

# Les défis

du cea

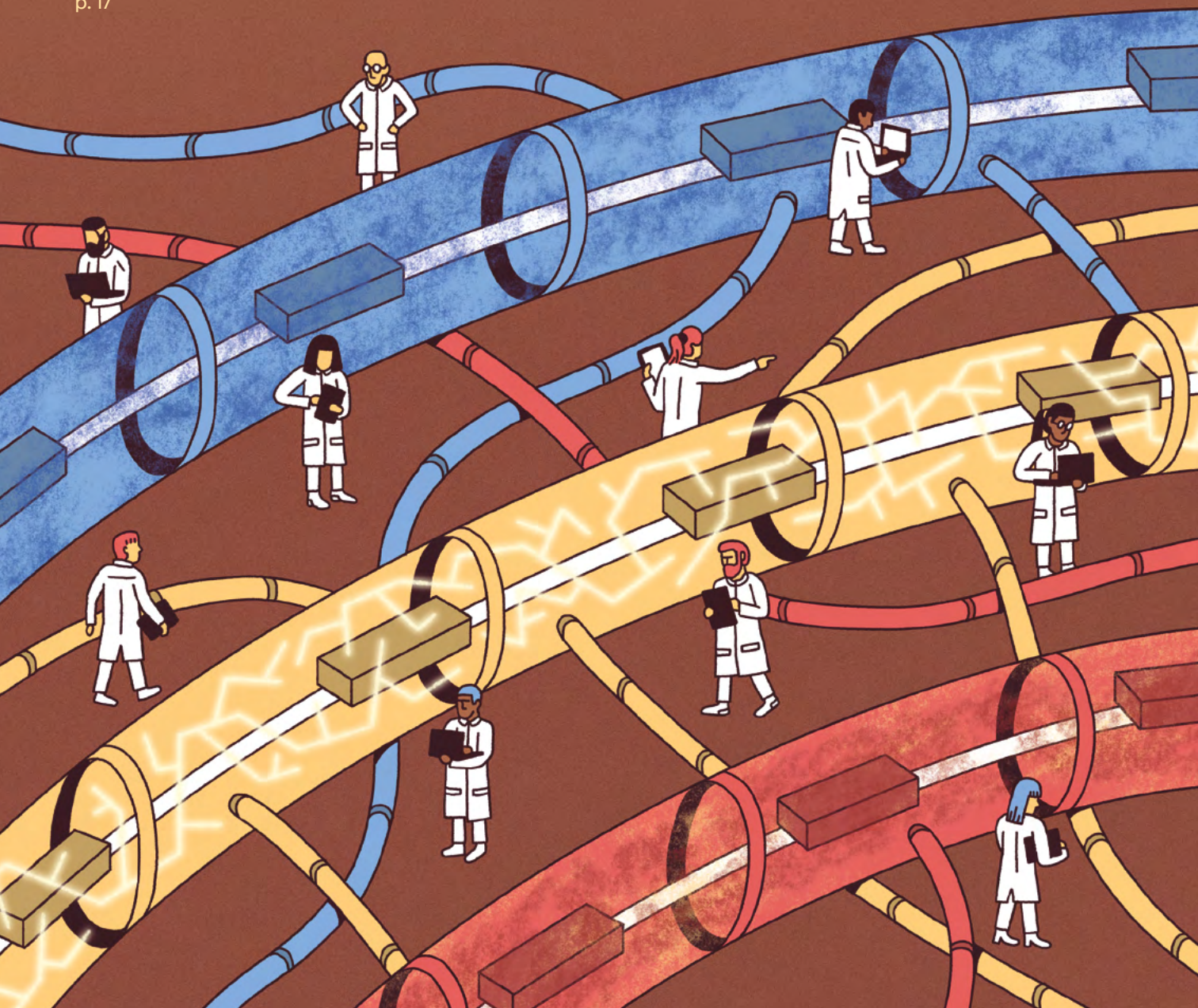
LE MAGAZINE DE LA RECHERCHE IMPLIQUÉE  
#250 – SEPTEMBRE / OCTOBRE 2022

DOSSIER  
**Les réseaux  
d'énergie du futur**

p. 17

Tout s'explique  
**Soigner avec  
des anticorps  
monoclonaux**  
p. 27

Regards croisés  
**Qui est  
réellement  
l'IA ?**  
p. 30





### L'humeur de...

Aude Ganier, rédactrice en chef

**Il n'est rien de permanent que le changement! Et c'est avec conscience, agilité, créativité, maîtrise et expertise que les équipes du CEA se mobilisent. Souveraineté, frugalité, innovation et progrès des connaissances, en somme, développement durable: autant d'enjeux au cœur des solutions que le CEA propose à la société. Grâce aux chercheurs, la rédaction de *Les défis du CEA* a eu à cœur de les décrypter pendant plus de trente ans, dans un magazine qui a su évoluer avec son temps. Accompagné par des professionnels de l'édition et de la direction artistique, le magazine tire aujourd'hui sa révérence. Ce dernier numéro est dédié à Maylis Gaillard de l'Atelier Marge Design.**

 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, Hugo Leroux  
**Comité éditorial** Claire Abou, Luc Barbier, Mathilde Costes-Majorel, Sophie Kerhoas, Elisabeth Lefèvre-Rémy, Camille Giroud, Sophie Martin, Frédérique Tacnet, Valérie Vandenberghe  
**Iconographie** Micheline Bayard  
**Illustrations** Jeremy Perrodeau (couverture, p. 27-29), Marta Signori (p. 2, 30)  
**Conception et réalisation graphique, secrétariat de rédaction** Atelier Marge Design  
**Impression** Papier Arctique Volume White FSC. Stipa.  
 Octobre 2022 - N° ISSN 1163-619X. Tous droits de reproduction réservés.

# SOMMAIRE #250

## EURÉKA

**03 Réchauffement climatique**  
Stop à la déforestation

**04 Communication quantique**  
La clé de l'intrication

**05 Imagerie cérébrale**  
Lire les pensées dans l'image

**06 Solaire photovoltaïque**  
Des panneaux biosourcés

**07 Réalité virtuelle**  
Formation façon jeu vidéo

**08 Astrophysique**  
Des nouvelles du Webb

**10 Matériaux**  
Magnétique en couche ultramince

**11 Nanoélectronique**  
Peser, à l'atogramme près

**12 Imagerie X**  
Les secrets du mammoth

## MAKING-OF

**13 Coulisses d'un projet**  
Le laser Nanolight, dompteur d'électrons

## AGORA

**32 Les 13 lauréats du CEA**

**33 Le gouvernement formé sur le climat**

**33 BIC rachète AMI**

## DOSSIER

# Les réseaux d'énergie du futur



**17 Anticiper la grande mutation**

Entretien  
**20 Le bâtiment, brique essentielle pour stabiliser le réseau**



## TOUT S'EXPLIQUE

**27 Les anticorps monoclonaux thérapeutiques**

**34 Toujours dans le Top 10**

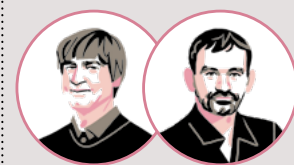
**34 Accord sur la cybersécurité**

**21 Construire le réseau électrique du futur**

**25 Le gaz et la chaleur à la rescousse**

## REGARDS CROISÉS

**30 Qui est réellement l'IA?**  
François Terrier et Raphaël Granier de Cassagnac



## LE COIN DES START-UP

**35 Arcure, l'œil des véhicules industriels**

En attendant, toutes les actualités sont à découvrir sur le site [www.cea.fr](http://www.cea.fr) et sur les réseaux sociaux [@CEA\\_Officiel](https://www.instagram.com/CEA_Officiel).



**Le CEA prépare une nouvelle revue pour le printemps 2023 et la proposera sur abonnement au format numérique.**

# EURÉKA L'ACTU DES LABOS



© Kate Evans / Cifor

## RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

# Stop à la déforestation

**↑ Ci-dessus**  
Contraste entre forêt et zone agricole près de Rio Branco (Brésil).

**CEA-LSCE**  
Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (Saclay).

**« Stoppons la perte des forêts pour limiter le réchauffement climatique », ont déclaré 141 pays en novembre 2021. Oui, mais pas n'importe comment, préviennent trois chercheurs.**

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Lors de la COP26<sup>1</sup> de novembre 2021 à Glasgow, 141 pays se sont engagés à « stopper et inverser la perte des forêts d'ici 2030 ». L'initiative couvre plus de 13 millions de km<sup>2</sup>, soit près de 91 % des forêts mondiales, dont l'Amazonie. Préserver ces espaces, qui globalement absorbent 30 % des émissions annuelles de CO<sub>2</sub>, est essentiel pour protéger le climat et ainsi espérer atteindre les objectifs de l'accord de Paris de 2015<sup>2</sup>, à savoir limiter le réchauffement en-deçà de 2°C, et si possible sous les 1,5°C.

### Inverser la perte des forêts ?

Un trio de chercheurs a cependant soulé un point important. Qu'entend-on

par « inverser la perte des forêts » ? « Toutes les forêts ne se valent pas. Avec des arbres grands et hauts et une végétation très dense, les forêts primaires contiennent bien plus de carbone que les nouvelles plantations, aux arbres plus petits et régulièrement récoltés. Remplacer les premières par les secondes n'est pas du tout équivalent en matière de séquestration de carbone », commente Philippe Ciais, climatologue au LSCE.

### Trois scénarios comparés

Pour étayer leurs arguments, les chercheurs ont examiné trois scénarios à l'aide d'un modèle éprouvé : une déforestation des forêts primaires qui s'arrête d'ici 2030 dans les pays signataires ; une déforestation réduite avec du reboisement pour compenser les surfaces perdues ; une déforestation qui continue au rythme actuel avec un reboisement plus important pour maintenir une surface constante.

Bien que ces scénarios soient conformes à la déclaration de la COP26, ils conduisent à

des flux nets de carbone très différents : le premier d'entre eux séquestre une quantité importante de CO<sub>2</sub> en quelques années seulement ; le second le fait beaucoup moins bien. Quant au troisième, il est similaire en perte de carbone au *business as usual*, où la déforestation continuerait au même rythme que pendant les dernières années. Sans compter l'impact très négatif de la destruction de forêts primaires sur la biodiversité.

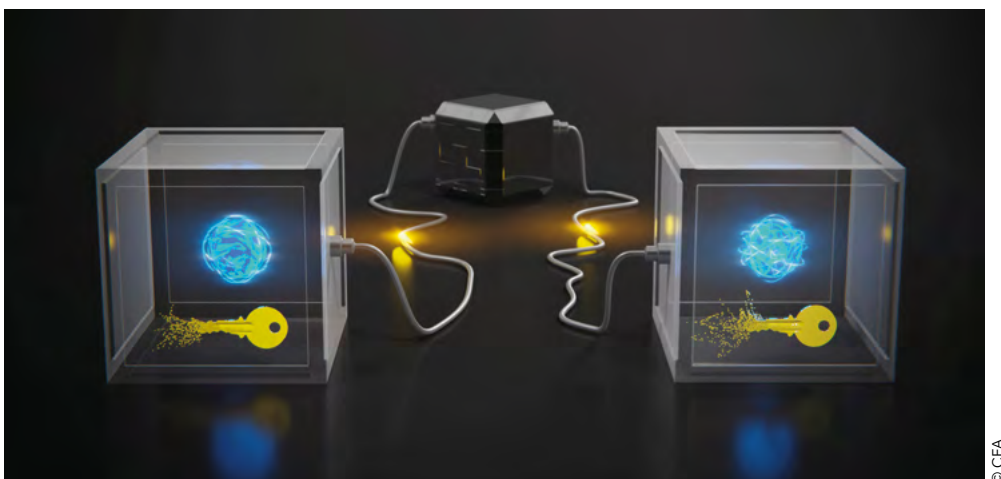
Selon cette étude, la seule voie efficace pour le climat est l'arrêt net de toute déforestation. Mais il n'est pas certain que les pays signataires, notamment ceux dans lesquels subsistent encore des forêts intactes, interprètent l'accord de cette manière... ●

1. COP: Conférence des parties des Nations unies sur le changement climatique.  
 2. Signé lors de la COP21.



### Ci-contre

L'échange de clés cryptographiques nécessite actuellement que les machines qui l'effectuent soient elles-mêmes sûres.



©CEA

## COMMUNICATION QUANTIQUE La clé de l'intrication

**L'ordinateur quantique n'existe pas encore qu'il représente déjà une menace dans le domaine des communications. C'est ce qu'anticipe le CEA-IPhT en proposant, dans le cadre d'une collaboration internationale, une solution pour sécuriser les futurs transferts de données. Une première mondiale.**

PAR AUDE GANIER

Paiements sur Internet, consultation de ses données bancaires ou de santé... Chacune de ces opérations est sécurisée par des protocoles de chiffrement (de type RSA) qui reposent sur des problèmes mathématiques supposés difficiles à résoudre. Ils consistent en l'échange, entre un émetteur et un récepteur, d'une « clé » composée d'une suite de nombres aléatoires (formalisés en bits, 0 et 1). Mais comment garantir l'inviolabilité de ces clés cryptographiques lorsque les ordinateurs quantiques seront opérationnels, c'est-à-dire capables de résoudre ces problèmes mathématiques bien plus rapidement que les ordinateurs traditionnels ?

### Le temps presse

« Avec les technologies actuelles, il faudrait un ordinateur quantique à plusieurs millions de qubits pour déchiffrer ces protocoles. Même si IBM prévoit de lancer une machine d'environ 1000 qubits, nous avons récemment démontré qu'un processeur quantique de 10 000 qubits, utilisant une mémoire quantique, pouvait déjà casser un système RSA », contextualise Nicolas Sangouard, physicien au CEA-IPhT. Par ailleurs,

tel que l'explique Jean-Daniel Bancal du même institut : « la sécurité des procédés actuels suppose également que les machines s'échangeant la clé soient elles-mêmes sûres ». La solution pourrait provenir d'une distribution quantique de ces clés, en utilisant le phénomène quantique d'intrication selon lequel deux particules intriquées se comportent de manière identique, quelle que soit la distance les séparant.

### Une clé de chiffrement de plus de 95 000 bits

Explication : lorsque l'on mesure l'une de ces particules intriquées, on obtient un résultat aléatoire ; et lorsque l'on mesure la seconde, le résultat est également aléatoire mais corrélé à celui de la première. « La répétition de ces mesures quantiques permet d'obtenir deux chaînes de résultats parfaitement corrélés, quel que soit l'état de sûreté des machines. Ces chaînes constituent la clé de chiffrement », indique Jean-Daniel Bancal. Ce que la collaboration<sup>1</sup> a permis de démontrer : l'expérience s'est déroulée entre un système émetteur et un récepteur, distants de deux mètres, chacun disposant d'un qubit matérialisé par un ion strontium. Après la préparation de ces deux ions dans un état intriqué, les chercheurs ont procédé à plus d'un million de mesures (dites « test de Bell »). Pendant une dizaine d'heures, ils ont ainsi pu s'assurer de l'intrication des ions et sont parvenus à une clé de plus de 95 000 bits. Un résultat publié dans la revue *Nature*. ●

1. Universités de Genève et d'Oxford, Écoles polytechniques fédérales de Lausanne et de Zurich.

## IMAGERIE CÉRÉBRALE

# Lire les pensées dans l'image

**Des chercheurs de NeuroSpin ont élaboré un algorithme d'intelligence artificielle permettant de « deviner » les processus mentaux à l'œuvre dans un cerveau, à partir de l'examen de ses images en IRM fonctionnelle. Un formidable outil pour la recherche en neurosciences.**

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Calculer mentalement, regarder une photo, lire des phrases... Chacune de ces tâches sollicite une ou des zones spécifiques de notre cerveau, phénomène qu'il est possible de suivre en direct grâce à l'IRM fonctionnelle (IRMf). Ce qui permet aux chercheurs de construire des cartes cérébrales cognitives. Mais l'inverse est-il possible ? C'est-à-dire déduire un processus mental à partir d'une image cérébrale acquise par IRMf. « Et saurions-nous le faire à partir de n'importe quelle image produite par la communauté scientifique, de façon indistincte, quelle que soit l'étude ? », se demandait Bertrand Thirion, chercheur Inria à NeuroSpin. Un tel moteur de décodage serait une avancée pour la recherche fondamentale : il faciliterait l'interprétation des images cérébrales et permettrait même de réexploiter des milliers de clichés déjà collectés par le passé.

### 50 000 images annotées

Comme point de départ, l'équipe disposait de la base de données NeuroVault de l'université de Stanford, qui collecte des clichés cérébraux d'IRMf. « Nous avons entrepris un important travail d'homogénéisation des images, par exemple pour les ramener à une même résolution. Puis étiqueté chacune d'entre elles avec un concept cognitif, en adoptant le vocabulaire proposé par le projet collaboratif *Cognitive Atlas* », précise le chercheur. Plus de 50 000 clichés ont ainsi été réexaminés et associés à 50 processus mentaux, tels que la mémoire de travail ou la fluidité de lecture.

Puis, les chercheurs ont entraîné des réseaux de neurones (système d'intelligence artificielle capable d'apprentissage automatique) à prédire les processus mentaux sur des dizaines de milliers d'images de cerveau. Si bien que l'algo-

rithme est devenu capable de réaliser ces prédictions sur des images inédites, sans aucune connaissance préalable du cadre expérimental ou des concepts pertinents.

### Un vocabulaire à enrichir

« Nous sommes les premiers à avoir entrepris et réussi un décodage aussi large et systématique », s'enthousiasme Bertrand Thirion, qui envisage déjà la suite du programme. « Nous allons continuer à enrichir le vocabulaire des concepts cognitifs pour annoter davantage d'images cérébrales. Celui de la reconnaissance de la couleur n'est par exemple pas renseigné ! » Des lacunes qu'il espère combler en tirant parti du meilleur de deux mondes, celui des banques d'images cérébrales et celui des bases de publications scientifiques. ●



### NeuroSpin

Centre de recherche pour l'innovation en imagerie cérébrale du CEA-Joliot (Saclay).

### LEXIQUE

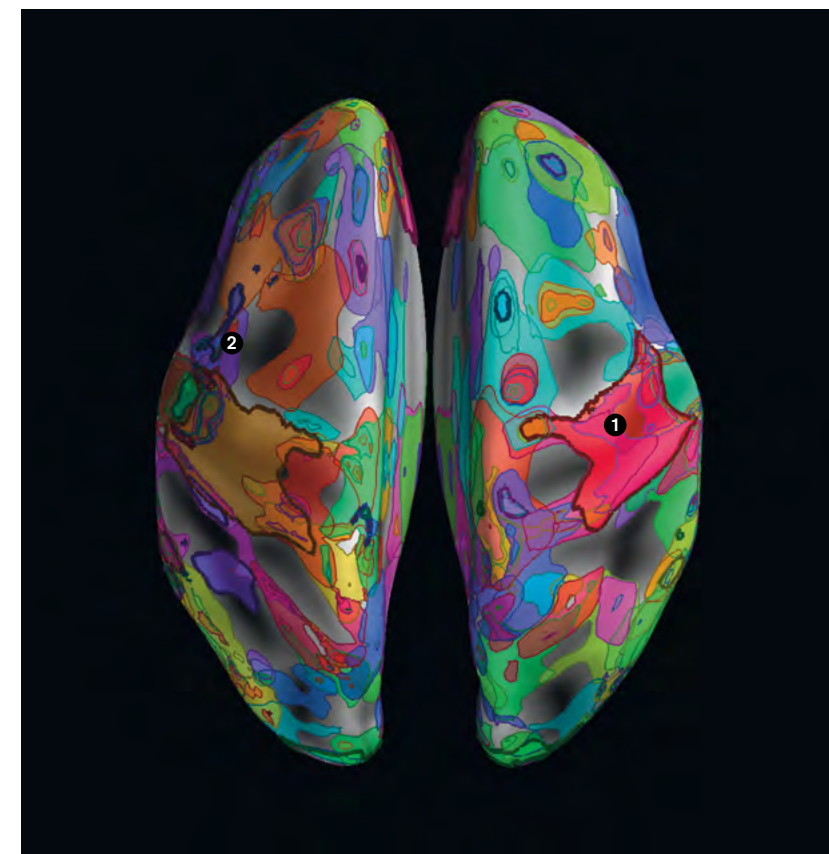
#### IRM fonctionnelle

Technique permettant de « voir » les zones cérébrales sollicitées par une action mentale, en mesurant l'arrivée du sang oxygéné dans les vaisseaux sanguins qui alimentent les groupes de neurones activés. Cette mesure repose sur les propriétés magnétiques de la molécule d'hémoglobine.



#### Ci-dessous

Différents réseaux cérébraux prédisent sélectivement l'implication de processus mentaux dans les tâches cognitives cartographiées par IRM fonctionnelle. Par exemple, le réseau rose à droite ① prédit l'occurrence d'une activité avec la main gauche ; le réseau violet à gauche ② prédit que le participant effectue une tâche de langage ou de calcul.



©CEA



### CEA-IPhT

Institut de physique théorique (Saclay).



© P. Avavian / CEA

## SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

**↑ Ci-dessus**  
Différents prototypes de panneaux solaires biosourcés sont testés sur les plateformes du CEA.

### LEXIQUE

**Biosourcé**  
Se dit d'un produit ou matériau entièrement, ou en grande partie, fabriqué à partir de matières d'origine organique et biologique.

# Des panneaux biosourcés

**Intégrant des thermoplastiques et des fibres naturelles produites en Europe, les nouveaux modules solaires de l'Institut Ines du CEA-Liten permettent de réduire l'impact environnemental ainsi que le poids des panneaux, tout en contribuant à l'amélioration de leur recyclage.**

PAR AUDE GANIER

« Nous en sommes persuadés : tout comme le bilan carbone et l'analyse du cycle de vie sont des critères essentiels dans le choix des panneaux photovoltaïques, l'approvisionnement des matériaux sera également crucial en Europe dans les années à venir », assure Anis Jouini, directeur de l'Institut national de l'énergie solaire (CEA-CNRS). Aussi les équipes développent-elles différents prototypes pour valider le choix de matériaux biosourcés. C'est ainsi qu'un premier démonstrateur a vu le jour, dans le cadre des programmes Easy-Poc pilotés par le CEA et financés par la région Auvergne-Rhône-Alpes pour soutenir les PME de différentes filières.

### Une face à base de lin et de basalte

Le prototype se compose de cellules solaires dites à hétérojonction, technologie qui présente actuellement les meilleurs rendements de conversion de l'énergie solaire en électricité. La face avant est constituée d'un polymère chargé

de fibres de verre qui apporte de la transparence. La face arrière est un composite à base de thermoplastiques dans lesquels a été intégré un tissage de deux fibres, le lin et le basalte, qui apportent de la tenue mécanique ainsi qu'une meilleure résistance à l'humidité. « Ces deux matériaux sont particulièrement intéressants car le lin est produit dans le nord de la France où tout l'écosystème industriel est déjà présent ; et le basalte, disponible en Europe, est tissé chez l'un de nos partenaires industriels », indique Aude Derrier, cheffe de service au CEA-Liten qui a dirigé ces recherches.

### Recyclable et prêt à produire

Au niveau du recyclage, le choix s'est porté sur les thermoplastiques, car ils permettent de séparer les couches de la face arrière plus aisément et, surtout, ils peuvent être refondus. « Destiné à des applications d'intégration sur des bâtiments, ce module permet de réduire le bilan carbone de 75 eq CO<sub>2</sub> par Watt par rapport à un module équivalent de même puissance. Quant à son poids, il est inférieur à 5 kg/m<sup>2</sup> », assure la spécialiste. Autre avantage, le module respecte le prérequis selon lequel sa production ne doit nécessiter aucune adaptation des processus industriels. Le transfert de cette solution d'écoconception soulage ainsi les modulateurs d'investissements supplémentaires. ●



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

## RÉALITÉ VIRTUELLE

# Formation façon jeu vidéo

**Avec la pandémie de Covid-19, le besoin en formation à distance a explosé. Mais ce mode d'enseignement requiert des technologies compétitives de visualisation, de connectivité et d'interactions virtuelles. Surtout lorsqu'il s'agit de formations industrielles très techniques. C'est ce que propose la plateforme VME à laquelle a contribué le CEA-List dans le cadre du projet V-Machina2.**

PAR AUDE GANIER

Facile à utiliser, VME est une plateforme en réalité virtuelle pour la formation industrielle (geste technique, manipulation de machine, etc.). Développée dans le cadre de l'infrastructure européenne EIT Manufacturing, elle permet de créer rapidement des contenus de cours virtuels partagés ainsi que des travaux pratiques simulés collaboratifs, quels que soient les secteurs industriels. Et ce, simplement via une connexion Internet et en étant muni d'un casque de réalité virtuelle.

### Optimiser l'expérience immersive...

La contribution du CEA-List a notamment porté sur l'infrastructure réseau afin de rendre l'expérience flexible et accessible à tous les partenaires européens du projet. Il s'agit en effet de pouvoir gérer un nombre variable d'apprenants (de 1 à 6 pour ce projet) géographiquement distants, en fonction des besoins. D'une part, la plateforme

analyse les comportements et les performances des utilisateurs pour évaluer leur autonomie, leur efficacité et le respect des consignes de sécurité. D'autre part, les ingénieurs ont inclus la possibilité d'intégrer aux avatars des apprenants le scan de leur visage. L'immersion réaliste dans l'expérience tout comme son inclusivité s'en trouve ainsi renforcée.

### Jusque dans la simulation des objets manipulés

Le CEA-List a également simulé le comportement physique des objets manipulés dans l'environnement virtuel en tenant compte des efforts et des interactions qui leur sont appliqués. « Cette innovation est essentielle, car la précision, le réalisme et la fidélité technique sont indispensables pour assurer un apprentissage de qualité sur des machines industrielles », justifie Enzo Delescluse, ingénieur-chercheur au CEA-List. Les briques technologiques développées pour l'occasion ont été intégrées à des solutions commerciales, comme le *plugin* Interact de la société Light & Shadows. Le projet se poursuit à présent afin d'être adapté à des groupes plus importants, de la taille d'une classe. La plateforme permettra à une trentaine d'utilisateurs dits « observateurs », de pouvoir rejoindre la simulation avec un simple ordinateur, visualiser les tâches réalisées et d'interagir avec les autres utilisateurs. Objectif final ? Commercialiser la plateforme pour pérenniser cette nouvelle modalité d'enseignement. ●



**CEA-List**  
Institut des systèmes numériques intelligents (Saclay).



**Ci-dessous**  
Plateforme de formation en réalité virtuelle VME.



© VME / CEA



© NASA / ASC / ESA

↑  
Ci-dessus

La nébuleuse de la Carène, selon le James Webb.

ASTROPHYSIQUE

# Des nouvelles du Webb

**Et maintenant, place aux découvertes. Neuf mois après son lancement le 25 décembre 2021, le télescope spatial James Webb est pleinement opérationnel. Après le succès suscité par la diffusion de ses premières images, les 11 et 12 juillet 2022, de nombreux programmes scientifiques ont démarré. Certains livrent déjà des résultats.**

PAR VAHÉ TER MINASSIAN

Pour les concepteurs des quatre instruments à bord du télescope spatial « Webb », c'est presque mission accomplie. Encore une ou deux réunions au mois d'octobre, et les vastes consortiums de laboratoires et d'industriels impliqués dans leur fabrication passeront la main au STScI de la Nasa qui dirigera seul les opérations avec des spécialistes. Au CEA-Irfu, où certains chercheurs ont consacré plus de vingt ans au

projet, cette perspective annonce le début d'une nouvelle aventure.

## Né sous une bonne étoile

Chargée de coordonner l'activité des laboratoires français qui ont conçu et réalisé la partie imageur (Miri) du spectro-imageur Miri, l'équipe de Pierre-Olivier Lagage a été sur la brèche durant des mois. En plus d'avoir répondu aux nombreuses sollicitations des médias, elle a suivi, jour après jour, les différentes phases de la mise en service du colossal télescope. «*Heureusement, tout s'est bien passé, et encore mieux que prévu*», raconte Pierre-Olivier Lagage, l'un des rares chercheurs à avoir été invité à assister au lancement depuis la base de Kourou. La fusée Ariane 5 transportant le précieux équipement a rejoint l'espace en suivant une trajectoire presque parfaite, rendant inutiles les manœuvres de repositionnement du Webb vers son orbite autour

du point de Lagrange L2, situé à 1,5 million de kilomètres de la Terre. Conséquence : les réserves en carburant sont demeurées intactes, et seraient à ce jour suffisantes pour qu'il fonctionne vingt ans, soit le double de ce qui était envisagé ! Le déploiement du bouclier thermique et le réglage des 18 hexagones constituant le miroir primaire se sont également déroulés à la perfection, dotant ce « successeur de Hubble » d'une qualité d'image et de pointage bien supérieure aux spécifications.

## Des images époustouflantes

Ensuite, l'étape de la « recette sur le ciel » a surpris tout le monde en révélant de premières images époustouflantes, celles des instruments pourtant en cours de calibration. Car cette délicate opération a consisté à tester, un à un, les 17 modes de fonctionnement de ces outils ; en l'occurrence pour Miri, l'imagerie, la spectrométrie et la coronographie. Mobilisant entre les mois d'avril et de juin plusieurs centaines de chercheurs sur le site du STScI à Baltimore (une cinquantaine pour Miri), elle s'est terminée sans accroc bien que les cinq Français dépêchés sur place se soient fait un frayeur en constatant une anomalie sur certains « masques de phase à quatre cadrans » du coronographe. Grâce au travail acharné des chercheurs, et notamment de Christophe Cossou du CEA-Irfu, l'incident a pu être réglé sans conséquence pour la suite de la mission.

Les astrophysiciens pouvaient souffler, tandis que les premières images extraordinaires étaient présentées par la Nasa à la presse les 11 et 12 juillet. Bien que le CEA ne soit pas intervenu directement, l'instrument Miri a contribué à l'élaboration de trois d'entre elles : celles du « Champ profond », de la « Nébuleuse de la Carène » et du « Quintette de Stephan ». Et les chercheurs se sont alors fortement impliqués dans les multiples programmes d'observation lancés dans la foulée.

## La course aux galaxies les plus lointaines

Limités à une durée de cinq mois, treize d'entre eux dits d'« *Early Release Science* (ERS) » devraient avoir la primeur des annonces à venir. Mais d'autres, dits de « temps garanti » (réservés aux équipes ayant contribué à la conception des instruments) ou de « temps ouvert » (accordés

à n'importe quel astronome dont le projet a été sélectionné par un comité scientifique), pourraient aussi créer la surprise. En cosmologie, la course aux galaxies les plus lointaines a d'ailleurs déjà commencé. Ces astres formés dans les 200 à 300 millions d'années après le Big Bang ont vu, avec le temps, leurs spectres lumineux se décaler vers l'infrarouge, les rendant parfois totalement invisibles pour un télescope spatial fonctionnant essentiellement dans le visible comme Hubble. «*Les images réalisées par le Webb sont souvent les premières de ces objets dont nous disposons*», explique David Elbaz du CEA qui s'est fortement investi dans « CEERS » et « PRIMER », deux des plus importants programmes du domaine. «*Or, il s'avère que ces clichés montrent une surabondance d'étoiles dans ces galaxies au regard des théories qu'il va falloir expliquer.*»

## Une détection inédite de CO<sub>2</sub> autour de la Jupiter chaude

D'autres résultats sont espérés notamment sur les nébuleuses stellaires, ces gigantesques nuages de gaz et de poussières où naissent, souvent par groupes, les étoiles. Mais c'est surtout dans le domaine des exoplanètes que le CEA est le plus attendu. Outre qu'elle ait décidé de consacrer l'ensemble de son « temps garanti » au sujet, l'équipe de Pierre-Olivier Lagage a joué un rôle majeur dans la mise au point, pendant la recette sur le ciel, des observations d'exoplanètes, et participe aux deux programmes ERS qui leur sont consacrés. L'un sur la mesure des constituants de leurs atmosphères qui a abouti à une détection inédite de gaz carbonique sur la « Jupiter chaude » Wasp 39 b ; l'autre sur leur imagerie qui fut à l'origine, le 2 septembre, d'un extraordinaire cliché de la planète HIP 65426 b. Et ce n'est qu'un début : «*car à partir du mois de novembre, nous commencerons à observer Trappist-1 b*», explique Pierre-Olivier Lagage. Évoluant à 40,5 années-lumière de distance autour d'une petite étoile froide, ce corps céleste rocheux, d'une masse et d'une taille comparables à celles de la Terre, pourrait être la toute première exoplanète tellurique tempérée à livrer des informations sur la nature de son atmosphère. De quoi déclencher un véritable séisme dans la communauté des astronomes. On n'a pas fini d'entendre parler du Webb. ●

1. Institut des sciences du télescope spatial de la Nasa.

## FOCUS

### Les équipes françaises impliquées dans Mirim

Mirim est l'imageur de Miri, l'un des quatre instruments du télescope James Webb. Sa construction, sous maîtrise d'ouvrage du CNES, a été coordonnée par le CEA-Irfu. Elle implique plusieurs laboratoires français :

- IAS – Institut d'astrophysique spatiale IAS (CNRS, université Paris-Saclay) ;
- LAM – Laboratoire d'astrophysique de Marseille (CNRS, université d'Aix-Marseille) ;
- Lesia – Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (CNRS – Observatoire de Paris, université Pierre et Marie Curie – Paris 6, université Paris Cité).

### Les missions du Webb

Le télescope spatial James Webb, conçu par la Nasa en collaboration avec les Agences spatiales canadienne (ASC) et européenne (ESA), doit sonder le ciel dans le domaine de l'infrarouge. Trois missions :

- déterminer les caractéristiques des galaxies les plus lointaines ;
- explorer le cœur des nébuleuses stellaires obscurcies de poussières ;
- identifier des constituants de l'atmosphère des exoplanètes.

## MATÉRIAUX

# Magnétique en couche ultramince

## LEXIQUE

**Cristaux de van der Waals**  
Matériaux formés par des couches de feuillets cristallins avec des liaisons faibles entre les couches.

**Épitaxie par jets moléculaires**  
Procédé de fabrication consistant à évaporer sous ultravide les différents éléments d'un matériau, à très faible vitesse afin de maîtriser leur croissance.

**Kelvin**  
Unité de mesure de la température thermodynamique.  
0 K = - 273,15°C  
229 K = - 44,15°C  
288 K = 14,85°C (température dite ambiante, correspondant à la température moyenne à la surface de la Terre).

Alors que la pénurie de semi-conducteurs grève une partie de l'économie, la maîtrise de ces composants est plus que jamais d'actualité. C'est là l'opportunité de belles innovations, à l'instar des travaux du CEA-Irig qui parvient à fabriquer des matériaux magnétiques indispensables à la frugalité de la microélectronique. Une première mondiale.

PAR AUDE GANIER

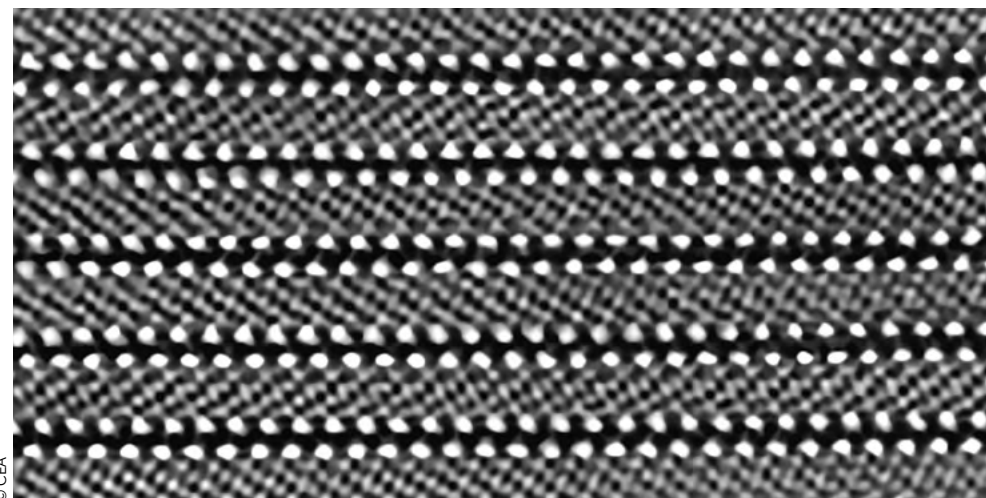
La réalisation de dispositifs électroniques innovants et plus compacts repose désormais sur des matériaux fonctionnels en couches ultraminces. Parmi eux, les cristaux de van der Waals. S'ils sont connus depuis longtemps, qu'il s'agisse du graphite des mines des crayons de papier ou du graphène aux propriétés électroniques remarquables, ce n'est qu'en 2017 que des chercheurs américains ont découvert leur magnétisme. Plus exactement, un ordre magnétique à longue portée a été observé dans un matériau composé d'un seul feuillet, c'est-à-dire une monocouche d'atomes!

D'où l'intérêt suscité depuis dans la communauté scientifique, le magnétisme étant au cœur de la spintronique grâce à laquelle, par exemple, les ordinateurs conservent en mémoire les données stockées sans alimentation électrique (voir Infographie dans *Les défis du CEA* n° 249).

Jusque-là, ces feuillets n'étaient magnétiques qu'à très basse température. Par ailleurs, ils étaient obtenus par exfoliation de cristaux massifs de différents éléments; un procédé relativement aléatoire ne délivrant que des dimensions micro-métriques. Or, l'intégration de ces matériaux dans des dispositifs de spintronique nécessite à la fois que leur magnétisme soit conservé à plus haute température, et qu'ils puissent être synthétisés avec des méthodes robustes à plus grande échelle.

## Une première mondiale

« Depuis quelques années, nous développons la croissance de cristaux de van der Waals en ayant recours à l'épitaxie par jets moléculaires. Dernièrement, nous sommes parvenus à faire croître sur du saphir des couches minces de  $Fe_5GeTe_2$ , magnétiques à haute température, ce qui n'avait jamais été réalisé auparavant », indique Frédéric Bonell, chargé de recherche du CNRS au CEA-Irig. Le procédé, par ailleurs hautement contrôlable, a permis à l'équipe de réaliser des feuillets à l'échelle du centimètre carré dont l'uniformité et la parfaite cristallinité ont été confirmées par des techniques de caractérisation structurales et chimiques. Cette avancée, qui montre que même dans des films extrêmement minces l'ordre magnétique persiste à une température proche de l'ambiante (229 kelvin), est une première mondiale. ●

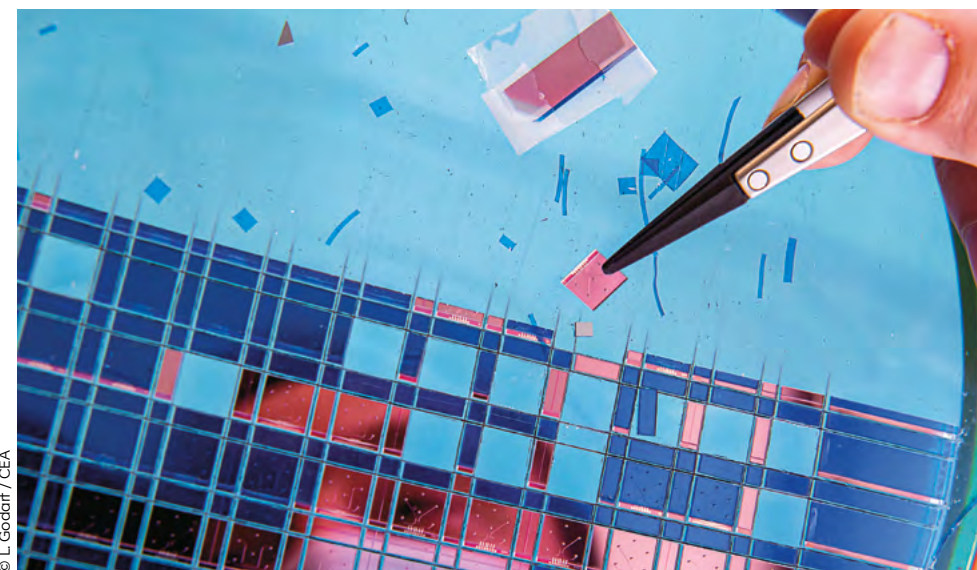


© CEA

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

## → Ci-contre

6 feuillets de  $Fe_5GeTe_2$ , composés d'atomes de tellure (points blancs) et d'atomes de fer et de germanium (points gris), séparés par des « gaps de Van der Waals ».



© L. Godart / CEA

## NANOÉLECTRONIQUE

# Peser, à l'attogramme près

Les équipes du CEA-Leti développent des « nanobalances » pour la pesée de particules comme les virus. Les applications sont nombreuses, par exemple dans le domaine médical.

PAR SYLVIE RIVIÈRE

« Nous avons réussi à peser des adénovirus avec une précision de l'ordre de l'attogramme, s'enthousiasme Vincent Agache, du CEA-Leti. Ce type de virus, qui entre dans la composition de certains vaccins, est aussi utilisé en thérapie génique. Pouvoir disposer d'un diagnostic aussi fin sera un plus pour la R&D ». L'ingénieur travaille depuis dix ans avec le MIT<sup>1</sup> sur ces nanosystèmes électromécaniques particuliers, dans lesquels sont introduits des canaux microfluidiques. Le cœur du capteur, invisible à l'œil nu, est l'oscillateur. « Imaginez un circuit creux en forme de U mis en oscillation à sa fréquence de résonance. Lorsqu'une particule, comme un virus ou une cellule, passe dans le canal, elle l'alourdit de manière transitoire et ralentit son oscillation. Le phénomène est proportionnel à la masse du virus », illustre le chercheur. L'objet, réalisé dans les salles blanches du CEA-Leti, est conçu dans du silicium, collé avec des techniques de pointe sur un substrat en verre et inséré dans une nanocavité sous vide.

## Une technique non destructive

Des nanoparticules impliquées dans les cancers, les exosomes, ont également été pesées avec la

même précision. Ces objets biologiques, de 30 à 200 nm de diamètre, sont des vésicules abondamment secrétées par les cellules tumorales. « Notre capteur permettrait de les détecter dans le sang des patients et ainsi de diagnostiquer un cancer de manière bien plus précoce que par les analyses classiques », avance Vincent Agache, moyennant une préparation préalable de l'échantillon sanguin pour isoler les exosomes, par exemple par une ultracentrifugation suivie d'une extraction à l'aide d'anticorps ciblant des protéines de surface. L'avantage de la technique est qu'elle est non destructive : la particule traverse le capteur et en ressort intacte, autorisant de fait la poursuite des analyses. « On pourrait commencer par la pesée, puis enchaîner avec du séquençage ADN ou ARN, qu'il s'agisse d'exosomes ou d'adénovirus », affirme le chercheur qui entrevoit déjà d'autres applications : pesée de nanoparticules inorganiques, par exemple en or ou en silice, utilisées comme vecteurs de molécules thérapeutiques; de nanoparticules lipidiques (les Lipidots®, une technologie vaccinale développée au CEA-Leti<sup>2</sup>); ou encore d'agrégats de protéines, tels ceux impliqués dans la maladie d'Alzheimer, avec en ligne de mire le diagnostic précoce de la pathologie. ●

1. Massachusetts Institute of Technology.  
2. Voir *Les défis du CEA* n° 249.

## ← Ci-contre

Fabrication de 300 oscillateurs nanomécaniques, appelés capteurs SNR (*Suspended Nanochannel Resonator*), sur un wafer en silicium. Chaque capteur (ici dans la pince) fait environ 1 cm<sup>2</sup>.

## LEXIQUE

**Attogramme**  
10<sup>-18</sup> gramme, soit un milliardième de milliardième de gramme.

**Microfluidique**  
Technologie permettant la manipulation de très petites quantités de liquide dans des microvolumes.

**Exosome**  
Nanovésicule secrétée par les cellules, contenant des lipides, des protéines et des acides nucléiques (ADN, ARN). Les exosomes assurent une fonction de communication entre les cellules.

**CEA-Leti**  
Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (Grenoble).



↑  
**Ci-dessus**  
 Le crâne du mammouth de Durfort, installé sur le tomographe Cinphonie du CEA.

## IMAGERIE X

# Les secrets du mammouth

**L'étrange anatomie du mammouth de Durfort n'avait pas été étudiée depuis son installation en 1898 dans une galerie<sup>1</sup> du Jardin des Plantes à Paris. Il vient de faire l'objet d'un examen poussé aux rayons X par des ingénieurs du CEA-Iresne. Objectif : établir à quel point son crâne, restauré et modifié au XIX<sup>e</sup> siècle, est conforme à celui de l'animal vivant !**

PAR VAHÉ TER MINASSIAN

Avec sa hauteur de 4,3 m, sa longueur de 6,8 m et son poids de 8 tonnes, le *Mammuthus meridionalis* compte parmi les plus gros mammifères à avoir jamais marché sur Terre. Plus grand et plus ancien que le mammouth velu représenté dans les grottes de Rouffignac en Dordogne, ce proboscidiien présent en Eurasie il y a entre 700 000 et deux millions d'années est connu de la science grâce à une poignée de spécimens dont le mammouth de Durfort. Ce dernier fut découvert dans un état quasi-complet en 1869 dans le Gard, avant de subir ultérieurement à son exhumation diverses dégradations. À tel point qu'il dût être restauré au moment de son arrivée au Muséum national d'Histoire naturelle, quatre ans plus tard. « Son crâne qui était très endommagé fut renforcé avec du plâtre, de la résine et du bois puis reconstitué en s'inspirant, faute de connaissances suffisantes, de l'anatomie des éléphants actuels », raconte Nicolas Estre, ingénieur au CEA-Iresne. Jusqu'à quel point ?

C'est ce que souhaitent déterminer les spécialistes du Muséum en profitant d'une opération exceptionnelle de démontage et de nettoyage du squelette.

### 15 000 radiographies pour une vue 3D

Ils ont alors demandé au Laboratoire de mesures nucléaires du CEA, le seul en France équipé pour traiter une pièce d'une telle envergure, de réaliser une tomographie X à hautes énergies afin d'obtenir une vue 3D du crâne, montrant à 0,5 mm près la répartition des différents matériaux qui le composent.

Bien qu'inhabituelle, la requête n'était pas inédite : « même si notre installation Cinphonie est spécialisée dans l'imagerie des colis de déchets nucléaires, il lui est déjà arrivé de travailler pour des archéologues, rappelle Nicolas Estre. En 2017 par exemple, nous avons étudié des canons du XVII<sup>e</sup> siècle pour savoir si leur gangue contenait encore du métal ». Une fois réceptionné à Cadarache le 28 juin, le crâne fossilisé de 400 kg et 1,1 m de large a été transporté jusqu'au plateau du tomographe où les analyses ont débuté. Elles consistent à réaliser, grâce au rayonnement produit par un accélérateur linéaire, un ensemble de 15 000 radiographies prises sous des angles et niveaux différents ; puis à effectuer une série de post-traitements numériques avant restitution d'une image 3D. Et l'on saura alors ce qui se cache derrière la trompe du proboscidiien. ●

1. Galerie d'anatomie comparée et de paléontologie.

## MAKING-OF COULISSES D'UN PROJET

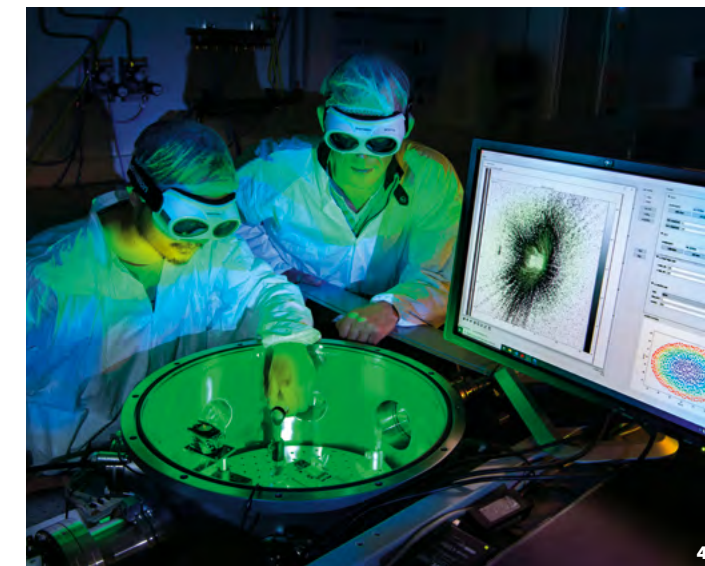
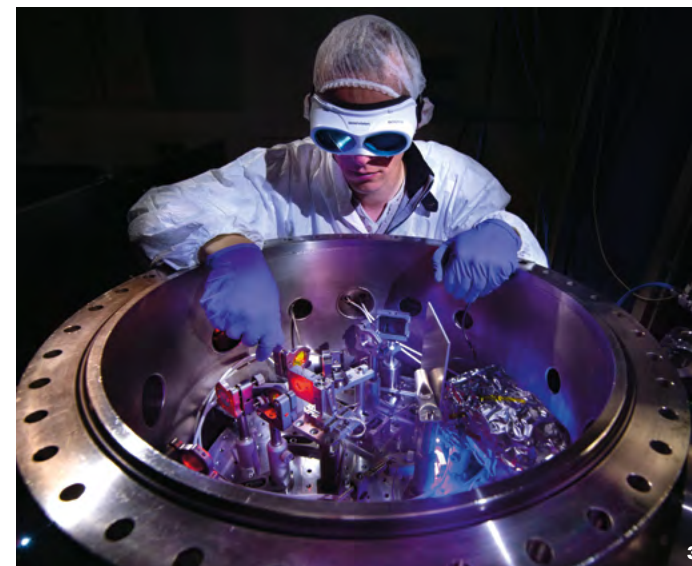
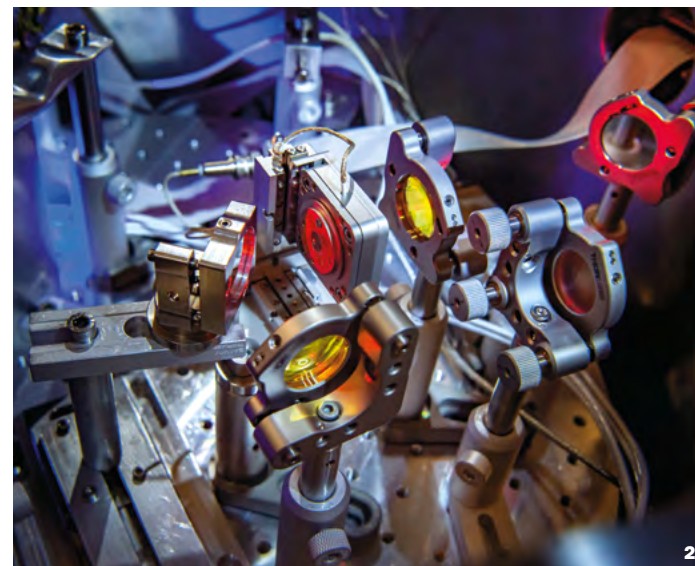
### Le laser Nanolight, dompteur d'électrons

Bienvenue dans le monde des lasers aux impulsions ultrabrèves et ultrapuissantes, spécialité du CEA-Iramis. Ici, les flashes laser ont des durées de l'ordre du millionième, voire du milliardième de seconde ! L'un des derniers développements, Nanolight, est un laser de nouvelle génération aux propriétés exceptionnelles. Avec cet outil, les chercheurs sont capables d'imposer aux électrons des mouvements contrôlés et dirigés, de grande amplitude et extrêmement rapides au sein

des atomes, des molécules ou de la matière condensée. Ils explorent ce que pourrait être l'électronique de demain, aux microprocesseurs un million de fois plus rapides que les meilleurs modèles actuels. Ce nouveau laser permet aussi de générer des sources secondaires de rayonnement dans l'extrême UV pour de nombreuses applications, de la recherche fondamentale aux besoins des industriels.

→  
 REPORTAGE RÉALISÉ  
 PAR SYLVIE RIVIÈRE (TEXTE)  
 ET LAURENCE GODART  
 (PHOTOS)

📍  
**CEA-Iresne**  
 Institut de recherche sur les systèmes nucléaires pour la production d'énergie bas carbone (Cadarache).



#### EN IMAGES

① Alignement des différents composants du laser Nanolight : miroirs, lentilles, cristaux (points verts brillants).

② Focalisation du laser sur un échantillon, par exemple sur des cristaux d'un matériau semi-conducteur (le cristal est ici inséré dans le module rouge, au centre).

#### FOCUS

##### Un laboratoire commun

Le laser Nanolight est exploité au sein du laboratoire commun Nanolite, créé en janvier 2020 avec la PME Imagine Optic, leader mondial de la caractérisation spatiale de faisceaux laser, et financé par l'Agence nationale de la recherche.

#### LEXIQUE

Femtoseconde  
10<sup>-15</sup> seconde.

Attoseconde  
10<sup>-18</sup> seconde.

## ① Un laser infrarouge innovant

« Notre nouveau laser femtoseconde exploite une rupture technologique. C'est le seul de ce type en service en France. »

David Gauthier, ingénieur-chercheur

Depuis trois ans, les chercheurs du CEA-Iramis disposent d'un laser exceptionnel reposant sur un concept innovant, développé en collaboration avec une PME française, Fastlite : Nanolight délivre 100 000 flashes dans le moyen infrarouge par seconde (au lieu d'une dizaine avec les anciennes générations), ultrabrefs (de l'ordre de 30 femtosecondes) et tous rigoureusement identiques ; ce qui permet d'atteindre des puissances instantanées phénoménales, autour du terawatt/cm<sup>2</sup>, soit 1 000 milliards de fois le rayonnement solaire sur Terre. Cette grande reproductibilité exige un environnement ultrastable : en température, flux d'air, hygrométrie et mécanique, notamment grâce à une imposante dalle en béton absorbant toutes les vibrations indésirables.

## ② Électronique du futur

« La puissance du laser Nanolight nous permet de guider les électrons dans la matière, de leur imposer une direction. »

Vijay Sunuganty, doctorant

Plus les faisceaux laser sont brefs et intenses, plus les mouvements qu'ils imposent aux électrons dans la matière sont rapides et de grande amplitude. Cette propriété est mise à profit pour étudier la dynamique des électrons dans les matériaux solides, mais aussi pour contrôler leurs trajectoires. Avec en ligne de mire l'électronique du futur, actionnée par des impulsions laser femtosecondes (au lieu d'impulsions électriques) et caractérisée par des réponses jusqu'à un million de fois plus rapides que l'électronique actuelle. Nanolight permet aussi de modifier les propriétés d'un matériau de manière transitoire, à des échelles femtosecondes, par exemple pour transformer un isolant en conducteur et ainsi faire commuter un transistor.

## ③ Émission d'extrême ultraviolet

« Les électrons se comportent comme une antenne : ils reçoivent un rayonnement infrarouge et émettent en retour un rayonnement ultraviolet. »

Willem Boufu, responsable de la plateforme

Au sein de l'échantillon testé, les électrons déplacés par le faisceau laser émettent de la lumière à très courte longueur d'onde dans le domaine de l'extrême UV (entre 20 et 100 nm). C'est en captant et en caractérisant ce rayonnement que les chercheurs arrivent à retracer le mouvement des électrons dans la matière. Pour cela, ils mesurent son profil spatial (sa forme), son spectre (c'est-à-dire ses composantes en longueur d'onde) et son profil temporel, grâce à des dispositifs mis au point au laboratoire et partagés sur ses différentes plateformes laser. Ces mesures permettent également d'étudier la structure cristalline du matériau et ses modifications ultrarapides induites par l'interaction avec le laser.

## ④ Un laser pour la communauté

« Le laser Nanolight permet de générer des impulsions femtoseconde dans l'extrême UV de façon compacte et économique. »

Xu Liu, doctorant

Le rayonnement UV émis par les électrons, ici parfaitement contrôlé et caractérisé, peut aussi être utilisé comme un nouveau faisceau laser délivrant des flashes femto ou attosecondes. Cette source de lumière dans l'extrême UV est mise à disposition d'utilisateurs académiques et industriels sur appels à expériences, pour de la physique fondamentale (sonder des réactions chimiques, imager des plasmas en 4D, étudier des phénomènes ultrarapides de magnétisme) et pour développer de nouveaux outils de précision (calibration de détecteurs de rayonnement, caractérisation de la qualité de surface de miroirs pour le spatial, pour les synchrotrons, etc.).

#### EN IMAGES

③ Vue d'ensemble de l'enceinte pour l'étude de l'interaction laser-matière.

④ Enceinte dans laquelle est placé l'échantillon soumis au flash extrême UV. Ici, expérience d'imagerie avec une résolution de l'ordre de 50 nanomètres.

#### FOCUS

##### Deux projets européens

La plateforme Nanolight est impliquée dans deux projets européens H2020, regroupant respectivement 8 et 5 laboratoires et visant à démontrer des technologies de rupture liées aux lasers ultra-rapides dans le domaine de l'extrême UV. Elle est pleinement intégrée dans le monde académique, notamment au sein de l'université Paris-Saclay, par les volets formation et recherche (accueil de doctorants et de chercheurs).

CEA-Iramis  
Institut rayonnement-matière de Saclay.





DOSSIER  
RÉSEAUX D'ÉNERGIE

# Anticiper la grande mutation

PAR HUGO LEROUX

Pour atteindre la neutralité carbone en 2050, les producteurs d'électricité, de chaleur et de gaz devront jouer collectif ! Dans ce contexte, le CEA se positionne sur la mise au point de réseaux flexibles et interconnectés. Pour une vision encore plus intégrée et de plus en plus décentralisée des énergies.

C'est l'un des exercices de prospective le plus complet en Europe... et il a fait grand bruit. Publié en octobre 2021 par le gestionnaire du réseau de transport d'électricité RTE, le rapport intitulé « Futurs énergétiques 2050 » donne une idée de l'immense défi qui attend la France mais également l'Europe : réaliser la neutralité carbone d'ici 2050, en vertu des accords de Paris sur la limitation du réchauffement climatique. « Les mutations à venir sont majeures. Il faudra électrifier les usages et passer de 25 % à 55 % la part d'électricité dans la consommation d'énergie finale. Cela impose tout à la fois de développer massivement les sources d'électricités renouvelables intermittentes, et de s'appuyer sur la source stable et pilotable qu'est le nucléaire en construisant de nouvelles centrales de type EPR », décrypte Xavier Le Pivert, ingénieur au CEA-Liten. Des usages électrifiés

plus efficaces devraient ainsi se massifier comme les pompes à chaleur dans le bâtiment ou les véhicules électriques. Ce qui soulève des problématiques techniques : « il faut pouvoir intégrer l'ensemble des sources de production et de consommation tout en assurant l'équilibre du réseau électrique, à tout moment pour éviter les black-out », pose Philippe Azaïs, chef de programme à la Direction des énergies (DES) du CEA.

## Comprendre les usages

Une solution immédiate est d'améliorer le pilotage des réseaux en prenant mieux en compte la demande des particuliers et des industriels. « Les réseaux doivent être davantage connectés et "intelligents" pour que le gestionnaire puisse avoir accès en continu et de manière sécurisée à un maximum d'informations lui permettant d'équilibrer le réseau à tout instant →



#### Ci-contre

Expérimentation de maisons à énergie positive et de parkings solaires à l'Institut national de l'énergie solaire.



#### Page précédente

Zone de simulation de micro-réseau de production et de consommation d'électricité photovoltaïque.

#### LEXIQUE

##### AEM

Anion Exchange Membrane.

##### PEM

Proton Exchange Membrane.



© CEA

et à toute échelle », poursuit l'expert. Ces technologies dites de *smart grids* reposent sur une multitude de capteurs permettant d'ausculter le système grâce à des logiciels capables de traiter cette masse de données, ainsi que des outils d'aide à la décision en temps réel. Autant de briques sur lesquelles le CEA développe une expertise de longue date. « Nos technologies permettent de contrôler de manière coordonnée les différents producteurs et consommateurs et les moyens de stockage », explique Bernard Thonon, responsable de programme au CEA-Liten. La compréhension des usages et l'implication des usagers dans certains changements d'habitudes sont une autre composante importante : « nous avons besoin de l'apport des sciences humaines comme la sociologie, c'est pourquoi nous lançons différents partenariats externes », indique Philippe Azaïs.

#### Flexibilité et interconnexion des réseaux

À moyen terme, un des enjeux majeurs est de développer des moyens dits de « flexibilité » pour assurer l'adéquation entre la production d'énergie et la consommation. Comme l'explique Arthur Clergeon, chargé d'études au CEA-I-Tésé, ce service de flexibilité peut être rendu de diverses manières : « on pense bien sûr au stockage d'électricité par des batteries stationnaires, mais celles-ci génèrent un surcoût. Il existe d'autres stratégies potentiellement plus efficaces comme le pilotage de la recharge des batteries de véhicules électriques voire, à terme, la réinjection de leur courant sur le réseau ». Le pilotage de la demande, qui consiste à inciter des industriels à décaler leurs consommations, est ainsi étudié depuis quelques années au CEA. Les bâtiments tertiaires et d'habitation pourraient

enfin jouer à l'avenir un rôle facilitateur en adaptant intelligemment leurs stratégies de chauffage (voir Entretien p.20).

À plus long terme, la priorité est d'interconnecter les différents réseaux d'énergie, en particulier au niveau local, pour accroître la flexibilité du système. « La chaleur et le gaz sont plus faciles à stocker et à piloter. La conversion de l'électricité vers ces vecteurs et vice versa, sera donc indispensable », estime Bernard Thonon. La production d'hydrogène décarboné par électrolyse de l'eau pourrait en effet permettre de consommer des surplus d'électricité, ou l'opération inverse de pile à combustible pourrait produire de l'électricité si besoin. Quant à la chaleur, « sa production à partir de l'électricité s'effectue de façon très efficace via la technologie des pompes à chaleur, qui peuvent émettre 3 kW de chaleur à partir de 1 kW électrique », complète Philippe Azaïs.

#### Une vision intégrée du mix énergétique

C'est pourquoi le CEA, historiquement actif sur l'ensemble des moyens de flexibilité, a décidé de passer à la vitesse supérieure il y a deux ans en adoptant une approche « intégrée » des systèmes énergétiques. L'idée est de développer toutes les briques technologiques et les systèmes de pilotage pour être capable, à terme, de concevoir un système énergétique décarboné, multi-échelles (locale, régionale et nationale), pour les besoins des industriels, des collectivités et des particuliers.

Cela passe notamment par des projets de démonstration de réseaux « multivecteurs » implantés dans les territoires à différentes échelles géographiques. Par exemple, le projet Trilogy incarne cette vision ambitieuse avec l'objectif de fusionner tous les outils de conception et de pilotage énergétique du CEA. « Nos différents instituts et laboratoires ont développé, au fil du temps, de nombreux outils spécifiques à chaque technologie : nucléaire, stockage, photovoltaïque, hydrogène, chaînes de propulsion hybrides, réseaux de chaleur, recyclage du carbone. L'idée est de rendre tout cela interopérable, tout en veillant à un optimum économique, environnemental et énergétique pour proposer une suite logicielle de conception et de pilotage de systèmes énergétiques multi-échelles et multivecteurs », résume le spécialiste. Et ainsi concrétiser le système énergétique du futur. ●

#### FOCUS

### Démonstrateur multivecteur à l'échelle du bâtiment...

Totem est un bâtiment tertiaire de 450 m<sup>2</sup> qui abrite, à Labège, une partie de l'antenne du CEA en Occitanie. Mis en service en 2020, il est couplé à une station de recharge pour véhicules électriques et hydrogènes et permet de tester la combinaison de technologies matures ou non pour équilibrer un micro-réseau autonome. Celui-ci se compose de 66 kW-crête de photovoltaïque, 550 kWh de batteries lithium-ion pour le stockage électrique à court terme, et 100 kg d'hydrogène stockés pour tester un usage intersaisonnier ; hydrogène produit par un électrolyseur de technologie AEM et consommé par une pile à combustible de type PEM. « Un des objectifs de ce bâtiment est de parvenir à fonctionner en autonomie totale vis-à-vis du réseau », annonce Hubert Dubois, responsable de l'antenne. Grâce à cette expérimentation grandeur nature, l'équipe Totem a pu développer des algorithmes pour piloter finement les phases de production, stockage et consommation au quotidien de ce bâtiment.



© idparchitectes

Ce dispositif repose notamment sur un ensemble de capteurs placés dans le bâtiment et sur les réseaux d'électricité et de chauffage. Il s'agit d'inciter les usagers de Totem à consommer différemment, plus sobriement, afin de tenir compte des limites énergétiques du bâtiment. L'autre enjeu est de pouvoir anticiper les usages grâce à la mise en place de plannings pour, par exemple, prévoir les réservations des véhicules électriques ou des salles de réunion. « Le but est d'avoir la vision la plus précise des consommations et ainsi pouvoir programmer le stockage et le déstockage d'énergie », précise Hubert Dubois.

### ... et sur un îlot de plusieurs bâtiments

Près de Chambéry, l'Institut national de l'énergie solaire se prête à une expérimentation semi-réelle afin de tester, avant leur déploiement, des solutions de gestion de l'énergie sur des réseaux complexes (électricité, gaz, chaleur) et de grande taille. À partir d'un îlot de plusieurs bâtiments, la plateforme Pise analyse des composants réels sur des réseaux réels mais dont les usages sont simulés. Cette approche permet de créer toute une variété de profils et d'identifier leurs impacts sur le fonctionnement global du système. « Un axe majeur de travail est d'être capable

d'anticiper la consommation en fonction de la météo, mais aussi des usages, et ce à toutes les échelles de temporalité : semaine, jour, heure, minute voire seconde. Si l'on a un trou de production lié aux énergies renouvelables, on peut ainsi faire jouer les technologies de flexibilité ou, en dernier recours, mettre en place des reports d'usages », résume Philippe Azaïs. Une extension de cette plateforme est prévue, à l'échelle représentative d'une ville d'une dizaine de km<sup>2</sup>, via le prochain projet Smart-CAD sur le site CEA de Cadarache.



#### CEA-Liten

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



#### CEA-I-Tésé

Institut de technico-économie des systèmes énergétiques (Saclay).



#### CEA-List

Institut des systèmes numériques intelligents (Saclay).

ENTRETIEN

# Le bâtiment, brique essentielle pour stabiliser le réseau



« Aujourd'hui, les priorités ont évolué car le défi ne réside plus tant dans la capacité à produire beaucoup d'énergies renouvelables intermittentes que de savoir les intégrer au réseau. »

Étienne Wurtz, coordinateur scientifique au CEA-Liten

Dans le bâtiment, la question de l'intégration des énergies renouvelables au réseau est devenue un défi essentiel à relever. Étienne Wurtz, coordinateur scientifique au CEA-Liten, décrit l'évolution des réflexions sur le sujet, et expose les enjeux stratégiques d'une telle transformation.

**Le CEA a mené des expérimentations essentielles sur le bâtiment. Comment ont évolué vos réflexions ?**

Le projet Comepos, achevé en 2018, s'est intéressé aux bâtiments à énergie positive, c'est-à-dire à des bâtiments avant tout très bien isolés pour atteindre des niveaux minimaux de consommation énergétique et rendus en sus producteurs par l'intégration d'énergies renouvelables. Aujourd'hui, les priorités ont évolué car le défi ne réside plus tant dans la capacité à produire beaucoup d'énergies renouvelables intermittentes que de savoir les intégrer au réseau. Et cela, tout en se passant progressivement du gaz, pour des raisons de décarbonation énergétique et d'indépendance géostratégique, qui était pourtant indispensable pour pallier l'intermittence de l'éolien et du solaire. Notre vision est que le bâtiment pourra rendre de grands services au réseau électrique en devenant « consomm'acteur », au-delà d'être un simple receveur passif d'énergie.

**Concrètement, comment un bâtiment peut-il rendre des services au réseau ?**

Aujourd'hui, les plus gros pics de consommation d'électricité l'hiver se situent entre 8 heures et 10 heures, puis de 18 heures à

20 heures lorsque les gens chauffent logements et bureaux. L'enjeu est d'« effacer » ces pics car ils génèrent des appels de puissance qui nécessitent le démarrage de centrales thermiques à gaz ou, pire, à charbon. À la place, nos bâtiments pourraient consommer la surproduction d'électricité notamment d'origine nucléaire qui a lieu pendant la nuit, en programmant par exemple un chauffage nocturne qui s'arrêterait à 8 heures. L'inertie thermique du bâtiment, au préalable bien isolé, est telle qu'elle pourrait maintenir la température de confort pendant la journée, en relançant au besoin légèrement la chauffe en début d'après-midi.

**Avez-vous déjà évalué l'efficacité de cette stratégie ?**

Nous menons actuellement un projet d'expérimentation avec RTE sur le bâtiment *World Trade Center* de Grenoble. Nous regardons dans quelle mesure ce vaste immeuble tertiaire, récemment rénové donc bien isolé et équipé de pompes à chaleur, peut maintenir une température supérieure à 19°C entre 8 heures et 13 heures après une chauffe nocturne. Si elle est concluante, cette stratégie pourrait s'appliquer aux quelque 14 000 bâtiments tertiaires de plus de 5 000 m<sup>2</sup> en France, moyennant des incitations financières qui sont encore à définir. Mais le gros du gisement d'économie se situe à plus long terme au niveau des habitations individuelles, dans lesquelles ce type de stratégie est plus difficile à mettre en place car généralement dépourvues de systèmes de pilotage énergétique automatisés. Il faudrait par ailleurs recourir aux sciences sociales pour comprendre comment mobiliser les citoyens et les amener à changer leurs habitudes. ●



© P. Avavian / CEA

# Construire le réseau électrique du futur

L'électrification croissante des usages et la production massive d'électricité renouvelable intermittente imposent de rendre le réseau électrique bien plus flexible et bidirectionnel. Le CEA déploie ses compétences pour concevoir, simuler et piloter ce réseau.

RTE prévoit d'investir 36 milliards d'euros d'ici 2035 dans la modernisation de son réseau pour intégrer à la fois le renouvellement des infrastructures et la forte croissance des parcs d'énergies renouvelables. Le distributeur Enedis cible environ 60 milliards d'ici 2050. Ces sommes colossales donnent une idée des défis qui s'annoncent pour le réseau électrique français. En cause d'abord : « le vieillissement

des installations, qui doivent être changées selon les types, au maximum tous les 90 ans ; ainsi que le renouvellement dont le rythme va s'accélérer », explique Philippe Azaïs, chef de programme au CEA/DES. Ainsi, jusque dans les années 2010, on remplaçait 300 km de câble par an sur 1,3 million de km de lignes exploitées par Enedis ; un rythme qui doit passer à 1 200 km d'ici 2030.

**Pour un réseau décentralisé**

La multiplication des fermes éoliennes, photovoltaïques, mais aussi des véhicules électriques et de leurs bornes de recharge soulève aussi des questions. « Ces formes d'énergie non pilotables et ces nouveaux usages impliquent de transformer un réseau auparavant hiérarchisé et descendant, reliant de grosses unités de production à des consommateurs finaux passifs, en un réseau plus décentralisé et flexible », expose Stéphane Salmons, chef de laboratoire au CEA-List. Ce qui impose de fait la numérisation progressive des infrastructures de contrôle de réseau, seul moyen pour gérer les flux d'électricité de façon multidirectionnelle et adapter la configuration du

réseau à la production intermittente. « Les premiers postes électriques installés il y a plus de cent ans étaient complètement analogiques. Aujourd'hui, on incorpore de plus en plus d'informatique à mesure que l'on renouvelle le parc », poursuit l'expert. Une logique qui culmine avec le « tout numérique » des postes électriques imposé par la norme IEC 61850. « Ce sont des dizaines de milliers de postes électriques et d'installations de contrôle à mettre au goût du jour dans les années à venir ! »

**Des postes électriques autonomes**

C'est pourquoi le CEA prépare dès aujourd'hui les technologies pour faciliter l'émergence d'un réseau numérique et flexible à l'horizon 2050. Un projet mené avec RTE depuis 2021, baptisé « Nacre » consiste à imaginer une architecture de contrôle du réseau électrique d'un nouveau type, plus flexible et autonome. « À l'heure actuelle, en amont, le centre national de RTE définit le programme prévisionnel de production visant à équilibrer l'offre et la demande ; et, en aval, les postes locaux l'appliquent. Le projet Nacre vise à apporter une couche intermédiaire de contrôle disposant



© RTE

↑  
Ci-dessus

Salle de supervision  
du réseau RTE.

←←

Page précédente

Supervision de la production  
et de la consommation  
électrique d'un site au CEA.

d'un certain degré d'autonomie sur le transport du courant dans une zone géographique déterminée», résume Stéphane Salmons dont le laboratoire travaille actuellement sur des simulations visant à déterminer la meilleure architecture et le bon degré de liberté à accorder aux « automates de zone » ainsi que la taille des zones qu'ils sont amenés à contrôler. « L'objectif est de livrer à RTE une plateforme de modélisation et de simulation permettant d'évaluer quelle est la meilleure configuration assurant à la fois sécurité et disponibilité de service dans son réseau », souligne l'expert. À la suite de cette phase préliminaire, l'équipe fournira des recommandations sur l'architecture physique et télécom la plus adaptée pour ces automates de zone.

#### Synchroniser les véhicules électriques et le photovoltaïque

Le CEA apporte également son savoir-faire dans la gestion de réseaux électriques à l'échelle locale, notamment pour intégrer harmonieusement les flux liés aux véhicules électriques et au réseau photovoltaïque. « Aujourd'hui, un four nécessite 2 kW de puissance. Par comparaison, une voiture peut appeler de 2 à 40 kW et plus selon la rapidité de charge de la borne », illustre Benoît Froidurot, chef de service au CEA-

### « L'objectif est de livrer à RTE une plateforme de simulation pour évaluer la meilleure configuration du réseau. »

Stéphane Salmons,  
chef de laboratoire au CEA-List

Liten. Sachant que le nombre de véhicules électriques devrait se chiffrer entre 9 et 15 millions d'ici 2035 selon les estimations, l'intégrité du réseau est en jeu. « L'une des solutions est de favoriser l'autoconsommation du bâtiment ou du quartier pour consommer en local le plus de courant photovoltaïque possible dans les voitures garées aux alentours. »

À travers le projet EvoIVE à Cadarache, le CEA et RTE ont ainsi lancé début 2020 une expérimentation pour synchroniser la charge des véhicules électriques avec une production photovoltaïque placée en ombrière de parking. Le pilotage du système s'appuie sur l'outil de gestion d'énergie Sige développé depuis plus d'une dizaine d'années au CEA-Liten. Environ 80 points de charge sont ainsi pilotés pour plus de 200 véhicules électriques. Les résultats obtenus



© RTE

montrent qu'il est techniquement possible d'obtenir une bonne synchronisation : « Le taux d'autoconsommation normale est de 20%. En pilotant la charge des véhicules, on peut atteindre 60 à 70%. Et l'on peut atteindre l'autonomie totale en ajoutant des batteries », détaille Benoît Froidurot. Dans ce dernier cas de figure, des solutions d'aide à la décision sont développées pour choisir la technologie de batterie appropriée et dimensionner le système au plus près des besoins. L'Institut explore également une solution de plus long terme : le *vehicule-to-grid*, soit la possibilité de réinjecter l'électricité contenue dans la batterie du véhicule vers le réseau lorsque les tarifs sont incitatifs ou pour répondre à des besoins de flexibilité. « Nous avons démontré la faisabilité de cette stratégie, mais les modèles commerciaux de voitures électriques sont encore très peu nombreux à l'offrir », poursuit le chercheur.

#### Le recours à l'électronique de puissance

Une nouvelle piste de recherche explore la possibilité de convertir de futurs pans du réseau en courant continu pour coller à la multiplication des sources délivrant ce type de courant comme le photovoltaïque et les batteries, ou d'appareils comme les

électrolyseurs, les bornes de recharges de véhicules électriques jusqu'aux innombrables chargeurs de smartphones. « Les étapes de transformation de courant continu en courant alternatif, puis de reconversion de courant alternatif en courant continu, génèrent des pertes marginales de l'ordre de 1 à 2%. Mais, additionnées à l'échelle d'un réseau entier, cela devient considérable », expose Benoît Froidurot. Historiquement, l'utilisation des transformateurs en courant alternatif permet de minimiser les pertes électriques en ligne lors du transport de l'électricité longue distance, à l'inverse des technologies de « courant continu ». Mais l'avènement d'une nouvelle génération d'électronique de puissance change la donne : « des matériaux de rupture comme le carbure de silicium (SiC) ou le nitrure de gallium (GaN) vont permettre désormais de concevoir des convertisseurs en courant continu à des tensions plus élevées et des rendements performants », pointe le chercheur. Le CEA-Liten est en cours de démonstration d'une architecture de réseau électrique « 100% courant continu » à l'échelle d'un site industriel. « Lorsque les premiers réseaux en courant continu émergeront d'ici cinq à dix ans, nous serons prêts pour apporter notre savoir-faire », conclut l'expert. ●

←  
Ci-contre

Poste électrique  
du réseau RTE.

FOCUS

#### Cybersécurité : l'autre grand défi des réseaux

La numérisation accrue des infrastructures des réseaux électriques, de gaz et de chaleur pose un autre défi de taille : la multiplication des surfaces d'attaques pour les malveillants de tous poils. « Les gestionnaires de réseau électrique d'énergie font face à des enjeux complexes en matière de cybersécurité », précise Florent Kirchner, responsable de ce domaine au CEA-List. Très pointues sur la question, les équipes collaborent ainsi avec un certain nombre d'industriels de la filière. Bien que beaucoup de projets soient confidentiels, l'expert « cybersécurité » confirme la nécessité d'assurer les fondamentaux : « La confiance numérique doit se construire sur des architectures systèmes efficaces, résilientes et maîtrisées. C'est un préalable fondamental à l'ajout de mécanismes de protection permettant de parer aux différents scénarios d'attaque. C'est en particulier ce que nous nous attachons de concrétiser au sein du projet Nacre mené avec RTE ».



**« À terme, la recombinaison d'hydrogène décarboné et de CO<sub>2</sub> peut aussi permettre de produire toutes sortes de molécules d'intérêt pour l'industrie chimique. »**

Guillaume Boissonnet,  
expert sénior au CEA-I-Tésé

## Le gaz et la chaleur à la rescousse

Le réseau électrique du futur devra s'interconnecter à terme avec les réseaux de gaz et de chaleur, vecteurs énergétiques plus faciles à stocker et à piloter. Le CEA élabore les briques technologiques et les outils de supervision adéquats.

Convertir l'électricité en chaleur ou en gaz, et vice versa, est l'un des moyens pour assurer la stabilité des réseaux. « *Le stockage dans les batteries présente de très bons rendements même s'il demeure cher. En complémentarité, le transfert vers d'autres vecteurs énergétiques, bien que moins performant, peut s'avérer plus économique car il est plus facilement pilotable et stockable* », assure Bernard Thonon, responsable de programme au CEA-Liten.

### Jupiter 1000 ou le power-to-gas

Côté gaz, l'un des projets phares du CEA est intitulé Jupiter 1000. Mené à Fos-sur-Mer, il vise à produire de l'hydrogène via des électrolyseurs alimentés par un parc éolien offshore voisin, selon une logique power-to-gas (de l'électricité vers le gaz). « *En partenariat avec GRTgaz, nous étudions notamment la réinjection de cet hydrogène dans le réseau de gaz naturel, dont les infrastructures sont déjà bien développées en France* », explique Laurent Bedel, chargé d'affaires au CEA-Liten. Pour ce faire, deux voies sont actuellement explorées.

La première consiste à injecter l'hydrogène directement dans le réseau. Mais le gaz naturel étant composé majoritairement de méthane, les spécifications du réseau de gaz imposent de ne pas le mélanger avec plus de 6 % d'hydrogène. « *GRTgaz a donc développé une station de pré-mélange pour diluer l'hydrogène dans le volume de gaz naturel approprié avant l'injection définitive dans le réseau* », précise l'expert.

L'autre voie consiste à recombinaison l'hydrogène avec du CO<sub>2</sub> issu des cheminées d'une usine sidérurgique voisine. L'opération, appelée méthanation, permet de produire du méthane de synthèse majoritairement qui peut alors être réinjecté tel quel dans le réseau.

Une technologie qui pourrait s'avérer salvatrice dans le contexte géopolitique actuel : « *Ce méthane de synthèse revient pour l'instant à environ 100-200 €/MWh, ce qui n'était pas compétitif il y a encore quelques années face au gaz naturel qui se vendait à environ 20 €/MWh... mais dont le coût oscille actuellement entre 100 et 350 €/MWh* », analyse Guillaume Boissonnet, expert sénior au CEA-I-Tésé. Le gaz ainsi produit pourrait faire tourner de façon décarbonée des centrales thermiques futures pour combler les pics de demande sur le réseau électrique.

### Contourner le gaz naturel et valoriser le CO<sub>2</sub>

« *À terme, la recombinaison d'hydrogène décarboné et de CO<sub>2</sub> peut aussi permettre de produire toutes sortes de molécules d'intérêt pour l'industrie chimique ; ainsi que des carburants de synthèse liquides, tels que le kérosène, le diesel ou le méthanol de synthèse pour les transports lourds et l'aviation* », précise le chercheur. Car même dans les projections les plus optimistes, près d'un tiers de la consommation énergétique en 2050 ne sera pas fournie par le vecteur électrique ou hydrogène et devra s'appuyer en partie sur des vecteurs carbonés d'origine non-fossile. « *La production de biométhane à partir de déchets agricoles par méthanisation est une réponse déjà mature mais insuffisante en termes de gisement exploitable, on ne peut donc pas faire l'économie d'explorer toutes les voies restantes* », pointe Frédéric Ducros, responsable de programme au CEA-Liten. En partenariat avec GRDF, le CEA investit ainsi le procédé de pyrogazéification, qui consiste à recycler de la matière organique solide (des résidus de bois ou des pneus usagés par exemple). Et cela, en la décomposant sous atmosphère pauvre →

### ← Ci-contre

Stockage thermique pour des réseaux de chauffage urbain.



© D. Guillaudin / CEA

#### ↑ Ci-dessus

Instrumentation du réseau de chaleur expérimental de la plateforme Calories du CEA.

**« Les pays nordiques sont pionniers dans l'utilisation de lacs artificiels souterrains permettant de stocker pendant l'été d'immenses quantités d'eau chaude, qui sont ensuite réutilisées en hiver. »**

**Bernard Thonon**, responsable de programme au CEA-Liten

en oxygène et à haute température pour obtenir un mélange gazeux riche en mono et dioxyde de carbone (CO, CO<sub>2</sub>), hydrogène et méthane (CH<sub>4</sub>). « *La suite est assez similaire : on peut isoler l'hydrogène ou favoriser la formation de méthane au travers d'un procédé de méthanation, en jouant sur les conditions de réaction et l'aval du procédé.* » Ce procédé, bien que démontré et produisant du méthane à environ 100-150 €/MWh, n'est pas encore déployé industriellement. Or il constitue un excellent moyen de produire du méthane de synthèse, d'autant que la combinaison d'une ressource biomasse et de l'hydrogène décarboné permet d'accroître les rendements et de limiter la consommation électrique du procédé. Toujours en partenariat avec GRDF, une voie complémentaire est explorée et repose sur le recyclage de matières organiques humides par voie hydrothermale.

#### L'IA pour le chaud et le froid

Côté chaleur, le CEA s'est associé à plusieurs opérateurs majeurs des quelque 700 réseaux existants en France pour optimiser la conduite de leurs infrastructures. « *Un réseau peut combiner plusieurs moyens de production d'eau chaude comme des chaudières à gaz, à bois, ou des incinérateurs de déchets. L'enjeu est d'optimiser la température et le débit d'eau chaude que l'on*

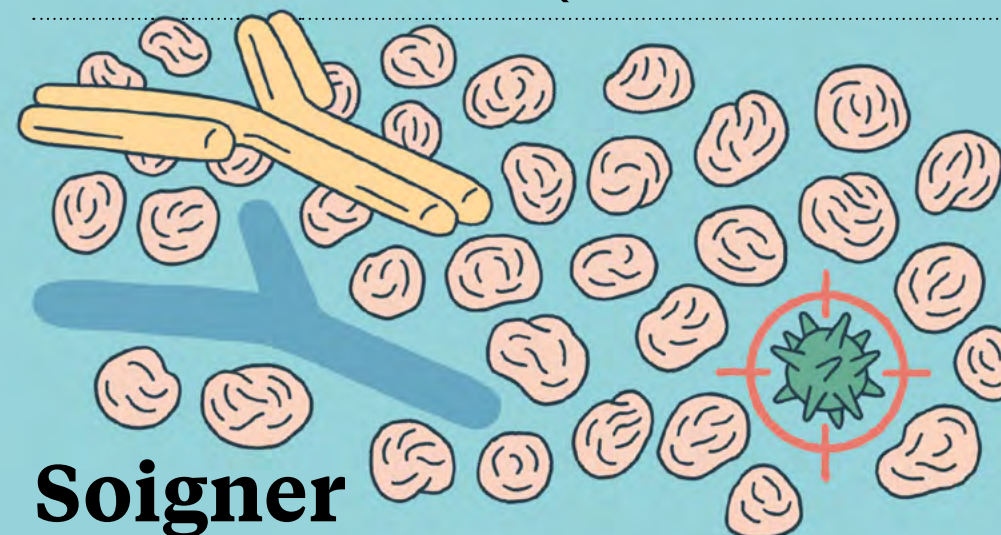
*produit et distribue pour maintenir une qualité de service optimale tout en diminuant les coûts opérationnels et en atteignant le mix énergétique le plus bas possible en CO<sub>2</sub>* », résume Bernard Thonon. Le CEA-Liten a ainsi développé l'outil de pilotage DistrictLab-H, qui a été déployé en 2021 sur deux des plus gros réseaux de chaleurs hexagonaux, Metz et Grenoble. Il fait appel à des méthodes mathématiques avancées pour la modélisation des systèmes, mais aussi à un système d'auto-apprentissage basé sur l'intelligence artificielle pour gérer les demandes utilisateurs, par anticipation, en complément des données (température, pression, débits) relevées par une myriade de capteurs placés en tous points. « *À terme, la perspective d'opérer des réseaux de froid pour alimenter les systèmes de climatisation de façon plus optimale est également étudiée* », ajoute le spécialiste.

#### Stocker la chaleur sur le long terme

Des questions de plus long terme se posent pour produire la chaleur de façon plus décarbonée et la coupler au réseau électrique *via* des pompes à chaleur. « *Pour lors cette technologie n'est mature que pour l'habitat individuel et des températures d'eau inférieures à 70 °C* », signale Bernard Thonon. D'où l'idée de développer des pompes à chaleur « haute température » adaptées aux besoins de gros réseaux de chaleur ou d'industriels qui fonctionnent le plus souvent entre 100 et 25 °C. « *Une technologie de capteurs solaires à concentration qui permet de produire de l'eau très chaude est actuellement utilisée dans de grosses centrales opérant dans le désert. Nous cherchons à l'adapter aux besoins de sites industriels* », précise-t-il. Le stockage de la chaleur, pas encore technologiquement mature contrairement à celui du gaz, constitue également une priorité. « *Les pays nordiques sont pionniers dans l'utilisation de vastes réservoirs ou de lacs artificiels souterrains permettant de stocker pendant l'été d'immenses quantités d'eau chaude, qui sont ensuite réutilisées en hiver* ». Une autre voie de stockage prometteuse repose sur des matériaux à changement de phase, qui en passant de l'état solide à l'état liquide ou inversement *via* des variations de température, ont la faculté d'absorber ou restituer de l'énergie sous forme de chaleur. Ces solutions sont actuellement expérimentées par le CEA sur le réseau de chaleur de la ville de Nice. ●

# TOUT S'EXPLIQUE

PAR SYLVIE RIVIÈRE, EN COLLABORATION AVEC BERNARD MAILLÈRE (CEA-JOLIOT)



## Soigner avec des anticorps monoclonaux

En octobre 2020, le président Donald Trump, atteint par la Covid-19, recevait en urgence un traitement à base d'anticorps monoclonaux, popularisant cette stratégie thérapeutique alors peu connue du public.

Les anticorps monoclonaux thérapeutiques existent depuis plus de trente ans. Mais c'est l'arrivée des anticorps dits « humanisés » à la fin des années 1990 qui a véritablement lancé leur usage. Si bien qu'aujourd'hui, plus de cent molécules sont commercialisées dans le monde, dont environ trente en France. La spécificité de ces traitements réside dans leur capacité à atteindre une cible (une protéine impliquée dans une maladie, un virus, etc.) avec une très grande précision, ce qui les classe parmi les outils les plus puissants de la médecine moderne. « *Les maladies inflammatoires chroniques, auto-immunes pour la plupart d'entre elles (maladie de Crohn, polyarthrite rhumatoïde, psoriasis, etc.), puis les greffes d'organe, ont les premières bénéficié*

*de ces avancées. Et depuis une dizaine d'années, elles révolutionnent le domaine de l'oncologie* », indique Bernard Maillère, immunologiste au CEA-Joliot. Bien plus ciblée et tolérée que la chimiothérapie, cette immunothérapie a en effet changé la prise en charge de certains cancers considérés comme incurables. « *On commence aussi à voir apparaître de nouvelles applications, observe l'expert, comme des anticorps antimigraineux, d'autres qui régulent le cholestérol. Et avec la Covid-19, c'est seulement la deuxième fois qu'on en développe contre les maladies infectieuses !* »

#### Développer les biomédicaments

Les anticorps monoclonaux thérapeutiques font partie de la stratégie d'accélération « Biothérapies et bioproduction de thérapies innovantes » lancée par le gouvernement le 7 janvier 2022, dont l'objectif est de produire davantage de biomédicaments contre les cancers et les maladies chroniques et de créer les dispositifs médicaux de demain. Cette stratégie s'appuie sur un volet recherche appelé PEPR (Programme et équipement prioritaire de recherche), piloté par l'ANR et confié à l'Inserm et au CEA.

#### FOCUS

##### Des prix Nobel

- **1984 (médecine)** : Niels K. Jerne, Georges J.F. Köhler et César Milstein, pour la découverte du principe de production des anticorps monoclonaux.
- **2018 (médecine)** : James P. Allison et Tasuku Honjo, pour la découverte du traitement du cancer par des anticorps monoclonaux (immunothérapie).
- **2018 (chimie)** : Gregory P. Winter, pour l'invention de la technique du *Phage display*, qui permet de produire de nouveaux anticorps monoclonaux en utilisant des virus.

#### FOCUS

##### Des équipes et des start-up

Au CEA, plusieurs équipes développent des anticorps monoclonaux utilisés comme outils de diagnostic des agents infectieux émergents et de la menace terroriste (NRBC). Ils travaillent aussi à l'élaboration d'anticorps monoclonaux thérapeutiques, notamment pour lutter contre les maladies infectieuses (Covid-19, Ebola...). Trois start-up issues du CEA-Joliot se sont lancées dans le domaine : Skymab Biotherapeutics, Deeptope et Blue Bees Therapeutics.

# 100

Plus de 100 anticorps monoclonaux thérapeutiques commercialisés dans le monde, dont environ 30 en France.

#### À SAVOIR

Tous les anticorps monoclonaux thérapeutiques commercialisés ont une dénomination qui se termine par *mab* (vient de l'abréviation *monoclonal antibodies*).

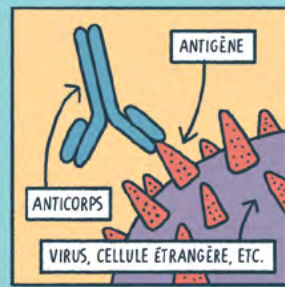
# Les anticorps monoclonaux thérapeutiques

Les anticorps monoclonaux sont des molécules produites en laboratoire pour traiter des maladies. Ils sont quasiment identiques aux anticorps naturellement fabriqués par notre organisme pour lutter contre une agression biologique. D'où leur efficacité.

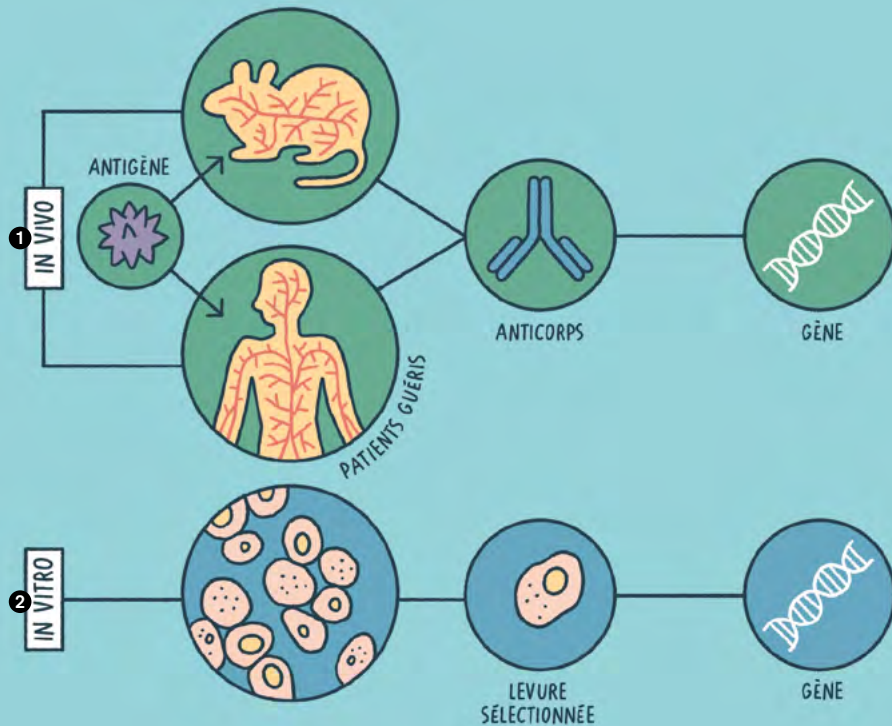
### DE QUOI PARLE-T-ON ?

**Un anticorps monoclonal, c'est (presque) comme un anticorps naturel.**

Les anticorps sont fabriqués à la demande par le système immunitaire des mammifères lorsqu'ils sont exposés à des micro-organismes infectieux (virus, bactérie, champignon, etc.), à des cellules étrangères (lors d'une greffe) ou à des cellules de leurs propres organismes lorsqu'elles sont considérées comme nocives (maladies auto-immunes). Un anticorps reconnaît spécifiquement un élément particulier de l'agresseur, appelé **antigène** (par exemple, une région d'une protéine de surface d'un virus), et s'y attache. Cette liaison anticorps-antigène va initier la



destruction de l'agresseur ou l'empêcher de se reproduire. Un anticorps monoclonal produit en laboratoire fonctionne quasiment comme un anticorps naturellement fabriqué par l'homme : il reconnaît spécifiquement une seule cible (l'antigène) et va s'y attacher.



## Comment fabriquer un anticorps monoclonal ?

Un anticorps est une très grosse molécule, impossible à fabriquer par synthèse chimique comme pour les médicaments. L'idée est donc de le faire produire par un organisme vivant.

### Sélection des anticorps, puis des gènes correspondants

1 *In vivo* : des cellules sanguines d'animaux (en général de souris) sont

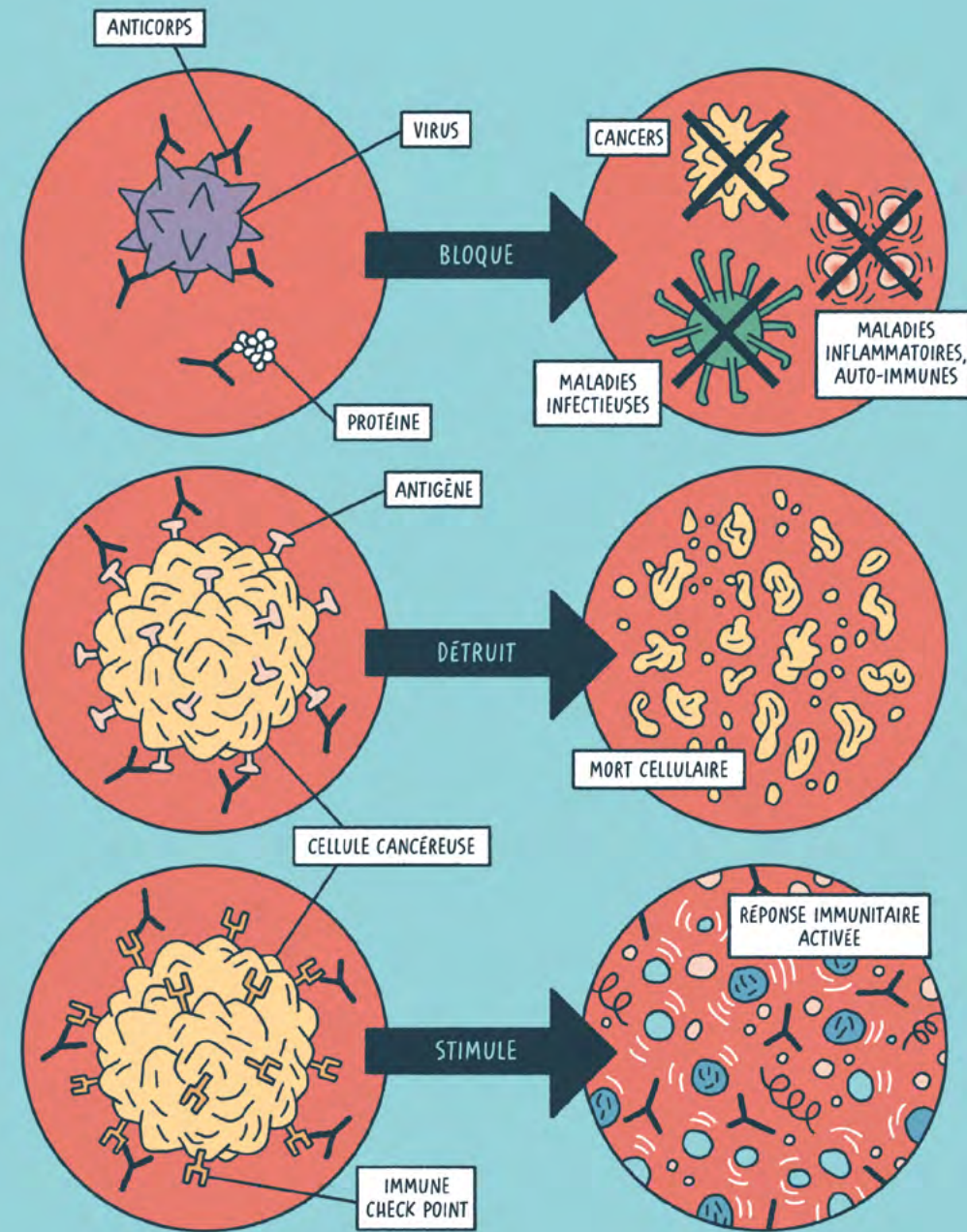
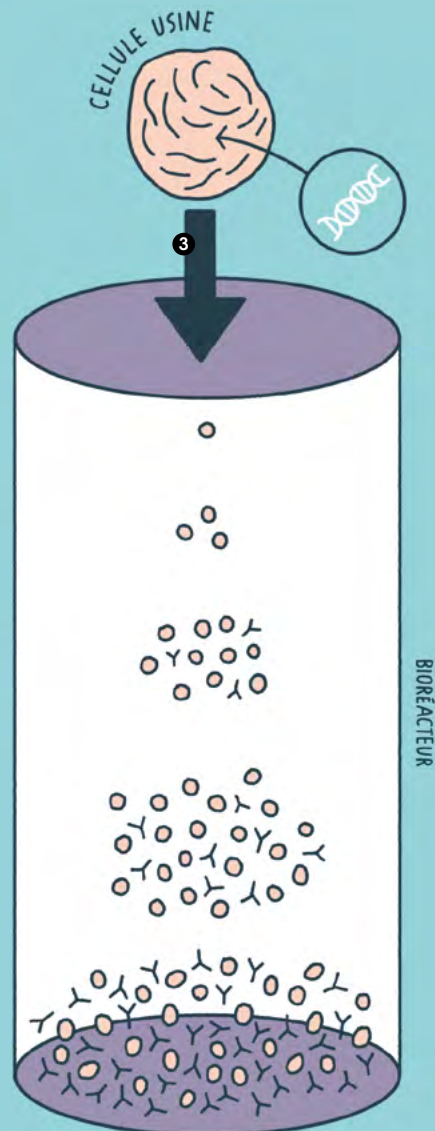
confrontées à l'antigène et vont produire des anticorps. Le gène permettant la production du meilleur anticorps est ensuite extrait. Des cellules sanguines de patients guéris peuvent aussi être utilisées.

2 Ou *in vitro* : des banques aléatoires de gènes d'anticorps sont créées artificiellement. Ces gènes sont « stockés »

dans des organismes comme des levures ou des phages (variété de virus très simple).

### 3 Production

Le gène de l'anticorps monoclonal sélectionné est inséré dans des cellules de mammifères, choisies pour leur capacité à produire de grandes quantités d'anticorps. Ces mini-usines sont mises en culture dans un bioréacteur.



## Comment agit un anticorps monoclonal ?

Selon la cible visée, un anticorps monoclonal peut agir selon différents modes.

### Bloquer un processus

En neutralisant des molécules telles qu'une protéine de surface d'un virus ou une protéine impliquée dans une maladie inflammatoire, il est possible de réduire, voire de bloquer le développement de la pathologie concernée.

### Détruire des cellules cibles

La liaison anticorps-antigène (exemple : un récepteur exprimé à la surface d'une cellule tumorale) peut aussi directement entraîner la destruction de la cellule.

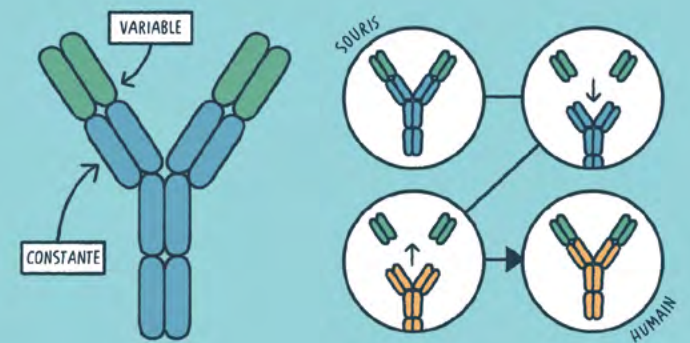
### Stimuler une fonction biologique

Les cellules cancéreuses expriment à leur surface des protéines empêchant le système immunitaire de les reconnaître (des *immune check points*). En ciblant et bloquant ces *check points*, des anticorps monoclonaux vont fortement réactiver la réponse immunitaire, conduisant à la destruction des tumeurs.

### DES ANTICORPS HUMANISÉS

Lorsqu'un anticorps monoclonal est produit chez la souris, il doit être « humanisé ». Ainsi modifié, l'anticorps, injecté au patient, ne sera pas considéré comme un corps étranger, et donc éliminé. Pour cela, le gène correspondant à l'anticorps est retouché par génie génétique. Un anticorps est en effet constitué d'une partie

constante, spécifique à l'espèce (humain, souris, etc.), et d'une partie variable, qui reconnaît l'antigène. Cette dernière est unique et est nouvellement créée chaque fois que l'organisme fait face à une agression biologique. Les séquences ADN de la partie constante de souris (ici en bleu) et de régions dans la zone variable (vert) sont enlevées et remplacées par des séquences humaines (jaune).



# REGARDS CROISÉS

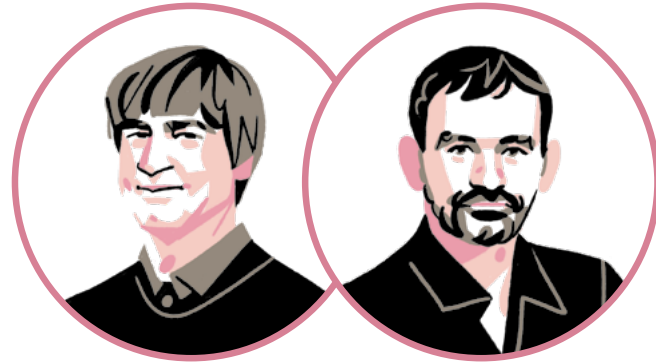
## Qui est réellement l'IA ?

**François Terrier**

Directeur de recherche et du programme Intelligence artificielle du CEA-List.

**Raphaël Granier de Cassagnac**

Auteur et directeur de la chaire Sciences et jeux vidéo de l'École polytechnique.



**Omniprésente dans nos activités sur Internet, tout autant dans la recherche que dans l'industrie, l'intelligence artificielle fascine et interroge. Comment l'humain organisera-t-il son rapport avec elle ? Et de quoi parle-t-on d'ailleurs ? Échange entre un expert scientifique et un auteur de science-fiction.**

### IA faible ou forte

**François Terrier** Selon l'OCDE, l'intelligence artificielle (IA) est un ensemble de techniques permettant de faire réaliser à une machine des tâches habituellement réservées aux êtres humains. Le terme « habituellement » est intéressant car il induit que la perception de l'IA peut évoluer au cours du temps. Cette définition introduit la notion d'IA spécifique (ou IA faible) qui est ciblée sur une problématique pour laquelle on cherche à dépasser les capacités de l'être humain au niveau de sa rapidité, de son endurance. Elle conduit à un autre concept, celui d'IA généraliste (IA forte) fondée sur le mythe du système doté de qualités humaines, fonctionnelles et émotionnelles. Pour en revenir au concret, l'une des technologies d'IA spécifique est l'apprentissage machine (ou *deep learning*) qui consiste à corréliser les données entrées dans un système avec les tâches qu'il exécutera. Si je vous disais « corrélation auto-

matique » plutôt qu'IA, vous vous poseriez moins de questions !

**Raphaël Granier de Cassagnac** Dans mes romans, j'opère la même distinction, en nommant « intelligence artificielle » l'IA faible et « conscience artificielle » l'IA forte. Cette dernière calquant le comportement humain dans toute sa variété et complexité. « Mes » scientifiques développent cette conscience en reproduisant le fonctionnement du cerveau dans le silicium ; alors que l'IA est plutôt un logiciel conçu pour des tâches spécifiques qui assiste l'humanité. J'aime beaucoup également la relativité temporelle évoquée par François car, à l'époque, on aurait pu considérer une calculatrice comme étant une IA, mais plus maintenant !

### Imaginaire et réelle

**R. G. d. C.** Dans la science-fiction, l'IA forte a tendance à se retourner contre son concepteur, ce qui véhicule des fantasmes de peur. Dans le film *2001 : l'Odyssée de l'espace* de Stanley Kubrick ou, même avant, dans *Alphaville* de Jean-Luc Godard, la machine a peur d'être débranchée, à l'instar de l'humain et de sa peur de la mort. Je note aujourd'hui un glissement optimiste : dans le film *Her* de Spike Jonze, l'IA collabore harmonieusement avec l'humain. Elle est multiple, redondante et comme elle est dans le *cloud* et non plus dans un

**« Je peine à considérer que l'intelligence ne soit que du calcul et du rationnel. Quid des aspects cognitif, émotionnel et psychique ? »**

François Terrier

ordinateur, elle ne craint plus la mort ! Mais cela reste de la fiction car je doute que l'on soit capable de développer dans quinze ans un cerveau en silicium.

**F. T.** Je souscris totalement car je peine à considérer que l'intelligence ne soit que du calcul et du rationnel. *Quid* des aspects cognitif, émotionnel et psychique ? Certes, la technologie permet de donner l'illusion d'une machine humaine, pourvu que l'on soit en visio-conférence et avec un son brouillé ! Même les meilleurs *chatbots* (robots conversationnels sur Internet) ne tiennent pas sur la longueur : si la discussion se poursuit, on se rend compte que l'IA n'a pas compris correctement les pre-

PROPOS RECUEILLIS PAR AUDE GANIER

mières questions, qu'elle ne prend pas en compte leur sémantique ni vraiment leur signification.

### La question des biais

**F. T.** Dans une IA à base d'apprentissage, on programme un algorithme pour qu'il corrèle des données d'entrée à une exécution par le système. Mais les données ne sont pas introduites dans leur état brut ni par hasard. Elles sont mises en forme et annotées, c'est-à-dire que l'humain décrit ce qui s'y trouve. Ce n'est pas la machine qui invente le concept du chat – à trouver dans une image – si on ne lui indique pas qu'il y a un chat. Cette étape d'annotation induit le risque d'introduction de biais. Par exemple, l'État hollandais avait mis en place un système de détection des fraudes aux aides sociales. Au bout de quelques mois, il a dû faire marche arrière suite à une avalanche de procès car l'IA avait créé un biais statistique vis-à-vis des personnes étrangères, du fait d'avoir mis l'accent sur une particularité des données plutôt que sur l'ensemble des critères renseignés. C'est pourquoi il est impératif de qualifier les systèmes avant de les exploiter. Il s'agit de vérifier toutes les annotations,

analyser ce qui a été appris, détecter des phénomènes inattendus et des grandes tendances pour décider si cela convient. C'est de la science de pointe.

**R. G. d. C.** Ces boucles de vérification,

s'assurant en permanence que les biais observés restent éthiques, sont en effet cruciales. Un autre point fondamental est celui de savoir quels moyens accorder à l'IA et de prévoir un gros bouton rouge permettant à l'humain de stopper à tout moment la machine. Prenons le cas du véhicule autonome et de la décision que son IA prendrait en cas d'accident : tourner à gauche et mourir contre un platane ou tourner à droite et faucher un cycliste ? Qui sera responsable ?

### Réglementation et confiance

**F. T.** Nous avons la chance que l'Europe se soit emparée de cette question. Cela a commencé par une réflexion éthique et aboutit aujourd'hui à une réglementation, l'IA Act, selon laquelle la responsabilité incombe aux fabricants et aux usagers. Et ce, même si de grands groupes ont parfois milité pour que seule l'IA soit responsable (autant dire personne !). Le parlement estime en effet qu'il faut qualifier la technologie, l'algorithme mais aussi les usages et les risques potentiels, ce qui incombe à l'humain. Pour le CEA, la confiance en l'IA est un enjeu primordial. Dès 2017, nous avons compris qu'au-delà de son utilisation dans la recherche, l'IA se retrouverait dans les systèmes industriels et nécessiterait des garanties. C'est pourquoi nous avons lancé un grand programme en la matière. Tout comme nous avons un comité d'éthique du numérique.

Certes, l'Europe est en retard par rapport aux États-Unis et à la Chine sur le volume de données acquises et disponibles. Mais elle est à la pointe sur ces enjeux d'éthique et de confiance. Elle interdit notamment à toute IA non qualifiée pour des usages à risque de pénétrer sur le marché européen.

Avec, en sous-texte, des intérêts évidents de souveraineté économique.

### De la qualité des données

**R. G. d. C.** Ce qui pourrait devenir inquiétant, c'est si les grandes entreprises conceptrices d'IA, possédant un volume colossal de données personnelles et une énorme puissance financière, s'emparaient d'un pouvoir politique. Dans l'un de mes romans, j'avance l'idée que des « sociétats » ont leur propre pays, leur propre milice... Peu après l'avoir écrit, j'eus la surprise de lire que Larry Page, cofondateur de Google, appelait de ses vœux un « territoire pour expérimenter de nouvelles formes de gouvernance ».

Mais je reste optimiste de voir que les citoyens s'emparent de ce débat et peuvent l'influencer, à l'image de la position européenne et même d'un réveil réel des consciences !

[Interpellé par un commentaire du public mentionnant la dégradation des services numériques et des moteurs de recherche]

**F. T.** Eh bien c'est une très bonne nouvelle car cela ouvre une opportunité : lorsque les services seront suffisamment dégradés, de nouveaux acteurs émergeront pour proposer de la qualité. Ces services seront peut-être payants mais nous pourrions continuer de capitaliser l'apport de l'IA. Celle développée pour Internet ne m'intéresse pas outre mesure. Mais les systèmes conçus pour l'industrie ou pour la recherche sur les maladies rares sont bien plus motivants : l'IA, sur des enjeux compliqués que les grands groupes n'ont pas développés justement parce que c'est compliqué, est un défi scientifique passionnant. ●

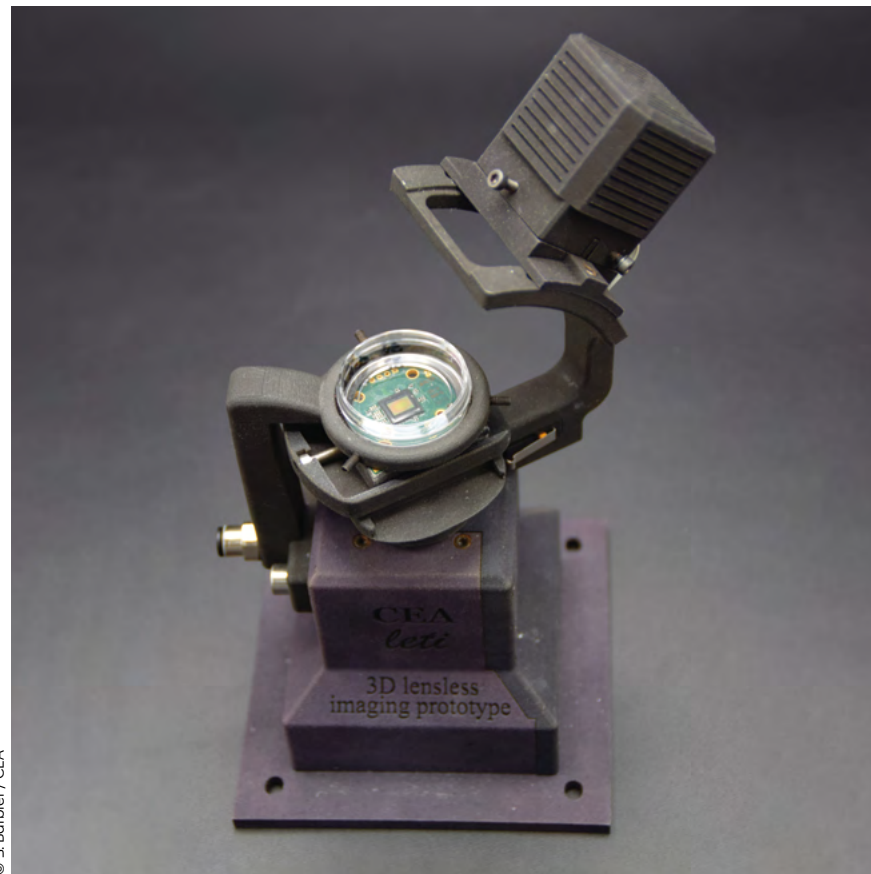
EXTRAITS DE LA RENCONTRE « SCIENCE TOI-MÊME ! » AU CENTQUATRE-PARIS, LE 11 JUIN 2022.

À retrouver sur la chaîne YouTube → CEA Officiel (playlist Conférences)

**« Un autre point fondamental est celui de savoir quels moyens accorder à l'IA et de prévoir un gros bouton rouge permettant à l'humain de stopper à tout moment la machine. »**

Raphaël Granier de Cassagnac





© S. Barbier / CEA

## CONCOURS D'INNOVATION

## Les 13 lauréats du CEA

**Beau palmarès pour les projets et start-up du CEA dans le Concours national d'innovation 2022 : treize d'entre eux se sont distingués, notamment en remportant trois grands prix sur les dix attribués !**

Soutenir et encourager l'innovation, via la création et le développement de start-up, tels sont les objectifs des trois concours nationaux i-PhD, i-Lab et i-Nov. Pour *in fine* dynamiser la croissance et l'emploi, dans un contexte où les défis sociétaux à relever sont immenses (climat, énergie, etc.) et de souve-

raineté numérique et industrielle à maintenir. i-PhD encourage les jeunes chercheurs souhaitant créer ou cocréer une start-up en rupture technologique ; i-Lab valorise les résultats de la recherche publique à travers la création d'entreprises de technologies innovantes ; et i-Nov soutient des projets d'innovation portés par des start-up et PME au potentiel particulièrement fort pour l'économie française. Nouveauté cette année, dix grands prix ont été attribués à des candidats prometteurs d'i-Lab présentant un fort impact en matière de développement durable et de retombées sociétales.



### Ci-dessus

Dispositif d'imagerie sans lentille.

### Grands prix i-Lab

- **Qosmos** : développement du premier ordinateur quantique capable de dépasser 1 million de Qubits, en se basant sur les technologies de la micro-électronique.
- **Orioma** (start-up partenaire du CEA) : caméra autonome en énergie pour la gestion intelligente des bâtiments. Le dispositif, qui peut fonctionner pendant quinze ans sans pile, câble ni maintenance, s'appuie sur un capteur infrarouge innovant et de l'intelligence artificielle (IA).
- **V4 Aqua** : développement d'un candidat médicament issu de venin du serpent mamba vert pour traiter des pathologies rénales.

### Lauréats i-Lab

- **Snowpack** : couche réseau permettant d'être invisible sur Internet, pour répondre aux besoins croissants de protection des données personnelles et professionnelles.
- **Admir** : instrument d'imagerie infrarouge associé à un logiciel d'IA pour accélérer l'analyse de tissus et cellules.
- **BAIO-DX** : dispositif d'identification rapide d'organismes pathogènes, combinant imagerie sans lentille et IA.
- **Blue Bees Therapeutics** : développement de nouveaux anticorps à activité antitumorale.

### Lauréats i-Nov

- **Diabeloop** : technologie visant à optimiser le traitement et la prise en charge du diabète grâce à l'IA.
- **Fluoptics** : leader européen de l'imagerie de fluorescence pour l'aide à la chirurgie.
- **Apix analytics** : système d'analyse pour la production d'énergies renouvelables.
- **Wise integration** : technologies d'électronique de puissance à base de nitrure de gallium permettant la réduction de la taille et des pertes énergétiques des alimentations d'appareils électroniques par trois.
- **Cardiorenal** : dispositif mesurant créatinine et potassium à domicile.
- **Demboost** : interface 3D interactive et immersive, permettant de visualiser les contaminations radioactives dans les structures de génie civil d'installations nucléaires. SR



© Rapports du GIEC - Haut conseil pour le climat

### SÉMINAIRE

## Le gouvernement formé sur le climat

Valérie Masson-Delmotte, climatologue au CEA et coprésidente du groupe de travail 1 du GIEC, a été invitée à participer à un séminaire gouvernemental consacré à l'écologie le 31 août dernier. Enjeu : former en deux heures d'échange les 42 membres du gouvernement (ministres, ministres délégués et secrétaires d'État) aux causes et conséquences du réchauffement climatique. Car il y a urgence à agir. L'été 2022, marqué par des événements climatiques inédits en France – canicule,

sécheresse, pénurie d'eau, feux de forêt, tempête extrême en Corse – mais aussi dans bien d'autres régions du monde à l'instar des inondations massives au Pakistan, est venu rappeler que le climat change, et vite. « *Il reste cependant une étroite fenêtre d'opportunité pour limiter la casse, mais elle se referme rapidement ; chaque année d'inaction exacerbe les risques à venir, avec des menaces croissantes pour le bien-être et la santé planétaire* », a expliqué la climatologue à cette assemblée de décideurs. SR



### Ci-dessus

Évolution de la température à la surface de la Terre, chaque barre représentant une année. Le réchauffement climatique actuel, de + 1,1°C depuis 1850, est le résultat des activités humaines.

→ La présentation, accessible à tous, est à retrouver sur le compte twitter @valmasdel



© E. Bressy / Ami

### ACQUISITION DE START-UP BIC rachète AMI

5 septembre : le groupe français BIC, implanté à l'international, annonce le rachat à 100% de AMI, spin-off du CEA-Leti. « *BIC anticipe la mutation de l'industrie de l'écriture. Ils ont souhaité se doter de nouveaux moyens numériques afin de développer leurs relais de croissance* », indique au journal *Le Dauphiné* Jean-Luc Vallejo, l'un des trois cofondateurs de cette société spécialisée dans le magnétisme et la magnétométrie.

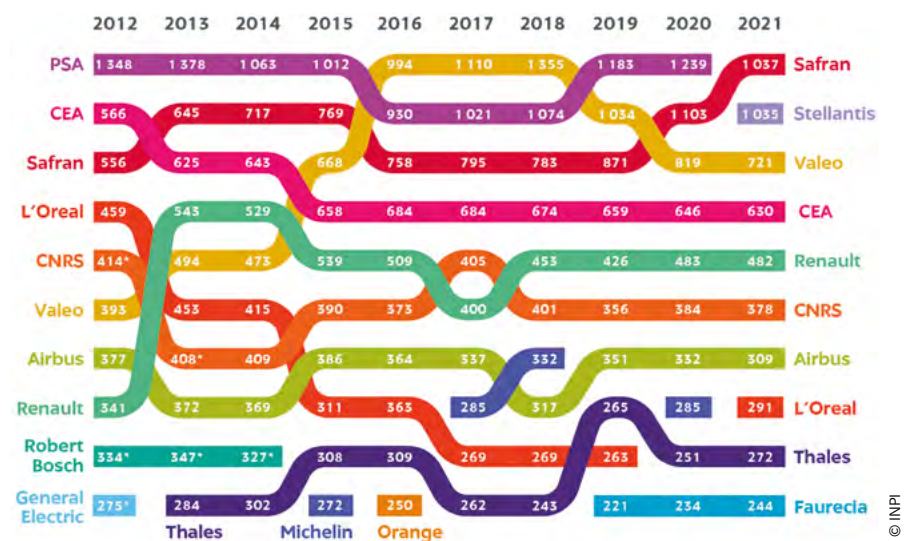
Alors que les tablettes Slate et Repaper de AMI – qui permettent de numériser en temps réel un dessin effectué au

stylo – sont déjà sur le marché (voir *Les défis du CEA* n° 241), la société travaille sur bien d'autres produits. « *Aujourd'hui, nous avons consolidé un savoir-faire, un portefeuille de brevets internationaux qui nous permet d'adresser d'autres marchés de masse. Nous sommes présents en tant que brique technologique intégrée dans des produits tiers. On va retrouver notre technologie dans des produits de gros acteurs de l'électronique et de l'informatique* », annonce le PDG dont la société demeurera implantée en Isère. AG

## PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE Toujours dans le Top 10

Chaque année, l'Institut national de la propriété intellectuelle (INPI) distingue les acteurs français majeurs de l'innovation.

Son palmarès 2021 confirme la place du CEA à la tête de la catégorie « Établissements de recherche, d'enseignement supérieur et établissements de l'État ». Avec 630 dépôts de brevets publiés, il se maintient par ailleurs à la quatrième place, derrière Safran, Stellantis (fusion de PSA et Fiat Chrysler Automobile) et le groupe Valéo. Pour cette édition 2021, l'INPI propose un classement selon différents sous-domaines technologiques. Le CEA est le premier du secteur électrotechnique et se place dans le Top 3 en chimie,



instrument, machines, techniques de mesure, appareils et énergie électrique. À noter, deux start-up issues du CEA occupent la tête du classement « PME » :

Aledia, spécialisée dans les technologies LED, suivie d'Isorg et ses capteurs d'empreintes digitales (voir *Les défis du CEA* n°244). AG

### COLLABORATION

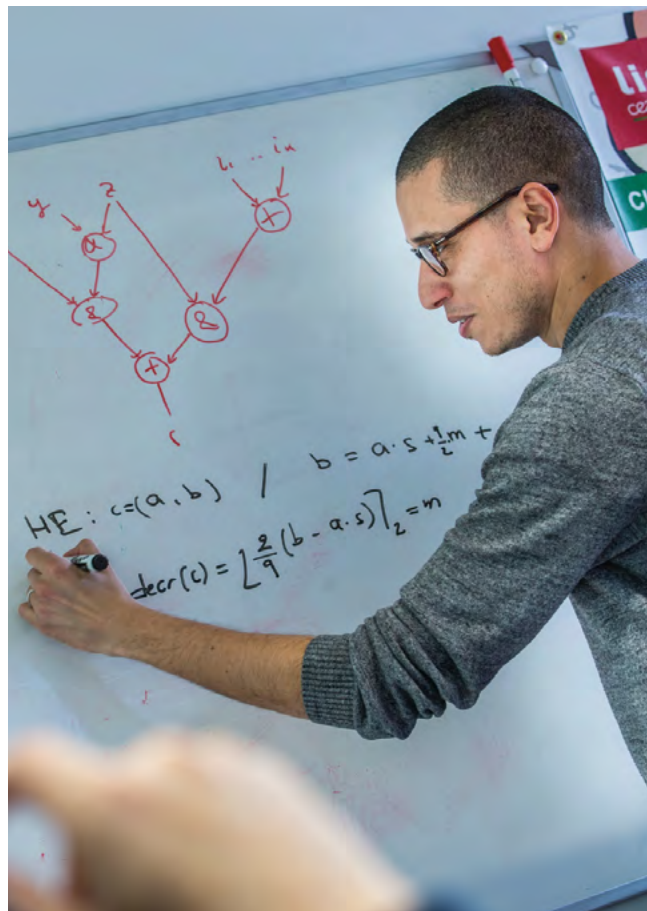
## Accord sur la cybersécurité

Multifonctionnels, souvent associés à de vastes bibliothèques de données, plus volumineux, plus complexes : les logiciels des systèmes d'information utilisés par les administrations et les industries (des bureaux d'études aux chaînes de production) ne cessent d'évoluer. Face à cela, la cybersécurité doit elle aussi s'adapter, toute faille pouvant entraîner des conséquences dévastatrices. C'est dans ce contexte que le CEA et l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (ANSSI) ont

signé un accord-cadre pour continuer à améliorer la sécurité de ces systèmes numériques et préparer les futures générations d'environnement d'analyse logicielle. L'un des premiers objectifs sera de développer et mettre en œuvre de nouveaux outils et approches pour vérifier l'absence de vulnérabilité dans ces logiciels, aussi bien en phase de conception que d'intégration. SR

### ← Ci-contre

Démonstration d'un chiffrement homomorphe pour la sécurisation des données.



© CEA

## LE COIN DES START-UP

PAR SYLVIE RIVIÈRE



© Arcure

## Arcure, l'œil des véhicules industriels

Patrick Mansuy et Franck Gayraud sont, dans les années 2000, deux ingénieurs de l'industrie de la défense. « Nous constatons alors, comme dans bien d'autres secteurs, des problèmes de sécurité entre les véhicules industriels et les personnels évoluant autour. Des collisions se produisaient régulièrement et il n'existait pas de solution technique satisfaisante pour les prévenir », se souvient Patrick Mansuy. C'est de ce constat qu'est née la start-up Arcure. En 2008, le duo contacte le CEA,

qui dispose alors d'une technologie de détection de piétons pour les voitures à base d'intelligence artificielle, et d'une solide culture industrielle, « qui n'existait pas dans les autres organismes de recherche », précise l'ingénieur. Ensemble, ils créent Blaxtair, une caméra « intelligente » pour véhicules industriels, capable de différencier en temps réel un humain de tout autre obstacle et d'alerter le conducteur, voire de stopper le véhicule en cas de danger imminent. Et ce, quelle que soit la situation du piéton (debout, accroupi, en mouvement, etc.) et son environnement (terrain accidenté, poussières, jour ou nuit, etc.). Vitesse de réaction, portée de détection, fiabilité, compacité... En treize ans, Arcure n'a cessé d'améliorer son dispositif, qui désormais reconnaît non seulement les piétons mais aussi les

autres véhicules. Une évolution menée en étroite collaboration avec le CEA-List, au sein d'un laboratoire commun de recherche. Devenue PME industrielle, Arcure est aujourd'hui la référence mondiale dans son domaine et peut s'enorgueillir d'avoir révolutionné la sécurité des intervenants. Comme le résume Patrick Mansuy, « nous avons vendu plus de 13 000 caméras Blaxtair dans le monde et il n'y a jamais eu de collisions impliquant les engins équipés ! » ●

### ↑ Ci-dessus

Dispositif Blaxtair installé sur une chargeuse.

### 📍 CEA-List

Laboratoire des systèmes numériques intelligents (Saclay).

### TECHNOLOGIE

- Caméra « intelligente » embarquée sur engins industriels (chariot élévateur, bulldozer, pelleuse, véhicule minier, etc.).
- Alerte du conducteur en temps réel, voire arrêt automatique du véhicule.

en temps réel dans des logiciels embarqués, développés avec le CEA-List.

### MARCHÉS

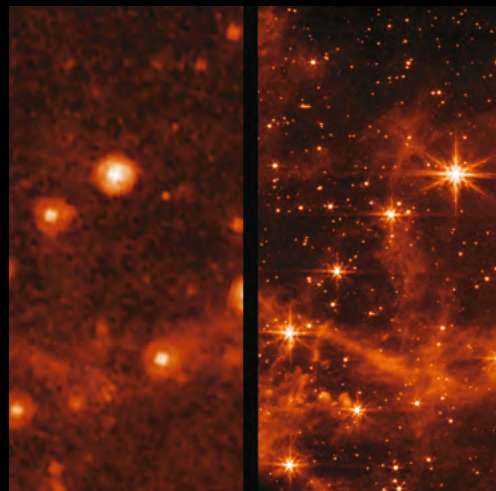
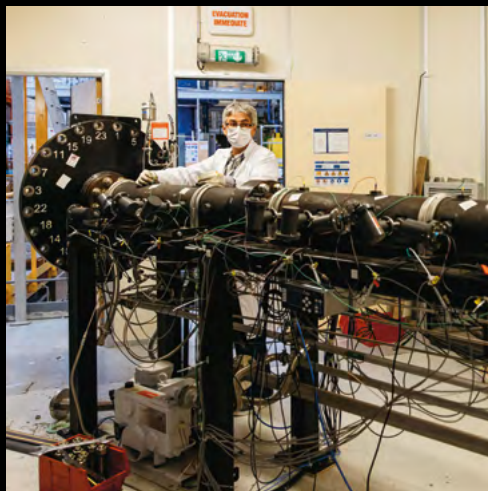
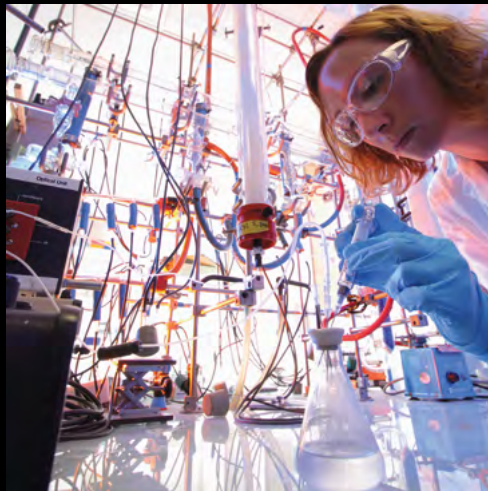
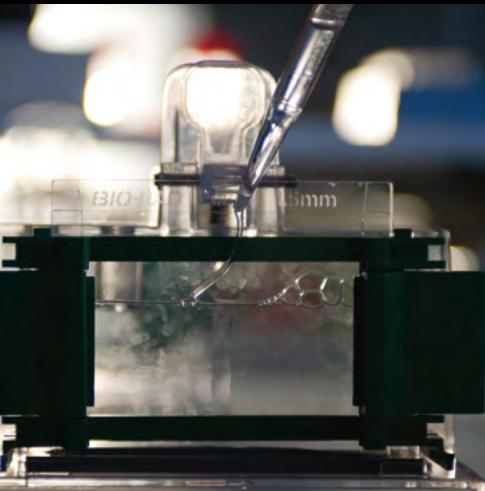
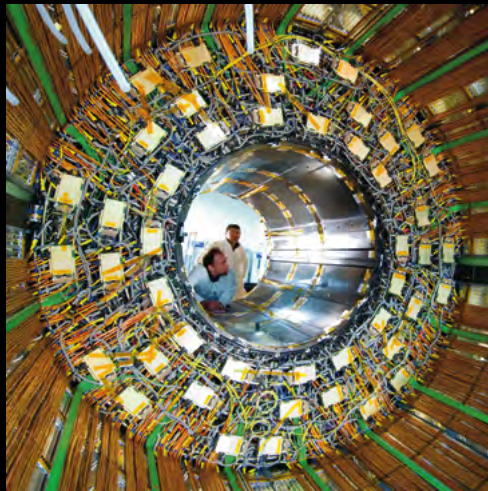
- Constructeurs et concessionnaires de véhicules industriels.
- Clients finaux : travaux publics, mines, tunnels, entrepôts, usines, secteur de la logistique...

**En Europe, Amérique du Nord et Asie (dans une trentaine de pays).**


→ [www.arcure.net](http://www.arcure.net)

### DATES-CLÉS

<b>2009</b> Création de Arcure	<b>2019</b> Entrée en bourse
<b>2012</b> Commercialisation de la première génération de Blaxtair	<b>2021</b> 10 000 <sup>e</sup> Blaxtair vendu
<b>2018</b> 4 000 <sup>e</sup> Blaxtair vendu	<b>2022</b> Commercialisation de la 4 <sup>e</sup> génération de Blaxtair



**@CEA\_Officiel**

Suivez le CEA sur Instagram   
et les réseaux sociaux

