robe de soie d'araignée ; manger sa bouteille d'eau ; lire un livre qui s'efface au fur et à mesure... Ces expériences vous sont encore inconnues, mais sans doute pas pour très longtemps ! En vous faisant découvrir plus de 100 innovations originales, imaginées par des startupeurs, des scientifiques, des designers, cet ouvrage dévoile à quoi ressemblera votre vie dans un avenir (très) proche ! Alimentation, santé, éducation, voyages, rencontres, mode... nombreux sont les domaines du quotidien concernés.

WWW

www.soonsoonsoon.com

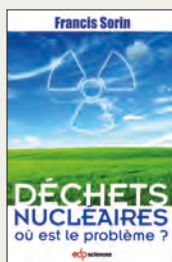
Ces créations ont été détectées par le webmag Soon Soon Soon, qui s'appuie sur une communauté de plus de 1 400 éclairés présents dans 17 pays.



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.

TOUT SUR LES DÉCHETS NUCLÉAIRES



Faut-il avoir peur des déchets nucléaires ? Entre le public inquiet et les ingénieurs rassurants, comment comprendre l'immense décalage des attitudes ? Voici le livre qui tente de répondre très directement à ces questions. L'auteur éclaire sur les problèmes et les solutions liés à la gestion de ces déchets en France. Il s'attache particulièrement au devenir des déchets de haute activité et à vie longue, pour lesquels l'Andra prépare le stockage sous-terrain Cigéo.

Déchets nucléaires, où est le problème ?

Francis Sorin.

Éditions EDP Sciences. 18 €

L'UNION DE LA FRANCE ET DU NUCLÉAIRE



« Il fut un temps où le nucléaire était innocent »... ainsi commence cet ouvrage qui permet de comprendre l'histoire singulière et troublante du mariage de la France, pays le plus nucléarisé au monde, et de l'atome. 70 ans après Hiroshima et la création du CEA, l'auteur expose ses recherches en quatorze chapitres et quelques repères chronologiques de 1939 à 1958. Une œuvre qui est unique par la nouveauté et l'exhaustivité de ses ressources.

L'atome et la France. Aux origines de la technoscience française.

Robert Belot.

Éditions Odile Jacob. 23,90 €

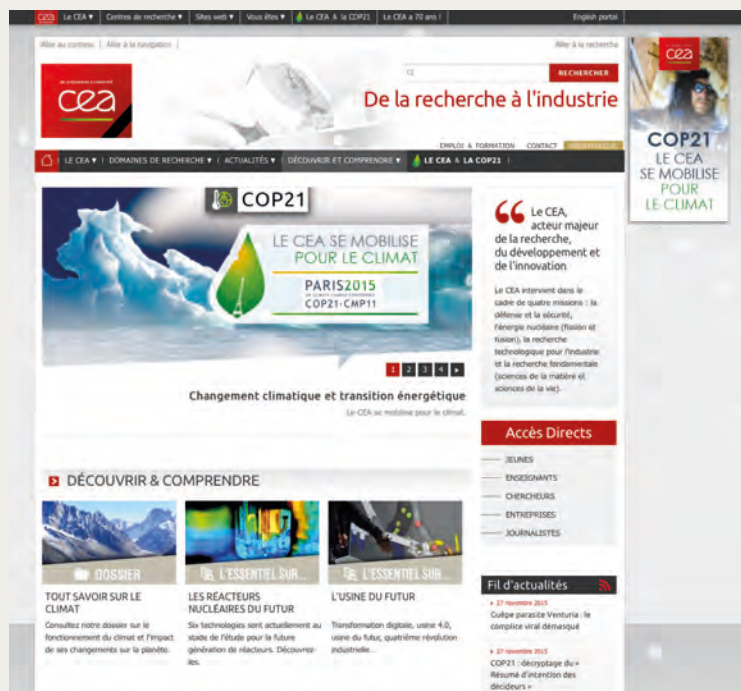
REPAS DE SCIENCES !



Une collection de livres pour savourer les sciences en 100 nombres dont les deux premiers numéros explorent la physique et la chimie. Ils commencent par les plus petits chiffres pour aller jusqu'aux quantités les plus vertigineuses. Savez-vous par exemple que vous prenez du poids chaque année car le prototype international du kilogramme perd 0,000 000 5 kg par an ? Et que le nombre total d'atomes dans l'Univers visible est estimé à 10^{80} .

Déguster La chimie (ou la physique) en 100 nombres.

Éditions Belin. 16,90 €



Sur le web

Le nouveau site Internet du CEA

Le site Internet du CEA fait peau neuve ! Nouveau design, nouveaux contenus, cette version de cea.fr propose aux internautes une arborescence simplifiée structurée en 4 entrées: « le CEA », « Domaines de recherche », « Actualités » et un tout nouvel espace « Découvrir & comprendre » consacré à la culture scientifique. L'occasion de faire le point sur de nombreux sujets tels que les réacteurs nucléaires du futur, l'effet de serre, l'énergie solaire ou encore la radioactivité. Cea.fr, c'est aussi, pour chaque type de public (entreprises, chercheurs, journalistes, enseignants, jeunes), son espace dédié et ses ressources ! Ainsi, les enseignants trouveront des outils et supports très variés pour tous les niveaux et toutes les matières scolaires scientifiques. Les curieux de science pourront également explorer la richesse des contenus multimédias et éditions du CEA proposés dans sa médiathèque (animations, vidéos, photos, posters...). Enfin, une barre de navigation globale, présente sur tous les espaces, permet de découvrir les autres sites web de l'univers CEA.

<http://www.cea.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 Garnier | **Rédactrice en chef adjointe** Amélie Lorec | **Ont contribué à ce numéro:** Fabrice Demarthon | Vahé Ter Minassian | Mathieu Grousson | Patrick Philippon | **Comité éditorial** Andrew Chilton, Alexandra Bender, Hélène Buret, Claire Abou, Elizabeth Lefevre-Remy, Sophie Martin, Brigitte Raffray, Françoise Poggi, Isabelle Dellis | **Iconographie** Michéline Baryard | **Infographie** Fabrice Mathé | **Photo de couverture** A. Gonin/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.



CLIMAT

l'expo à 360°

Actualités • Enjeux • Visions d'artistes

Jusqu'au **20 mars 2016**



Cette exposition, dont Valérie Masson-Delmotte, paléoclimatologue au CEA, est conseillère scientifique, mêle approche scientifique et création artistique pour informer, échanger et sensibiliser sur les enjeux liés aux changements climatiques de notre planète.