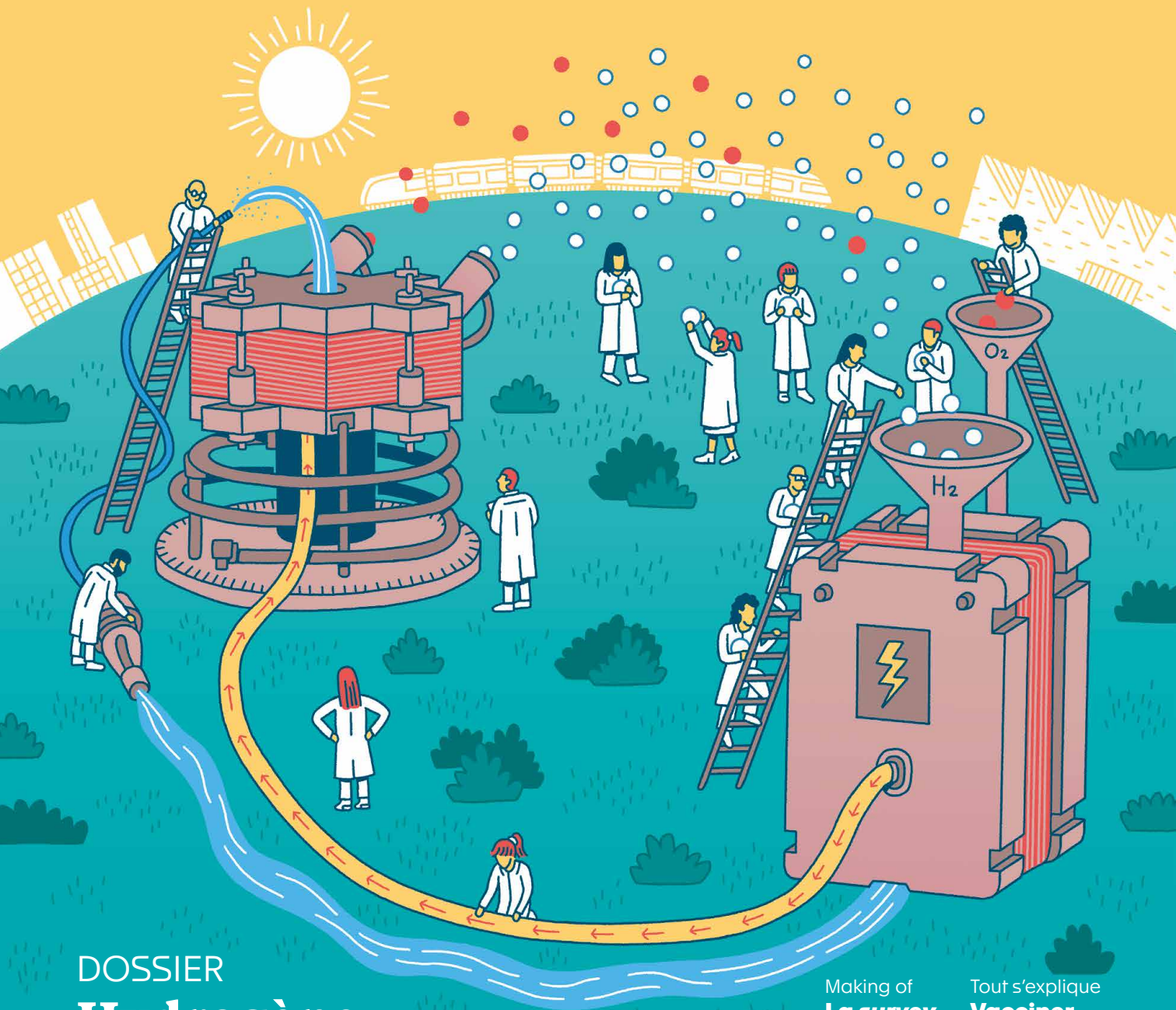


# Les défis

LE MAGAZINE DE LA RECHERCHE IMPLIQUÉE  
#243 – MAI / JUIN 2021

du cea



DOSSIER  
**Hydrogène,  
filière d'avenir** p. 17

Making of  
**La survey  
validation  
de Desi**  
p. 13

Tout s'explique  
**Vacciner  
avec  
de l'ARNm**  
p. 27



### L'humeur de...

Aude Ganier, rédactrice en chef

**À l'origine des filières industrielles françaises du nucléaire et de la microélectronique, le CEA poursuit son action motrice en déployant une technologie de rupture de production d'hydrogène bas carbone. En ce printemps 2021, il inaugure avec Schlumberger la coentreprise Genvia, fondée avec des partenaires privés et publics. Cette nouvelle filière aura bien des défis à relever pour assurer à la France compétitivité et souveraineté en la matière. Elle pourra compter sur les chercheurs qui continuent d'explorer des solutions d'éco-innovation toujours plus frugales pour les transitions énergétique et numérique.**



WWW.CEA.FR

**Éditeur** Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, R. C. S. Paris B77568019  
**Directrice de la publication** Marie-Ange Folacci  
**Rédactrice en chef** Aude Ganier  
**Rédactrice en chef adjointe** Sylvie Rivière  
**Ont contribué à ce numéro** Vahé Ter Minassian, Stéphane Laveissière, Hugo Leroux  
**Comité éditorial** Claire Abou, Luc Barbier, Mathilde Costes-Majorel, Sophie Kerhoas, Elisabeth Lefèvre-Rémy, Camille Giroud, Sophie Martin, Frédérique Tacnet, Anne Orliac, Valérie Vandenberghe  
**Iconographie** Micheline Bayard  
**Illustrations** Jeremy Perrodeau (couverture, p. 27-29), Marta Signori (p. 2, 30)  
**Conception et réalisation** Atelier Marge Design  
 N° ISSN 1163-619X.  
 Tous droits de reproduction réservés.  
 Papier Arctic Volume White FSC. Stipa. Mai 2021.

# SOMMAIRE #243

## EURÉKA

- 03 Informatique**  
Challenges quantiques
  - 04 Économie circulaire**  
Du CO<sub>2</sub> vers le méthane
  - 05 Simulation**  
Apollo s'adapte aux SMR
  - 05 Covid-19**  
Vaccin : une nouvelle piste ?
  - 06 Physique**  
Le long surf des électrons sur une onde laser
  - 07 Maladie de Parkinson**  
Illuminer les neurones
  - 08 Climat**  
Et si l'oxygène venait à manquer dans les océans ?
  - 10 Recyclage PV**  
Sur le fil du diamant
  - 10 Numérique**  
Apprentissage en temps réel
  - 11 Imagerie médicale**  
iMiGiNE, mini-usine de radiotraceurs
  - 12 Datation**  
Léonard et la Flora
- MAKING OF
- 13 La survey**  
**validation de Desi**

## AGORA

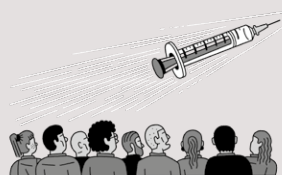
- 32 Le rapport**  
« *Blockchain* »
- 32 Mission accomplie**  
pour l'Otice
- 33 Formation**  
à l'éco-innovation

## DOSSIER ÉNERGIES

# Hydrogène



- 17 Hydrogène, filière d'avenir**
- 20 Genvia : l'union fait la force**  
Entretien
- 21 Décarboner l'industrie**
- 24 La mobilité lourde en toute sobriété**
- 25 Le train à hydrogène passe à la vitesse supérieure**  
Entretien
- 26 Véhicules à hydrogène, l'enjeu sécurité**



## REGARDS CROISÉS

- 30 Matériaux critiques**  
Enjeu de souveraineté  
Luc Aixala et  
Guillaume Pitron



## TOUT S'EXPLIQUE

- 27 Vacciner avec de l'ARN messenger**

## LE COIN DES START-UP

- 35 Sublimed**  
soulage les douleurs

ABONNEMENT  
GRATUIT SUR  
[bit.ly/abonnement-defis](http://bit.ly/abonnement-defis)

ou en faisant parvenir par courrier  
vos nom, prénom, adresse, profession  
et tranche d'âge à :

Les Défis du CEA - Abonnements  
CEA - Bâtiment Siège  
91191 Gif-sur-Yvette

# EURÊKA L'ACTU DES LABOS

INFORMATIQUE

## Challenges quantiques

À l'heure où les recherches sur l'ordinateur quantique battent leur plein, l'amélioration de la fidélité des bits quantiques demeure le principal verrou scientifique. Voici l'une des conclusions de nouveaux travaux du CEA-Irig.

PAR VAHÉ TER MINASSIAN

Le 23 octobre 2020, un article de la revue *Nature* faisait sensation. Google y décrivait les capacités d'un extraordinaire processeur quantique, capable de réaliser en 200 secondes un calcul dont les meilleures machines actuelles auraient eu toutes les peines du monde à venir à bout en 10 000 ans ! De quoi, selon l'entreprise américaine, marquer le début d'une nouvelle ère de l'humanité : celle de la « suprématie quantique ».

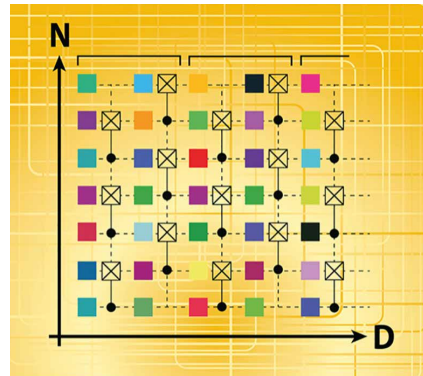
Il n'aura fallu que quelques mois à une équipe française pour « dégonfler » significativement cette annonce. Dans un article de *Physical Review X*, Xavier Waintal et ses collègues du CEA-Irig expliquent comment, à l'aide d'un ordinateur portable standard, ils ont pu démontrer que la simulation de l'expérience de Google est infiniment plus facile que ce que prétendait le géant américain.

### Un taux d'erreurs trop important

Ils ont en effet remarqué que l'algorithme de référence de Google porte sur la simulation de bits quantiques (qubits) à la perfection bien loin de la réalité expérimentale. « Constitué d'un empilement de 53 qubits de haute fidélité, la machine de Google est

*l'une des plus avancées du monde. Malgré cela, elle ne possède qu'une infime partie de la puissance de calcul que posséderait un ordinateur quantique parfait, explique le directeur de recherche. Au prix d'une "compression" consistant à réduire la quantité d'informations employée pour le calcul, son fonctionnement peut par conséquent être simulé sur un ordinateur courant ».*

À l'instar de la machine de Google, l'algorithme inventé par les chercheurs du CEA fait des erreurs ; en retour, il est des milliards de fois plus rapide. « Notre méthode fonctionne car le taux d'erreurs produit par son ordinateur quantique est encore trop important. Au-delà d'un certain niveau, elle ne serait plus compétitive. Il ne s'agit donc pas tant de multiplier les qubits, comme le fait Google, que d'augmenter globalement la fidélité de ces systèmes. Et cela est extrêmement difficile car un ordinateur quantique est un dispositif délicat, susceptible à tout moment de pâtir de décohérence ou d'imprécision. » ●



**« Il ne s'agit pas tant de multiplier les qubits, comme le fait Google, que d'augmenter la fidélité de ces systèmes. »**

Xavier Waintal, directeur de recherche

### LEXIQUE

#### Fidélité

Capacité des qubits à faire fidèlement ce qu'on leur demande, sans déviation.

#### Décohérence

Phénomène omniprésent limitant la fidélité et rendant l'état quantique inutilisable après un certain nombre d'opérations.



#### CEA-Irig

Institut de recherche interdisciplinaire de Grenoble.

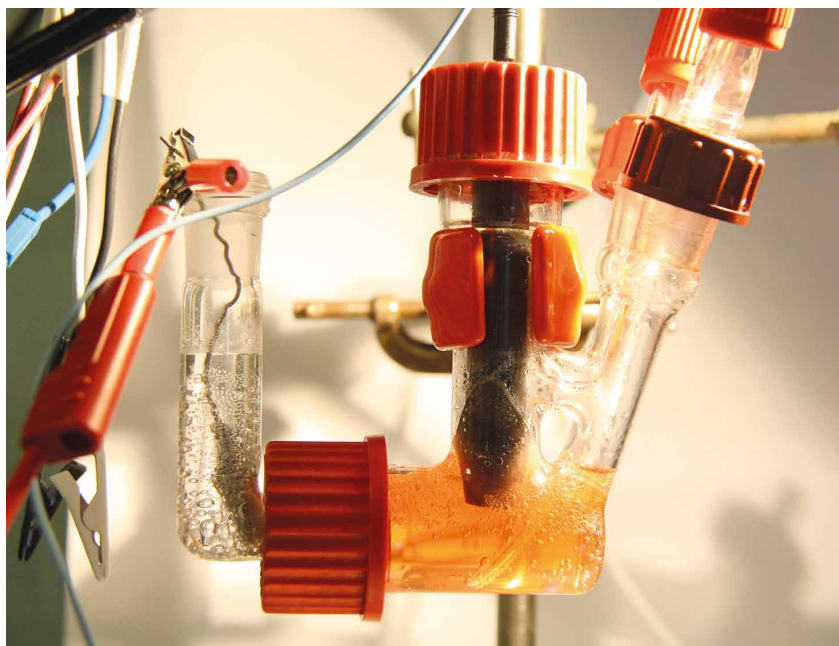
#### ← Ci-contre

« Réseau de tenseur » calculé par l'algorithme de compression d'états quantiques pour simuler une expérience de calcul quantique.



## ÉCONOMIE CIRCULAIRE

# Du CO<sub>2</sub> vers le méthane



© CEA

**Ci-dessus**

Électrolyseur de production de méthane à partir de CO<sub>2</sub>. L'eau est oxydée à l'anode (à gauche) et le CO<sub>2</sub> est valorisé à la cathode de graphite (à droite).

**LEXIQUE****Anaérobie**

Vivant en l'absence d'oxygène.

1. Département de chimie moléculaire (université Grenoble-Alpes) et *Indian association for the cultivation of science* de Kolkata.

**CEA-Irig**

Institut de recherche interdisciplinaire de Grenoble.

## Comment aider à réduire la quantité de CO<sub>2</sub> atmosphérique ?

### Comment obtenir du méthane sans recourir à l'extraction de ressources fossiles ?

### En transformant directement le CO<sub>2</sub> en méthane par la voie de l'électrochimie.

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Respecter les objectifs de l'accord de Paris pour limiter le réchauffement climatique implique de réduire drastiquement nos émissions de CO<sub>2</sub>. Les concentrations atmosphériques relevées année après année indiquent cependant une décroissance bien trop lente. Pour relever ce défi planétaire, des pistes complémentaires sont étudiées et testées pour capter et stocker ce gaz à effet de serre. Il est aussi question de le recycler pour le transformer en produits utiles pour l'industrie ou en vecteurs énergétiques : monoxyde de carbone (CO), acide formique (HCOOH) ou encore méthane (CH<sub>4</sub>). C'est ce que vient de réaliser

en laboratoire une équipe du CEA-Irig et ses partenaires<sup>1</sup> en s'inspirant du fonctionnement de métallo-enzymes.

**Inspiré par la nature**

Ces catalyseurs utilisant des métaux sont présents chez certaines bactéries anaérobies, et leur sont indispensables pour métaboliser le CO<sub>2</sub>. D'où l'idée des chercheurs de construire un catalyseur similaire à base de nickel et de fer, par synthèse chimique. « Dans notre électrolyseur, nous faisons barboter du CO<sub>2</sub> dans de l'eau, en présence du catalyseur greffé sur une cathode en graphite et en apportant de l'énergie électrique, de préférence renouvelable pour une empreinte carbone minimale. L'eau oxydée à l'anode fournit les protons et les électrons nécessaires à la réduction électrochimique du CO<sub>2</sub>. En sortie, le système produit directement un mélange de méthane et d'hydrogène », explique Vincent Artero, directeur de recherche au CEA-Irig.

**Un catalyseur efficace**

Comparé aux rares catalyseurs capables de produire sélectivement du CH<sub>4</sub> à partir de CO<sub>2</sub>, ce nouveau composé cumule bien des avantages : réaction en milieu aqueux et à pression atmosphérique, bonne efficacité énergétique, utilisation de métaux abondants et peu chers.

Mais ces procédés ont-ils un avenir ? « Pas dans l'immédiat, concède Vincent Artero, car le méthane, constituant principal du gaz naturel, est aujourd'hui peu cher. Ce que nous faisons, c'est préparer l'avenir. C'est envisager une économie circulaire du carbone. Lorsque nous déciderons de ne plus utiliser de ressources fossiles, alors ces technologies seront pertinentes. On peut par exemple imaginer des habitations équipées d'électrolyseurs fournissant du méthane sur place ».

L'équipe poursuit donc ses travaux pour dépasser le stade de la preuve de concept, pour mieux comprendre les mécanismes de la réaction et augmenter la proportion de méthane produit par rapport à celle de l'hydrogène. ●

## SIMULATION

## Apollo s'adapte aux petits réacteurs nucléaires

Depuis plus de quarante ans, le CEA développe des codes de calcul neutronique pour les industriels de la filière nucléaire. On pense notamment aux célèbres Cronos2 et Apollo2 qui viennent de connaître une évolution majeure avec la nouvelle génération de code Apollo3®.

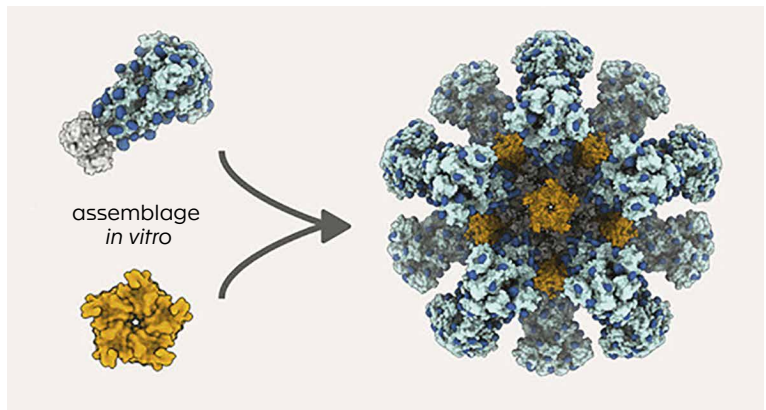
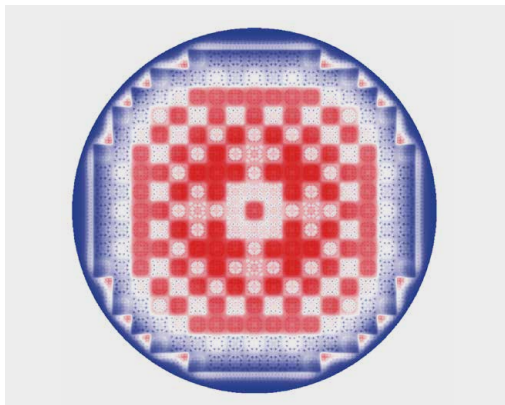
PAR STÉPHANE LAVEISSIÈRE

Le code Apollo3® vient d'être validé pour le projet de petit réacteur nucléaire modulaire (SMR) Nuward™, conduit par EDF et le CEA, avec le soutien de Naval Group et de TechnicAtome. Il simule la réaction auto-entretenu de fission nucléaire : naissance des neutrons, déplacements et interactions avec tous les matériaux du réacteur, disparition (absorption). Ce code permet de modéliser encore plus finement les phénomènes physiques qui se produisent entre le combustible et le flux neutronique. Apollo3® a été développé pour être multi-échelle et également multifilières, c'est-à-dire qu'il s'adapte à plusieurs technologies de réacteurs. « Il sera ainsi l'étalon du calcul neutronique du SMR de Nuward™ qui, rappelons-le, sera de technologie à eau sous pression (REP), permettant à la filière nucléaire française de proposer une offre de centrale entre 300 et 400 MW à l'export, en remplacement de centrales thermiques à combustible fossile », indique Jean-Michel Ruggieri, chef de programme à la Direction des énergies du CEA. ●



### Ci-dessous

Simulation neutronique du cœur d'un REP.



© P.J.M. Brouwer et al., Cell, 184 (2021)

## COVID-19

## Vaccin : une nouvelle piste ?

**Un nouveau candidat-vaccin contre la Covid-19 vient de montrer son efficacité en phase préclinique. Présentation.**

PAR SYLVIE RIVIÈRE

La pandémie de Covid-19 a montré l'importance des stratégies vaccinales pour lutter rapidement et massivement contre tout agent pathogène émergent. Plusieurs vaccins sont déjà utilisés, mais la recherche se poursuit pour explorer de nouveaux modèles, comme cette particule originale présentée dans la revue *Cell* par le CEA-Jacob et l'université d'Amsterdam en mars dernier.

### Un assemblage de protéines

Elle est composée d'un assemblage géométrique de protéines créées *in vitro* (au préalable testé pour son innocuité) couplé à vingt protéines Spike, l'ensemble atteignant environ la taille d'un petit virus. Comme avec tout vaccin, notre système immunitaire produit dès lors des anticorps capables de reconnaître la Spike,

pour ensuite bloquer le développement du virus lors d'une future infection. Et les premiers résultats sont prometteurs : « les études dans différents modèles animaux ont montré une forte production d'anticorps », indique Pauline Maisonnasse, chercheuse au CEA-Jacob. Des primates non-humains vaccinés puis infectés ont vu leur charge virale fortement et rapidement réduire, et ont été préservés des lésions pulmonaires ». ●



### Ci-dessus

Architecture de la particule vaccinale. En bleu : les protéines Spike.

### LEXIQUE

#### Protéine Spike

Présente à la surface du virus SARS-CoV-2, Spike (spicule en français) lui est essentielle pour pénétrer dans les cellules humaines.



#### CEA-Jacob

Institut de biologie François-Jacob (Fontenay-aux-Roses).

## PHYSIQUE FONDAMENTALE

# Le long surf des électrons sur une onde laser

## LEXIQUE

### Impulsion laser femtoseconde

Impulsion ultracourte (quelques femtosecondes,  $10^{-15}$  s), de l'ordre de la période d'une onde électromagnétique de la lumière visible.

### Faisceau collimaté

Faisceau dont les particules ont des trajectoires quasiment parallèles, sans divergence.



### Ci-contre

Les électrons sont comme ces surfeurs, bien centrés au milieu du fleuve, surfant sur l'impulsion unique femtoseconde du mascaret (vague remontant un fleuve) !



© Thierry Dorrier

**Pour la première fois, une équipe impliquant le CEA parvient à accélérer directement des paquets d'électrons subfemtosecondes ( $10^{-15}$  s) dans une onde laser, à une vitesse proche de celle de la lumière. De quoi envisager de nouvelles expériences pour sonder des processus ultrarapides dans la matière.** PAR VAHÉ TER MINASSIAN

Produire des faisceaux de particules de haute énergie lancées à pleine vitesse, à même d'être utilisés dans des expériences de physique fondamentale. L'enjeu n'est pas nouveau. Au sein du grand collisionneur à hadrons (LHC) du Cern, il a abouti à la construction d'un anneau de 27 km de circonférence où des paquets de protons sont accélérés grâce à des cavités radiofréquence (RF). Pourrait-on faire moins imposant, plus économique, en remplaçant par exemple ces cavités RF par des lasers ?

### **Se rapprocher de la vitesse de la lumière dans le vide**

La lumière étant une onde électromagnétique, un faisceau laser est porteur d'un champ électrique. Et celui des impulsions laser femtoseconde intenses peut être un million de fois supérieur à celui d'une cavité RF. « Mais, piéger et accélérer des électrons dans une onde laser s'avère une tâche extrêmement ardue. Car il faut savoir injecter des paquets d'électrons assez brefs (subfemtoseconde, sub-fs) et avec

une vitesse suffisante pour qu'ils restent le plus longtemps possible dans une zone accélératrice du champ laser », indique Henri Vincenti du CEA-Iramis. C'est à cette approche prometteuse que se consacrent depuis plusieurs années le CEA-Iramis et le Laboratoire d'optique appliquée (Loa) depuis l'université Paris-Saclay. En 2015, ils avaient pu démontrer l'injection de paquets d'électrons dans l'onde réfléchie par un miroir plasma, lors d'expériences guidées par des simulations numériques très avancées. Cependant, les électrons fortement accélérés par le champ laser sont déviés par la polarisation « linéaire transverse » du champ. Le faisceau obtenu est alors divergent et difficilement utilisable.

### **Un faisceau collimaté**

Les chercheurs parviennent aujourd'hui, pour la première fois, à générer des faisceaux d'électrons accélérés par une impulsion laser sub-fs avec une polarisation « longitudinale » (orientée selon sa direction de propagation). Pour cela, ils ont focalisé la lumière préalablement polarisée radialement sur un miroir plasma. « Avec cette polarisation, on observe que le faisceau d'électrons arraché au miroir plasma est fortement accéléré au sein de l'onde laser réfléchie, tout en restant bien collimaté », détaillent Fabien Quéré et Neil Zaim de l'Iramis. De quoi envisager la production d'un faisceau pour des expériences de science ultrarapide dans la matière. ●





## MALADIE DE PARKINSON

# Illuminer les neurones

**Comment ralentir l'évolution de la maladie de Parkinson ? C'est l'enjeu d'un nouvel essai clinique, testant l'effet neuroprotecteur de la lumière proche infrarouge. PAR SYLVIE RIVIÈRE**

Si des traitements existent pour atténuer les symptômes de la maladie de Parkinson – administration de dopamine ou plus rarement stimulation cérébrale profonde (voir focus) –, elle reste aujourd'hui incurable. Cette pathologie, qui affecte 6,5 millions de personnes dans le monde, dont 175 000 en France, dégrade progressivement les neurones dopaminergiques de la substance noire du cerveau, conduisant à d'importants troubles moteurs et cognitifs. L'essai clinique en cours à Clineatec, Centre de recherche biomédicale Edmond J. Safra, suscite ainsi bien des espoirs puisqu'il a vocation à ralentir la progression de la maladie.

## Un implant cérébral

L'idée, proposée en 2011 par les Pr Benabid (Clineatec) et Mitrofanis (université de Sydney), consiste à implanter une sonde lumineuse diffusant une lumière proche infrarouge au plus près la zone cérébrale impliquée. Elle s'est depuis concrétisée à

travers le projet NIR (*Near Infra Red*), porté par le CEA, le CHU Grenoble-Alpes, l'UGA et *Boston Scientific*<sup>1</sup>.

« L'implant cérébral repose sur une technologie développée par l'équipe de Claude Chabrol, du CEA-Leti, en collaboration avec *Boston Scientific*. Il est constitué d'un neurostimulateur – l'équivalent d'une batterie – positionné sous la peau au niveau de la clavicule et relié à un module optique. Ce module est le cœur du dispositif. Il est implanté au niveau du crâne et transforme l'électricité en lumière proche infrarouge. La lumière est ensuite acheminée près de la substance noire grâce à une fibre optique plongeant au cœur du cerveau », détaille Cécile Moro, biologiste à Clineatec.

## Un premier patient opéré

Testée en essai préclinique (sur des modèles animaux) avec le soutien du fonds de dotation Clineatec, la méthode a montré d'excellents résultats : la dégénérescence des neurones dopaminergiques est considérablement ralentie et les performances motrices sont améliorées. L'essai clinique de faisabilité et de tolérance est désormais lancé. Un premier patient volontaire, sur les quatorze prévus, a été opéré avec succès en mars dernier. ●

## FOCUS

### La stimulation cérébrale profonde

La technique, inventée par le Pr Benabid, fondateur de Clineatec, consiste à délivrer au patient des impulsions électriques à haute fréquence via des électrodes intracérébrales implantées. Elle réduit significativement les symptômes de la maladie de Parkinson, sans toutefois arrêter la neurodégénérescence. En trente-quatre ans, 200 000 personnes ont été traitées dans le monde.

## LEXIQUE

### Substance noire

Région cérébrale riche en neurones dopaminergiques, participant au contrôle de l'activité motrice.

1. Entreprise américaine spécialisée dans les dispositifs médicaux.



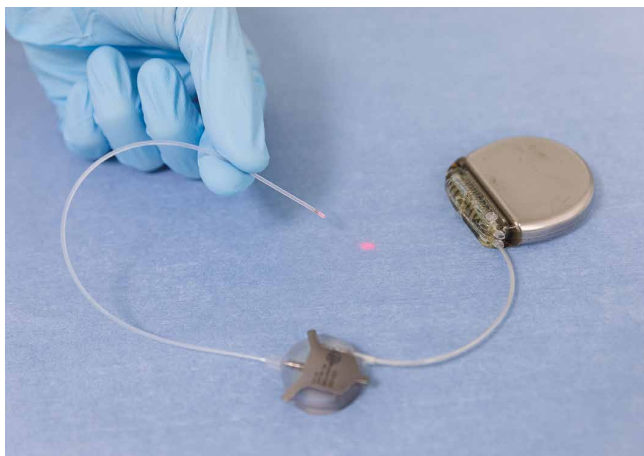
### CEA-Leti

Institut des micro et nanotechnologies et de leur intégration dans les systèmes (Grenoble).



### Ci-dessous

Dispositif intracérébral de neuro-illumination, avec ses trois parties (neuro-stimulateur, module et fibre optiques).



## CLIMAT

# Et si l'oxygène venait à manquer dans les océans ?

**Entre 1% et 7% d'ici 2100. C'est l'estimation de la diminution de la teneur en oxygène dans certaines parties des océans, principalement les zones côtières. Cette baisse constitue déjà une menace pour l'écosystème et la pêche nourricière. En cause : le réchauffement climatique. Après la publication d'un recueil de publications scientifiques dans *Frontiers in Marine Science*, un consortium incluant des chercheurs du LSCE propose un programme d'envergure internationale pour mieux comprendre et anticiper cette désoxygénation.**

PAR AUDE GANIER

L'oxygène ( $O_2$ ) est essentiel à la vie sur Terre. Dans les océans, il régule les grands cycles des éléments nutritifs (azote et phosphore) indispensables au maintien de l'écosystème marin. Or, d'après plusieurs publications récentes, les concentrations en  $O_2$  dans l'océan ouvert et les mers côtières diminuent. Et ce, depuis plus de cinquante ans. Même si cette baisse semble minime, estimée entre 1% à 7% d'ici 2100, elle affecte particulièrement certaines zones où l'oxygène est déjà naturellement limité. Dans ces zones dites « à minimum d'oxygène », les habitats des écosystèmes sont amenés à diminuer voire disparaître, entraînant un affaiblissement des ressources et notamment des poissons pour les populations qui s'en nourrissent.

## Le cycle normal de l'oxygène

Comprenons : dans les océans, le cycle naturel de l'oxygène opère à deux niveaux, vertical et horizontal. Au niveau vertical,

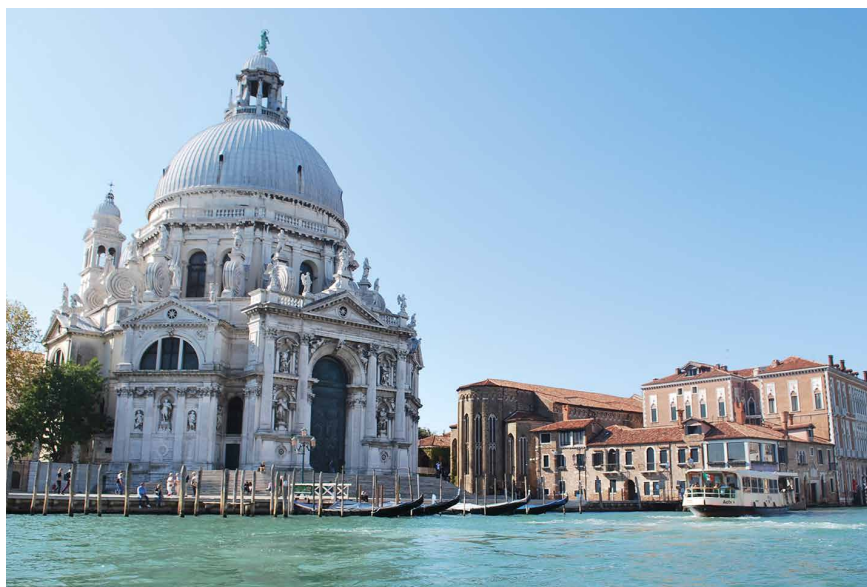
il y a une production d' $O_2$  à la surface de l'océan due à la photosynthèse du phytoplancton. En profondeur, cette teneur en  $O_2$  diminue car elle est consommée par la respiration des bactéries qui se nourrissent de la décomposition du phytoplancton. Les sédiments marins déposés sur le fond sont quant à eux presque dépourvus d' $O_2$  car, d'une part, les mécanismes de photosynthèse ne peuvent opérer faute de lumière et, d'autre part, la consommation d' $O_2$  par les bactéries se poursuit à partir de la matière organique tombant depuis la surface.

Au niveau horizontal, la répartition de l'oxygène varie d'une zone à l'autre en fonction des courants ascendants marins. Particulièrement, les zones de bordures océaniques (au-delà des plateaux continentaux) sont naturellement appauvries en  $O_2$  à partir de 500 mètres de profondeur,

et encore plus dans les zones de remontées d'eau profonde.

## Une mortalité accrue des poissons et mollusques

Au cours de différentes missions ces dix dernières années, les chercheurs ont observé une diminution des concentrations en  $O_2$  dans certaines zones. Et la cause principale est le réchauffement climatique. *« L'atmosphère qui se réchauffe, cumulée à l'énergie solaire, élève la température de la surface des océans. Plus chaude, l'eau est moins dense et se mélange moins. Cela engendre une stratification des couches supérieures de l'océan, formant une sorte de couvercle. Les océans sont alors moins ventilés car l' $O_2$  de surface est moins transféré en profondeur. De plus, lorsque la température de l'eau augmente, l'oxygène est moins soluble c'est-à-dire qu'il pénètre moins dans*





*l'eau*», détaille Christophe Rabouille, climatologue du CEA, au LSCE.

Dans les mers côtières, cette chute des concentrations en O<sub>2</sub> s'amplifie du fait des apports excessifs en sels nutritifs (provenant des engrais agricoles) par les fleuves. Il s'agit du phénomène d'eutrophisation : la production primaire de plancton et d'algues en surface est certes stimulée par ces sels mais, en profondeur, l'intensification de la respiration bactérienne qui se nourrit du phytoplancton mort entraîne une désoxygénation inquiétante des eaux de fonds. « On parle même d'*hypoxie* : la teneur en O<sub>2</sub> dissous devient critique, passant sous le seuil des 63 µmol/l, soit environ 25% de saturation. Et la composition de l'écosystème (poissons, mollusques, invertébrés) commence à être affectée par une mortalité importante », pointe le spécialiste. Cette eutrophisation est particulièrement visible près des embouchures des fleuves et dans les zones proches des côtes.

#### Des phénomènes aggravés en été

Récemment, les chercheurs ont mené deux études dans le golfe du Mexique et dans la lagune de Venise. Dans le golfe du Mexique, la plus vaste zone hypoxique saisonnière mondiale sous l'influence du Mississippi, ils ont observé que cette hypoxie est amplifiée en été. « La faune vivante fuit cette hypoxie ou finit par mourir, ce qui réduit sa capacité à enfouir la matière organique

## « Plus chaude, l'eau est moins dense et se mélange moins. »

Christophe Rabouille, climatologue

*dans les sédiments. La stagnation des débris à la surface des sédiments augmente la consommation d'oxygène dans l'eau de fond (respiration bactérienne), ce qui accélère l'hypoxie*», explique Christophe Rabouille. Dans la lagune de Venise, où les rejets urbains entraînent des phénomènes aggravés au cours de l'été, le scénario serait plus complexe. Il semble que les algues accumulées dans les sédiments en fond de baie, par les vents et les courants en hiver et au printemps, jouent un rôle dominant dans l'apparition d'hypoxie. « De plus, il existerait un risque bien réel de voir du sulfure dissous, issu de la décomposition des algues, envahir les eaux : ce poison menacerait alors la survie de l'écosystème fragile de la lagune », alerte-t-il.

Ces problématiques sont telles que la communauté scientifique a proposé un projet à l'échelle planétaire sur la désoxygénation (GO<sub>2</sub>NE) sous l'égide du programme « Décennie des océans » de l'ONU (2021-2030). ●

#### LEXIQUE

##### Hypoxie

Quantité insuffisante d'oxygène dans un milieu.



##### LSCE

Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (Saclay).



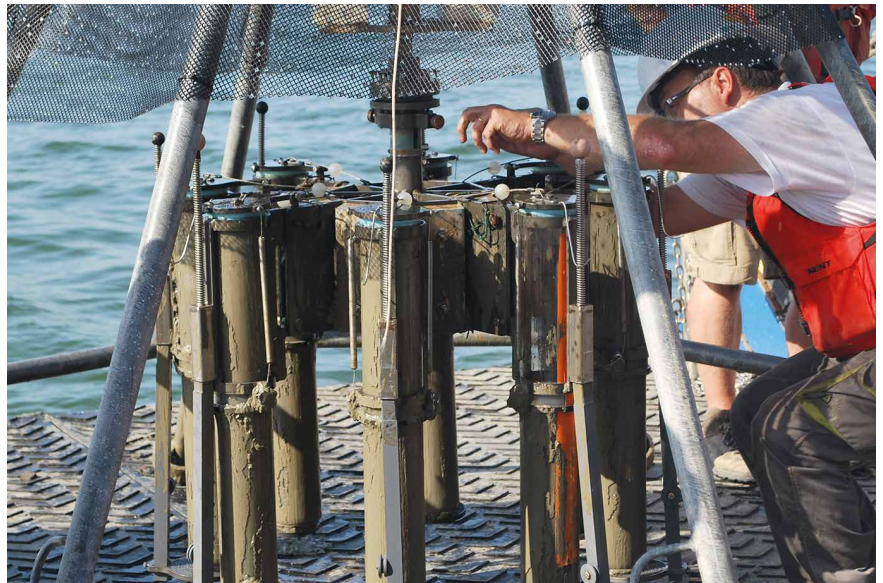
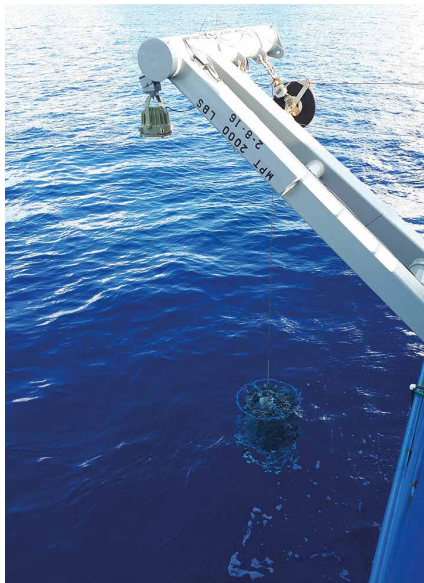
##### À gauche

Dans la lagune de Venise, les chercheurs ont observé l'apparition d'hypoxie en été.



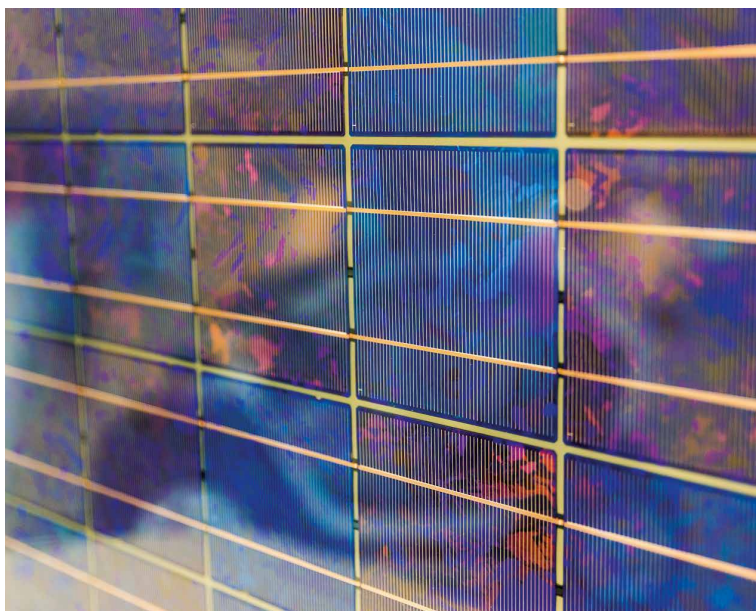
##### Ci-dessous

Les études reposent notamment sur le prélèvement de sédiments marins avec ce type de carottier utilisé lors de la mission dans le golfe du Mexique.



RECYCLAGE PHOTOVOLTAÏQUE

# Sur le fil du diamant



© CEA

**Plus de 10 millions de tonnes de déchets de panneaux photovoltaïques en 2050 en Europe : voici ce que prévoient les estimations sur la base de la durée de vie moyenne de trente ans de ces dispositifs.**

PAR AUDE GANIER

Alors qu'ils recèlent pourtant des métaux comme le silicium, l'argent ou le cuivre, la solution de démantèlement la plus commune consiste à broyer les modules et à les utiliser comme remblai dans le BTP. Cette question préoccupe des chercheurs du CEA-Liten qui ont développé une méthode de récupération des matériaux utiles peu polluante et peu consommatrice d'énergie. Elle consiste à séparer en deux la cellule photovoltaïque, en désolidarisant ses faces avant (verre) et arrière (mélange de polymères) espacées de quelques centaines de microns

seulement, grâce à un fil diamanté. Avec cet équipement expérimental, un module d'un mètre carré peut être traité en une demi-heure. Le verre ainsi récupéré peut-être recyclé et, grâce à l'hydrométallurgie, il est possible de séparer et de récupérer les différents métaux présents dans les poudres de découpe afin de les réutiliser également. Un projet européen débutera prochainement pour développer des équipements industriels capables de traiter plusieurs modules par heure. Ils utiliseront du fil diamanté en bobine pour en contrôler l'usure. Des solutions de refroidissement du polymère pour améliorer son comportement à la découpe sont également à l'étude. ●



CEA-Liten

Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (Grenoble).

NUMÉRIQUE

# Apprentissage en temps réel

**Avis aux développeurs d'algorithmes de traitement de flux de données !**

**Le CEA-List propose en *open source* la plateforme logicielle Streamer qui permet de les traiter en continu sans avoir à les stocker.**

PAR AUDE GANIER

Réseaux sociaux, Internet des objets (IoT)... Le nombre d'applications générant des quantités importantes de données s'est multiplié. Avec elles, le besoin en logiciels de traitement en ligne capables d'apprendre en continu à partir de ces flux de données (*data stream machine learning*). L'enjeu est d'en extraire de l'information et donc de la valeur, tout en observant une certaine sobriété numérique. Pour cela, les logiciels doivent être capables de traiter des flux continus sans les stocker. Pour évaluer l'efficacité de ces outils, les développeurs doivent pouvoir les tester dans des contextes de *streaming* réalistes. L'objectif de la plateforme logicielle du CEA-List, Streamer, est justement de leur fournir cet environnement de test en conditions réelles, en simulant un contexte de flux de données (émission et réception) adapté à chaque situation. Des algorithmes de pré-traitement et de post-traitement des données y sont d'ores et déjà intégrés (classification, réseaux de neurones, etc.). L'utilisateur peut facilement ajouter de nouveaux algorithmes à partir de codes et langages de programmation (Python, R, Java, etc.). Plusieurs métriques d'évaluation des algorithmes sont également intégrées, permettant aux utilisateurs de tester facilement les algorithmes en cours de développement.

Streamer peut être déployée sur n'importe quel système d'exploitation et elle est dotée d'une interface graphique facilitant la supervision des tests sans avoir à entrer dans le code. ●

→ [www.streamer-framework.github.io](http://www.streamer-framework.github.io)



CEA-List

Laboratoire des systèmes numériques intelligents (Saclay).



## IMAGERIE MÉDICALE

# iMiGiNE, mini-usine de radiotraceurs

**Pour détecter une tumeur ou une pathologie neurologique, rien de tel qu'une TEP, aussi appelée PET-Scan. Les possibilités liées à cette technique sont cependant largement inexploitées. Des lacunes qu'entendent bien combler les chercheurs du SHFJ, grâce à la plateforme iMiGiNE.**

PAR SYLVIE RIVIÈRE

La TEP (Tomographie par émission de positons) est une méthode d'imagerie médicale très utilisée pour les diagnostics en oncologie et neurologie. L'examen nécessite d'administrer au patient un radiopharmaceutique. En se fixant sur les tissus à cibler tout en émettant des rayonnements que les praticiens peuvent mesurer, il donne accès à des images précises et en 3D du fonctionnement des organes.

## Premier prototype au monde

La fabrication de ces traceurs radioactifs implique cependant des contraintes techniques majeures. Aussi dispose-t-on seulement sur le marché d'une demi-douzaine de molécules différentes, produites par une poignée d'industriels. iMiGiNE veut changer la donne. Comme l'explique Vincent Lebon, chef du service hospitalier SHFJ, au CEA-Joliot, « *iMiGiNE, conçu en partenariat avec l'industriel PMB, est le premier prototype au monde de production automatisée et miniaturisée de radiopharmaceutiques au plus près du patient* ». Véritable mini-usine, il comprend un cyclotron qui fournit les isotopes radioactifs, un automate de radiochimie à l'échelle microfluidique qui réalise la greffe des isotopes sur les molécules biologiques, la mise en seringue et le contrôle qualité.

Voilà donc un formidable outil qui permettra aux chercheurs de développer des radiopharmaceutiques innovants pour la détection de nouvelles lésions et pathologies, et ce avec une très grande spécificité. « *Le programme ouvre notamment la voie à l'exploitation d'un grand nombre d'isotopes radioactifs à vie très courte* », ajoute Vincent Lebon.

## Vers une médecine personnalisée

iMiGiNE, c'est aussi la promesse d'une médecine personnalisée. « *Ce type d'équipement permettrait de fournir, à la demande et en quelques minutes, le radiopharmaceutique le plus adapté à chaque patient, en fonction de sa maladie* ». Opérationnelle depuis la fin 2020, la plateforme a déjà produit ses premières seringues : deux fois 5 ml de fluorure de sodium marqué au fluor 18, destinés au diagnostic de lésions osseuses. Les premières d'une longue série à venir. ●

## LEXIQUE

### Radiopharmaceutique

Molécule biologique (par exemple un sucre) contenant un isotope radioactif à vie courte.

### Cyclotron

Accélérateur circulaire de particules qui, envoyées sur une cible, génèrent la production d'isotopes radioactifs.



### CEA-Joliot

Institut des sciences du vivant  
Frédéric-Joliot (Orsay).



### Ci-dessous

Bras robotisé multitâches d'iMiGiNE pour la fabrication de radiopharmaceutiques.





## DATATION

# Léonard et la Flora

**C'est la fin d'une énigme vieille de 112 ans. Le buste de la Flora, exposé au Bode-Museum de Berlin, n'est pas de Léonard de Vinci. Chimistes et physiciennes ont mené l'enquête.**

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Est-ce un « de Vinci » ? La réponse n'est pas toujours évidente, même pour les plus grands spécialistes de l'art du maître italien. La science en revanche, rationnelle, permet parfois de trancher. Ainsi en est-il de l'origine du buste en cire de la Flora, déesse romaine des fleurs et du printemps. L'histoire commence 112 ans plus tôt, à Londres. En 1909, Wilhelm von Bode, directeur des musées de Berlin, achète un buste en cire chez un marchand d'art, convaincu qu'il s'agit d'une œuvre de Léonard de Vinci. Dans les mois qui suivent, les visiteurs affluent au Kaiser Museum pour découvrir l'une des rares sculptures conservées de l'artiste. Mais très vite, le doute s'installe. Le sculpteur serait anglais, un certain Richard Cockle Lucas, comme l'atteste son fils dès 1910. Il aurait façonné le buste en 1846, en s'inspirant d'un tableau de l'école du maître. Depuis, faute de preuves scientifiques suffisamment probantes, la question fait débat... jusqu'à ce 15 avril 2021 et la publication d'une ultime analyse.

## Calibration sur mesure

Des chercheuses du Laboratoire de mesure du carbone 14 du LSCE et de l'Institut de recherche de chimie Paris ont soumis la cire de la sculpture à une batterie de tests : analyse par faisceau d'ions, spectroscopie infrarouge, chromatographie en phase gazeuse combinée à la spectrométrie de masse et datation au  $^{14}\text{C}$ . « *La matière utilisée contient de la cire d'abeille, mais est principalement composée de "blanc de baleine"* », raconte Lucile Beck, du LSCE (voir focus). La datation au  $^{14}\text{C}$  doit donc tenir compte de la présence de ces matériaux marins. Le  $^{14}\text{C}$  contenu dans les profondeurs de l'océan et assimilé par les cachalots est en effet beaucoup plus ancien que celui

de l'atmosphère. Difficulté supplémentaire : l'âge de ce  $^{14}\text{C}$  diffère d'une région océanique à l'autre ! « *Il fallait absolument adapter notre technique de datation à cette particularité* », poursuit l'experte. C'est l'une des œuvres de Richard Cockle Lucas qui est venue aider les chercheuses. *Léda et le cygne*, un bas-relief en cire modelé en 1850, à la composition chimique similaire à celle de la Flora. « *Il nous a servi de référence pour mettre au point la calibration tenant compte à la fois des origines marines et terrestres* ». Verdict : les matériaux de la Flora sont datés entre le XVIII<sup>e</sup> et le XX<sup>e</sup> siècle, excluant de fait Léonard de Vinci, mort en 1519. Reste la beauté incontestée de l'œuvre... et le talent de son auteur : Richard Cockle Lucas. ●

## FOCUS

### Le blanc de baleine

Cette substance blanche extraite de la tête de certains cétacés est d'usage courant au XIX<sup>e</sup> siècle pour la fabrication des bougies ou les sculptures, mais est extrêmement rare à la Renaissance.



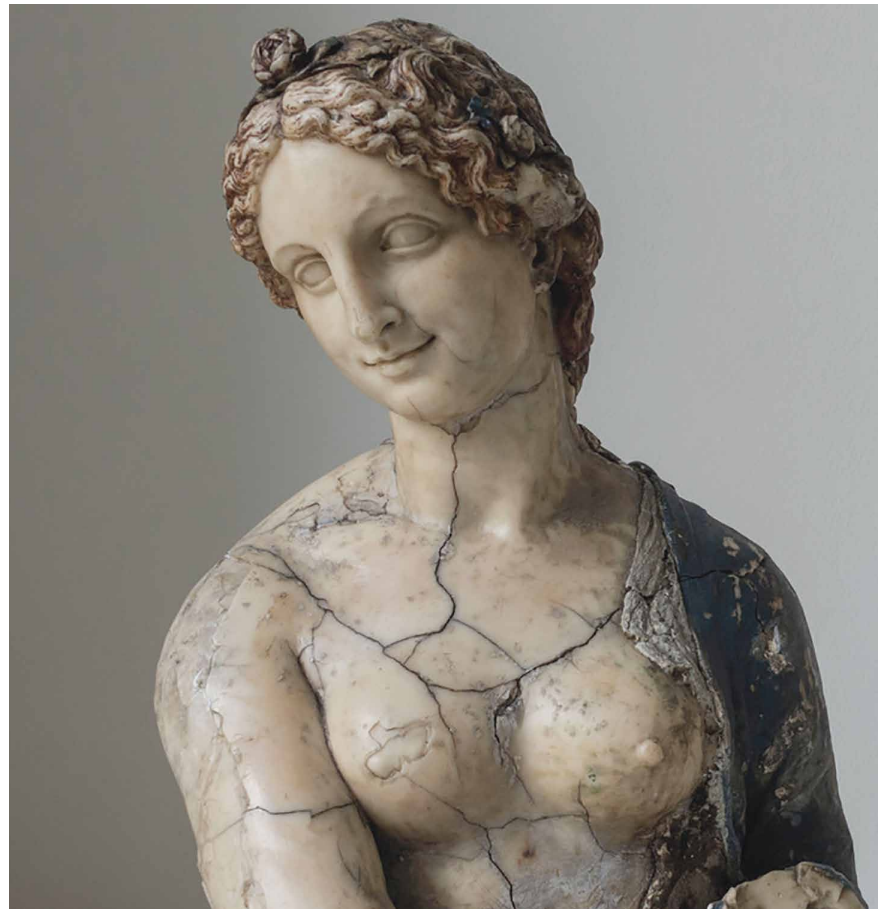
### LSCE

Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CEA-CNRS-UVSQ, Saclay).



### Ci-dessous

Buste de la Flora, numéro d'inv. 5951, Skulpturensammlung, Museum für Byzantinische Kunst (SBM).





# MAKING OF COULISSES D'UN PROJET

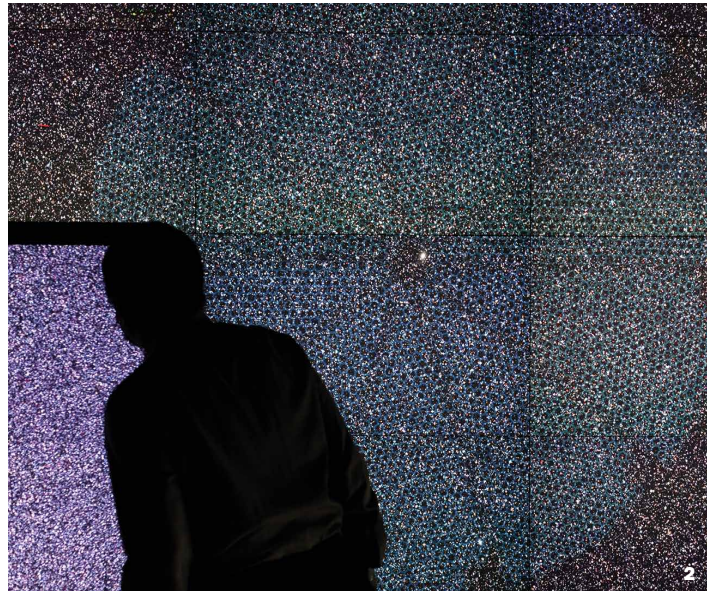
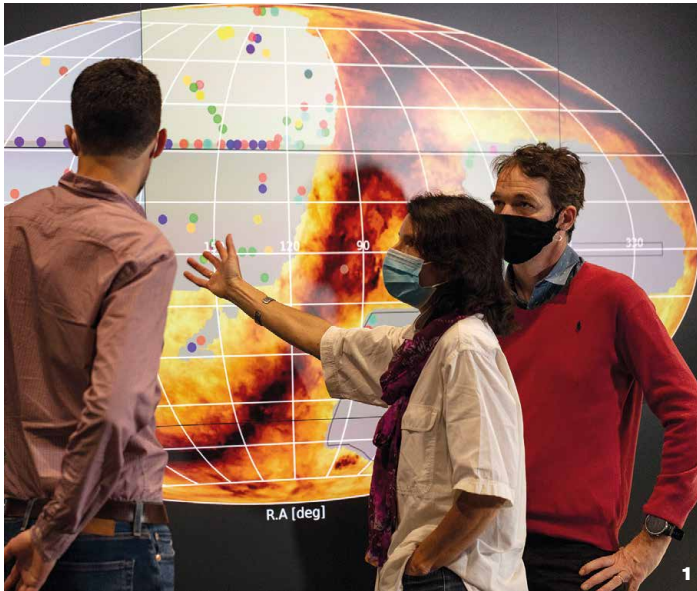
## La *survey validation* de Desi

Mai 2021. Le télescope Desi ouvre ses 5 000 yeux depuis l'Arizona. Objectif : recueillir et analyser pendant cinq ans les spectres de millions de galaxies pour mesurer leur distance par rapport à la Terre. Une précieuse information qui renseignera sur l'accélération de l'expansion de l'Univers et sur l'énergie noire qui en serait responsable. Au préalable, le CEA-Ifu a participé à la *survey validation* (validation du relevé), étape incontournable dans chaque mission astronomique : « cette

*étape a consisté à sélectionner les 35 millions de galaxies que Desi observera et à s'assurer que les objectifs scientifiques pourront être atteints* », explique Christophe Yèche, pilote de cette étape vertigineuse. Tout comme le sera la mission. →

REPORTAGE RÉALISÉ  
PAR AUDE GANIER (TEXTE),  
ET ROMAIN GUITTET (PHOTOS)  
À LA MAISON DE LA  
SIMULATION DE SACLAY.





## EN IMAGES

1 - Les zones grises du planisphère représentent la partie du ciel accessible et les points de couleurs, les champs où Desi a été pointé pendant la *survey validation* (chacun contenant près d'un million d'objets).

2 - Superposition du plan focal du télescope (alvéoles bleues) sur une partie de la carte 2D de l'Univers pour programmer ce que regardera Desi.

## FOCUS

### Une carte 2D record !

Établie à partir de 200 000 images provenant de 1405 nuits d'observations sur trois télescopes et de plusieurs années de données satellitaires, la carte 2D réalisée compte deux milliards d'objets célestes sur une surface de plus de 10 000 milliards de pixels.



CEA-Irfu

Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Saclay).

1

## Sélection

**« En observant 35 millions de galaxies à différentes époques de l'Univers, Desi étudiera le taux de son expansion. »**

**Nathalie Palanque-Delabrouille**, porte-parole de la collaboration Desi

Desi étudiera le taux d'expansion de l'Univers en analysant le rayonnement énergétique des galaxies : *« leur "décalage vers le rouge", lié à leur vitesse d'éloignement, renseigne sur leur distance de la Terre et sur l'expansion »*, précise Edmond Chaussidon, doctorant au CEA-Irfu. Pour choisir 35 millions de galaxies pertinentes, les chercheurs ont au préalable réalisé une carte 2D de l'Univers qui en compte deux milliards. Grâce à de l'intelligence artificielle, ils ont pu identifier quatre types d'objets dont la lumière fut émise à différentes époques de l'Univers aujourd'hui âgé de 13,7 milliards d'années (Mds) : jusqu'à 12 Mds (quasars), depuis 10 Mds (jeunes galaxies bleues), 8 Mds (galaxies rouges), et moins de 4 Mds (galaxies brillantes).

2

## Position

**« En moins de deux minutes, les 5 000 fibres optiques du plan focal sont positionnées pour mesurer 5 000 nouvelles galaxies. »**

**Christophe Yèche**, pilote de la *survey validation* de Desi

Le plan focal de Desi compte 5 000 alvéoles dans lesquelles une fibre optique collecte la lumière et la transmet aux spectrographes. La mission balaiera 14 000<sup>02</sup> du ciel (qui en mesure 40 000<sup>02</sup>) avec un plan focal en couvrant 8<sup>02</sup>. Chaque fibre a dans sa ligne de visée une dizaine de galaxies alors qu'elle ne doit en cibler qu'une seule. Pour cela, des micro-actionneurs placés dans chaque alvéole et pilotés par algorithme la positionnent au micron près. Les observations durent vingt minutes, temps de pose nécessaire car le rayonnement des galaxies est faible. Puis, en moins de deux minutes, les spectres sont générés, le télescope orienté vers une autre région du ciel et les 5 000 fibres repositionnées. Il fallait environ une heure aux précédentes expériences pour le faire.





3



4

**3**  
**Pré-observations**

**« Nous nous sommes relayés toutes les six heures pour piloter Desi et nous avons une conférence quotidienne à minuit ! »**

Étienne Burtin, physicien

Le télescope de quatre mètres de Desi est installé sur le site de Kitt Peak en Arizona. Pendant quatre mois lors de la *survey validation*, des chercheurs sur site et à distance, y compris depuis Saclay, se sont relayés pour surveiller les observations les nuits où la météo était favorable. Ils ont réceptionné les spectres de 300 000 galaxies dont l'analyse a révélé que la stratégie de sélection des objets célestes est très prometteuse et que les performances de l'instrument sont au niveau attendu. À présent, et pour cinq ans, les 600 collaborateurs de la mission se relaieront pour s'assurer que Desi observera les 35 millions de galaxies choisies, dont certaines seront ciblées au moins cinq fois, lors de différentes nuits, pour générer les spectres les plus précis possibles.

**4**  
**Traitement**

**« L'intelligence artificielle s'avère très utile pour analyser les millions de spectres de galaxies et de quasars. »**

Éric Armengaud, physicien

Le spectre d'une galaxie révèle les éléments chimiques qui la composent. En comparant les valeurs de ces éléments dans l'Univers avec celles en laboratoire, les chercheurs calculent le décalage vers le rouge des galaxies. Ils en déduisent leur distance par rapport à la Terre pour étudier l'expansion de l'Univers. Les spectres sont inspectés visuellement et l'analyse doit être validée par deux chercheurs. Comme il y en aura des millions à effectuer, l'équipe du CEA a validé sur 30 000 spectres récoltés lors de la *survey validation* des algorithmes d'apprentissage profond dont elle possède une grande expertise pour les besoins de la physique des particules. Objectif : limiter le recours à l'inspection visuelle aux seules données les plus compliquées, en vue de livrer la plus grande carte 3D de l'Univers.

**EN IMAGES**

3 - Suivi du pilotage automatique des observations préliminaires lors de la *survey validation*.

4 - Contrôle d'un spectre du rayonnement d'un quasar observé pendant la *survey validation*.

**FOCUS**

**Une collaboration internationale**

Menée par l'université américaine de Berkeley, la mission Desi (*Dark Energy Spectroscopic Instrument*) regroupe 600 chercheurs dont ceux du CEA-Irfu, très impliqués à différents niveaux : réalisation des cryostatats des capteurs du plan focal et des dix spectrographes ; pilotage de la *survey validation* ; porte-parolat de la collaboration ; contribution à l'analyse des spectres et exploitation scientifique des données.







## DOSSIER ÉNERGIES

# Hydrogène, filière d'avenir

PAR HUGO LEROUX

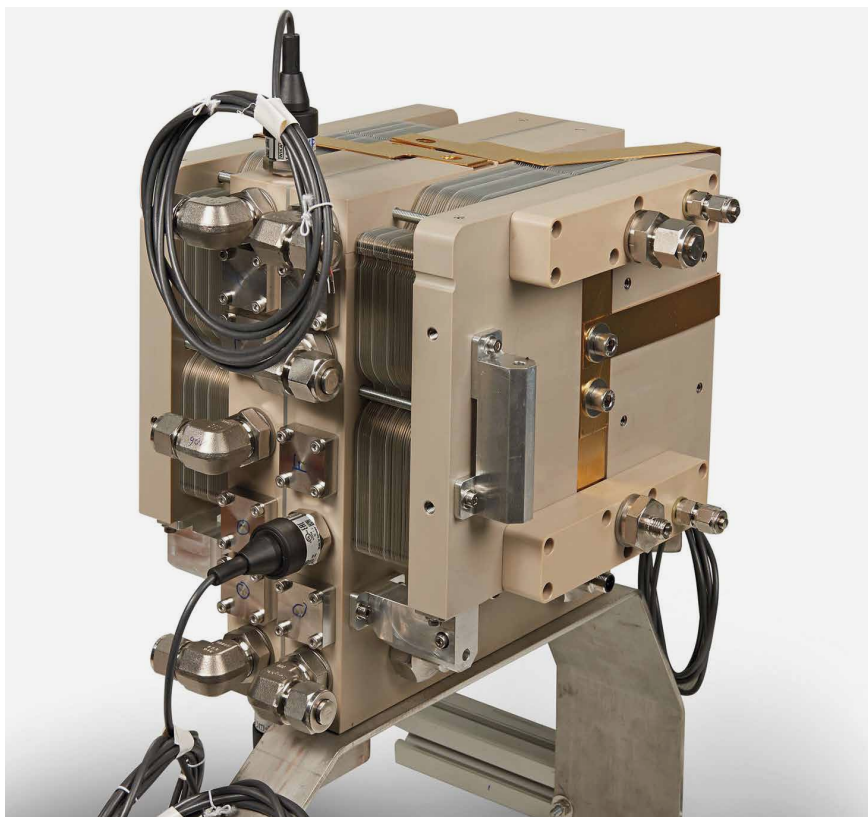
Associée à une électricité décarbonée, le vecteur hydrogène est un pilier du mix énergétique à émission nette de CO<sub>2</sub> nulle. Rappelons en effet l'enjeu primordial de limiter le réchauffement climatique. C'est dans cette optique que le gouvernement a lancé un plan ambitieux destiné à faire émerger une filière française et européenne de l'hydrogène bas carbone. Le CEA se positionne en acteur essentiel pour en assurer la pérennité à long terme.

Genvia sera l'un des fleurons de la future filière hydrogène hexagonale (voir page 20). La coentreprise créée par le CEA, via sa filiale CEA Investissement, Schlumberger, Vinci Construction, Vicat et l'Agence régionale énergie climat Occitanie, a été inaugurée le 30 mars dernier. À sa tête, Florence Lambert, précédemment directrice du CEA-Liten. Son ambition n'est autre que de faire sortir de terre une *gigafactory* d'électrolyseurs, ces dispositifs destinés à la production d'hydrogène à partir d'eau et d'électricité. Dans un pays comme la France, qui dispose d'une électricité décarbonée, ces électrolyseurs permettront ainsi de produire de l'hydrogène bas carbone, alors que les procédés pour l'instant majoritaire (95%) comme le vaporeformage du gaz naturel s'appuient sur des hydrocarbures et sont fortement émetteurs de CO<sub>2</sub>.

### Décarboner l'économie

Genvia mise précisément sur l'électrolyse haute température (EHT), une technologie conçue au CEA qui a fait l'objet d'un transfert industriel. Elle voit par ailleurs le jour dans la dynamique lancée par le gouvernement et son ambitieux plan Hydrogène, annoncé en septembre 2020 et doté d'une enveloppe de 7,2 milliards d'euros d'ici 2030 (voir focus). « Ce plan marque la →





© D. Guillaudin/CEA

## « Le CEA se positionne sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène bas carbone avec une approche intégrée. »

Laurent Antoni, responsable affaires publiques



### Ci-dessus

Stack de piles à combustible.



### À droite

Cimenterie de Montalieu qui accueillera des électrolyseurs pour produire de l'hydrogène bas carbone via la valorisation de la chaleur fatale du site.



### Page précédente

Plateforme de tests d'électrolyseurs haute température réversibles de forte puissance.



*volonté de la France d'intégrer l'hydrogène comme vecteur énergétique indispensable pour atteindre les objectifs nationaux en matière de décarbonation de l'économie»,* salue Laurent Antoni, responsable des affaires publiques pour les technologies hydrogène au CEA Liten.

Du reste, la prise de conscience est mondiale : une quinzaine de pays se sont dotés ces dernières années de leur propre plan ou stratégie. Car l'hydrogène présente de nombreux avantages pour la transition énergétique. « *Aujourd'hui, seule 20 % de l'énergie est transportée sous forme électrique et 80 % sous forme de molécules comme le gaz et le pétrole. L'hydrogène permet justement de substituer ces molécules fossiles. Et contrairement à l'électricité, il peut être stocké sans perte sur le long terme* », résume le spécialiste. En particulier, il permet de décarboner des secteurs difficilement « électrifiables » comme l'industrie et la mobilité lourde (camions, trains, etc.) qui constituent justement deux priorités du plan Hydrogène ; la troisième consistant à financer la recherche et la formation pour soutenir l'essor de la filière française à long terme. Copiloté par le CEA et le CNRS, un

« Programme et équipements prioritaires de recherche » (PEPR) doté de 80 millions d'euros vient de démarrer au printemps 2021. Sur tous ces enjeux, le CEA est bien positionné en raison de son expertise historique. « *Les premières recherches sur le sujet ont débuté il y a plus de vingt ans* », indique Hélène Burlet, directrice-adjointe des programmes Énergies du CEA. En 2002, le projet Genepac mené avec PSA visait par exemple à développer une pile à combustible (produisant de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène) pour la mobilité légère.

### Maîtrise de la chaîne énergétique

Autre étape majeure : la conception en 2017 de l'architecture énergétique du catamaran Energy Observer, devenu un véritable démonstrateur technologique validant le principe d'un mix énergétique décarboné pour d'autres usages (bâtiment, quartier, ville, etc.). Équipé de batteries, il combine également la production d'hydrogène à partir d'eau de mer dans des électrolyseurs alimentés par panneaux photovoltaïques, son stockage dans des réservoirs haute



© Vicat

pression, et sa conversion en électricité et chaleur dans des piles à combustible. « Le CEA se positionne sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène avec une approche intégrée allant de la recherche sur les matériaux à la démonstration des procédés, en passant par les aspects stockage, distribution, pilotage intelligent... », souligne Laurent Antoni. Dans le cadre du PEPR, il mènera ainsi un certain nombre de recherches pour développer des technologies de rupture comme des cellules innovantes pour l'EHT, des nouveaux procédés de stockage de l'hydrogène par voie chimique, ou encore la substitution des métaux rares dans les électrodes de piles à combustible.

### Sécurité, réglementation et éco-innovation

En parallèle, le CEA consacre beaucoup d'efforts à des sujets transverses à toute la filière, à commencer par les aspects liés à la sécurité (voir page 26). « De plus en plus de dispositifs alimentés à l'hydrogène vont être installés dans les lieux publics. Bien que ces technologies soient d'ores et déjà éprouvées, il faut impérativement éviter

un accident qui compromettrait l'avenir de la filière en diminuant la confiance des usagers », pointe Hélène Burlet. Une grande importance est également accordée aux approches d'éco-innovation : « comme les technologies hydrogène bas carbone visent in fine le respect des objectifs climatiques, tous nos développements intègrent une analyse de cycle de vie pour évaluer leur impact environnemental, de la mine au recyclage, et effectuer les choix pertinents », poursuit Laurent Antoni.

Enfin, le CEA porte une vision systémique visant l'intégration optimale de l'hydrogène au sein des réseaux énergétiques existants. Le projet européen Qualygrids, achevé fin 2020, visait par exemple à évaluer dans quelle mesure un électrolyseur pouvait contribuer à maintenir l'équilibre et rendre des services à un réseau électrique. « Tous ces sujets transversaux sont primordiaux car ils contribueront à affiner la réglementation autour de l'hydrogène, et à favoriser son acceptation par les utilisateurs », conclut Laurent Antoni. ●

### PLAN HYDROGÈNE

# Objectifs 2030

## 24 Md€

d'investissements nécessaires

## 7,2 Md€

de soutien public

## 6,5 GW

d'électrolyse déployée

## 6 Mt+

de CO<sub>2</sub> évitées par an (soit les émissions annuelles de la ville de Paris)

**+ de 100 000 emplois**  
dans la filière H<sub>2</sub>

## 295 000 t

d'H<sub>2</sub> décarboné pour l'industrie

## 342 000 t

d'H<sub>2</sub> décarboné pour la mobilité  
**dont**

**300 000 t**  
pour les  
véhicules légers



**250 t**  
pour les  
trains



**5 000 t**  
pour les  
véhicules lourds



**1 000 t**  
pour les  
bateaux



**1 000 stations**  
de recharge H<sub>2</sub>

source : France Hydrogène 2020.  
→ [www.afhyprac.org](http://www.afhyprac.org)



## ENTRETIEN

**Genvia: l'union fait la force**

**« Tout au long de 2020, nous avons travaillé ensemble à déterminer comment faire mûrir la technologie et la rendre compétitive, comprendre les différents usages et, *in fine*, établir un *business model*. »**

**Capella Festa,**  
directrice d'exploitation  
de Genvia

PROPOS RECUEILLIS  
PAR AUDE GANIER

**Le CEA, Schlumberger, Vicat, Vinci et la région Occitanie s'unissent pour lancer une *gigafactory* d'électrolyseurs produisant de l'hydrogène bas carbone. Une aventure scientifique, technologique, industrielle et commerciale inédite commence en France.**

**Pourquoi Schlumberger en est-il venu à explorer le vecteur hydrogène ?**

Le groupe Schlumberger a été fondé il y a cent ans par deux frères, ingénieur et chercheur, pour faire de la prospection électrique du sous-sol alsacien. Il est aujourd'hui le leader mondial en fourniture de technologies et services appliqués à la prospection, la simulation, le forage et la production de pétrole.

Fort de ses compétences techniques, le groupe s'intéresse depuis plusieurs années à la transition énergétique en s'investissant sur les technologies de capture et de stockage du CO<sub>2</sub>, ainsi que sur l'exploitation du lithium. Nous nous intéressons également au vecteur hydrogène pour les besoins de nos clients. Début 2020, Schlumberger New Energy a été créée pour étendre notre savoir-faire à des activités neutres en carbone.

**Comment est née l'aventure Genvia ?**

Le CEA est un partenaire historique de Schlumberger. Ils collaborent depuis plus de quarante ans sur des projets ponctuels, comme celui de l'automatisation de l'une de ses usines en France. C'est au cours d'une collaboration dans un autre domaine, fin 2019, que la discussion sur l'hydrogène a démarré. Les équipes du CEA-Liten leur ont présenté leur technologie de rupture: l'électrolyse haute température réversible capable de produire à la fois de l'hydrogène bas carbone et de l'électricité, en mode pile à combustible.

Nous étions conscients du potentiel de ce vecteur énergétique dont les analystes prévoient l'essor commercial à l'horizon 2030. Tout au long de 2020, nous avons travaillé ensemble à déterminer comment faire mûrir la technologie et la rendre compétitive, comprendre les différents usages et, *in fine*, établir un *business model*. Genvia a vu le jour

en mars 2021 et je suis ravie de partager cette aventure aux côtés de la présidente directrice générale Florence Lambert, qui fut la directrice du CEA-Liten.

**C'est justement la force de cette coconstruction, parfait exemple d'un partenariat public-privé...**

Dans le monde de l'hydrogène bas carbone, tout est à créer. Il s'agit d'inventer toute une chaîne de valeur en s'appuyant sur les compétences de chacun. Schlumberger dispose d'une expertise scientifique et technique historique ainsi que d'une force industrielle et commerciale. Quant au CEA, il est leader sur les technologies de l'hydrogène et dispose de solides équipes de recherche amont et de R&D. Il a également des relations privilégiées avec l'industrie, ce qui est primordial pour bien comprendre les usages de la technologie. Deux grands groupes ont rejoint ce duo et c'est une force pour Genvia: Vicat, leader dans l'industrie lourde de la cimenterie; et Vinci, constructeur et concessionnaire de structures de la mobilité avec les autoroutes et les aéroports. La connaissance de la logique des territoires est également cruciale. C'est pour cela que nous sommes fiers de pouvoir compter sur l'Agence régionale énergie climat Occitanie, région qui accueille notre usine et permet de nous inscrire dans une économie locale.

**Quelle est la feuille de route pour industrialiser la technologie du CEA ?**

Une première ligne pilote de fabrication d'électrolyseurs doit voir le jour dès cet été dans l'usine Cameron-Schlumberger de Béziers (Hérault). Sur la base de ses résultats ainsi que d'unités de démonstration de 300 kW déployés à partir de 2023, la décision de construire une *gigafactory* sur le même site sera prise en 2024.

Parallèlement, Genvia s'appuiera sur un centre de transfert technologique copiloté avec le CEA sur son site de Grenoble (Isère), ainsi que sur les équipes Schlumberger du site de Clamart (Hauts-de-Seine), pour accélérer l'exploitation de la maturité de la technologie. À terme, Genvia vise à produire des unités de plusieurs centaines de mégawatts à l'horizon 2030. ●

# Décarboner l'industrie

**Entre électrolyse haute température et photo-électro-catalyse, le CEA développe des technologies de rupture susceptibles d'assurer à long terme une production massive et compétitive d'hydrogène bas carbone.**

L'industrie française consomme environ 800 000 tonnes d'hydrogène par an dans des secteurs comme le raffinage, la chimie ou la sidérurgie. Substituer cet hydrogène majoritairement fossile (issu du vaporéformage du gaz naturel) par de l'hydrogène bas carbone permettrait de réduire les émissions nationales de gaz à effet de serre de 3% à court terme. C'est pour cette raison que la première priorité du plan Hydrogène est bien de décarboner les industries grâce à l'hydrogène produit par électrolyse. Ce procédé casse la molécule d'eau (H<sub>2</sub>O) grâce à un courant électrique (généré par des énergies bas carbone) pour en séparer les molécules d'oxygène (O<sub>2</sub>) et d'hydrogène (H<sub>2</sub>). Sur ce créneau, le CEA développe depuis plus de quinze ans une technologie unique : l'électrolyse haute température (EHT), bientôt industrialisée par la société Genvia (voir ci-contre).

*« L'électrolyse haute température utilise de la vapeur d'eau à plus de 150 °C, et non de l'eau liquide. Car la quantité d'énergie nécessaire pour casser la molécule d'eau sous forme vapeur est plus faible que celle requise pour une molécule d'eau liquide. Cela permet donc de gagner en rendement par rapport à l'électrolyse traditionnelle »,* pointe Julie Mougin, cheffe de service au CEA-Liten, qui évalue ce gain jusqu'à 15% de rendement.

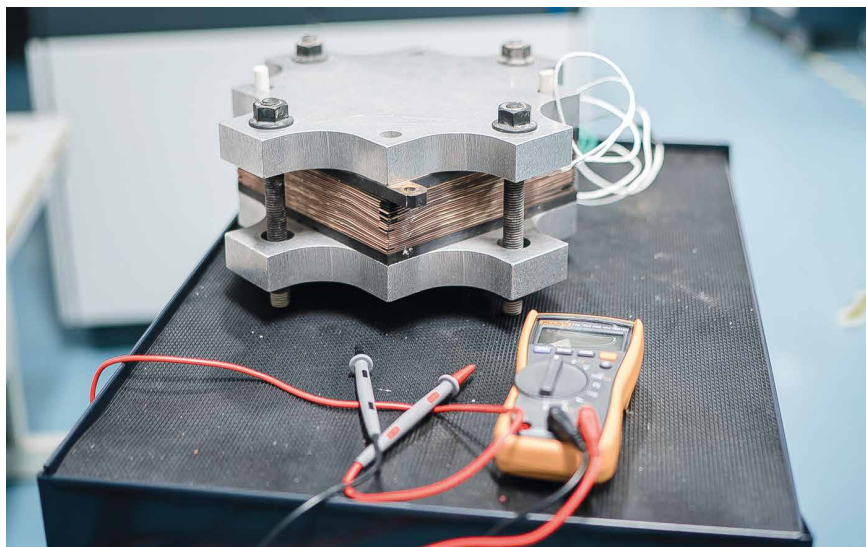
## **Électrolyse haute température, une technologie compétitive**

Cette technologie prometteuse est le fruit d'un programme de long terme initié au CEA en 2006. *« Nous avons développé des matériaux qui ne contiennent pas de catalyseurs en métaux nobles, ainsi que l'architecture des cellules d'électrolyse et leur intégration sous forme de stack. Dès le début, nous avons intégré une réflexion sur le compromis final entre coût, performance et durabilité. Elle nous a évité l'écueil classique en recherche amont consistant à se lancer sur des systèmes privilégiant l'un de ces critères et se révélant finalement inadaptés aux usages réels »,* se félicite Julie Mougin. Exemple de cette vision intégrée : les aciers constituant le stack de l'électrolyseur ne

sont pas fabriqués spécifiquement pour la production d'hydrogène, mais sont utilisés dans l'industrie automobile. *« Le fait qu'ils soient produits à fort tonnage annuel à partir de procédés éprouvés contribue à la baisse des coûts »,* pointe l'experte.

La technologie du CEA est ainsi en cours d'industrialisation via deux sociétés : la start-up Sylfen qui vise le secteur de l'habitat, et Genvia qui commercialisera à moyen terme des solutions plus puissantes destinées aux industries. Selon les projections de la Commission européenne, l'EHT constituera d'ici 2030 une solution complémentaire aux technologies d'électrolyse basse température, alcalines et PEM (Proton Exchange Membrane) déjà commercialisées. *« En se couplant à des industries disposant de rejets thermiques valorisables comme la sidérurgie, la chimie ou les centrales nucléaires, l'EHT pourrait produire un hydrogène bas carbone à moins de 2 euros le kilogramme, compétitif avec l'hydrogène d'origine fossile (entre 1,5 et 2 € par kg avant capture du CO<sub>2</sub> émis) »,* prévoit Julie Mougin.

Dans l'optique d'étoffer à plus long terme la production de ce type d'hydrogène, la recherche fondamentale intervient en renfort, par exemple avec la photo- →



© J. Penelon/CEA

## CHIFFRE-CLÉ

# 800 kt

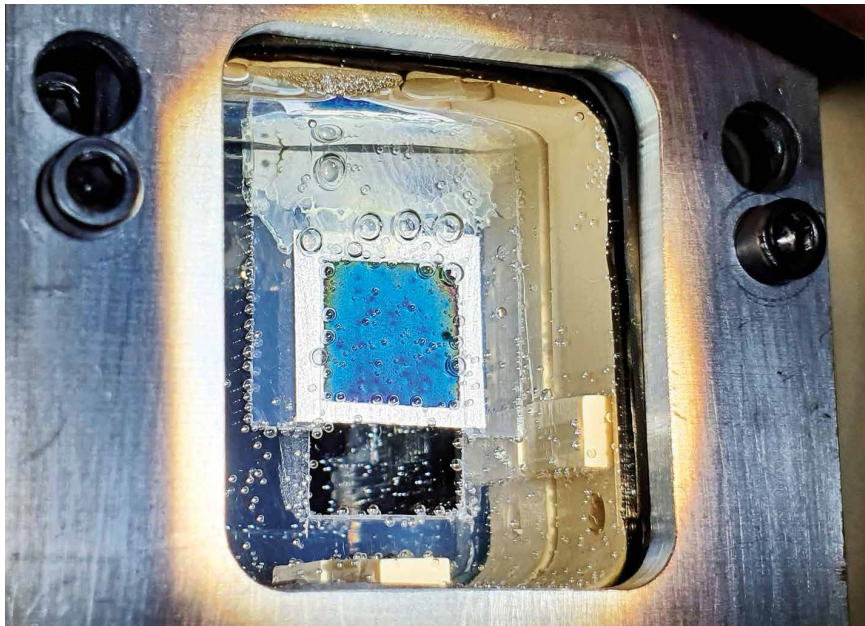
d'hydrogène consommées par an par l'industrie française



## Ci-contre

Stack d'électrolyseur haute température en cours de test de durabilité.





© CEA

électro-catalyse. « *L'idée est de capter l'énergie solaire pour produire l'hydrogène au sein d'un dispositif unique, plus compétitif que le couplage de panneaux photovoltaïques à des électrolyseurs* », explique Vincent Artero, directeur de recherche au CEA-Irig. Dans cette approche qui mime le fonctionnement des micro-algues, on parle de photosynthèse artificielle. Le procédé consiste en la combinaison intime de deux matériaux : l'un convertissant l'énergie lumineuse en potentiel électrochimique et reposant sur les mêmes principes que

les technologies photovoltaïques en cours de développement ; l'autre, un catalyseur capable d'exploiter les charges photogénérées pour décomposer l'eau et produire de l'hydrogène. Pour cette dernière partie, l'équipe de l'Irig s'inspire des enzymes hydrogénases présentes chez les micro-algues. « *On cherche notamment à reproduire la forme du site actif de ces enzymes à l'aide de métaux abondants comme le nickel et le fer. C'est une clé pour concevoir des catalyseurs efficaces et bon marché* », précise Vincent Artero.

## « Reproduire la forme du site actif de ces enzymes à l'aide de métaux comme le nickel et le fer est une clé pour concevoir des catalyseurs efficaces et bon marché. »

Vincent Artero, directeur de recherche

### Prochaine rupture : produire de l'hydrogène directement à partir du Soleil

Pour lors, son équipe a réussi à mettre au point de premières cellules photo-électro-chimiques opérationnelles qu'elle cherche maintenant à optimiser dans le cadre du projet européen *Sun to X* lancé en septembre 2020. Mais des limites subsistent : « *nos cellules délivrent pour le moment un rendement de conversion d'environ deux ordres de grandeur inférieur aux meilleurs systèmes "classiques" associant photovoltaïque et électrolyseurs* », reconnaît Vincent Artero. À terme, ces prototypes compacts, non polluants et bon marché, élaborés avec des éléments présents en quantité abondante (cuivre, fer, etc.) laissent espérer une production décentralisée et à bas coût d'hydrogène à partir d'énergie solaire. ●

### FOCUS

## La problématique du stockage

Produire massivement de l'hydrogène bas carbone ne suffit pas : encore faut-il le stocker efficacement. Or, les technologies actuelles impliquent une dépense énergétique non négligeable, recourant soit à la compression du gaz à haute pression, soit à la liquéfaction à basse température. Le CEA explore donc la piste du stockage sous forme chimique, « *potentiellement plus sûre et moins énergivore pour du stockage de très long terme et du transport longue distance* », explique Philippe Capron du CEA-Liten. Le principe est de lier chimiquement l'hydrogène à un matériau au moment du stockage, et de le « désorber » au moment du déstockage.

### Des procédés peu énergivores

Deux types de matériau sont explorés : les hydrures chimiques pour la voie solide ; et des molécules « porteuses d'hydrogène » dites LOHC (*Liquid Organic Hydrogen Carriers*) pour la voie liquide. Tout l'enjeu sera de trouver des matériaux à la fois peu coûteux, capables d'absorber une grande quantité d'hydrogène, tout en assurant un stockage-déstockage réversible via des procédés simples et peu énergivores. « *Nous avons déjà mis au point des composés capables de stocker jusqu'à 10 % de leur propre masse en hydrogène. Nous intégrons aussi des matériaux bio-sourcés pour minimiser les impacts environnementaux du procédé de stockage de l'hydrogène* », conclut Philippe Capron.

### ☞ Ci-dessus

Feuille artificielle composée d'une cellule photovoltaïque sur laquelle sont greffés des catalyseurs bio-inspirés. Sous irradiation, l'eau est décomposée en oxygène et hydrogène.

### ➔ Ci-contre

Banc de conditionnement de stacks d'électrolyseurs haute température.









## ENTRETIEN

# Le train à hydrogène passe à la vitesse supérieure

PROPOS RECUEILLIS  
PAR AUDE GANIER

la facture économique et environnementale d'une PAC», pointe Vincent Artero du CEA-Irig. C'est pourquoi il étudie de nouveaux catalyseurs bio-inspirés susceptibles de le remplacer dans les PAC.

Dès 2009, son équipe et celle de Bruno Jousset du CEA-Iramis ont ainsi décrit dans la revue *Science* un complexe moléculaire à base de nickel bio-inspiré du site actif des hydrogénases (enzymes présentes dans les micro-algues), greffé sur des nanotubes de carbone et adapté à la réaction d'oxydation de l'hydrogène au niveau de l'anode des PAC. «*Même si sa performance et sa longévité n'égalent pas encore celles du platine, la densité de courant qu'il délivre a été multipliée par 20 en dix ans*», se félicite le chercheur.

## Remplacer le platine

De son côté, Bruno Jousset développe un catalyseur similaire mais à base de fer pour la réaction de réduction de l'oxygène au niveau de la cathode. Ces deux catalyseurs sont intégrés dans des systèmes PAC expérimentaux et évalués au sein des projets européens Crescendo et Pegasus, dans lesquels le CEA est impliqué aux côtés d'industriels majeurs comme BMW et Toyota. «*À l'instar du fabricant Ballard, qui a déjà annoncé avoir recours à une technologie sans platine dans l'une de ses PAC, les industriels savent qu'ils devront tôt ou tard substituer le platine*», prévoit Vincent Artero. ●



### Ci-contre

Caractérisation électrochimique d'un assemblage membrane électrode d'une pile à combustible.



### Ci-contre

Régiolis hydrogène 2018.



**Julien D'Arbigny**, référent technique du développement des systèmes Pile à combustible chez Alstom.

## Depuis quand Alstom s'intéresse-t-il au vecteur hydrogène ?

Dès 2014, le groupe a lancé le développement du Coradia iLint, le premier train de passagers à hydrogène au monde. Nous nous sommes notamment rapprochés en 2017 du CEA afin d'avoir une meilleure connaissance du sujet en ayant accès à l'état des connaissances en matière d'hydrogène et de piles à combustible. Les deux premiers Coradia iLint sont entrés en service commercial en 2018 en Allemagne, où ils circulent depuis trois ans en conditions réelles puisqu'ils transportent des voyageurs. Ils ont également fait l'objet de démonstrations en Autriche et aux Pays-Bas. Le 1<sup>er</sup> avril dernier, Alstom a annoncé l'acquisition d'Helion Hydrogen Power (filiale d'Areva énergies renouvelables) spécialisée dans les PAC pour des applications de forte puissance. En internalisant ainsi ses compétences, Alstom passe à la vitesse supérieure sur l'hydrogène.

## Quel est l'enjeu du train à hydrogène ?

En France, près de 50 % des lignes ferroviaires ne sont pas électrifiées (14 300 km sur 30 000 km de rail) et représentent 20 % du trafic. Vouloir les électrifier ne serait pas viable d'un point de vue économique. Or l'ambition est d'éliminer les trains diesel d'ici 2035, un objectif fixé par le gouvernement français et la SNCF. C'est dans ce contexte que les trains à hydrogène s'avèrent pertinents, à tout point de vue, y compris pour pérenniser ce mode de transport dans les zones reculées. Ces trains sont également compétitifs, si on les compare à des trains à batterie, dont l'autonomie ne dépasse pas 80 km dans l'état actuel des choses.

## Avez-vous vendu des premières unités en France ?

En avril 2021, SNCF Voyageurs a commandé à Alstom, pour le compte de quatre régions françaises (Auvergne-Rhône-Alpes, Bourgogne-Franche-Comté, Grand Est et Occitanie) dans le cadre du projet Régionalis, les douze premiers trains bi-mode électrique-hydrogène issus de sa gamme Coradia Polyvalent. Les essais débiteront fin 2023 pour une mise en circulation commerciale prévue en 2025. Nous avons démarré un projet en Italie en janvier dernier et avons de bonnes perspectives d'évolution au Royaume-Uni. Nous allons également livrer en 2022 au marché allemand 42 Coradia iLint permettant jusqu'à 1 000 km d'autonomie. ●





# Véhicules à hydrogène, l'enjeu sécurité

Le projet Hytunnel simule des accidents de véhicules à hydrogène en milieu confiné. De quoi étudier différents scénarios redoutés, et perfectionner la sécurité des systèmes.

À l'heure où circulent déjà 17 000 véhicules à hydrogène dans le monde, aucun accident majeur n'a été à déplorer. Pourtant, des flous persistent dans la réglementation française « qui déconseille notamment de garer un véhicule hydrogène dans un parking ou d'emprunter un tunnel », détaille Didier Bouix, ingénieur au CEA-Liten. En cause : un manque de données sur les scénarios d'inflammations et d'explosion des réservoirs à hydrogène en milieux confinés. C'est pour y remédier qu'a été conçu le projet européen Hytunnel, rassemblant vingt acteurs académiques et industriels dont le CEA. Les tests, qui ont débuté en septembre 2020, visent à reproduire à l'intérieur du tunnel de Mortier, dans le massif du Vercors, différents scénarios d'accidents de véhicules à hydrogènes.

## Expérimenter des accidents en milieu confiné

Le tunnel a ainsi été instrumenté avec différents capteurs (hydrogène, oxygène, température, pression, flux d'air, etc.) qui permettent de surveiller et analyser les tests menés sur un châssis représentant un véhicule avec son réservoir. « Les réservoirs à hydrogène actuels sont conçus avec une soupape. En cas de surchauffe au-dessus de 110°C, due par exemple à un incendie voisin, cette dernière permet d'expulser l'hydrogène pour éviter une surpression dans le réservoir conduisant à une explosion. Le but de l'expérience est de reproduire dans des conditions maîtrisées ce rejet d'hydrogène gazeux et comprendre son interaction avec l'environnement immédiat. Nous comparons alors ces effets avec les résultats de simulations », précise l'expert. Trois scénarios seront par-

ticulièrement étudiés. D'abord, celui d'une dispersion de l'hydrogène non enflammé après une fuite pour étudier la répartition du gaz sous le châssis et dans le tunnel. Ensuite, un incendie provoqué par une ignition de ce jet : « nous regarderons comment la flamme, normalement orientée vers le bas, se comporte selon le diamètre de la soupape et différents scénarios accidentels comme le retournement du véhicule sur le côté ou le toit. Cela induira-t-il des atmosphères explosives sous le châssis, sous la voûte ? Quels seront les risques associés pour les personnes et l'impact sur l'ouvrage ? », s'interroge l'expert. Le dernier scénario étudié est le pire : celui d'une explosion consécutive à la rupture peu probable d'un réservoir.

## Nourrir les réflexions sur la réglementation

Les données acquises par ces expériences conduites jusqu'à la fin 2021 serviront à alimenter des simulations numériques de scénarios accidentels en milieu confinés. « Cela conduira in fine à améliorer la conception et l'intégration de systèmes de sécurité et à clarifier les stratégies de ventilation d'urgence par exemple dans des parkings ou tunnels », souligne Didier Bouix. Dans un autre projet européen (Hyresponder), le CEA contribue cette fois à mieux documenter, former et préparer l'intervention des services de pompiers en cas d'accidents hydrogène en milieux confinés. « Les résultats de ces projets de recherche pourront également alimenter la réflexion sur des textes de loi et des normes futures », prévoit l'ingénieur. Et ainsi faire avancer sereinement et en confiance la filière hydrogène. ●

**À l'heure où circulent déjà 17 000 véhicules à hydrogène dans le monde, aucun accident majeur n'est à déplorer. Pourtant, des flous persistent dans la réglementation française.**



**CEA-Iramis**  
Institut rayonnement-matière de Saclay.



**CEA-Irig**  
Institut de recherche interdisciplinaire de Grenoble.



**CEA-Liten**  
Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (Grenoble).

# TOUT S'EXPLIQUE

PAR SYLVIE RIVIÈRE,  
EN COLLABORATION AVEC MICHEL  
LEONETTI (CEA-JOLIOT) ET  
FRÉDÉRIC MARTINON (CEA-JACOB)



## Vacciner avec de l'ARN messenger

ARN messenger... Cette petite molécule, que notre organisme produit en permanence, a fait une entrée remarquée dans la panoplie des vaccins.

Moins d'un an après l'apparition de la pandémie de Covid-19, Pfizer-BioNTech, puis Moderna, annonçaient la mise au point d'un vaccin à ARN messenger à haute efficacité. Une première, puisque cette stratégie n'avait jamais été déployée chez l'humain. C'est l'aboutissement de près de trente ans de R&D, initiés en 1993 avec une preuve de concept établie par une équipe française (Inserm, Institut Cochin et Pasteur-Mérieux). Jusqu'alors, tous les vaccins consistaient à introduire chez l'humain l'agent infectieux (bactérie, virus) sous une forme atténuée ou inactivée, ou l'un de ses composants (souvent une protéine inoffensive), directement ou *via* un autre virus (*voir zoom*). Le principe consiste

à activer la réponse immunitaire sans déclencher la maladie, de manière à fabriquer des cellules « mémoires ». Celles-ci seront alors capables de reconnaître le germe entier en cas d'infection ultérieure pour immédiatement lancer son processus de destruction.

### Donner une instruction génétique

Dans le cas du vaccin à ARN messenger (ARNm), on n'incorpore plus l'agent infectieux ou l'un de ses fragments, mais une instruction génétique. Ce sont les cellules de l'individu vacciné qui produisent directement la protéine, en « lisant » cet ARNm.

Parmi les avantages de cette nouvelle approche, citons la production rapide et à grande échelle. Seuls quelques jours sont en effet nécessaires pour synthétiser des brins d'ARN, contre plusieurs semaines dans toutes les autres voies. Les vaccins à ARNm, mais aussi à ADN, représentent aujourd'hui un arsenal supplémentaire dans les stratégies vaccinales. Plusieurs développements sont en cours : Zika, mononucléose, grippe, etc.

### ZOOM

#### La grande famille des vaccins

**Vaccin atténué :** contient l'agent pathogène vivant, devenu non pathogène à la suite d'une série de sélections.

**Vaccin inactivé :** contient l'agent pathogène tué (par la chaleur ou des traitements chimiques) et incapable de se multiplier.

**Vaccin protéique :** contient une protéine de l'agent pathogène produite en laboratoire, le plus souvent par culture de cellules modifiées par génie génétique pour pouvoir fabriquer la protéine d'intérêt. On parle alors de protéine recombinante.

**Vaccin à vecteur viral :** contient un virus vivant inoffensif et incapable de se multiplier (par exemple dérivé d'un adénovirus ou du virus de la rougeole) portant le gène qui permettra la fabrication de la protéine vaccinale directement dans l'organisme.

À cette liste viennent désormais s'ajouter les vaccins à acide nucléique (ARN et ADN).

### À SAVOIR

#### Quel recul sur les vaccins à ARNm ?

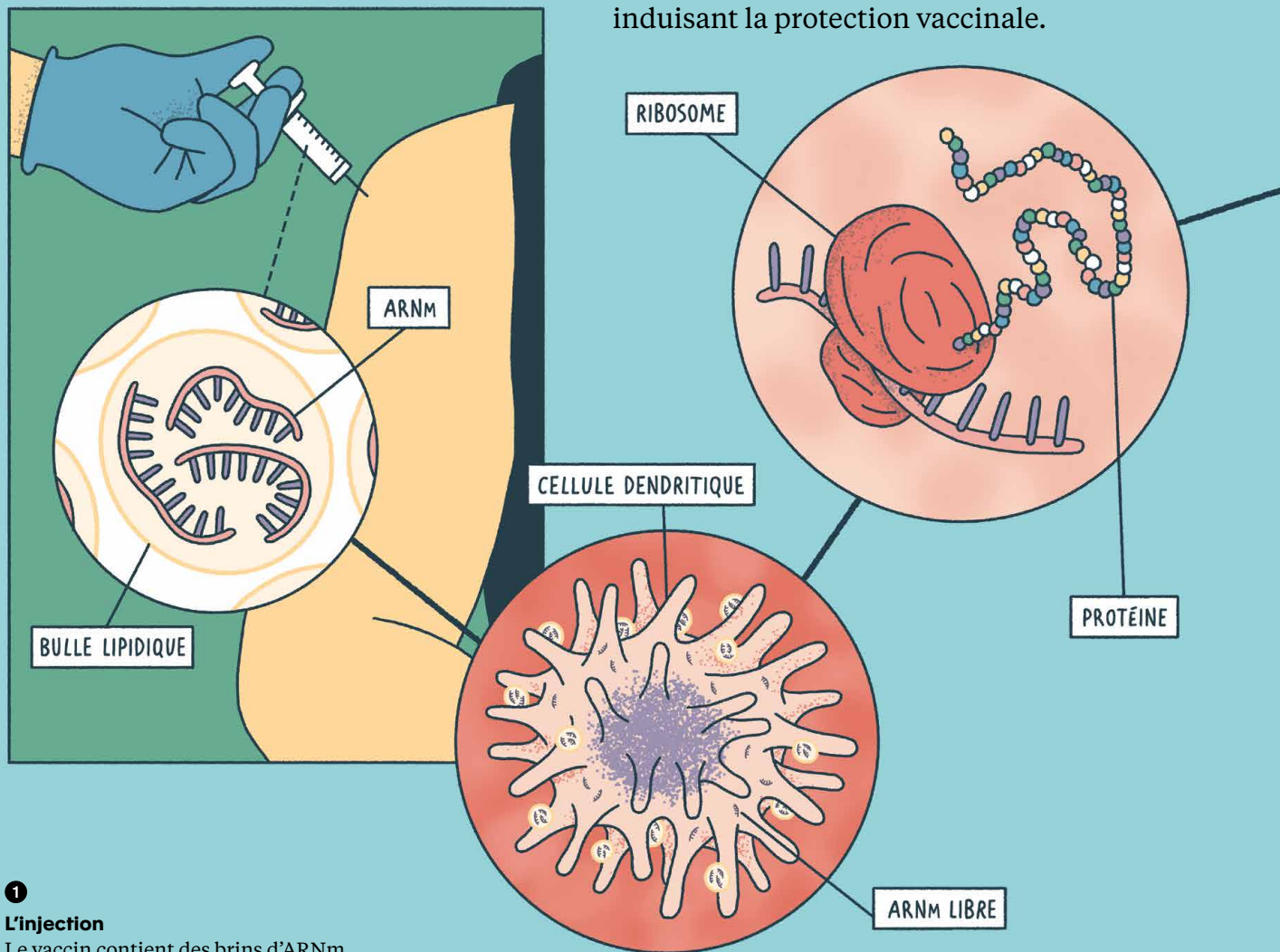
La durée de persistance des anticorps et de la réponse mémoire restent à évaluer, tout comme les effets secondaires à long terme. Ce dernier point est surveillé en assurant un suivi de la population vaccinée. C'est la phase 4 de tout développement clinique.





# ARNm contre agent pathogène

Un vaccin à ARN messager (ARNm) contient une copie synthétique d'une petite partie du génome d'un agent infectieux, sous forme d'ARNm. Celui-ci va permettre à nos cellules de fabriquer elles-mêmes et de manière temporaire une protéine de cet agent. Cette dernière est un intrus pour notre organisme. Notre système immunitaire va donc l'éliminer mais aussi en garder la mémoire, induisant la protection vaccinale.



**1**

## L'injection

Le vaccin contient des brins d'ARNm portant le « plan de construction » d'une protéine (appelée antigène) de l'agent infectieux. Ces brins sont encapsulés dans de petites bulles lipidiques qui les protègent d'une destruction immédiate. En effet, l'ARNm n'existe normalement qu'à l'intérieur des cellules. « Nu » et à l'extérieur, il serait dégradé très rapidement.

**2**

## L'ARNm libéré

Au niveau du point d'injection, les capsules lipidiques sont ingérées par des cellules du système immunitaire (cellules dendritiques et macrophages) et l'ARNm est libéré dans leur cytoplasme.

**3**

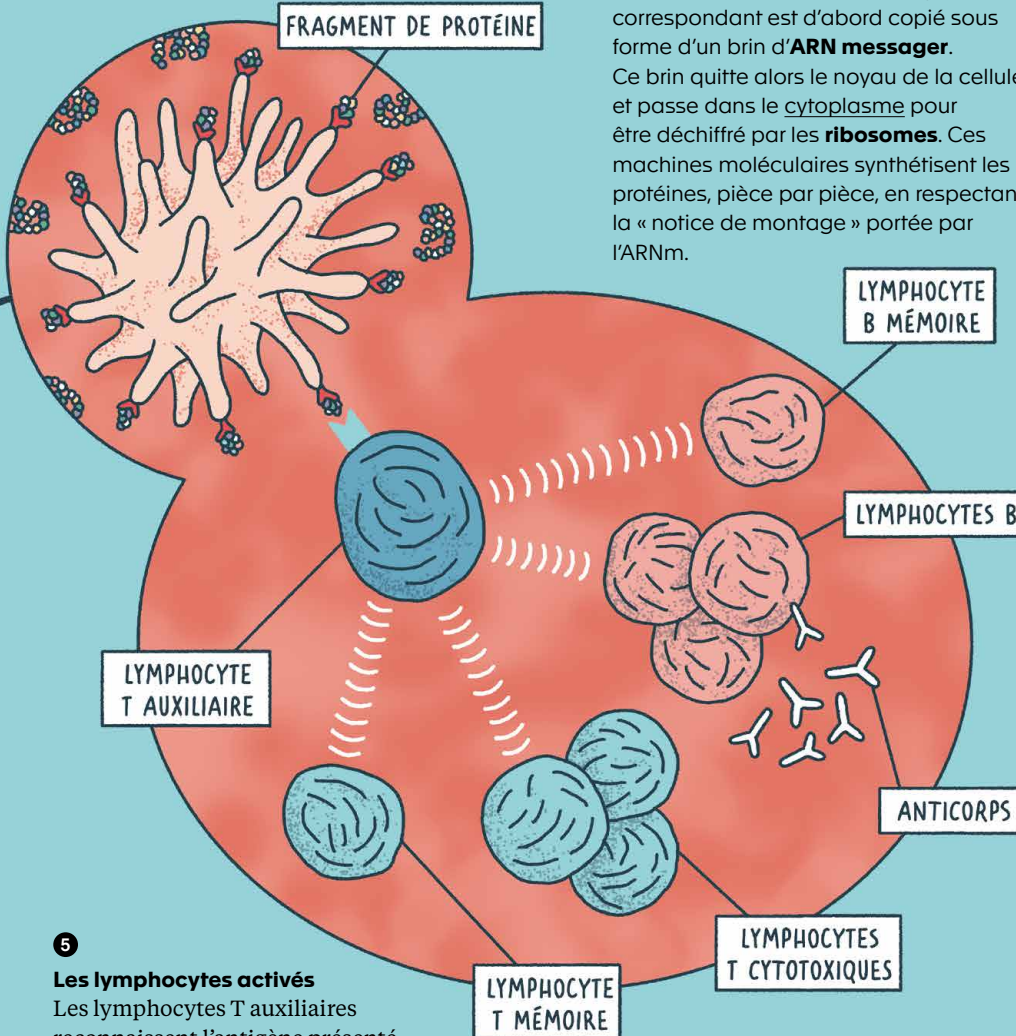
## L'antigène fabriqué

L'ARNm rencontre les ribosomes, qui vont lire le plan de construction et fabriquer la protéine à l'intérieur des cellules. Une fois lu, l'ARNm est rapidement détruit.

4

**L'antigène présenté**

La protéine est libérée à l'extérieur des cellules. Elle est captée par les macrophages et les cellules dendritiques, qui vont la « présenter » au système immunitaire. L'idée est de le stimuler avec un vrai antigène mais faux pathogène.



5

**Les lymphocytes activés**

Les lymphocytes T auxiliaires reconnaissent l'antigène présenté. Ces « relais » vont à leur tour activer d'autres lymphocytes, qui vont se multiplier.

- **Les lymphocytes B** : ils fabriquent des anticorps spécifiques capables de se lier à l'antigène et de neutraliser le pathogène.

- **Les lymphocytes T cytotoxiques (ou tueurs)** : ils sont capables d'éliminer des cellules infectées en créant des trous dans leurs membranes.

C'est la réaction commune à toute primo-infection.

**MODE D'EMPLOI****Fabriquer des protéines**

Les gènes contenus dans notre ADN sont les « cahiers d'instruction » de la fabrication de toutes nos **protéines**. Pour fabriquer une protéine, le gène correspondant est d'abord copié sous forme d'un brin d'**ARN messager**.

Ce brin quitte alors le noyau de la cellule et passe dans le **cytoplasme** pour être déchiffré par les **ribosomes**. Ces machines moléculaires synthétisent les protéines, pièce par pièce, en respectant la « notice de montage » portée par l'ARNm.

**ALLER + LOIN****Strike sur le Spike**

Pour lutter contre le virus SARS-CoV-2 responsable de la Covid-19, la protéine choisie pour le vaccin est Spike (spicule en français). Tapisant la surface du virus, Spike est une sorte de clé permettant au virus de s'accrocher aux cellules humaines et d'y pénétrer pour pouvoir se multiplier.

**L'ARNm du vaccin peut-il intégrer le génome humain ?**

Un ARN ne peut pas s'intégrer à de l'ADN. Il faudrait pour cela une enzyme spécifique, la transcriptase inverse, qui permet de fabriquer de l'ADN à partir d'ARN. Cette enzyme n'existe pas chez l'homme. Les rétrovirus en disposent, mais la **séquence** d'ARN des vaccins ne permet pas son action.

**L'ARNm, une molécule fragile**

Les molécules d'ARN sont particulièrement instables et peuvent se « casser » au-delà d'une certaine température. C'est pourquoi il est essentiel de préparer et de conserver les vaccins à ARN à des températures très basses.

**LEXIQUE****ARN (acide ribonucléique)**

Molécule chimiquement proche de l'ADN (la base thymine de l'ADN est remplacée par la base uracile). C'est une copie linéaire simple brin d'une portion d'ADN.

**Génome**

Ensemble de l'information génétique, porté par l'ADN.

**Cytoplasme**

Intérieur de la cellule, situé entre la membrane externe et le noyau.

**Séquence**

Ordre des composants, appelés bases, d'un fragment d'ADN ou d'ARN.

6

**La mémoire gravée**

Une faible proportion de ces lymphocytes va se différencier pour former des cellules T et B mémoire, qui peuvent se maintenir dans l'organisme plusieurs années. Lors d'une infection ultérieure, ceux-ci vont immédiatement reconnaître l'agresseur et intensément réagir. L'infection sera alors stoppée sans laisser le temps à la maladie de s'installer. C'est l'effet vaccin : construire une mémoire sans avoir été malade.



# REGARDS CROISÉS

## Matériaux critiques

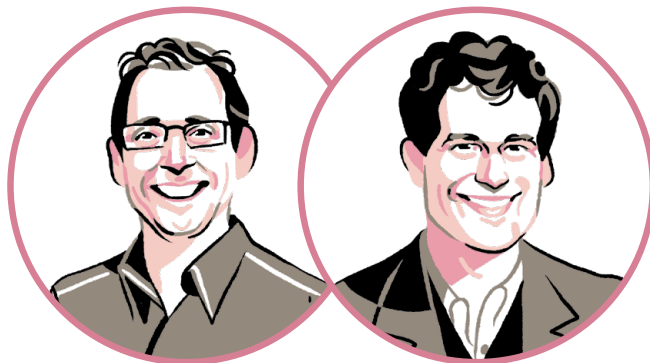
### Enjeu de souverainetés

#### Luc Aixala

chef du programme  
Procédés de fabrication,  
recyclage et analyse du  
cycle de vie à la Direction  
des énergies du CEA.

#### Guillaume Pitron

journaliste, reporter  
et réalisateur.  
*Promethium* (adaptation BD  
de *La Guerre des métaux rares*),  
Éditions Massot & LLL.



**Sans matières premières, point de transition énergétique ni numérique. Or, la disponibilité de la plupart de ces métaux est soumise à de nombreux aléas. Un sujet éminemment stratégique où il est question de souveraineté économique, technologique, industrielle et environnementale. Deux spécialistes font le point.**

### Explosion de la demande

**Guillaume Pitron** En Europe, nous faisons face à un risque de pénurie d'approvisionnement de certains métaux déterminants dans la transition énergétique. Un métal est considéré comme critique lorsque sa production est faible par rapport aux métaux abondants, et surtout lorsqu'elle est concentrée dans quelques pays producteurs. Par exemple, le Brésil produit plus de 90 % du niobium, les États-Unis plus de 90 % du béryllium, la Chine plus de 90 % de certaines terres rares. Cette situation est identifiée depuis 2011 par la Commission européenne qui dresse tous les trois ans une liste de ces métaux critiques. En France, ils sont nommés métaux stratégiques par le comité du même nom parce qu'ils sont au cœur des filières industrielles d'un pays qui n'en maîtrise pas l'extraction.

**Luc Aixala** La question de l'approvisionnement est cruciale car nous assistons à une explosion du marché des batteries, panneaux photovoltaïques (PV) et moteurs électriques. Les batteries des véhicules électriques contiennent par exemple du lithium, du cobalt et du nickel. Si le premier est relativement disponible, les deux autres le sont moins et sont onéreux (entre 20 et 70 € le kg). Or, des experts estiment que la demande de ces matériaux sera multipliée par six d'ici 2030 par rapport à 2010, ce qui reviendra à produire 150 000 tonnes par an de cobalt contre 25 000 tonnes.

Les industriels européens commencent à évoquer leur difficulté d'approvisionnement, car le secteur est dominé par l'Asie. L'Europe cherche à retrouver sa souveraineté dans la fabrication des batteries en relocalisant leur fabrication dans des *giga-factory*. Il y a deux projets en France, ceux des entreprises ACC et Verkor, qui visent entre 500 000 et un million de batteries par an. Mais cela représente plusieurs milliards d'euros d'investissement.

### Souveraineté minérale et technologique

**G. P.** Le sujet des matériaux critiques est en effet lié à celui de la souveraineté. On constate que la Chine a pensé sa souveraineté minérale au regard de sa souveraineté technologique, avec une vision à long terme. Elle contrôle ses ressources pour capitaliser sur toute la chaîne de valeurs

**« Les batteries des véhicules électriques contiennent par exemple du lithium, cobalt et nickel. Des experts estiment que la demande de ces matériaux sera multipliée par six d'ici 2030 par rapport à 2010, ce qui reviendra à produire 150 000 tonnes par an de cobalt contre 25 000 tonnes. »**

Luc Aixala

en extrayant, développant et fabriquant batteries, aimants permanents, panneaux PV, etc. Un boulanger ne peut faire de bon pain s'il n'a pas de farine ! Et la Chine l'a bien compris, de la mine au laboratoire.

**L. A.** Les entreprises ont conscience de cette problématique, mais demeure le problème de la compétitivité. Par exemple, fabriquer les aimants des moteurs électriques et des éoliennes en mer coûte deux fois plus cher en Europe qu'en Chine. Nous devons faire face à une réalité industrielle difficile. La France et l'Europe s'emparent ainsi du sujet : le plan France Relance accorde 450 millions d'euros aux projets

PROPOS RECUEILLIS  
PAR AUDE GANIER

Résilience, dont une partie pour les matériaux critiques et l'alliance européenne des matériaux stratégiques regroupe 500 partenaires industriels pour réfléchir à des projets et plateformes pilotes dans le cadre du programme Horizon Europe.

## Souveraineté environnementale et sociale

**G. P.** Se pose la question des souverainetés environnementale et sociale. Fabriquer une batterie ou un aimant dans un pays où l'on ne maîtrise pas le mix énergétique (par exemple dominé par le charbon et le pétrole), ni les conditions d'extraction du minerai (polluantes voire socialement déplorables), revient à perdre une partie de notre souveraineté en la matière.

**L. A.** L'analyse du cycle de vie (ACV) des produits, qui consiste en l'étude technico-économique et l'impact environnemental de l'ensemble des étapes de leur fabrication, est en effet un outil très important. L'utiliser dans les programmes Énergie du CEA pour nos partenaires industriels permet de mieux concevoir les systèmes bas carbone, voire de générer parfois de réelle symbiose industrielles. Mais, dans les faits, l'ACV ne peut être le seul décideur car, à un moment donné, l'industriel doit pouvoir vendre ses produits. C'est important de le dire, tout comme il faut nuancer le discours du « on va tout recycler ».

## Vers un mix de matières primaires et secondaires

**G. P.** Il est en effet candide de tout miser sur le recyclage. Car entre le moment où un produit rentre sur le marché et le moment où il en sort, il peut se passer dix ans. Or, sa consommation croît de 10 % par an, si bien que beaucoup de métaux doivent être produits dans cet intervalle de temps. Et donc vous vous retrouvez avec probablement autant de mines à ouvrir qu'il y a dix ans.

L'avenir sera un mix de matières primaires (extraites) et secondaires (recyclées).

**L. A.** En Europe, les réglementations actuelles, et celles se profilant, sont à la hauteur des enjeux environnementaux. Mais le problème est en partie ailleurs. La Direction générale des entreprises a pris les choses en main concernant les aimants permanents. Elle mène depuis plus d'un an des groupes de travail avec les acteurs du secteur qui ont fait émerger plusieurs projets structurants soutenus par France Relance. Mais, force est de constater que des sujets ont été désindustrialisés et qu'il y a des « trous » dans la chaîne de valeur. Il y avait notamment en France le recyclage des terres rares, mais l'usine de Solvay a fermé fin 2016, faute de rentabilité.

Autre exemple : demain, 100 % des batteries de la mobilité électrique devront être recyclées, il y a donc un marché conséquent. Mais bien que l'Europe ait de grandes capacités technologiques et industrielles en recyclage, elles sont sans commune mesure avec celles de la Chine : 160 000 tonnes par an pour plusieurs usines en cours de construction, quand nos acteurs, comme la SNAM en France, en recyclent 10 à 20 000 tonnes par an. De plus, cela peut vraiment coûter moins cher demain d'envoyer par conteneurs des batteries usées et de les recycler en Chine. Mais cela serait dramatique, tant au niveau économique qu'environnemental. Ne va-t-il pas falloir à un moment aider ces industries stratégiques ?

## Intervention publique

**G. P.** Oui, comment valoriser les matériaux recyclés par rapport à ceux extraits de la mine ? Il y a déjà le problème du prix des métaux : si on intégrait dans le coût du néodyme ou de l'indium, celui de la construction de l'hôpital pour soigner les cancers induits par les méthodes d'extraction, et celui de la dépollution de tous les sols, il est certain que ce coût serait bien plus important. Mais les Chinois ne le feront pas, à moins que cela devienne socialement et politiquement intenable.

**« Il est candide de tout miser sur le recyclage. Car entre le moment où un produit rentre sur le marché et le moment où il en sort, il peut se passer dix ans. Or, sa consommation croît de 10 % par an. L'avenir sera un mix de matières primaires (extraites) et secondaires (recyclées). »**

Guillaume Piron

Ce qui n'est pas encore le cas. On pourrait attendre longtemps avant d'être compétitif par les seules règles du marché, et que la matière secondaire soit aussi compétitive que la matière primaire. D'autant plus que les industriels sont soumis aux cycles très changeants des cours des matières premières, avec les difficultés de visibilité et de projections que cela induit pour la filière du recyclage. Nous avons en effet besoin que la puissance publique crée artificiellement de la compétitivité.

## Le temps de la mine n'est pas terminé

**G. P.** Je crois beaucoup en la relocalisation de nos moyens d'extraction, avec la réouverture de mines en Europe et en France. Car la production de ces matériaux dans des conditions environnementales et socialement acceptables est aussi un enjeu éthique. Si on veut une transition écologique et solidaire, du nom du ministère qui en a la charge, il faut qu'à un moment donné on prenne notre part de ce « fardeau » et qu'on ne compte plus sur un autre pour faire la « sale besogne ». Car dans nos systèmes énergétiques, y compris fossiles, tout commence par une cicatrice dans le sol. ●



# AGORA L'ACTU DU CEA

EXPERTISE

## Le rapport « Blockchain »

**Des centaines de technologies passées au crible, 18 verrous identifiés et 14 recommandations. Tel était l'enjeu du rapport « Les verrous technologiques des blockchains » rédigé par le CEA, l'Institut Mines-Télécom et l'Inria à la demande du gouvernement français.**

Rappelons que la *blockchain* est un procédé visant à sécuriser des transactions entre utilisateurs, sans passer par un organe central, mais par le maintien d'un registre partagé où tous les échanges sont répertoriés ; échanges qui ne sont enregistrés qu'une fois validés par les utilisateurs. Disruptive, elle crée des modalités innovantes d'échanges entre des secteurs qui ne se parlaient pas auparavant, et permet de faire émerger de nouveaux modèles d'organisation et de création de valeur.

### Confiance numérique

Les sept auteurs, dont deux chercheuses du CEA-List, ont abordé le sujet sous différents angles. À commencer par celui de quatre grands types d'usages : notariat, banque, commerce, management. L'activité économique autour de la *blockchain* en France et principalement ses start-up ont également fait l'objet d'une analyse approfondie. Tout comme l'organisation de la recherche ainsi que l'offre et les besoins en formation, comparés à ceux d'autres pays et régions du monde.

Un travail minutieux et précis qui insiste sur la nécessaire mobilisation transversale de la recherche, de l'industrie et des usagers pour garantir et promouvoir la confiance numérique. Et pour assurer la souveraineté de la France en la matière. AG



© Otice

EXPERTISE  
INTERNATIONALE

## Mission accomplie pour l'Otice

La station de mesure des infrasons IS25, en Guadeloupe, est certifiée par l'Organisation du traité d'interdiction complète des essais nucléaires (Otice). Cette station rejoint le réseau mondial, qui en compte 321, pour permettre de localiser et quantifier tout essai nucléaire. Il s'agit aussi de la dernière des 16 stations que la France s'était engagée à construire. De fait, la France est la première des cinq puissances nucléaires reconnues par le Tice à avoir achevé sa contribution au système de surveillance internationale. Les stations françaises, situées en Guadeloupe, Guyane, Martinique, Nouvelle-Calédonie, Polynésie, Réunion et dans les Terres australes, ont été réalisées par les équipes

de la direction des applications militaires du CEA, opérateur technique pour la France. Elles combinent plusieurs technologies complémentaires pour surveiller tout mouvement qui correspondrait à un essai nucléaire souterrain, atmosphérique, ou en mer (sismomètres, microbaromètres pour mesurer les infrasons, capteurs hydrophones). Le CEA fut également en charge de leur raccordement au réseau, dont les mesures sont gérées par le centre international de données de Vienne, en Autriche, où siège l'Otice. 51

↑  
Ci-dessus  
Siège de l'Otice à Vienne.



**François Tardif**, chargé de mission Éco-innovation au CEA

#### CONTENU DE LA FORMATION

##### Trois enseignements sous format numérique,

réalisés avec l'INSTN et Grenoble INP :

- 1 Monter des projets de R&D dans le contexte de l'économie circulaire

**Durée** équivalent 4 h

**Cible** monteurs de contrats

- 2 Outils et méthodes pour éco-innover

**Durée** équivalent 2 j

**Cible** ingénieurs

- 3 Analyse du cycle de vie

**Durée** équivalent 2 j

**Cible** futurs spécialistes de l'éco-conception

##### Une newsletter mensuelle,

à destination des personnels du CEA, conçue pour les acculturer et les inspirer avec des exemples d'éco-innovation réalisés dans le monde dans des domaines techniques proches des leurs.

##### Des supports vidéo

diffusés sur les réseaux intranet pour traiter de tous les aspects de l'éco-innovation.

##### Des travaux pratiques

au centre d'innovation ouverte Y Spot du CEA à Grenoble... lorsque la situation sanitaire le permettra.

## ENTRETIEN

# Formation à l'éco-innovation

PROPOS RECUEILLIS  
PAR AUDE GANIER

Dans le cadre d'une démarche globale lancée par le CEA, la Direction de la recherche technologique propose depuis mars 2021 un programme de sensibilisation de ses techniciens, ingénieurs et chercheurs à l'éco-innovation. Cette nouvelle manière d'appréhender la R&D apparaît cruciale pour maîtriser l'impact des travaux, tant pour les organismes de recherche que pour leurs partenaires industriels. Le point avec François Tardif, chargé de mission Éco-innovation au CEA.

### Dans quel contexte s'inscrit cette initiative de sensibilisation des chercheurs ?

En 2020, la Commission européenne a adopté l'économie circulaire comme l'un des piliers du *Green deal* visant à faire de l'Europe le premier continent neutre pour le climat. Il s'agit d'un véritable changement de modèle de croissance qui s'inscrit dans une trajectoire durable en adressant, au-delà des aspects de compétitivité, la régénération de l'environnement et le bien-être sociétal. Cette évolution va modifier notre façon de vivre, de produire, et d'innover. Ainsi, les acteurs de la recherche vont devoir raisonner non plus uniquement en termes de performance scientifique et technique mais en prenant en compte l'impact plus global de leurs travaux. Cela inclut les aspects économiques, l'environnement et la société ; et ce, dès l'origine des processus de R&D. Il s'agit de passer de l'innovation à l'éco-innovation qui considère globalement les problématiques environnementales et l'usage futur des technologies.

### Pourquoi l'éco-innovation est elle importante pour un organisme de recherche technologique ?

Il y a au moins trois raisons. La première est l'opportunité de développer de nouvelles technologies plus vertueuses à destination de nos

partenaires industriels et *in fine* de la société. La deuxième est d'accompagner cette transition de méthode : la Commission européenne et la France inscrivent désormais la maîtrise de l'impact environnemental dans tous les appels d'offres de R&D qu'elles financeront. Enfin, il s'agit de répondre aux attentes des équipes et d'être plus attractifs vis-à-vis des futurs talents.

### En quoi l'éco-innovation est synonyme de performance pour les entreprises ?

L'éco-innovation constitue un levier stratégique car elle permet de rendre plus vertueux les produits développés. L'attractivité des entreprises est ainsi dopée car elles répondent aux attentes des consommateurs et clients industriels, tous de plus en plus responsables. Elle permet aussi d'imaginer de tous nouveaux types de produits ou de services spécifiquement adaptés à l'économie circulaire qui trouveront, par leur caractère précurseur, des marchés moins compétitifs.

Le positionnement de l'entreprise dans l'économie circulaire permet également d'améliorer son image vis-à-vis de ses clients, de cultiver sa culture d'entreprise, de renforcer ses marques commerciales et employeur, en particulier en matière d'attractivité des jeunes talents de la génération « Climat ». ●



## STRATÉGIE INDUSTRIELLE

# Du nouveau pour la filière nucléaire

Un avenant vient d'être ajouté au contrat stratégique de la filière nucléaire signé en janvier 2019.

L'avenant intègre notamment les priorités et moyens du plan « France Relance » du gouvernement, qui lui alloue 470 millions d'euros supplémentaires. Cette décision réaffirme une trajectoire ambitieuse pour le redéploiement de cette filière qui implique 2 600 entreprises françaises et génère 220 000 emplois (directs et indirects). Dans ce contexte, la contribution du CEA portera sur trois axes. Tout d'abord, la formation et le maintien des compétences grâce à son Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN). Deuxième axe, la transformation numérique de la filière, dans laquelle plusieurs projets d'envergure seront menés ; par exemple, le développement piloté par EDF d'un réacteur numérique qui permettra de conduire toutes les études de simulation nécessaires à la vie d'une centrale.

Le troisième axe concerne la transformation écologique de la filière dans une démarche d'économie circulaire, et la recherche sur les SMR (*small modular reactors*), notamment au travers du projet français Nuward™, aux côtés de TechnicAtome, EDF et NavalGroup. Ces petits réacteurs modulaires de petite puissance pourraient en effet s'insérer dans le mix énergétique décarboné, en complément des énergies renouvelables intermittentes. Le CEA continuera d'apporter son expertise et sa R&D en matière de recyclage : recyclage des métaux de très faible activité, multirecyclages en réacteur à eau sous pression, recyclage complet des combustibles usés envisagés avec la génération 4 de réacteur. Et il explorera la voie des réacteurs à sels fondus, notamment pour la possibilité de transmuter certains déchets radioactifs. SR

## PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE 1<sup>er</sup> déposant français de brevets

Pour la deuxième année consécutive, le CEA figure en tête du classement français de demandes de dépôts de brevets (520 en 2020) et à la 37<sup>e</sup> place mondiale. Et cela, malgré une baisse de demandes de 12 %, du fait de la crise sanitaire. Il se place ainsi devant les industriels français Safran (48<sup>e</sup> mondial) et Saint-Gobain (50<sup>e</sup> mondial), et devant l'organisme de recherche Inserm (89<sup>e</sup> mondial). La France est le 2<sup>e</sup> pays le plus innovant en Europe, derrière l'Allemagne, avec une hausse de 3,1% de demandes. AG

## PARTENARIAT R&D commune entre le CEA et Atos

Après de nombreuses années de collaboration, notamment en matière de calcul intensif, le CEA et Atos signent un partenariat stratégique de recherche et d'innovation. Construit autour de plusieurs grandes thématiques, il inclut la lutte contre le changement climatique. Les deux organismes mettront leurs expertises respectives à profit pour aider les territoires à mieux suivre leurs émissions de CO<sub>2</sub>, en établissant des bilans en quasi-temps réel. Atos et le CEA prévoient également d'explorer le champ du numérique frugal, enjeu majeur de maîtrise des consommations électriques et des émissions de gaz à effet de serre. La R&D commune portera aussi sur l'informatique quantique, en exploitant les performances de l'*Atos quantum learning machine* ; l'intelligence artificielle ; la cybersécurité, avec la mise en œuvre d'algorithmes pré et post-quantiques et le développement des capacités en matière de cryptographie homomorphe ; et enfin sur l'architecture cloud de confiance. SR

### ← Ci-contre

Centrale nucléaire de Cruas-Meysses.



# LE COIN DES START-UP

PAR SYLVIE RIVIÈRE

## Sublimed soulage les douleurs

Un adulte sur cinq souffre de douleurs chroniques (lombalgie, arthrose, cancer, etc.). C'est pour répondre à cet enjeu de santé publique que la start-up Sublimed a développé le dispositif actiTENS. « Notre système reprend le principe de la neurostimulation électrique transcutanée. Connue depuis plus de 40 ans, elle consiste à stimuler électriquement le système nerveux pour remplacer le signal douloureux. actiTENS est une solution miniaturisée, portable sous les vêtements sous forme d'un patch souple s'adaptant à la morphologie et connectée à une application sur smartphone. C'est un vrai plus par rapport aux solutions existantes, certes efficaces, mais lourdes, encombrantes et souvent abandonnées par les patients à cause de la forte gêne physique et psychologique occasionnée », témoigne Nicolas Karst, président de Sublimed. L'idée est née de sa rencontre en 2013 avec le Dr Jean-Pierre Alibeu, chef du centre antidouleur du CHU



© Sublimed

de Grenoble. Le premier, ingénieur au CEA-Liten, souhaite développer des solutions pour la santé. Le second rêve de dispositifs miniaturisés pour ses patients. L'alchimie donne naissance en 2015 à la start-up Sublimed et à son produit phare actiTENS. C'est un succès, avec aujourd'hui plus de 10 000 patients

équipés en France. Prescrit par environ 200 centres antidouleur, le produit fait l'objet d'un remboursement partiel par la Sécurité sociale. Sublimed vise désormais les marchés européen et américain, pour lequel elle vient d'obtenir le sésame : l'agrément de la *Food & Drug Administration* ! ●

### TECHNOLOGIE

Un patch flexible générateur d'impulsions électriques. Porté sur le corps, au plus près de la zone à soulager, il délivre deux types d'impulsions : haute fréquence pour stopper la douleur ; basse fréquence pour stimuler la production d'endorphine et ainsi obtenir un effet antalgique naturel et général.

Des électrodes cutanées déportées, reliées par câbles courts.

Une électronique pilotable par *bluetooth* depuis un smartphone.

→ [www.subli-med.fr](http://www.subli-med.fr)

### MARCHÉS

**En France, et bientôt en Europe et aux États-Unis**

#### Où ?

- Centres antidouleur.
- Pharmacies.
- Grossistes, distributeurs et magasins de matériel médical.

### DATES-CLÉS

**2015**  
Création de Sublimed.

**Juin 2016**  
Levée de fonds de 700 000 euros en capital.

**Janvier 2018**  
Obtention du marquage CE ; lancement de actiTENS sur le marché français.

**Décembre 2018**  
Levée de fonds de 2,1 millions d'euros en capital.

**Décembre 2020**  
Agrément de la FDA (*Food & Drug Administration*) sur le marché américain.



#### Ci-dessus

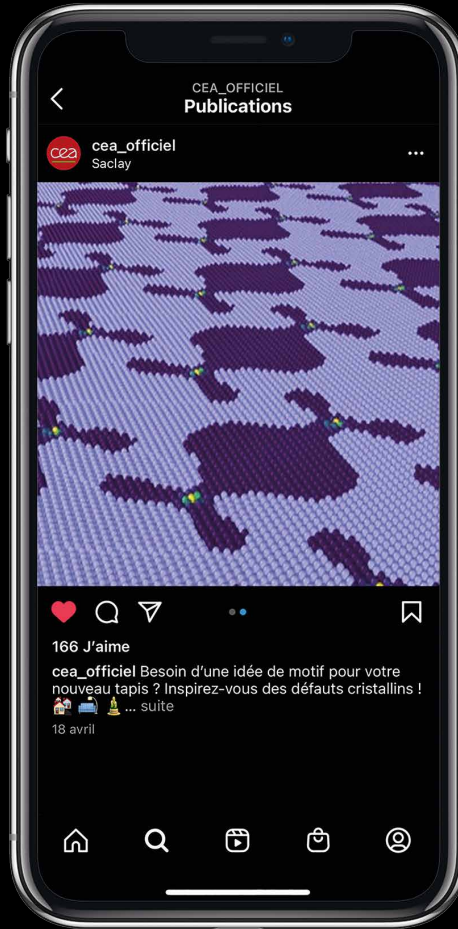
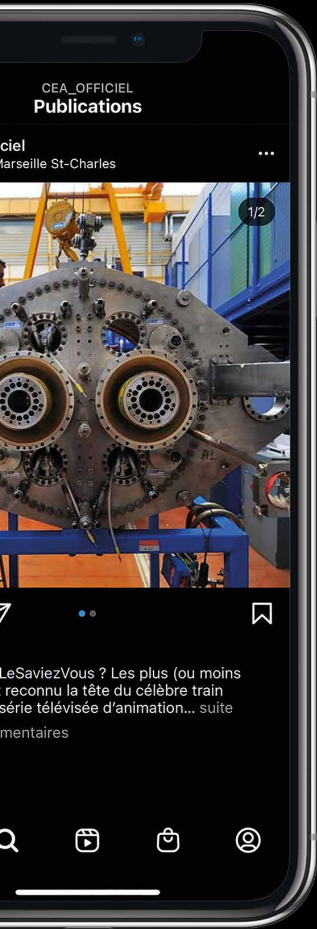
Dispositif actiTENS (patch et électrodes), pilotable *via* une application sur smartphone.



#### CEA-Liten

Institut d'innovation sur les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (Grenoble).





Suivez #CEA\_Officiel

