

# Les défis

LE MAGAZINE DE LA RECHERCHE IMPLIQUÉE  
#248 – MARS / AVRIL 2022

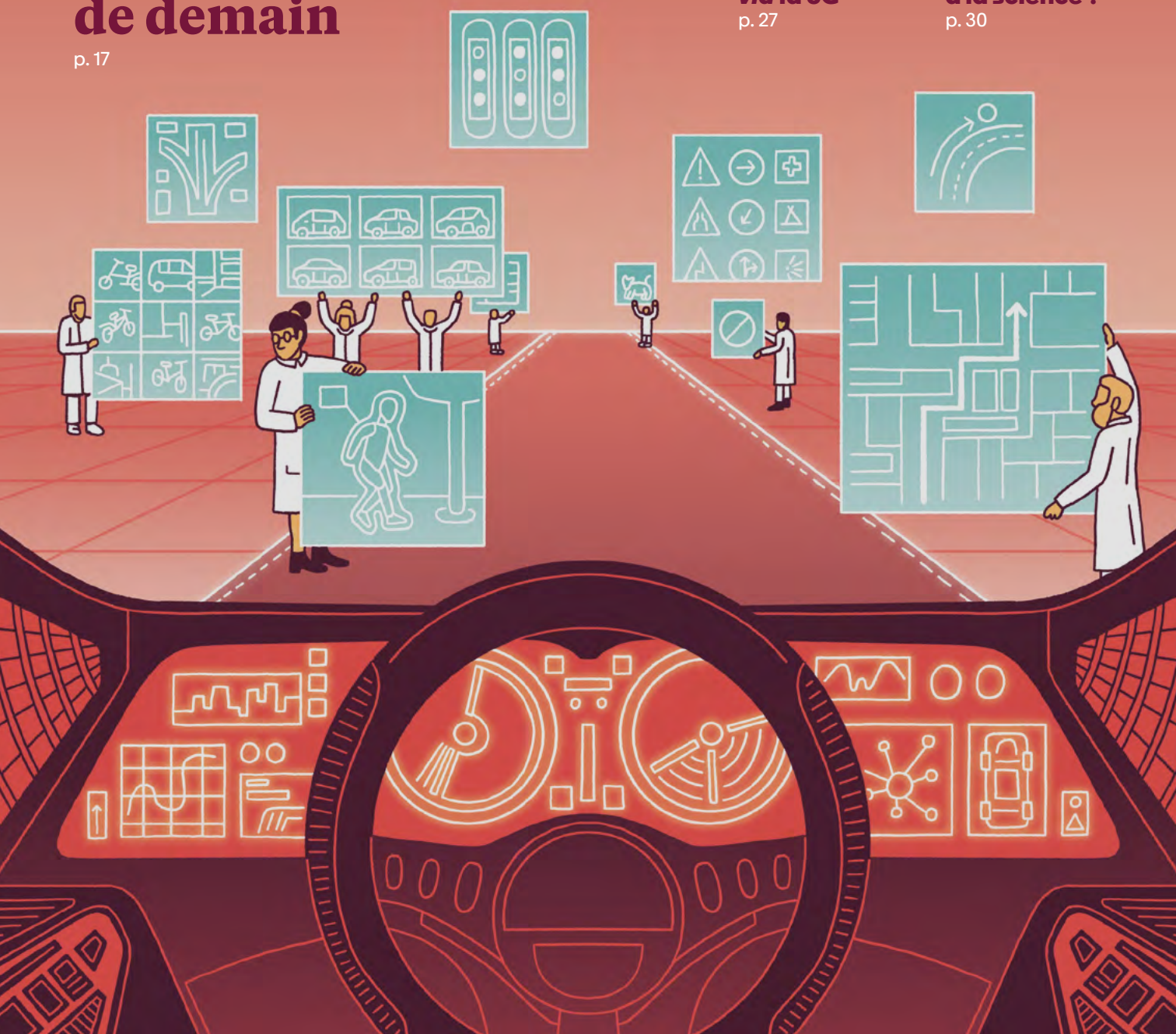
du cea

## DOSSIER Vers l'IA de demain

p. 17

Tout s'explique  
**Le voyage  
des données  
via la 5G**  
p. 27

Regards croisés  
**Peut-on faire  
confiance  
à la science ?**  
p. 30







### L'humeur de...

Aude Ganier, rédactrice en chef

**De l'intelligence, de la conscience et de la confiance, la science n'en manque pas. Lorsqu'elle doute elle-même, lorsque l'on doute d'elle. Ou lorsqu'il s'agit d'orienter l'intelligence artificielle vers plus d'éthique, de recycler les éléments précieux des déchets électroniques, de se soucier de la santé mentale des jeunes enfants, futurs adultes. Et les chercheurs n'en manquent pas. Malgré le climat ambiant et les découvertes préoccupantes, comme celles des gigantesques fuites de méthane des industries fossiles. Sur le chemin des connaissances, partageant éclairs de génie et incertitudes, ils gardent le cap de l'impérative frugalité énergétique. En toute intelligence, conscience et confiance.**

**cea** 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** Fabrice Demarthon, Guillaume Langin, Céline Lipari  
**Comité éditorial** Claire Abou, Luc Barbier, Mathilde Costes-Majorel, Sophie Kerhoas, Elisabeth Lefèvre-Rémy, Camille Giroud, Sophie Martin, Frédérique Tacnet, Anne Orliac, Valérie Vandenbergh  
**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 Arctic Volume White FSC. Stipa. Avril 2022 - N° ISSN 1163-619X. Tous droits de reproduction réservés.

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

# SOMMAIRE #248

## EURÉKA

**03 Fusion nucléaire**  
Un peu plus près des étoiles

**05 Mobilité durable**  
Un chargeur compact à très haut rendement

**06 Réchauffement climatique**  
Mégafuites de méthane

**07 Fabrication additive**  
Des alliages de cuivre imprimés en 3D

**08 Déchets électroniques**  
Avancées sur le front du recyclage

**09 Climat**  
Le plancton fait tourner les modèles

**10 Microélectronique**  
La FD-SOI pour la 5G

**11 Astrophysique**  
Une nova en temps réel

**12 Imagerie cérébrale**  
La santé mentale de nos ados

## MAKING-OF

**13 Analyses à l'échelle microfluidique**

## AGORA

**32 Le CEA au CFIA 2022**

**32 Conférences de NeuroSpin en ligne**

**32 Le campus Y.Spot au complet**

**33 3 moonshots pour 2022**

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

## DOSSIER INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

### Vers l'IA de demain



**17 Vers l'IA de demain**

**20 Comment l'IA apprend-elle ?**

**21 IA & éthique**  
Entretien

**22 Avoir confiance**

**24 Cap sur l'embarqué et la frugalité**

**26 De l'IA bio-inspirée**



## TOUT S'EXPLIQUE

**27 Demain, la 6G**

**34 Mission accomplie pour Svom**

**34 Le chiffre**

**34 Accord de R&D sur la propulsion nucléaire**

## REGARDS CROISÉS

**30 Peut-on faire confiance à la science ?**  
Cynthia Fleury et Étienne Klein

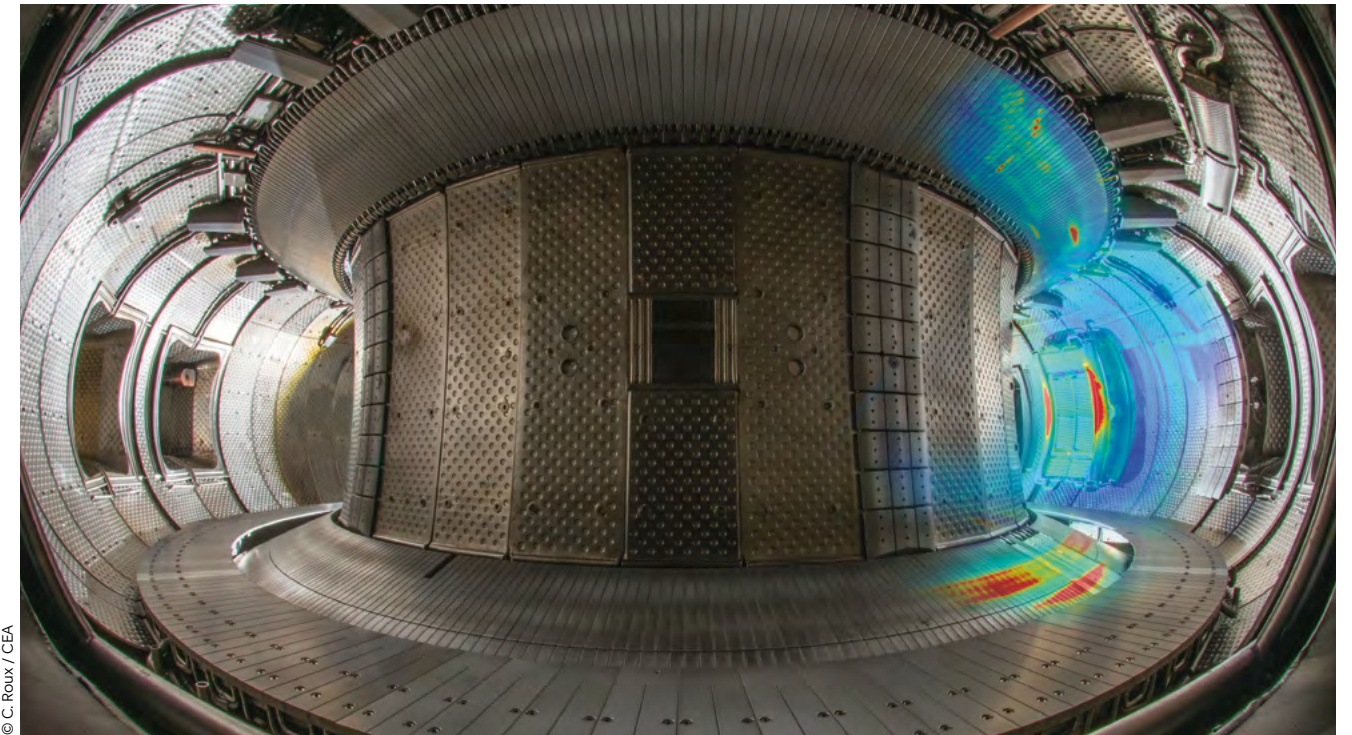


## LE COIN DES START-UP

**35 Les micro-écrans de Microoled**

Les Défis du CEA – Abonnements  
CEA – Bâtiment Siège  
91 191 Gif-sur-Yvette

# EURÉKA L'ACTU DES LABOS



© C. Roux / CEA

## FUSION NUCLÉAIRE

# Un peu plus près des étoiles

↑ **Ci-dessus**  
Vue à 180° de l'intérieur du tokamak West et simulation d'images infrarouges du plasma.

**Le 9 février 2022, le consortium EUROfusion, auquel participe le CEA, annonçait un nouveau record d'énergie de fusion nucléaire pour le Joint European Torus (JET), installé au Royaume-Uni. Quelques semaines plus tôt, c'était l'Académie des sciences chinoise qui révélait un record de durée de confinement du plasma au sein du Experimental Advanced Superconducting Tokamak (East). Et dès l'été prochain, débutera la nouvelle campagne scientifique du W-tungsten Environment in Steady-state Tokamak (West) du CEA-IRFM à Cadarache.**

PAR FABRICE DEMARTHON

Chaque nouveau record, chaque succès expérimental rapproche un peu plus la communauté scientifique d'un de ses buts ultimes : domestiquer l'énergie des étoiles. « Ces expériences menées un peu partout dans le monde constituent les briques essentielles de notre future maîtrise de la fusion nucléaire par confinement magnétique », estime Jérôme Bucalossi, directeur du CEA-IRFM. Avec en ligne de mire, la mise en route avant 2030 d'Iter (*le chemin*, en latin), prodigieuse machine expérimentale qui ouvrira la voie aux véritables centrales électrogènes.

**La clé du refroidissement des parois et de la supraconductivité**

Mastodonte de 23 000 tonnes construit à Cadarache par un consortium de 35 pays,

Iter est un tokamak, acronyme russe désignant une chambre en forme de tore autour de laquelle sont placés des aimants qui y génèrent un puissant champ magnétique. Ce champ sert à confiner un plasma, état de la matière constitué de particules ionisées. Dans Iter, ce plasma sera constitué de deutérium et de tritium et sera porté aux 150 millions de degrés nécessaires au déclenchement des réactions de fusion. L'objectif étant de produire une puissance de fusion de 500 mégawatts sur des durées assez longues (jusqu'à 10 minutes). Sur le chemin, forcément pavé d'embûches, qui mène à ce premier plasma d'Iter, le nouveau record de puissance de JET – 11,8 mégawatts pendant 5 secondes, soit 59 mégajoules d'énergie de fusion produits – et



## FORMULE

$$\begin{array}{r} \text{Puissance (watt)} \\ \times \text{Durée (seconde)} \\ \hline = \text{Énergie (joule)} \end{array}$$

## FOCUS

## L'énergie du futur

Comment poursuivre le développement des sociétés tout en préservant la planète et limiter le changement climatique ? Relever cet immense défi passe notamment par l'utilisation d'énergies plus propres. Or, il en est une abondante et pérenne, qui ne produit ni gaz à effet de serre ni déchets radioactifs à vie longue... C'est celle de notre Soleil et de toutes les étoiles : la fusion nucléaire. Au cœur du Soleil, où la température atteint 15 millions de °C, les noyaux d'hydrogène (H) entrent en collision à des vitesses phénoménales. En fusionnant, deux noyaux d'H donnent naissance à un noyau d'hélium tout en libérant une énorme quantité d'énergie. Au XX<sup>e</sup> siècle, les scientifiques ont découvert que la réaction de fusion la plus efficace et rentable réalisable en laboratoire était celle de deux isotopes de l'hydrogène, le deutérium (D) et le tritium (T). Mais, sur Terre, elle exige des températures de 150 millions de °C, soit dix fois plus que la réaction H-H au cœur du Soleil. Pour y parvenir, il existe plusieurs techniques. Celle sur laquelle se fondent les plus grands espoirs est le confinement magnétique mis en œuvre au sein des machines comme JET, West et Iter.



© C. Roux / CEA

plus encore, les prochaines expériences de la machine West, revêtent une importance capitale. « JET a subi une profonde transformation afin de le rapprocher de la configuration d'Iter », explique Jérôme Bucalossi. Mais il est limité à des durées de quelques secondes car ses parois intérieures ne sont pas refroidies activement et ses aimants ne sont pas supraconducteurs. » West, qui résulte de la modification de l'ancien tokamak Tore Supra du CEA, possède ces deux atouts. Il va donc permettre de développer les techniques de contrôle pour des durées de production de plasma de deutérium (sans tritium) de plusieurs minutes. « Nous y testons les pièces d'Iter, comme le divertor, la pièce du plancher de la chambre à vide la plus exposée aux flux de chaleur et de particules générés par les réactions de fusion », précise Jérôme Bucalossi.

## Affiner les configurations du plasma et du champ magnétique

Après une première phase consacrée à valider la nouvelle configuration du plasma avec divertor, l'attention de l'équipe de West va se porter sur la qualification des matériaux. « Durant longtemps, les parois des tokamaks étaient en carbone, un matériau connu pour sa légèreté et surtout sa capacité à ne pas entraver les réactions de fusion dans le plasma de deutérium-tritium », décrypte Jérôme Bucalossi. Mais les recherches ont montré que sa forte affinité pour le deutérium et le tritium entraîne

une accumulation du tritium radioactif dans les parois des machines ». D'où l'idée de remplacer le carbone par le tungstène qui ne possède pas cette affinité. Il a cependant un autre inconvénient. Il peut, lui, facilement polluer le plasma et le refroidir : alors qu'un plasma de deutérium-tritium supporte jusqu'à 5% de carbone, la limite tombe à 0,001% pour le tungstène ! « Les particules énergétiques provenant des plasmas de fusion peuvent éroder le tungstène des parois. Ce dernier peut alors migrer vers le cœur du plasma », explique Jérôme Bucalossi. Il est donc primordial d'éviter au maximum cette érosion, par exemple en affinant les configurations du champ magnétique dans le divertor pour éloigner le plus possible le cœur du plasma des parois. De même, nous veillons à assurer au préalable un ajustement extrême des pièces afin que rien n'affleure ».

Mener à bien toutes ces expériences complémentaires est donc la condition sine qua none à la réussite d'Iter. Avant la construction éventuelle de Demo, premier démonstrateur de centrale électrique à fusion. ●



## Ci-dessus

Inspection des composants qui font face au plasma dans West.



## CEA-IRFM

Institut de recherche sur la fusion magnétique (Cadarache).

## MOBILITÉ DURABLE

## Un chargeur compact à très haut rendement

Alors que Sony et Honda forment une alliance stratégique pour les véhicules électriques, le CEA et Renault Group présentent un chargeur embarqué pour batteries dernier cri. Il équipera les voitures du constructeur dès 2025.

PAR AUDE GANIER

Lancé il y a à peine cinq ans, le projet du CEA et de Renault Group aboutit à un chargeur embarqué de batteries aux performances inégalées. Une première : il réduit de 30% les pertes d'énergie lors de la conversion de l'électricité en tension et en courant, ce qui réduit d'autant l'échauffement du convertisseur et améliore son efficacité et sa durée de vie. Bidirectionnel (il peut à la fois délivrer et stocker l'électricité), avec une capacité de charge jusqu'à 22 kVA (celle des prises murales), il permet d'envisager les futurs usages de la maison autonome alimentée en partie par le véhicule !

## Le graal de l'électronique de puissance

Cela, on le doit au pari audacieux des chercheurs du CEA-Leti dans les années 2010. Pour l'électronique de puissance embarquée, ces pionniers ont misé sur le potentiel du « GaN » (nitride de gallium). Pour différentes raisons : les composants GaN peuvent être produits sur les lignes standard

de la microélectronique et ils peuvent être bidirectionnels. De fait, les coûts s'avèrent moins élevés qu'avec d'autres technologies comme celle à base de carbure de silicium, et les performances garanties. « Dès le début, nous avons évolué sur deux axes de recherche. D'une part, la fabrication des composants dans nos salles blanches et dont le transfert de technologie est actuellement en cours chez STMicroelectronics. D'autre part, la conception de systèmes applicatifs tests pour améliorer dès la phase amont les composants selon les usages. À l'arrivée, nous obtenons des performances à l'état de l'art mondial », relate Philippe Despresse, ingénieur au CEA-Leti.

## Réduction de la taille des composants

Renault Group s'est également appuyé sur l'expertise du CEA-Liten en matière de procédés de fabrication et de matériaux pour réduire la taille du convertisseur. Les gains en compacité ont notamment été obtenus grâce à un procédé dit de Powder Injection Molding qui permet de fabriquer des formes complexes pour s'adapter à l'espace utile, autorisant ainsi une miniaturisation. Un transfert est en cours auprès d'un équipementier, futur fournisseur de Renault. L'objectif étant d'intégrer ce chargeur dans les véhicules électriques du constructeur dès 2025. ●



## Ci-dessous

Tests de vérification du chargeur embarqué de batteries.

## LEXIQUE

## Électronique de puissance

Branche récente de l'électronique (moins de 50 ans), autrement appelée « électronique de conversion d'énergie », qui permet de convertir l'électricité en d'autres formes d'énergie comme l'alimentation des batteries, l'induction des plaques de cuisson, etc.



## CEA-Leti

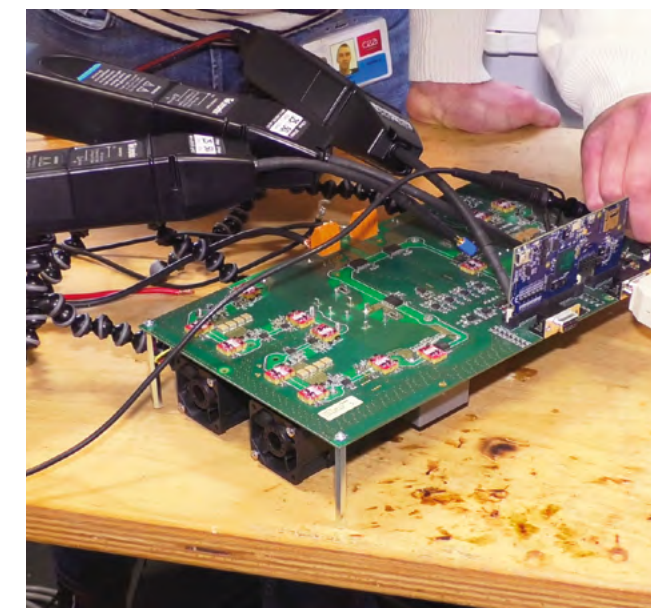
Institut des micro et nano-technologies et de leur intégration dans les systèmes (Grenoble).

## CEA-Liten

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



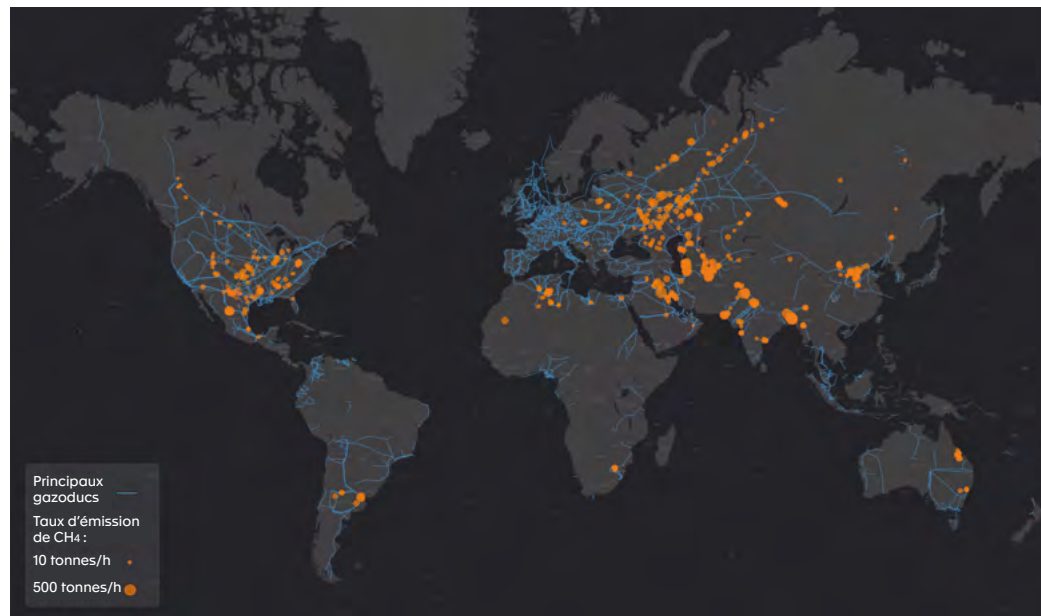
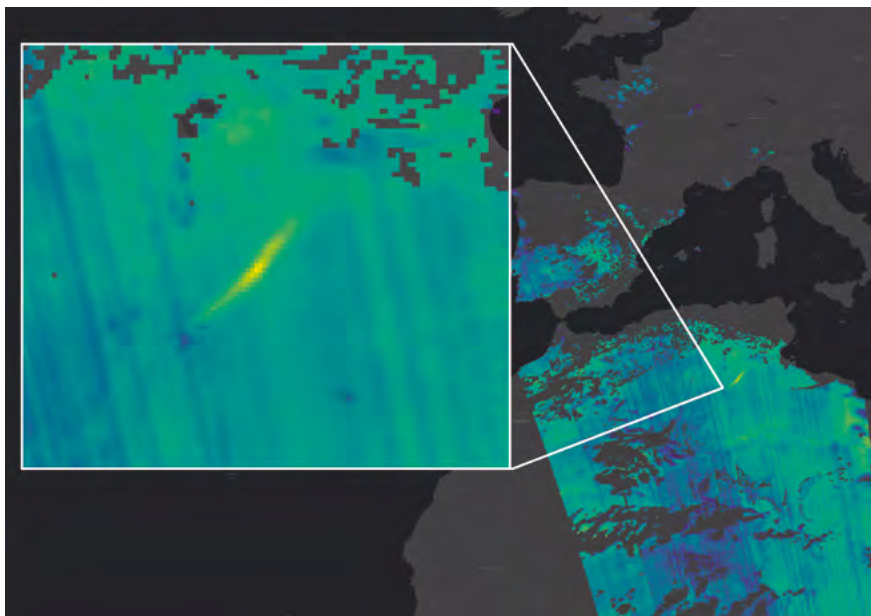
© CEA





## RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

## Mégafuites de méthane



**Les fuites de méthane en provenance des industries gazières et pétrolières étaient sous-estimées. Et elles sont colossales. C'est ce que vient de montrer une étude à laquelle a contribué le LSCE.**

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Juste après le CO<sub>2</sub>, le méthane est le deuxième contributeur au réchauffement du climat. Le Giec avait d'ailleurs insisté sur l'impact de ce gaz à effet de serre en août 2021 dans son rapport sur les bases physiques du changement climatique (voir *Les défis du CEA* n° 245). S'il est présent de manière naturelle dans l'atmosphère, lié par exemple à la décomposition des matières organiques dans les zones humides, sa concentration a considérablement augmenté depuis la période préindustrielle du fait des activités humaines : élevage, décharges, exploitation des énergies fossiles, incluant les fuites de gaz. Cette dernière composante vient d'être quantifiée dans une étude de longue durée impliquant le LSCE, le CNRS et Kayrros, une start-up spécialisée dans les données satellitaires pour l'énergie et l'environnement.

Le phénomène est de grande ampleur, bien plus important que ce que pressentaient les chercheurs : sur les 1800 panaches de méthane enregistrés en 2019 et 2020, 1200 sont directement attribués aux exploitations d'hydrocarbures ; le reste étant réparti entre charbon et un mélange de décharges, fermes géantes, etc. « Ces 1200 panaches représentent à eux seuls 10 % des émissions de méthane du secteur de l'industrie fossile, soit l'équivalent des quinze dernières années de rejets carbonés de l'Australie, ou encore de 20 millions de véhicules circulant pendant un an », rapporte Thomas Lauvaux, chercheur au LSCE.

#### Des fuites vues de l'espace

C'est depuis l'espace que l'observation a été faite, grâce aux images du satellite européen Sentinel-5P lancé en 2017 pour mesurer les polluants atmosphériques. Deux ans durant, des milliers de clichés quotidiens balayant la surface de la Terre ont été analysés ; et l'origine de chaque panache retrouvée en remontant les heures dans des modèles météorologiques. « La majorité de ces rejets sont intentionnels, et cela a été une découverte pour nous !

commente le chercheur. *Lors d'opérations de maintenance par exemple, les vannes des gazoducs sont tout simplement laissées ouvertes. C'est une pratique courante en 2022, et c'est choquant. Nous avons vu des rejets massifs, autour de 25 tonnes par heure, entre 50 et 150 fois par mois en moyenne en provenance des grands pays producteurs que sont la Russie, le Turkménistan, les États-Unis, l'Iran, le Kazakhstan, l'Algérie.*

#### Un bilan seulement partiel

En réalité, le bilan de ces rejets n'est que très partiel, pour plusieurs raisons : le seuil de détection du spectromètre infrarouge du satellite ne permet de voir que les panaches les plus massifs. Or ceux-ci ne représentent qu'une petite partie du volume global des rejets ; les hautes latitudes, comme le grand Nord, n'étant pas balayées par le satellite, l'observation du Canada et d'une partie de la Russie, n'a pas été instruite ; les zones aux couverts nuageux importants (tropiques, Canada, Russie) sont peu accessibles à l'observation ; et enfin, en Chine, la proximité des exploitations de gaz et des mines de charbon ne permet pas de différencier la source des panaches.

Avec un effet réchauffant du méthane 30 fois supérieur à celui du CO<sub>2</sub> sur 100 ans, ces fuites massives ont un impact considérable sur le climat. Les stopper est donc crucial. Et le résultat serait mesurable à court terme, puisque le méthane disparaît de l'atmosphère au bout de dix ans environ. « Les industriels et États concernés ont eux-mêmes tout intérêt à engager ces changements de pratique, en réalité peu coûteux au regard des gigantesques économies réalisées, que nous évaluons à plusieurs milliards de dollars par an. 6 milliards par exemple pour le Turkménistan, et 1,6 pour les États-Unis. » Sans oublier que la possibilité de détecter les fuites de gaz depuis l'espace pourrait ouvrir la voie à des contrôles de la conformité de ces sociétés... ●

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

↑  
Ci-dessus, de gauche à droite : Panache de méthane, Algérie, 4/01/2020 ; principales sources d'émissions de méthane liées aux industries de gaz et pétrole (2019-2020).

## FABRICATION ADDITIVE

## Des alliages de cuivre imprimés en 3D

**Pour diversifier ses activités, la société Tolectro a sollicité l'aide du CEA autour de la fabrication additive de pièces complexes en cuivre.**

PAR AUDE GANIER

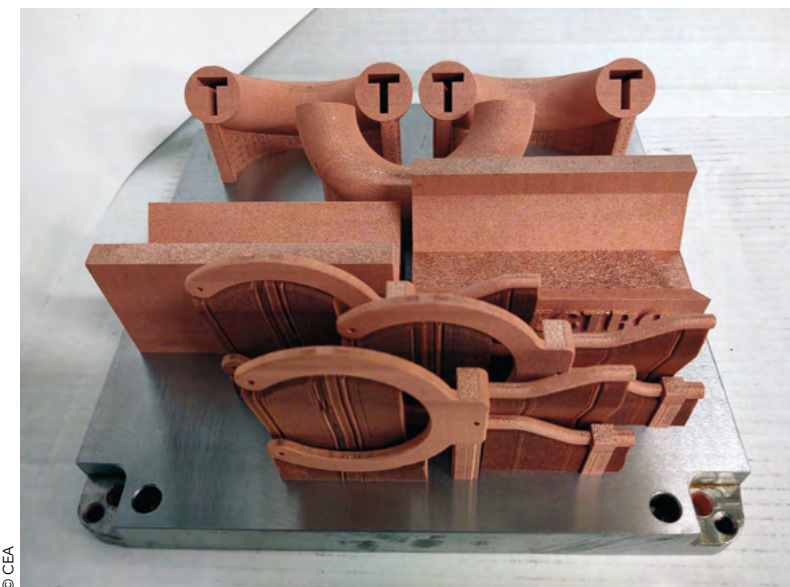
Il n'est pourtant pas considéré comme un métal rare ou critique, mais le cuivre reste très cher et indispensable à de nombreux pans de l'industrie. Combinant de très bonnes propriétés thermiques, électriques et mécaniques, les alliages de cuivre ont leur rôle à jouer dans les domaines de la mobilité et de l'énergie. C'est ainsi que Tolectro, société spécialisée en mécanique de précision et tôlerie fine, s'y intéresse de près. Précisément, elle vise la conception de pièces complexes en cuivre par fabrication additive, nouveau paradigme industriel qui permet de réduire le nombre d'étapes de fabrication et d'assemblage des pièces et ainsi générer des gains substantiels de temps et de matière.

Pour maîtriser cette technologie, la PME s'est rapprochée des équipes du CEA en Pays de la Loire et des experts

du CEA-Liten. Pendant dix-huit mois, leur collaboration a consisté à définir les paramètres optimaux de mise en forme des alliages par fusion laser et à sélectionner les meilleures poudres. L'objectif étant de fabriquer des pièces aux propriétés mécaniques et dimensionnelles compatibles avec une exploitation industrielle. La caractérisation mécanique, thermique, électrique et géométrique des échantillons réalisés a permis aux chercheurs du CEA de rédiger des préconisations. La société cherche à présent des partenaires techniques, financiers et commerciaux pour développer le marché des pièces complexes en alliage de cuivre. ●

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

↓  
Ci-dessous  
Pièce complexe fabriquée par le CEA pour Tolectro.





## LEXIQUE

## Libs

*Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*: technologie développée par la Direction des énergies du CEA, consistant à éclairer une cible avec un laser ultrabref, puis à analyser le spectre émis dans le visible par les différents éléments chimiques présents.

## Extraction liquide-liquide

Dissolution de métaux dans des solvants, puis séparation à l'aide de molécules extractantes.

## FOCUS

## Scarce

Scarce (*Singapore CEA Alliance for Research in Circular Economy*), créée en 2018, associe l'université technologique de Nanyang de Singapour et plusieurs instituts du CEA (Iramis, Leti, Isec) au sein d'un laboratoire commun de recherche, le premier du CEA à l'étranger. Leurs travaux portent sur le recyclage des déchets électroniques : batteries, panneaux photovoltaïques, circuits imprimés et plastiques de l'électronique.



## CEA-Iramis

Institut rayonnement-matière de Saclay.

## CEA-Leti

Institut des micro et nano-technologies et de leur intégration dans les systèmes (Grenoble).

## CEA-Isec

Institut des sciences et technologies pour une économie circulaire des énergies bas carbone (Marcoule).

## DÉCHETS ÉLECTRONIQUES

# Avancées sur le front du recyclage

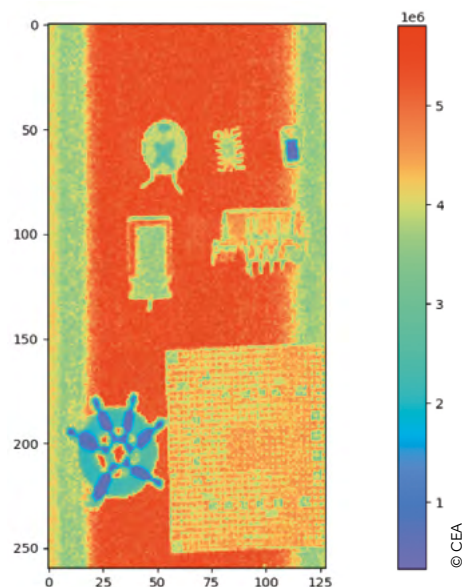
**Le CEA et l'université technologique de Nanyang à Singapour, œuvrant au sein du laboratoire commun Scarce, proposent de nouvelles méthodes de tri et d'extraction pour le recyclage des déchets électroniques, plus performantes et uniques au monde.**

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Recycler la myriade de matériaux contenus dans une carte électronique ou une batterie de téléphone est loin d'être simple tant ils sont imbriqués. « *Aujourd'hui, on ne récupère que 30 % de la masse d'une carte électronique, et une dizaine d'éléments chimiques sur les 60 utilisés. En matière d'économie circulaire, on peut faire mieux...* », déplore Jean-Christophe Gabriel, codirecteur de Scarce. *Notre approche est d'arriver à récupérer davantage d'éléments. Les terres rares, mais aussi les métaux à forte valeur ajoutée aujourd'hui trop délaissés (Ni, Co, Pd), les métaux réfractaires (W, Ta, Mo...) et même les plastiques*. Ceci grâce à une combinaison de technologies économiquement viables, touchant à deux étapes-clés : le tri et l'extraction.

## Lasers et rayons X

Pour trier les plastiques, l'équipe propose l'utilisation de lasers (*technologie Libs*) pour détecter la présence d'additifs toxiques, comme les retardateurs de flamme bromés. « *Ce procédé permet de trier rapidement les plastiques recyclables de ceux qui ne le sont pas* », affirme le chercheur. Pour les métaux ou les composants électroniques en contenant, l'« analyse par rayons X résolue en énergie » du CEA-Leti a fait ses preuves. Elle révèle en temps réel la nature des éléments présents dans un mélange, autorisant le tri de composants en fonction de leur composition chimique. « *Constituer des lots par exemple très enrichis en terres rares serait ainsi possible. À 200 000 € la tonne de néodyme, cela devient très intéressant. L'industrialisation du procédé sur tapis roulants, analyse en ligne et robot trieur est tout à fait envisageable. Nous testons actuellement un prototype préindustriel et visons une cadence de tri de 10 kg/h.* »



### Optimiser les procédés grâce à la microfluidique

Le laboratoire travaille aussi à faciliter l'utilisation de l'*extraction liquide-liquide*, une technique pourtant performante, mais encore trop chère à mettre en œuvre pour des raisons que le chercheur détaille : « *la composition des lots de déchets arrivant à l'usine est très variable. Elle implique d'ajuster à la demande le procédé d'extraction ; ce qui demanderait des mois de R&D* ». Pour surmonter cet obstacle, les chercheurs ont mis au point une plateforme microfluidique instrumentée avec une mesure de fluorescence X qui permet d'adapter le procédé en quelques heures. « *Nous multiplions les contacts avec les industriels pour construire des prototypes à plus grande échelle, voire préparer des transferts*, indique Jean-Christophe Gabriel. *C'est un changement de paradigme de l'industrie du recyclage que nous essayons de promouvoir.* »



## Ci-dessus

Visualisation de composants électroniques par transmission multi-énergie des rayons X, permettant la reconnaissance des éléments chimiques présents.

## CLIMAT

# Le plancton fait tourner les modèles

**Le plancton est un élément central de la régulation du climat. Peut-on mieux le prendre en compte dans les modèles climatiques ?**

PAR SYLVIE RIVIÈRE

« *Le plancton produit 50 % de l'O<sub>2</sub> que nous respirons ; il est aussi un acteur important de la pompe à carbone des océans par sa consommation de CO<sub>2</sub>, rappelle Olivier Jaillon, du CEA-Jacob. Cela grâce à la photosynthèse de ses espèces végétales* ». Et pourtant, il est encore très mal représenté dans les modèles climatiques. Un défi auquel son équipe s'est attelée avec des collègues du LSCE : « *nous avons au Génoscope<sup>1</sup> la possibilité de disposer d'une importante quantité de données génomiques du plancton, grâce aux échantillons collectés par les expéditions de la fondation Tara Océan dans toutes les mers du monde. Nous nous sommes demandé s'il était possible de les intégrer dans les modèles numériques des cycles biogéochimiques océaniques.* »

## Le plancton en cartes

La réponse est venue en plusieurs étapes. « *Nous avons d'abord séquencé environ 1 000 échantillons et constitué une base d'ADN planctonique unique au monde, équivalente à 8 000 fois le génome humain !* », raconte le chercheur. L'analyse fine de cette immense collection a ensuite permis de dessiner une sorte de cartographie planctonique planétaire. « *Nous avons identifié de grandes régions géographiques que nous avons appelées "provinces", à l'intérieur desquelles les populations de plancton sont plus homogènes qu'entre deux provinces différentes.* » En y regardant de plus près, les chercheurs se sont aperçu qu'il existe un lien très fort entre ces provinces et les conditions environnementales (température, salinité, composition en nutriments, nitrate, phosphate, etc.) qui y siègent.

## Prédictions pour la fin du siècle

D'où la question : que se passera-t-il, par exemple en 2090, lorsque le climat se sera réchauffé ? Deux événements, disent les modèles numériques. D'une part, un déplacement des provinces,



© F. Rhodès / CEA

comme l'illustre Marion Gehlen, du LSCE : « *elles vont presque toutes se déplacer vers les deux pôles ; les provinces tropicales vont notamment s'étendre au détriment des tempérées ; celles très pauvres en biomasse et en diversité vont s'élargir. Ceci parce que le plancton suivra naturellement les conditions propices à son développement* ». D'autre part, et ce fut une surprise pour les chercheurs, la capacité à chiffrer l'efficacité de la pompe à carbone : elle se réduirait de 4 %, du fait des réorganisations importantes de la distribution géographique du plancton.

Le pari est donc relevé pour cette double équipe de chercheurs : oui, les données de génomique peuvent être intégrées aux modèles numériques océaniques, et elles les enrichissent. ●



## CEA-Jacob

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

## LSCE

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



## Ci-dessus

Préparation automatisée des échantillons avant séquençage.

## LEXIQUE

## Plancton

Écosystème constitué de millions d'espèces marines différentes, végétales et animales, dont la taille varie de moins d'un micron à plusieurs centimètres.

## Cycle biogéochimique

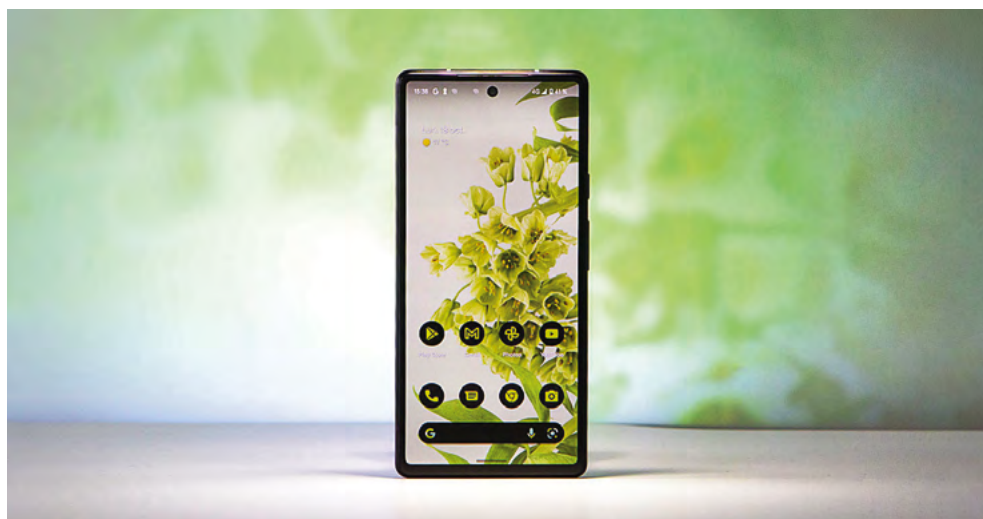
Processus de transport et de transformation d'un élément ou composé chimique entre les grands réservoirs (écorce terrestre, air, eau, glaciers, sols et biosphère).





### Ci-contre

Smartphone 5G intégrant la FD-SOI.



© Google

### FOCUS

#### Où trouve-t-on du FD-SOI ?

- Microcontrôleurs (processeurs de calcul, traitement et prise de décision).
- Enceintes connectées
- Interrupteurs à commande vocale.
- Radars automobile.s
- Smartphones 5G.
- Puces GPS.

## MICROÉLECTRONIQUE La FD-SOI pour la 5G

**La technologie FD-SOI du CEA-Leti s'impose dorénavant sur le marché des smartphones, au cœur du tout dernier pixel 6 Pro de Google. En trois ans, devenue un incontournable de la microélectronique notamment parce qu'elle est économe en énergie, elle investit le terrain de la 5G.**

PAR CÉLINE LIPARI

« L'aventure FD-SOI est née il y a quarante ans dans nos laboratoires », rappelle François Andrieu, ingénieur au CEA-Leti. Elle concerne le transistor, composant-clé de la microélectronique, pour lequel les spécialistes ont eu l'idée révolutionnaire de le façonner, non pas dans un bloc de silicium massif mais, dans un substrat de silicium ultramince, sur une couche d'oxyde isolante (SOI). Cette technologie fut transférée dans les années 1990 à la start-up Soitec, devenue depuis l'entreprise leader mondial de ces substrats. Et les composants FD-SOI, licenciés à STMicroelectronics, sont aujourd'hui proposés dans les catalogues des sociétés Samsung et GlobalFoundries.

#### Une grande efficacité énergétique...

Pour cause, la FD-SOI est 25% plus rapide que des transistors équivalents sur silicium massif (notamment ceux de la technologie concurrente FinFet d'Intel) et consomme jusqu'à 40% moins d'énergie. Car les composants sur film ultramince, placés sur une couche isolante, sont

intrinsèquement immunisés contre les fuites de courant. Elle connaît aujourd'hui un nouveau tournant avec la recherche de frugalité énergétique pour l'Internet des objets (IoT) et les besoins de la téléphonie mobile de type 5G+ (voir *Tout s'explique* p. 27). « C'est une belle revanche quand on sait qu'elle n'a pas fait l'unanimité pendant longtemps dans le petit monde de la microélectronique », estime François Andrieu. Et son histoire semble loin d'être finie.

#### ... et des performances radiofréquences

La FD-SOI séduit aujourd'hui les fabricants de téléphonie mobile pour ses performances en matière de radiofréquence. « Elle est en effet tout à fait adaptée aux besoins de la 5G, qui a et aura recours dans le futur aux ondes millimétriques, situées dans des gammes de fréquence au-dessus de 12 GHz », confirme Éric Mercier, ingénieur au CEA-Leti. Dans les gammes de fréquences millimétriques, elle propose en effet des solutions compétitives pour plusieurs blocs radiofréquences (RF), notamment les amplificateurs de puissance et les amplificateurs à faible bruit qui composent le réseau d'antennes. Offrant la capacité de co-intégrer ces blocs RF avec des blocs analogiques et numériques sur une même puce, les procédés de fabrication sont compétitifs et économes en énergie. Avec, à l'arrivée, des composants RF moins chers que ceux d'Intel. Autant de raisons qui font que Google a choisi la technologie FD-SOI pour l'émetteur-récepteur de son tout dernier smartphone. ●

## ASTROPHYSIQUE

# Une nova en temps réel

**Ou quand, alertés par un astronome amateur, les scientifiques de la collaboration internationale H.E.S.S. dont ceux du CEA-Irfu, observent en temps réel une nova. De quoi découvrir un phénomène d'accélération de particules cosmiques à des énergies dépassant le cadre théorique.**

PAR AUDE GANIER

« RS Ophiuchi » est un couple d'étoiles en orbite l'une autour de l'autre, situé à 7 500 années-lumière de la Terre. L'une des étoiles est une naine blanche et l'autre une géante rouge en devenir. Lorsqu'elles se rapprochent, la géante perd de la masse au bénéfice de la naine: cette matière (hydrogène et hélium) s'agrège autour de la naine avant de s'effondrer sur elle, ce qui finit par provoquer une violente explosion, qui n'est autre qu'une nova. Il se trouve qu'une naine blanche peut produire des novas tant que l'hydrogène de la géante rouge continue à s'accumuler à sa surface. C'est le cas de RS Ophiuchi dont sept éruptions ont été enregistrées, en 1893, 1933, 1958, 1967, 1985, 2006 et 2021.

#### Accélération et collision

Et c'est précisément cette dernière nova qu'ont pu observer les scientifiques de la collaboration H.E.S.S., à laquelle contribue le CEA-Irfu, lorsqu'ils furent alertés en août 2021 par un astronome amateur. Et c'est une première dans le domaine des très hautes énergies (rayons gamma). Les télescopes au sol ont en effet détecté des particules accélérées à des énergies plusieurs centaines de fois supérieures à celles observées précédemment dans les novas, jusqu'à atteindre les énergies maximales prédites par les modèles théoriques. Cette accélération particulièrement efficace serait à mettre au compte du très puissant champ magnétique de la naine blanche, amplifié par les rayons cosmiques en amont du choc. Plus précisément, les particules seraient accélérées au niveau des fronts de ce choc lorsqu'ils entrent en collision avec la géante rouge.

#### Des photons gamma

Autre première: les astrophysiciens ont pu mesurer les photons gamma de très haute énergie



© DESY / H.E.S.S., Science Communication Lab

produits par la nova de RS Ophiuchi jusqu'à un mois après l'explosion; ce qui leur a donné l'opportunité d'étudier cette accélération des particules cosmiques ainsi que l'évolution de la nova comme s'ils regardaient un film! Ces nouvelles mesures apportent des informations inédites qui vont permettre de préciser le fonctionnement de ces explosions et leur contribution à l'omniprésence des rayons cosmiques dans l'espace. Elles aideront aussi à mieux comprendre d'autres explosions cosmiques beaucoup plus extrêmes, les *supernovae*, qui pourraient être la source d'accélération de particules tout aussi efficaces. ●



#### Ci-dessus

Vue d'artiste du système naine blanche et géante rouge après l'explosion de la nova.



#### CEA-Irfu

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



#### CEA-Leti

Institut des micro et nano-technologies et de leur intégration dans les systèmes (Grenoble).



IMAGERIE CÉRÉBRALE

# La santé mentale de nos ados

## FOCUS

**Healthy Brain Network**

Créée en 2015 à New-York, cette cohorte constitue l'un des ensembles de données neuroscientifiques les plus complets consacrés à la santé mentale des enfants et des adolescents américains. Elle regroupera, à terme, les données de plus de 10 000 sujets âgés de 5 à 21 ans, pour lesquels les parents se soucient de la santé mentale.

## LEXIQUE

**Gyrification**

Processus de plissement cortical débutant au 2<sup>e</sup> trimestre de grossesse jusqu'à la maturation cérébrale.

**Des chercheurs du CEA-Joliot parviennent à corrélés les états d'anxiété et d'irritabilité observés chez de jeunes enfants avec des modifications anatomiques du cortex préfrontal.**

**De quoi ouvrir la voie à un diagnostic précoce pour préserver la santé mentale des adolescents et jeunes adultes.**

PAR AUDE GANIER

De récentes études d'imagerie montrent que le cerveau poursuit son développement jusqu'à environ 25 ans. Cette phase de maturation, à l'œuvre dans les régions hébergeant les fonctions cognitives supérieures (langage, conscience) et la régulation des émotions, s'opère à partir de l'adolescence. « Elle consiste en un élagage neuronal, c'est-à-dire une perte de neurones qui n'est pas liée au vieillissement. D'anciennes connexions neuronales disparaissent pour que s'en créent de nouvelles. C'est un peu comme si l'on partait d'un jardin en friche pour en faire un jardin à la française. Si cet élagage ne s'effectue pas correctement, que cela soit pour des raisons génétiques ou de stress intense, il peut entraîner des troubles mentaux, voire des souffrances psychiques à l'âge adulte, de l'état dépressif à la schizophrénie », explique Édouard Duchesnay du

CEA-Joliot, qui a décidé d'en savoir plus avec ses collègues du centre Neurospin et de l'université Paris-Saclay.

### Troubles de l'humeur et modifications anatomiques

À partir des données en libre accès de la cohorte *Healthy Brain Network* (HBN), ils ont analysé les rapports parentaux et auto-évaluations de 658 sujets de 11,6 ans d'âge moyen. À l'aide d'algorithmes d'analyse de données, ils ont corrélé les IRM cérébrales des sujets avec leur état d'anxiété et d'irritabilité renseignés. « Nous avons observé une perte de matière grise chez les sujets les plus anxieux et irritables. Au regard de trois marqueurs de maturation cérébrale (épaisseur et surface corticales, "indice de gyrification"), nous avons pu associer l'irritabilité à une diminution de la surface du cortex préfrontal, et l'anxiété à une diminution de l'indice de gyrification dans cette même région. »

### Un outil de diagnostic précoce

En parallèle, les chercheurs travaillent avec l'hôpital Saint-Anne de Paris sur la mise au point d'algorithmes d'intelligence artificielle capables de repérer, dès 14 ans, les modifications anatomiques potentiellement témoins d'une évolution vers la psychose. L'objectif de ce projet PsyCare est de pouvoir détecter précocement les sujets à risque pour proposer des solutions thérapeutiques individualisées. « Il est aujourd'hui avéré que l'exposition au cannabis de certains jeunes peut induire de graves conséquences pour leur santé mentale. De même, des études cliniques concluent à l'efficacité de la méditation de pleine conscience pour gérer le stress », illustre le chercheur. ●



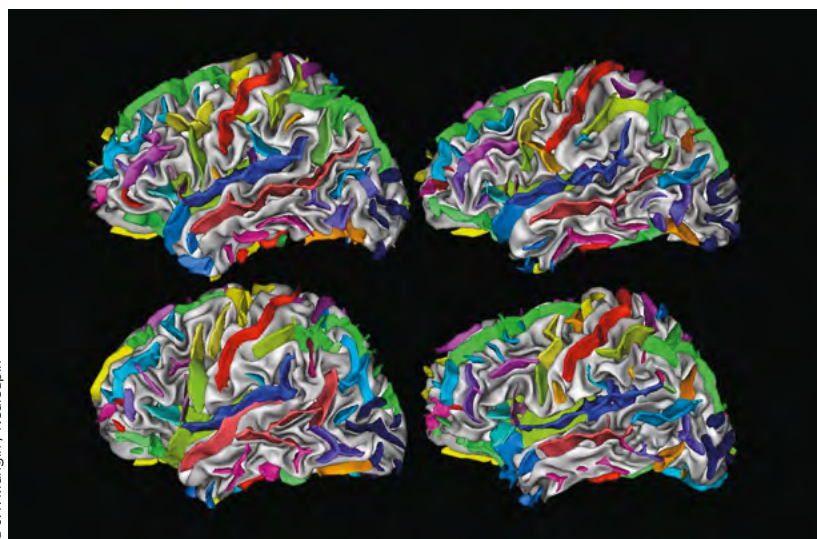
CEA-Joliot

Institut des sciences du vivant Frédéric Joliot (Saclay).



Ci-contre

Reconstitution des plis corticaux à partir d'images IRM.



## MAKING-OF COULISSES D'UN PROJET

### Analyses à l'échelle microfluidique

Au CEA-Isas, les chercheurs travaillent à l'élaboration de dispositifs microfluidiques afin de réaliser des analyses rapides de haute performance : dans des microcanaux, ils séparent les éléments constitutifs d'un échantillon, ou encore mettent en évidence les interactions entre des molécules et des radioéléments.

Ces microsystèmes mettent en jeu des volumes de l'ordre de quelques microlitres, soit 1 000 fois plus petits qu'avec les méthodes classiques. À la clé : la diminution du volume des échantillons engagés, un atout lorsque ceux-ci sont onéreux, disponibles en très faibles quantités, ou bien dangereux (radioactifs, toxiques), allégeant de fait les contraintes liées à leur manipulation, et la diminution des déchets générés.

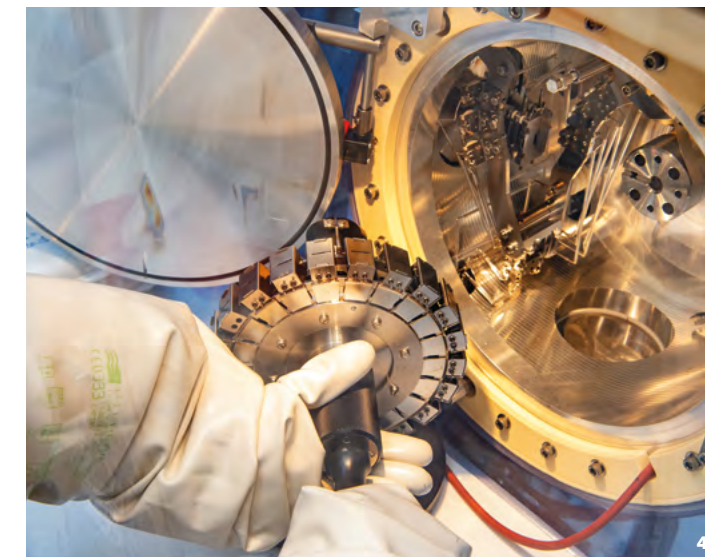
Des applications sont envisagées dans de nombreux domaines : industrie nucléaire, contrôle du Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires, sciences du vivant, environnement, etc.



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







#### EN IMAGES

① Usinage de canaux de l'ordre de 50 à 200 micromètres de diamètre dans une plaque de polyméthacrylate de méthyle (PMMA) par une microfraiseuse à commande numérique.

② Mise en place de techniques de séparation dans des microcanaux. Les connectiques d'entrée et de sortie permettant la circulation des fluides sont fixées sur le support, lui aussi fabriqué au laboratoire.

#### FOCUS

##### Le TNP, traité sur la non-prolifération des armes nucléaires

Les engagements des pays signataires du TNP sont contrôlés par l'AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique), notamment via l'envoi d'inspecteurs dans les installations nucléaires. Des contrôles et mesures y sont réalisés et des échantillons prélevés. Ces derniers sont analysés par une vingtaine de laboratoires experts, dont deux sont au CEA : à la Direction des applications militaires, et au CEA-Isas.

## 1 Microfabrication

« Le prototypage d'un nouveau microsystème analytique peut être réalisé en quelques jours. »

Erwan Dupuis, ingénieur-chercheur en chimie analytique

Les systèmes microfluidiques sont des dispositifs d'une taille généralement inférieure à celle d'une carte de crédit, intégrant des canaux micrométriques dans lesquels circulent des fluides. Ces canaux sont obtenus par micro-usinage assisté par ordinateur à l'aide d'une fraiseuse ou par gravure laser. Le choix du matériau est crucial. Pour des analyses de combustible nucléaire irradié, les chercheurs ont par exemple opté pour un matériau thermoplastique. Le dispositif doit en effet pouvoir résister au milieu très acide dans lequel se trouvent les échantillons et être peu coûteux. Pour les échantillons biologiques, les dispositifs en verre ou en polymères biocompatibles sont les plus adaptés.

## 2 Séparation *in situ*

« Nous avons démontré la faisabilité de la séparation à l'échelle microfluidique dans des canaux de taille micrométrique, avec la même performance que celle obtenue à l'échelle macroscopique. »

Carole Bresson, directrice de recherche en chimie analytique

L'objectif est d'implanter des étapes de séparation *in situ* dans les microcanaux, sur la base de différentes techniques. La chromatographie liquide, par exemple, permet dans ce cas précis de retenir des molécules en fonction de leur affinité pour un élément ; ce dernier ayant au préalable été fixé par les chercheurs au sein des microcanaux. Une autre technique, basée sur l'électrophorèse capillaire, permet de séparer les différents éléments d'un échantillon grâce à un courant électrique. Un dispositif microfluidique peut aussi être constitué de canaux parallèles et identiques, autorisant la réalisation de  $n$  fois la même expérience simultanément, gage de fiabilité du résultat.

## 3 Couplage pour l'analyse

« L'analyse chimique élémentaire, menée avec des systèmes microfluidiques, est un domaine encore très peu exploré. »

Marta Garcia Cortes, ingénieure-chercheuse en chimie analytique

Une fois les espèces d'intérêt séparées, vient l'étape d'analyse avec un spectromètre de masse. Celui-ci permet d'identifier et quantifier les constituants d'un échantillon, même en quantités très faibles : des molécules, mais aussi des éléments (comme l'uranium) et leurs isotopes. Tout l'enjeu est de mettre au point l'interface adéquate entre la sortie du dispositif microfluidique et le spectromètre. Grâce à un nébuliseur, il s'agit notamment de transformer en aérosols les fluides sortant du microsystème, et d'adapter ce processus à de très faibles débits (de quelques nanolitres à quelques microlitres par minute). Les chercheurs ont réussi à franchir cette étape délicate en adaptant des nébuliseurs commerciaux ou même en développant de nouveaux modèles.

## 4 Les applications

« Pour les applications dans le nucléaire, la microfluidique permet de manipuler des quantités de radioéléments de l'ordre du nanogramme, voire du picogramme, au lieu de microgrammes. »

Wilfried Pacquentin, chef de laboratoire

L'équipe poursuit ses développements pour concevoir des dispositifs microfluidiques dédiés à différentes applications. Exemple avec l'analyse de combustibles nucléaires irradiés (issus du fonctionnement en réacteur) pour déterminer leurs quantités relatives d'uranium, de plutonium et de produits de fission, ainsi que leurs isotopes. Les données de haute précision ainsi obtenues servent à affiner les codes de calcul destinés à optimiser la disposition des assemblages de combustibles. Autre exemple avec l'analyse des prélèvements transmis par l'AIEA dans le cadre du contrôle du TNP (voir Focus), ou encore en toxicologie nucléaire, pour identifier les molécules cibles du vivant ou de l'environnement susceptibles d'interagir avec des radioéléments.

#### EN IMAGES

③ Couplage du dispositif microfluidique au spectromètre de masse. La manipulation, ici d'un échantillon radioactif, est réalisée en boîte à gants.

④ Préparation d'une analyse d'un échantillon de combustible nucléaire irradié avec un spectromètre de masse et en boîte à gants.

#### LEXIQUE

##### Isotopes

Atomes ayant donc le même nombre de protons et d'électrons mais un nombre différent de neutrons.

##### Boîte à gants

Enceinte étanche équipée de gants intégrés permettant la manipulation, en dépression, de substances radioactives.



##### CEA-Isas

Institut des sciences appliquées et de la simulation pour les énergies bas carbone (Saclay).





## DOSSIER INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

# Vers l'IA de demain

PAR GUILLAUME LANGIN

Être digne de confiance, embarquée à bord des systèmes, et frugale en énergie et en data. Voici les trois enjeux auxquels est confrontée l'intelligence artificielle, ou plutôt les chercheurs qui s'y mesurent, en toute intelligence et conscience !

« *Nous sommes en 2001. Où est HAL ?* », s'interroge l'Américain Marvin Minsky, considéré avec John McCarthy comme le père fondateur de la cybernétique. HAL, clin d'œil à IBM, est l'intelligence artificielle (IA) aux commandes du vaisseau spatial imaginé par le cinéaste Stanley Kubrick en 1968 pour son épique *2001, l'Odyssée de l'espace*. HAL est une IA forte, car en plus de pouvoir reproduire un comportement intelligent, elle est capable de sentiments voire de conscience. Force est de constater aujourd'hui que HAL n'a pas encore d'équivalent dans le vrai monde. Tout au plus existe-t-il une IA « faible » que désignent John McCarthy et Marvin Minsky comme « *tout comportement produit par une machine dont on peut estimer que s'il avait été le fruit d'une action humaine, il aurait exigé de l'intelligence de la part de l'agent concerné* ». Ainsi définie

dans les années 1950, elle a en effet trouvé de nombreux secteurs d'application dans nos vies quotidiennes. Le smartphone dans notre poche en est bardé. Lorsque nous le déverrouillons grâce à la reconnaissance biométrique des empreintes digitales. Ou quand, doté de reconnaissance vocale, il répond à nos requêtes qu'il est capable d'anticiper selon nos appétences. De même, peut-être avons-nous déjà échangé avec un *chatbot* (ou agent conversationnel) sur un site Internet de santé ou de commerce en ligne. Dans les chaînes d'assemblage, des caméras qui en sont équipées savent déceler des défauts, imperceptibles à l'œil humain, à la surface de pièces défilant à grande vitesse. Sans oublier l'analyse d'IRM cérébrales, l'épluchage des milliers de données des missions astrophysiques ou les projets de véhicules autonomes dont de nombreux prototypes

← **Ci-contre**  
Démonstrateur Spirit du CEA, constitué de neurones « à pointes » pour effectuer d'importants calculs en parallèle et à basse puissance et latence sur écran tactile.





© Flickr / goclubzh

permettent d'assister les conducteurs en détectant lignes blanches, piétons et autres véhicules partageant la chaussée.

#### Une IA intuitive

Car depuis les années 2000, les puces sont devenues suffisamment puissantes pour que l'IA « connexionniste », qui est basée sur l'apprentissage de réseaux de neurones, prenne son envol. Jusqu'à dépasser l'autre grande catégorie, celle « symbolique » des « systèmes experts » capables de raisonner et de répondre à des questions à partir de lois fournies au préalable par des experts humains. En effet, lorsqu'il s'agit d'apprendre, les réseaux de neurones sont capables de retrouver eux-mêmes des principes connus. « Aux échecs, il y a un proverbe qui dit que placer son cavalier sur les bords de l'échiquier est en général une mauvaise idée, illustre Cédric Gouy-Pailler, chef de laboratoire au CEA/List. Et une IA connexionniste est capable de développer elle-même ce genre d'intuition ! » Voire de créer ses propres règles. « Lorsqu'on laisse à la machine cette liberté, elle trouve ses solutions indépendamment des concepts humains. Et c'est parfois absolument fasci-

nant », ajoute Alexei Grinbaum, philosophe des sciences et directeur de recherche au CEA-Irfu.

Ainsi, en octobre 2015, à force d'apprendre en enchaînant les parties de jeu de go, « bien plus intuitif que le jeu d'échecs », AlphaGo a fini par l'emporter contre un joueur professionnel. Cet avènement du *machine learning* (apprentissage machine) n'aurait pas vu le jour sans la possibilité de « s'entraîner » sur un très grand nombre de données, en l'occurrence près de 5 millions de parties. D'autres domaines comme la reconnaissance d'images et le traitement automatique des langues peuvent aussi compter aujourd'hui sur des bases de données devenues suffisamment gigantesques. Les IA s'en nourrissent allègrement pour apprendre par accumulation, et non par instruction de règles mathématiques. Jusqu'à finir par illustrer ce que Peter Norvig, directeur de recherche chez Google, appelait en 2009 « l'efficacité déraisonnable des données » !

#### Des questions de confiance

Aujourd'hui, trois grands enjeux rythment les efforts de la communauté scientifique,

dont les 400 chercheurs du CEA qui s'y attèlent depuis les années 2010. « *Même si la technologie est prête, son déploiement massif auprès des utilisateurs et des industriels pose des questions de confiance, notamment en matière de sûreté et de sécurité* », explique François Terrier, directeur du programme IA du CEA. En témoigne notamment le programme d'envergure « Confiance.ai » lancé en 2021 par la France (voir Focus p. 23). Il y a ensuite l'enjeu de l'IA embarquée, qui consiste à rapatrier ses capacités de traitement au sein du système qui l'emploie. « *Parallèlement à la volonté de recréer des capacités souveraines en microélectronique, l'Europe s'est positionnée sur ce domaine car il y a encore de nombreux besoins technologiques et l'opportunité de devenir leader dans le domaine* », explique l'expert.

#### Voracité énergétique

Un troisième enjeu a émergé ces dernières années, en lien avec les préoccupations environnementales de la société. Celui de la frugalité. En 2019, une étude publiée par l'université du Massachusetts, à Amherst, calculait que l'empreinte carbone générée



© CEA

par l'apprentissage d'une IA égalait celle de cinq voitures pendant toute leur durée de vie. Sans compter l'énorme quantité de données que certaines IA nécessitent pour apprendre. « *Pour Luc Julia, l'un des créateurs de Siri [interface audio d'assistance de navigation dans certains smartphones NDLR], l'IA est une débauche d'énergie et de data* », illustre Cédric Gouy-Pailler. Trop vorace l'IA ? Pas fatalement. Car au CEA-List, des solutions ont déjà été trouvées pour rendre l'IA moins gourmande en data. Avec pour second avantage, celui d'élargir l'éventail de ses applications. « *Aujourd'hui, nous sommes en train d'arriver aux limites de ce que l'acquisition aveugle et massive de la data pouvait nous offrir*, estime François Terrier. En effet, dans de nombreux domaines, comme celui de la prédiction de risques, ou d'accidents, les données sur lesquelles s'entraînent sont rares par nature. »

#### De confiance, embarquée et frugale

Ainsi s'esquissent les traits de l'IA de demain. Celle qui naît entre les murs du CEA, au service d'un large spectre industriel (automobile, énergie, santé,



© DR



#### À gauche

2016, l'IA AlphaGo de DeepMind bat un joueur professionnel de go.



#### Ci-dessus

Les IA développées au CEA sont entraînées pour reconnaître automatiquement les objets et leur position, les postures, les tâches ménagères, voire même les émotions.

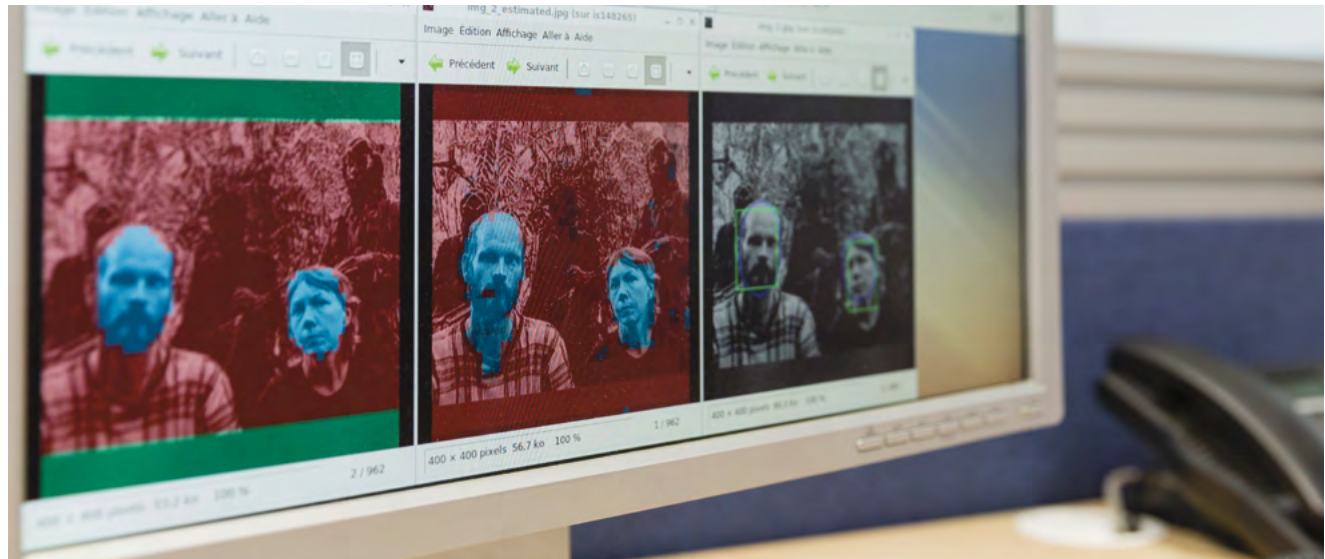


#### Ci-contre

Exemple de captcha, utilisé pour vérifier que l'utilisateur n'est pas un robot.

agriculture, etc.). Celle à laquelle l'État a décidé de consacrer 2,22 milliards d'euros pendant cinq ans, comme annoncé le 8 novembre 2021 lors du lancement de la deuxième phase de sa stratégie nationale. ●





© CEA

## Comment l'IA apprend-elle ?

Par renforcement, supervisé ou auto-supervisé. Tels sont les trois grands modes d'apprentissage qui distinguent les intelligences artificielles. D'autres approches existent, développées pour des considérations éthiques.

Dans le premier mode dit « par renforcement », l'IA est conçue pour s'entraîner seule, par exemple en enchaînant des parties d'échecs contre elle-même. Gardant en mémoire les choix qui l'ont amenée à gagner, la victoire lui étant signalée, l'IA entame chaque nouvelle partie un peu plus renforcée.

### Grâce à nous

Quand il est supervisé, le *machine learning* repose sur des données préalablement étiquetées par les humains. Une IA conçue pour distinguer les chiens des chats s'entraîne ainsi à partir d'images certifiées comme représentant un chien ou un chat, ou ni l'un ni l'autre. Nous y contribuons

sans le savoir sur Internet lorsque nous complétons les « captcha », ces modules assurant que nous ne sommes pas un robot ! Leur image est divisée en cases sur lesquelles nous devons identifier certains objets, contribuant ainsi à cet étiquetage pour de futurs IA. Ce mode d'apprentissage est optimisé par le *machine teaching* (enseignant), tel que l'explique Cédric Gouy-Pailler, du CEA-List : « il consiste à organiser un dialogue entre l'étiqueteur et la machine, laquelle aiguille le choix d'images en fonction des besoins identifiés pour améliorer son modèle, par exemple en demandant plus d'étiquettes là où elle manque de confiance ». Lancé en 2020 par le CEA-List, l'outil d'annotation Pixano est lui-même alimenté par de l'IA assistant l'humain dans sa tâche, en réduisant le nombre de clics nécessaires à la création d'étiquettes.

### Grâce à elle

Dans le cas de l'IA auto-supervisée, le programmeur laisse à la machine le choix d'organiser l'espace des données comme bon lui semble. « Imaginez une banque de milliers de photos de visages. Un humain pourrait être enclin à créer des catégories selon la couleur de peau, alors que cela n'est pas forcément pertinent, illustre le spécialiste. L'IA va organiser cette collection d'images à sa façon, parfois selon des critères auxquels on n'aurait pas pensé. »



### Ci-dessus

Développement d'une application de reconnaissance de visages sur la plateforme N2D2 du CEA.

Or, c'est quand l'humain s'efface pendant l'apprentissage que certaines IA sont les plus efficaces. AlphaZero a ainsi très vite surpassé son prédécesseur AlphaGo. La méthode est aussi redoutable en traitement automatique des langues : « si vous essayez d'inculquer des règles de grammaire ou de conjugaison à une IA, le système est inefficace, complète Alexei Grinbaum. En revanche, un réseau de neurones de type "transformée" tel que GPT-3, auto-entraîné sur un énorme corpus de textes, est capable d'écrire des articles de presse comparables à ceux de vrais journalistes ».

### Même en désapprenant ?

De plus, dès qu'il y a intervention humaine, il y a un risque de transmission de biais à la machine. L'exemple de dérives racistes de la Justice de Floride, utilisant le logiciel Compas pour la prédiction des récidives de délinquants, l'a illustré en 2016 ; lorsque l'enquête a révélé que l'IA prenait en compte des données annotées selon des critères de races. « Ces questions d'équité de l'IA ont fait leur entrée au CEA », témoigne Cédric Gouy-Pailler. Tout comme celles de l'usage des données personnelles qui conduisent les chercheurs à se pencher sur le *machine unlearning* (désapprentissage). Car conserver en continu des données entraîne des problèmes de confidentialité et de respect de la vie privée. ●



« L'histoire des sciences montre que chaque développement rapide d'une nouvelle technologie génère des espoirs et des craintes. Les deux cohabitent un temps. »

Alexei Grinbaum, philosophe des sciences au CEA-Irfu et membre du Comité national pilote d'éthique du numérique



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

## ENTRETIEN IA & éthique

À la question « l'IA peut-elle être éthique ? », voici la réponse d'un chatbot, une IA spécialiste du langage : « On le sait, les outils numériques sont omniprésents dans notre société. Ces avancées technologiques, loin d'être anecdotiques, bouleversent notre société, notre économie et nécessitent une réflexion éthique. L'IA et les technologies du machine learning sont en train de transformer les modèles économiques dans de nombreux domaines. Cela est notamment le cas pour les services financiers où les algorithmes sont capables de prédire les comportements des clients et les conseiller avec la plus grande justesse. Mais ses applications sont également présentes dans de nombreux autres domaines comme l'industrie automobile, la santé, le sport, la mode et même la politique. La question d'une gouvernance numérique se pose alors afin d'assurer le respect des droits et la protection des données personnelles. »

Nous avons aussi posé la question à un humain !

### L'IA peut-elle être digne de confiance ?

Alexei Grinbaum Un système d'intelligence artificielle ne fait que calculer, or le jugement moral n'est pas une affaire de nombres. Chez l'humain, l'éthique est fondée sur le sens de nos actions mais ces significations échappent à la machine. Des tensions éthiques vont donc inévitablement émerger et il est nécessaire de les identifier en amont et d'en mitiger les risques. Le Groupe d'experts indépendants de haut niveau sur l'IA (HLEG), créé par la Commission européenne en 2018, a livré l'année suivante sept valeurs et principes à respecter pour qu'un système d'IA soit considéré digne de confiance. On y trouve le respect de la vie privée, la sécurité, la transparence, ou le bien-être

sociétal et environnemental... Mais la signification de ces valeurs évolue avec le développement des technologies. Posez la question de l'usage des données personnelles aux jeunes générations : ils n'auront pas la même réponse que leurs aïeux. En outre, il existe des tensions entre les valeurs ; par exemple entre l'explicabilité et l'efficacité de l'apprentissage de la machine.

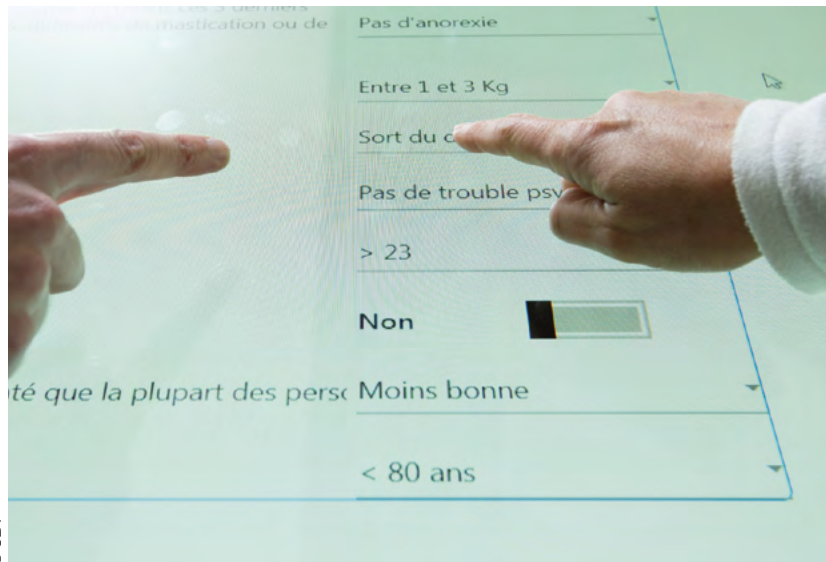
### Ces recommandations de la Commission européenne font-elles office de loi ?

A. G. En 2019, il a été question de *soft laws* qui sont des recommandations ou des codes de conduite à respecter pour les développeurs d'IA. Depuis, on évolue vers une véritable réglementation. Le 21 avril, la Commission européenne a proposé un projet de règlement sur l'IA qui est actuellement discuté par tous les pays membres de l'Union européenne. De manière générale, nous sommes entrés dans une phase de normalisation de l'IA qui fait suite à dix ans de « loi molle ». Le CEA en a pris conscience. D'une part, il est en train de créer son propre comité opérationnel d'éthique du numérique. D'autre part, nos différents services du numérique correspondent avec les juristes du CEA qui eux-mêmes se forment activement sur ces questions.

### L'humain est-il plus enclin à craindre ou faire confiance à l'IA ?

A. G. L'histoire des sciences montre que chaque développement rapide d'une nouvelle technologie génère des espoirs et des craintes. Les deux cohabitent un temps. Le public est fasciné par les perspectives qui se présentent et les attitudes sont polarisées en conséquence. Mais la sociologie observe qu'après une période de fascination, les gens finissent par s'habituer aux technologies qui entrent dans leur quotidien. Ce fut notamment le cas des nanotechnologies à l'origine de nombreuses craintes à la fin des années 2000. ●





# Avoir confiance

Fort de son expertise en sûreté des logiciels et systèmes, le CEA a souligné dès 2017 l'enjeu de « l'IA de confiance », c'est-à-dire d'une IA pour laquelle les développeurs sont capables de fournir aux usagers tous les éléments qui permettent d'en assurer le bon fonctionnement. Une question de bon sens qui appelle un nouveau langage...

Comment imaginer que l'IA puisse être déployée massivement auprès des industriels et des utilisateurs, si nul ne peut démontrer que les machines pensantes sont dignes de confiance ? Une question de bon sens qui se pose à tous les niveaux. La sûreté d'abord, qui désigne le fait qu'un système exécute bien ce pour quoi il a été conçu et non autre chose. La sécurité ensuite, qui garantit la protection du système contre les risques et les attaques, notamment cyber, en provenance du monde extérieur. À cet égard, les ingénieurs-chercheurs du CEA-List développent des méthodes formelles (basées sur les mathématiques et la logique) pour évaluer la sûreté des IA qu'on leur présente. « Les industriels viennent nous voir avec l'IA qu'ils développent. Nous la testons et les guidons pour l'améliorer, explique Zakaria Chihani, chef de projet au CEA-List. Nous évaluons aussi la robustesse de ces systèmes, c'est-à-dire qu'on vérifie que des petites variations dans les données en entrée de l'IA ne débouchent pas sur de grandes erreurs à sa sortie ». Mal conçus ou mal entraînés, certains réseaux de neurones font preuve d'une certaine instabilité.

## Garantir la sûreté et la robustesse des systèmes industriels

Les équipes ont ainsi créé, fin 2019, PyRAT, un analyseur abstrait de réseaux de neurones qui a déjà servi dans le cadre d'un contrat avec Technip Energies. Pour surveiller la stabilité de ses plateformes pétrolières flottantes, l'entreprise compte sur une IA. Celle-ci utilise les mesures de balises GPS placées sur le pont de la plateforme et de capteurs de tension accrochés à ses lignes d'ancrage, longues de plusieurs kilomètres. « À partir de la mesure du mouvement des balises, l'IA peut déduire si une ligne d'ancrage s'est brisée, ou si une ancre s'est mise à racler le fond marin. Nous en avons testé la robustesse », explique Zakaria Chihani. Au-delà des mers, PyRAT a démontré son efficacité dans les airs : « il fonctionne très bien sur le dataset public ACAS [Airborne Collision Avoidance System] ». Ce jeu de données comprend des logiciels de réseaux de neurones qui, embarqués à bord d'un engin volant, sont chargés de l'évitement automatique des collisions avec un avion voisin ou un obstacle. En plus de PyRAT, une plateforme a été développée en 2020, CAISAR, pour vérifier

puis valider les IA. « C'est toujours mieux quand un industriel qui développe son IA vient nous voir tôt. Car des bons choix faits en amont permettent ensuite d'en démontrer plus facilement la sûreté et la robustesse », poursuit l'expert. Certaines IA sont même considérées *safe by design*, c'est-à-dire que leur sûreté est garantie par la façon même dont elles ont été conçues. C'est en général le cas des IA « symboliques » basées sur des systèmes experts car elles sont programmées sur la base de règles connues et comprises par l'humain, par opposition aux IA « connexionnistes » des réseaux de neurones. Lorsque ces derniers sont trop profonds, il devient compliqué de savoir ce qui se passe en leur cœur. « Dans le cas du deep learning, il n'y a pas de théorie mathématique satisfaisante pour décrire le fonctionnement du système. Il est donc impossible de démontrer rigoureusement que leur comportement ne sortira jamais du périmètre autorisé, intervient Alexei Grinbaum, philosophe des sciences au CEA-Irfu. Le risque zéro n'existe pas pour les systèmes apprenants. Mais on peut le tester, les benchmarker [les comparer entre eux] ».

## De l'explicabilité de l'IA

En plus de la sûreté et de la sécurité, l'explicabilité d'une IA est un autre vecteur important de confiance. Mais comment espérer l'expliquer si on ne la comprend pas ? En 2018, le mathématicien Alain Connes regrettait, lors d'une intervention radiophonique, que l'essor de l'IA s'accompagne de cette perte de compréhension, considérant que l'on troque le « comprendre sans faire » des experts humains par le « faire sans comprendre » de la machine. Ce n'est pas le cas de l'IA ExpressIF®, développée depuis dix ans au CEA, car elle appartient à la famille des IA symboliques. Par essence, les résultats qu'elles produisent sont explicables, à la grande satisfaction des industriels tels que Véolia ou Total. Chez eux, ExpressIF® contribue à la maintenance prédictive. Elle détecte tout signe avant-coureur qui annoncerait une défaillance des systèmes surveillés. Également capable d'annoter des images d'IRM viscérales, ExpressIF® le fait tout en expliquant ses propositions par une argumentation en langage naturel. Un moyen d'assister efficacement les médecins dans l'interprétation des images de leurs patients. « Dans mon laboratoire,

**« C'est toujours mieux quand un industriel qui développe son IA vient nous voir tôt. Car des bons choix faits en amont permettent ensuite d'en démontrer plus facilement la sûreté et la robustesse. »**

Zakaria Chihani,  
chef de projet au CEA-List

nous croyons beaucoup à l'association de la connaissance des experts, que l'on cherche à formaliser, et de la méthode statistique des réseaux de neurones », complète Cédric Gouy-Pailler, chef de laboratoire au CEA-List. Grâce à cette hybridation, l'IA statistique gagne en explicabilité.

Si elle est déjà importante pour obtenir l'adhésion des utilisateurs dans un fonctionnement normal, l'explicabilité devient une propriété essentielle si l'IA venait à prendre des décisions inopportunes. Par exemple, en cas d'accident provoqué par une voiture autonome, comment désigner un responsable (concepteur, régulateur ou conducteur) s'il est fondamentalement impossible d'identifier une faille ? De même, comment réagirait une personne se voyant refuser un crédit par une IA incapable de s'expliquer ? « Pour que les utilisateurs acceptent le recours à des systèmes d'IA dont l'utilité est avérée, la mise en récit est l'une des voies. Devant la complexité des systèmes, on ne peut pas donner aux utilisateurs les moyens de comprendre leur fonctionnement. Souvent, même les concepteurs ne comprennent pas comment un système apprenant produit tel ou tel résultat. Pour le public, il s'agit de créer des récits conformes à la vérité – on ne peut pas mentir – procurant une connaissance heuristique, limitée, ou le sentiment d'avoir compris quelque chose, » décrit Alexei Grinbaum. En somme, mettre des mots sur des concepts qui ne sont que calculs. Un nouveau genre de littérature scientifique ? ●

## À gauche

L'IA explicative basée sur les connaissances, ExpressIF® du CEA, dispose de logiciels ergonomiques qui permettent des saisies de connaissances sur écran tactile.

## FOCUS

### Raison d'État

En 2021, la France lançait un programme de très grande envergure pour répondre à l'un de ses « Grands Défis » : Sécuriser, fiabiliser et certifier des systèmes fondés sur l'intelligence artificielle. Baptisé Confiance.ai et doté d'un budget de 45 millions d'euros sur cinq ans, il réunit treize acteurs industriels et académiques dont le CEA, incontournable et même précurseur sur cette question. « Ces préoccupations sont en ligne avec les valeurs sociales de l'Europe, pionnière en la matière. Depuis, nous avons eu des échanges outre-Atlantique qui indiquent la convergence des préoccupations, notamment lors de notre dernier workshop avec les scientifiques américains en décembre 2021 », indique François Terrier, directeur de programme au CEA-List.

## LEXIQUE

Heuristique  
Qui sert à la découverte.



# Cap sur l'embarqué et la frugalité

« L'IA embarquée n'est pas un choix, c'est une obligation. Notamment du point de vue énergétique », affirme Fabien Clermidy, chef de département au CEA/List, dont les équipes avec celles du Leti réfléchissent à comment rapatrier les capacités de traitement numérique des IA au sein même des systèmes qui les emploient.

**« On pense multi-systèmes : car on peut imaginer qu'une voiture autonome qui roule dans Paris et une autre à Nevers n'auront pas accumulé la même expérience, mais qu'elles pourraient se transmettre le fruit de leur apprentissage. »**

Patrick Sayd,  
chef de département  
au CEA-List

CEA-List  
Laboratoire des systèmes  
numériques intelligents  
(Saclay).

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

Pour qu'on la qualifie d'« embarquée », l'IA doit (re)descendre de son nuage, ou *cloud*, et rejoindre l'environnement proche du système, *the edge*. Car le traitement des données de l'IA se fait en effet dans des serveurs à distance très énergivores. Mais le rapatriement de ces capacités de calcul et d'analyse suppose de nouveaux développements, autant sur les logiciels que sur les architectures des composants électroniques. Ce à quoi s'emploient les chercheurs du List et du Leti depuis une dizaine d'années. « Les réseaux de neurones et les méthodes d'apprentissage profond ont connu un boom vers 2010. Ont alors démarré nos recherches pour adapter cette IA directement sur du matériel », témoigne Fabien Clermidy. Avec, en ligne de mire, des applications concrètes pour l'industrie.

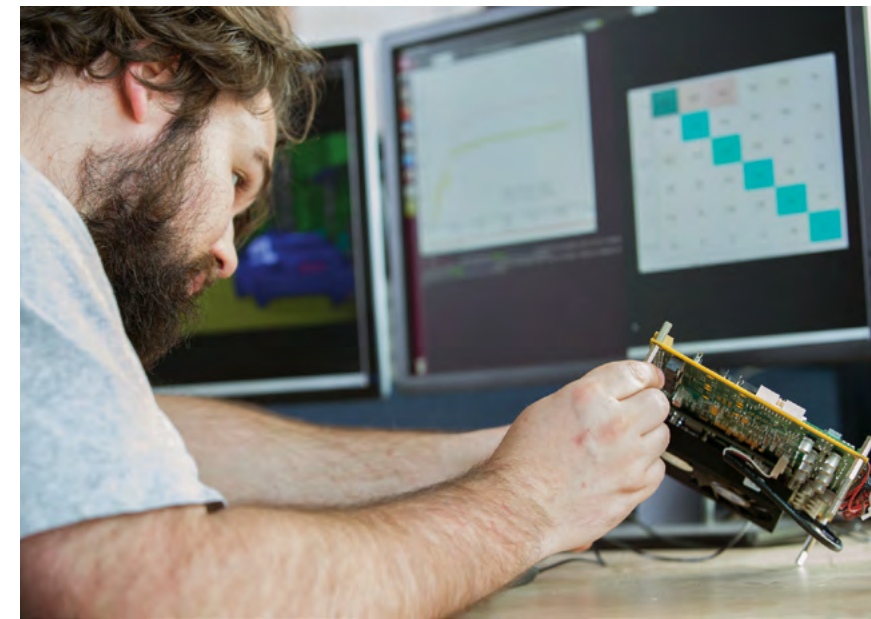
## Au cœur des véhicules autonomes...

La voiture autonome est l'un d'eux. « L'autonomie complète, c'est l'aboutissement. Car aujourd'hui, l'aide à la conduite, par exemple sous la forme de détection des piétons ou lignes blanches, intègre déjà de l'intelligence artificielle », commente Patrick Sayd, chef de département au CEA-List. Ce niveau d'autonomie total qui autoriserait le conducteur à lire le journal pendant que la voiture se charge du reste n'est pas encore déployé en France. Sauf dans des zones fermées à la circulation générale. C'est le cas des routes sur lesquelles s'entraîne le

véhicule autonome développé par Valéo et le CEA dont le logiciel de reconnaissance de véhicules *Deep Manta* prenait en 2017 la tête d'un *benchmark* (études comparatives). À cette date, l'IA développée était capable de traiter deux images par seconde. Ce qui n'empêcha pas le véhicule du projet de circuler pour la première fois en 2019 dans les rues de Paris. Au fil des améliorations, elle est aujourd'hui passée à 20, soit 80 images par seconde avec quatre caméras autour de la voiture.

## ... et des usines d'assemblage

Autre grand secteur bénéficiant des efforts du CEA en matière d'IA embarquée : les usines d'assemblage. Le contrôle de vision, à la recherche des défauts sur les pièces qui défilent à la chaîne, existe depuis une trentaine d'années. Mais grâce à l'IA, la classification est aujourd'hui beaucoup plus subtile. Elle peut être utile pour « dévraquer » un bac, à savoir trier un grand nombre de pièces enchevêtrées, de taille et forme différentes. Plus pointu, le contrôle non destructif dit 4D développé au CEA-List, qui scrute l'intérieur même de ces pièces et pouvant repérer en temps réel des porosités de 0,6 mm, peut également compter sur l'IA. De même, les véhicules à guidage automatique se déplacent dorénavant en autonomie dans certaines usines, qu'elles soient automobiles ou aéronautiques. « Dans le second cas, l'intervention humaine reste importante



car la cadence de production des avions est plus lente. Les robots jouent davantage un rôle d'assistance auprès de l'opérateur et les deux doivent se comprendre », précise Patrick Sayd.

## Apprentissage collectif et bio-inspiré

Évoluant dans un environnement en perpétuel changement, les systèmes intelligents embarqués devront s'adapter. Cela implique des besoins spécifiques en matière d'apprentissage. Celui-ci doit être continu ou incrémental. Or, aujourd'hui encore, de nombreux réseaux de neurones apprenant une nouvelle information tendent à oublier leur précédent corpus de connaissances ! Une lacune auquel le CEA remédie en prenant exemple sur... la nature. L'une de ces voies bio-inspirées est celle du « rafraîchissement », directement inspirée d'un modèle de mémoire humaine développé par un autre laboratoire. Dans ce mode de fonctionnement, deux réseaux de neurones artificiels fonctionnent de concert. Ils réapprennent conjointement l'un et l'autre les informations, anciennes comme nouvelles. Une fois l'apprentissage *in situ* d'une machine maîtrisé, les chercheurs du CEA envisagent que chaque système pensant puisse transmettre ses connaissances à d'autres. « On pense dorénavant multisystèmes », témoigne Patrick Sayd. C'est intéressant car à terme, on peut imaginer qu'une voiture autonome qui roule

dans Paris, et une autre à Nevers, n'auront pas accumulé la même expérience. Mais ces deux voitures pourraient se transmettre le fruit de leur apprentissage ».

Cette approche présente plusieurs avantages. D'une part, en évitant que « tout remonte à Google ou dans le cloud », elle solutionne des questions de confidentialité des données et diminue la surface d'attaques externes. D'autre part, elle fonctionne avec une quantité plus frugale de données.

## Frugalité, ou comment faire aussi bien avec moins

La frugalité a toujours été sous-jacente dans les recherches du CEA. Or, certaines IA sont l'antithèse de la sobriété, exigeant une quantité colossale de puissance électrique pour fonctionner. Dans le cas de l'IA embarquée, ce besoin est évidemment limité par la capacité de stockage des batteries. Par ailleurs, la famille des IA statistiques est au moins aussi gourmande en data. « Si l'algorithme de Google est si fort, c'est qu'il a accès à des tas de données », commente Patrick Sayd. Mais, en Europe, le RGPD [Règlement général sur la protection des données, en vigueur depuis 2016] contraint de nous en passer ».

Comment faire aussi bien avec moins ? En se montrant plus malin : le *transfer learning* consiste à spécialiser un réseau de neurones artificiels à partir d'un autre déjà entraîné, en y adjoignant une pincée



de nouvelles données. Plus subtil que tout réapprendre de A à Z systématiquement ! Quant à faire chuter la puissance de calcul requise par une IA trop vorace, les ingénieurs du CEA ont plusieurs cordes à leur arc. À commencer par la quantification, technique employée pour diminuer la précision superflue des résultats de calculs (par exemple, le nombre de chiffres après la virgule) que les neurones se transmettent de proche en proche. Deuxièmement, le *pruning* (ou élagage) consistant à retirer des neurones dont l'absence ne change pas le fonctionnement du système. Enfin, la distillation qui permet de transférer la connaissance d'un gros réseau (constitué d'un grand nombre de couches de neurones) préalablement entraîné, vers un petit réseau (faible nombre de couches). Les systèmes qui doivent transporter de tels algorithmes apprécieront l'allègement ! ●

↳ Ci-dessus  
Conception, optimisation et export des réseaux de neurones sur des plateformes matérielles.

↑ Ci-dessus  
Expérimentation dans les rues de Paris du logiciel *DeepManta* du CEA développé avec Valéo.



## De l'IA bio-inspirée

Parce que la frugalité de l'IA passe également par le développement de nanosystèmes en rupture, une chercheuse propose de développer la toute première puce intelligente associée à un module neuronal local. Une architecture inspirée du système nerveux des grillons.

L'un des sujets de recherches du CEA sur les composants, capital pour la frugalité numérique, vient d'être sélectionné pour l'obtention d'une bourse prestigieuse (trois millions d'euros) du Conseil européen de la recherche (ERC). Première bourse de ce type sur les fondements de l'IA au CEA, elle vise le développement de mémoires à l'échelle nanométrique inspirées du système nerveux des insectes.

Car la sobriété énergétique de l'IA requiert des nanosystèmes dotés d'architecture en rupture. Cela concerne notamment les mémoires électroniques qui doivent être à haute densité, à haute résolution et dotée d'une endurance illimitée. Si cette capacité n'existe pas encore aujourd'hui, le projet d'Elisa Vianello pourrait en ouvrir la voie. Son objectif est de développer la toute première puce intelligente associée à un module neuronal local capable de traiter les données sensorielles en temps réel. Une ambition clairement inspirée des grillons, lorsqu'elle a découvert que différentes fonctions de leur système nerveux ressemblent étroitement aux fonctions assurées par les mémoires déterministes, probabilistes, volatiles et non volatiles.

### Une synapse hybride

« Pour échapper à leurs prédateurs, les grillons prennent des décisions justes à partir de données peu fiables, imprécises et lentes, envoyées par leurs neurones et synapses. En



© P. Joyet / CEA

*examinant de près leur structure biologique, nous avons identifié une diversité de fonctions de type mémoire, impliquées dans leurs systèmes sensoriels et nerveux. En combinant ces différentes fonctions, le système de traitement interne du criquet parvient à atteindre des performances remarquables et efficaces énergétiquement»,* explique la chercheuse.

Avec son équipe du CEA-Leti, elle fabriquera des réseaux de dispositifs de mémoires physiques à l'échelle nanométrique avec l'objectif de traduire les principes biologiques des insectes en principes physiques. Ceci permettra l'apprentissage à partir d'un volume très limité de données bruitées, telles que les données mesurées en temps réel par différents capteurs : caméras, radars, capteurs cardiaques (ECG), capteurs musculaires (EMG), flux de bio-impédance et potentiellement aussi de signaux cérébraux par le biais de capteurs EEG et de sondes neuronales.

Au-delà du diagnostic médical, cette innovation de rupture pourrait révolutionner également les marchés de l'électronique embarquée des objets du quotidien. ●



### Ci-dessus

Le CEA-Leti dispose d'équipements de pointe dans sa plateforme nanoélectronique afin de concevoir des nanosystèmes performants et économes en énergie, indispensables à l'IA de demain.

## TOUT S'EXPLIQUE

PAR SYLVIE RIVIÈRE, EN COLLABORATION AVEC JEAN-BAPTISTE DORÉ ET ÉRIC MERCIER (CEA-LETI)



## Demain, la 6G

Préparée depuis une dizaine d'années dans les laboratoires, notamment ceux du CEA-Leti, la 5G se déploie aujourd'hui dans le monde entier. La R&D sur la génération suivante, celle de la 6G, a quant à elle déjà commencé.

C'est en 2020 que la 5G, cinquième génération des standards de la téléphonie mobile, a commencé à se déployer. Plus performante, notamment dans la bande des très hautes fréquences (26 GHz), elle doit permettre de répondre à l'explosion du trafic et de la consommation mondiale de données. Ses atouts ? Des débits plus élevés, une faible latence (1 ms annoncée entre un ordre passé sur un téléphone et sa réponse), la possibilité de prendre en charge un plus grand nombre d'appareils (jusqu'à 1 million de connexions annoncé par km<sup>2</sup>), une liaison plus stable, même en mobilité.

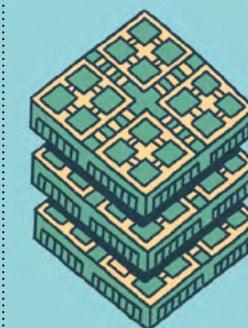
Outre des usages améliorés pour l'utilisateur, les changements les plus attendus de la 5G se situent au cœur

de la transition numérique : usine du futur, véhicules autonomes, villes intelligentes, Internet des objets, santé personnalisée... Autant de champs d'applications dans lesquels le CEA est déjà fortement impliqué. Parallèlement, et anticipant l'augmentation exponentielle du trafic, les ingénieurs du CEA-Leti travaillent déjà sur la 6G. Il s'agit notamment d'étudier, dans une approche de frugalité numérique, la faisabilité de ces communications sur des nouvelles bandes fréquences dont certaines atteignent la centaine de GHz, même si elles ne sont pas encore attribuées par les pouvoirs publics. « Comme pour la 5G, il y aura d'énormes enjeux de souveraineté et de sécurité. À la fois pour protéger nos données et pour assurer une couverture réseau haut débit sur tout le territoire, essentielle pour la compétitivité des entreprises et industries », souligne Jean-Baptiste Doré, responsable du programme 6G au CEA-Leti. Quant aux usages de la 6G, « nul ne sait aujourd'hui ce que la société en fera ! ». Personne n'avait notamment anticipé l'envolée récente des réseaux sociaux, ni même l'arrivée des premiers smartphones à l'époque de la 3G...

### FOCUS

#### Performance et frugalité énergétique

Acteur européen incontournable de la R&D en microélectronique et pour les réseaux mobiles, le CEA-Leti est à l'origine de Soitec, dont les produits (plaques de silicium sur isolant sur lesquelles sont gravées les puces électroniques) équipent 95 % des smartphones, mais aussi, plus anciennement, de la genèse de STMicroelectronics, fabricant mondial de semi-conducteurs. Sa technologie FD-SOI pour les transistors, plus performante et économe en énergie que celle d'Intel, la FinFet, est particulièrement adaptée aux défis de frugalité et de performance de la 5G. Elle est d'ailleurs au cœur de l'émetteur-récepteur du smartphone pixel 6 Pro de Google, lancé en octobre 2021.



### Parlons santé

Dans l'état actuel des connaissances, les différentes autorités sanitaires ne relèvent pas de risque avéré en-dessous des seuils définis par les directives internationales. Pour la bande de fréquences 26 GHz de la 5G, non encore exploitée en France, l'Anses, l'organisme en charge de ces études, précise que les données sont encore trop peu nombreuses pour conclure à l'existence ou non d'effets sanitaires. Le CEA ne travaille pas sur ces thématiques, mais collabore avec l'agence, par exemple en concevant des équipements pour les expériences de mesure de l'exposition aux champs électromagnétiques.

### Pour en savoir plus :

→ [radiofrance.fr](https://www.radiofrance.fr)  
→ [anses.fr](https://www.anses.fr)

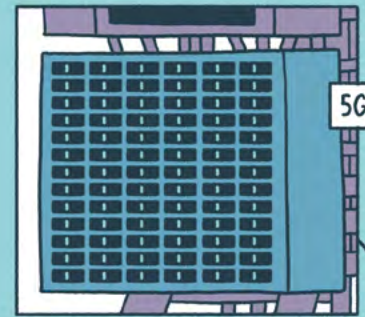


# Le voyage des données via la 5G

Avec la 5G, nous entrons dans l'ère des échanges colossaux et quasi-instantanés de données. Ces réseaux mobiles reposent sur tout un arsenal technique incluant antennes intégrées, circuits radiofréquences, modems et processeurs intégrés dans les téléphones et objets connectés, antennes-relais et centraux de communication, bandes de fréquences dédiées...

## Nina et Arthur sont en appel vidéo

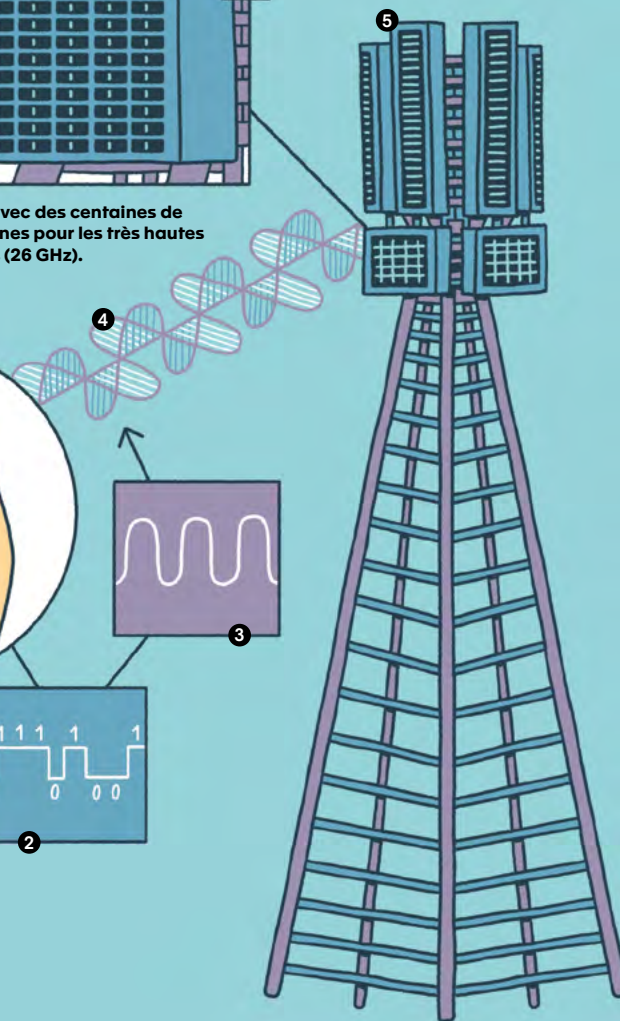
L'image de Nina, captée par la caméra de son téléphone 1, est transformée par un microprocesseur en un signal numérique sous forme de 0 et de 1 2. Lui-même converti en signal électrique radiofréquence via un modem 3. Celui-ci se transforme en une onde électromagnétique émise à la vitesse de la lumière à l'aide de l'antenne du téléphone 4.



Dispositif avec des centaines de mini-antennes pour les très hautes fréquences (26 GHz).

## L'onde électromagnétique est captée par l'antenne-relais la plus proche du téléphone de Nina

Ces antennes-relais 5 (qui appartiennent à chaque opérateur de téléphonie) localisent en permanence les téléphones mobiles situés dans leur périmètre, à savoir une zone géographique appelée cellule (de rayon variant entre 10 km et 500 m, voire moins pour la 5G). L'onde est convertie en signaux électriques; puis de nouveau numérisée (0 et 1) pour être décodée par un modem; et enfin reconvertie par exemple en onde lumineuse 6.



## Les deux opérateurs entrent en communication

L'onde lumineuse est envoyée par fibre optique au central de communication de l'opérateur de Nina 7. Lequel le transmet à celui d'Arthur, qui l'envoie à l'antenne-relais la plus proche de son téléphone. Là, débute le traitement inverse... jusqu'à Arthur. Le tout en temps quasi-réel!



PROCESSUS IDENTIQUE



## Pendant ce temps, par le même processus,

Théo 8 commande un engin de chantier à 200 km de distance 9. Dans l'usine, les robots communiquent en direct avec l'unité de traitement des données et ajustent leurs tâches en conséquence. En ville, des milliers de capteurs envoient leurs données pour optimiser en temps réel les réseaux d'énergie, de transport...



## ZOOM Une histoire de fréquences

Un réseau de téléphonie mobile exerce sur une bande de fréquence donnée. Celle-ci est partagée entre les différents opérateurs, sur la base de licences d'exploitation obtenues auprès des pouvoirs publics. Par exemple, dans la bande des 3,5 GHz de la 5G (voir frise historique), 310 MHz ont été vendus aux enchères aux opérateurs français en 2020 et 2021 : 90 MHz pour Orange, 80 MHz pour SFR et 70 MHz chacun pour Bouygues Telecom et Free.

## 5G: nouvelles antennes pour très hautes fréquences

Plus élevée est la fréquence, plus courte est la portée. Avec deux conséquences pour la 5G dans la bande des 26 GHz : le besoin d'un plus grand nombre d'antennes, environ tous les 200 m; et la diminution drastique de leur taille (de l'ordre de celle de la longueur d'onde, ici millimétrique). Ces équipements, composés d'une multitude de mini-antennes (256, voire 512), permettent de connecter un grand nombre d'utilisateurs à la fois et de diriger le signal uniquement vers l'utilisateur concerné, seulement lorsqu'il le réclame (à l'inverse des antennes 4G qui émettent en continu sur la totalité de la zone couverte). Les smartphones étant aux aussi équipés de plusieurs mini-antennes, la capacité de transmission en sera accrue. Des « surfaces passives dites intelligentes » seront aussi prévues pour refléter l'onde électromagnétique et ainsi couvrir les zones masquées.

## Consommation de données en croissance

**8,1 milliards**

nombre d'abonnements mobiles dans le monde en 2021

**+ 50 %/an**

augmentation mondiale des échanges de données via les téléphones portables

**11 gigaoctets/mois**

moyenne de la consommation mondiale de données par utilisateur de téléphone portable

Source : Ericsson Mobility Report, 2021.

## De la 1G à la 6G, petit historique

### 1G

Fin des années 1980  
Voix (appels téléphoniques)

### 2G

≈ 1990  
+ SMS et MMS  
Débit moyen : 50 kbits/s  
Fréquences : 900 et 1800 MHz

### 3G

≈ 2000  
+ Internet mobile, mails, lecture de vidéos  
Débit moyen : 10 Mbits/s  
Fréquences : 900 et 2100 MHz

### 4G

≈ 2010  
Échange de grandes quantités de données : applications, e-commerce, etc.  
Débit moyen : entre 10 et 100 Mbits/s  
Fréquences : 700, 800, 900, 1800, 2100 et 2600 MHz

### 5G

≈ 2020  
Objets connectés, jeux en ligne, industrie 4.0, ville intelligente, médecine à distance...  
Débit moyen : entre 100 et 400 Mbits/s  
Fréquences : 700, 800, 900 MHz (fréquences de la 4G); 3,5 GHz; 26 GHz (en 2022-2023)

### 6G

2030 ?  
Réalité virtuelle, industrie 5.0...  
Débit moyen : au-delà du Gbit/s  
Fréquences : non encore attribuées



# REGARDS CROISÉS

## Peut-on faire confiance à la science ?

**Cynthia Fleury**

Professeur titulaire de la chaire *Humanités et Santé* du Conservatoire national des arts et métiers

**Étienne Klein**

Physicien et philosophe des sciences au CEA



**La pandémie de Covid-19 a mis à l'épreuve notre confiance collective en la science. Comment débattre de science ? La science dit-elle le vrai ? Comment instaurer de la confiance ? Cynthia Fleury et Étienne Klein proposent leurs réflexions, entre philosophie et regard scientifique.**

### La question du débat

**Étienne Klein** Il y a plusieurs façons de comprendre la question posée. Faire confiance à la science, est-ce croire la parole des scientifiques ? Est-ce croire à la pertinence de la démarche scientifique ? Ou bien est-ce penser que la science sera capable de relever les défis qui se présentent à nous, tel le changement climatique ? Les réponses à ces trois questions, prises isolément, ne seraient sans doute pas identiques. Ceci étant posé, si nous regardons le niveau de confiance du public à l'égard de la science et des scientifiques, dans tous les pays d'Europe, il est resté extrêmement fort, autour de 90 %, tout au long de cette pandémie de Covid-19. Sauf en France, où il a perdu 18 points<sup>1</sup>. Les raisons sont multiples. L'une d'elles est sans doute que nous avons trop personnaliser les débats. Nous avons une occasion historique de faire de la pédagogie scientifique. Au lieu de cela, nous avons

préférez organiser des controverses souvent prématurées. Ce qui pose déjà la question de ce que devrait être un débat.

**Cynthia Fleury** Oui, comment s'organise la parole dans un débat ? Quels sont les modes de vérification<sup>2</sup>, c'est-à-dire les manières de dire le vrai ? En démocratie, il existe une pluralité de modes qui, de plus, sont hiérarchisés. Prenez par exemple le débat au comptoir d'un café ou au Parlement. Le premier est déterminant, notamment pour la liberté d'expression. Le second va devoir produire, en sus, une décision. Il répond à d'autres critères de légitimité et obéit nécessairement à une normativité, notamment basée sur la rationalité et souvent sur la charge de la preuve. Or, nous assistons depuis quelques années à un renforcement de la confusion de ces modes, par exemple en faisant passer une controverse publique pour une controverse scientifique et *vice versa*.

### Les raisons de la défiance

**E. K.** Il est une autre confusion qui peut expliquer la défiance : on a trop souvent confondu la science et la recherche. La science est un corpus de connaissances qu'on ne peut contester que grâce à des arguments scientifiques. La recherche, elle, est impulsée par des questions dont nous ne connaissons pas encore les réponses.

Son moteur est donc le doute. Mais lorsque l'on met dans le même sac la science et la recherche, l'idée de doute, qui est consubstantielle à la recherche, vient coloniser la science même. Et on arrive alors à ce raccourci selon lequel la science serait, par essence, le doute. Dans ce cas, pourquoi faudrait-il tenir compte de ses résultats ?

**C. F.** Cette défiance s'inscrit dans un contexte français plus large, relatif au tropisme du populisme. Celui-ci s'est construit sur différentes formes d'insécurité (socioéconomique, politique, culturelle) et sur la défiance, notamment envers les institutions, qui s'étend aujourd'hui jusque vers la science. Cette dernière a

**« Si le politique ne s'en mêle pas, et donc s'il n'y a pas de débat, nous irons vers une délégation de la compréhension et de la décision à la machine. »**

Cynthia Fleury

aussi connu des faillites, incarnées par différents moments de notre histoire : Hiroshima, Auschwitz, etc. On a même parlé de catastrophe des Lumières car il existait, au siècle des Lumières, une convergence des finalités, avec l'idée que plus on serait scientifique, plus on serait moral, plus on pourrait cohabiter, plus on se comprendrait ; or, le XX<sup>e</sup> siècle a fait éclater cette convergence.

### Une critique de la science

**E. K.** Aujourd'hui, comme l'explique le philosophe anglais Bernard Williams, coexistent dans notre société deux courants de pensée, contradictoires, mais qui, curieusement, se renforcent l'un l'autre. Il y a d'une part un « désir de véracité » : nous sommes éduqués, informés, et ne voulons pas être trompés par les discours institutionnels ou médiatiques. Mais dans le même temps, ce désir de véracité, qui est parfaitement légitime, déclenche un esprit critique généralisé qui vient défaire l'idée qu'il y aurait des vérités assurées. Le désir de véracité vient ainsi fragiliser l'idée même de vérité, surtout lorsque celle-ci est dite par des institutions.

**C. F.** Nous assistons, de plus, en France, à une dégradation magistrale en mathématique et en science, révélée par le classement Pisa. Or, il existe une corrélation très claire entre confiance dans la science et niveau élevé en science et mathématique. J'ajoute à cela le rôle des réseaux sociaux, avec leurs algorithmes et leur modèle économique, qui valorisent non pas la qualité d'un contenu, mais un certain type de vocabulaire, favorisant les discours haineux, les discours *ad hominem* qui désignent, le complotisme, etc.

**E. K.** D'ailleurs, pourquoi une *fake news* est-elle sept fois plus partagée qu'une vraie information ? Pourquoi nos cerveaux ont-ils tendance à déclarer vraies les idées qu'ils aiment, même si elles sont fausses ? L'affaire est d'autant plus délicate qu'il est

arrivé que la science se trompe. Dans le passé, des « vérités » scientifiques se sont révélées finalement fausses ; d'autres, comme la forme ronde (mais pas parfaitement sphérique) de la Terre, ne peuvent plus guère être remises en cause ; certaines doivent en revanche être remaniées pour tenir compte de l'évolution des savoirs. Si la science produit des connaissances, elle produit aussi de l'incertitude, mais une incertitude très spéciale : elle ne nous dit pas ce que nous devons faire des possibilités qu'elle nous offre. Il faut faire des choix. Mais selon quels critères ?

### Restaurer la confiance

**C. F.** Nous avons atteint de tels niveaux de défiance envers les élites et les institutions... Restaurer – ou instaurer – un climat de confiance avec simplement des arguments rationnels ne sera pas aisé. Comme dans tout délire paranoïaque, tout ce qui est donné comme argument est retourné en biais de confirmation. Tout l'enjeu est de permettre d'élaborer et de sophistiquer notre critique de la science – qui en est le corollaire – tout en considérant que la science reste un protocole de vérification plus élaboré que d'autres. Mais pour accéder au débat démocratique, il nous faudra davantage comprendre cette science. Or, nous n'avons pas révolutionné nos formations globales. La part de l'éducation scientifique dans notre système de gouvernabilité est essentielle, et cela s'organise. Il faudra consacrer un « temps citoyen » à cela, pour comprendre, participer, voire décider... Nous ferions ainsi bondir le niveau de l'exercice libre de rationalité publique.

**E. K.** La science est en effet républicaine, au sens où elle est, en principe, « affaire publique ». Mais si la confiance a été abîmée, c'est peut-être parce que nous n'avons pas réussi à inventer des instances permettant de discuter collectivement du type de compagnonnage que nous souhaitons avoir avec les nouvelles technologies.

**C. F.** Les travaux sur la construction des avis des experts, sur l'intégrité scientifique, les conflits d'intérêt, la cartographie des lobbies, sont aussi essentiels.

### Gagner en compétence

**C. F.** Restaurer la confiance dans la science est d'autant plus nécessaire que nous sommes face à deux métachangements : le numérique et l'anthropocène, assortis d'une course de vitesse. Le numérique est un monde permanent d'accélération, antinomique de la réflexivité humaine ; il y a là une bataille. Si le politique ne s'en mêle pas, et donc si le débat est inexistant, nous irons vers une délégation de la compréhension et de la décision à la machine.

**E. K.** Je note cependant une bonne nouvelle : l'arrogance des uns et des autres a progressivement baissé d'un ton. C'est la manifestation de l'effet dit « Dunning-Kruger », qui s'articule en un double paradoxe : d'une part, pour mesurer son incompetence, il faut être... compétent ; d'autre part, l'ignorance rend plus sûr de soi que la connaissance. De fait, durant la pandémie, à mesure que nous nous sommes informés, nous avons fini par comprendre que l'affaire est plus complexe que nous ne l'avions soupçonné. Du coup, l'arrogance se porte un peu moins bien qu'il y a quelques mois, sauf dans les réseaux ou les sites spécialement dessinés pour lui prêter main forte. ●

EXTRAITS DE LEUR CONVERSATION LORS DES RENCONTRES DU CEA « SCIENCE TOI-MÊME ! » AU CENTQUATRE-PARIS, LE 12 FÉVRIER 2022.

À retrouver sur la chaîne youtube « CEA Officiel » (playlist Conférences)

1. *Les Français au temps du Covid-19 : économie et société face au risque sanitaire*, Yann Algana et Daniel Cohen, note du Conseil d'analyse économique, n° 66, octobre 2021.

2. Notion utilisée par le philosophe Michel Foucault.



# AGORA L'ACTU DU CEA



© C. Morel / CEA

## SALON

### Le CEA au CFIA 2022

Via sa plateforme régionale de transfert technologique en Bretagne, le CEA est l'un des fournisseurs d'innovations pour l'industrie agroalimentaire française. Présent en mars dernier sur le salon CFIA, une référence en Europe dans le domaine, il a présenté sa nouvelle plateforme TeQPA de technologies pour la qualité des productions alimentaires. TeQPA développe des solutions innovantes de sécurité sanitaire, d'analyse de la qualité

de l'eau, de l'air et du sol, de contrôle qualité nutritionnelle et organoleptique, et de contrôle des procédés agroalimentaires. Des solutions à destination des entreprises locales, notamment les PME et ETI, afin d'accroître leur compétitivité et soutenir l'emploi local. [SR](#)

↑ **Ci-dessus**  
Détection rapide de bactéries en agroalimentaire.

## INNOVATION & USAGES

### Le campus Y.Spot au complet

« Nous sommes au milieu de transformations radicales, où plus que jamais les usages déterminent la diffusion des technologies. Il faut donc comprendre les usages et maîtriser les technologies », a déclaré le directeur de la Recherche technologique du CEA lors de l'inauguration du Y.Spot Partners le 11 mars dernier à Grenoble. Cet immeuble de 10 000 m<sup>2</sup> de bureaux rejoint le Y.Spot Labs du CEA (lancé en 2019) au sein d'un campus inédit

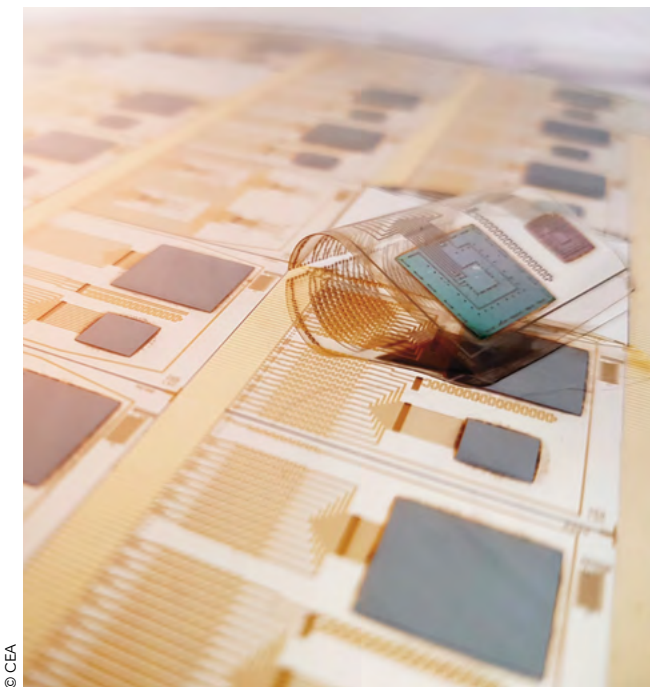
initié par le CEA. L'ambition est de répondre aux enjeux de demain en rapprochant, au sein d'un même lieu et autour d'équipements de pointe et d'approches innovantes, industriels, entreprises, chercheurs, étudiants, artistes et investisseurs. Y.Spot Partners est financé par le Crédit Agricole Sud Rhône-Alpes, la Banque des territoires Auvergne-Rhône-Alpes et Mutualia Territoires Solidaires. [AG](#)

## MÉDIATION

### Conférences de NeuroSpin en ligne

Organisée au mois de mars depuis plus de vingt ans, la semaine du cerveau est une occasion unique de sensibiliser le public à l'importance de la recherche en neurosciences. Au CEA-Saclay, les chercheurs de NeuroSpin, spécialisés dans l'imagerie cérébrale au moyen de puissants IRM, et leurs collègues de NeuroPSI (Institut des neurosciences Paris-Saclay), ont proposé six conférences. Consultables sur *Youtube*, elles abordent une foule de questions passionnantes : le fonctionnement de notre horloge circadienne cérébrale, qui régule nos rythmes veille-sommeil ; le métabolisme incroyable du cerveau, responsable à lui seul de 20% de l'énergie utilisée par notre corps alors qu'il n'en représente que 2% du poids ; les possibilités offertes par l'intelligence artificielle pour repérer dans les images d'IRM cérébrales les petites modifications non visibles à l'œil nu et pourtant signes potentiels d'une pathologie psychiatrique, associées aux espoirs de diagnostics précoces de ces maladies ; l'IRM le plus puissant au monde pour les images chez l'être humain, du projet Iseult à 11,7 teslas ; les secrets de cette petite zone enfouie au cœur du cerveau, l'hippocampe, essentielle à la construction de nos souvenirs gravés dans le temps et dans l'espace... Des conférences à écouter, partager et réécouter sans modération. [SR](#)

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



© CEA



## PROJETS DISRUPTIFS

### 3 moonshots pour 2022

**Le CEA se donne 18 à 36 mois pour réaliser trois démonstrateurs innovants dans le domaine du numérique, au service de l'industrie et de l'environnement.**

Parce que le numérique est omniprésent dans nos vies, nos sociétés, transformant nos modes de communication, de consommation, nos manières de travailler, etc. ; parce qu'il est devenu un enjeu de compétitivité des entreprises et de souveraineté pour les États, récemment mis en exergue par la pénurie de semi-conducteurs ; parce qu'il porte des enjeux de cybersécurité... le CEA, acteur incontournable du domaine et soutien de l'industrie française, a lancé une vaste réflexion pour répondre à ces défis contemporains.

Dans un rapport publié en octobre 2021, l'organisme présente sa nouvelle vision, qu'il décline en une dizaine d'actions et dans le lancement de projets transverses : les *moonshots*. Un anglicisme choisi pour désigner des « démonstrateurs disruptifs d'objets technologiques, de services, répondant à des défis sociétaux ou industriels

*forts* », selon les termes de François Jacq, administrateur général du CEA.

#### Blockchain et robot

Neuf *moonshots* proposés par des équipes de chercheurs ont été sélectionnés, dont trois sont lancés dès cette année :

- une *blockchain* de stockage et de gestion de données climatiques, frugale, c'est-à-dire basée sur un protocole beaucoup moins énergivore que les technologies actuelles. Un premier sujet d'étude portera sur le traitement de données de concentrations de gaz à effet de serre provenant de capteurs en région parisienne ;
- un dispositif de contrôle de la qualité de l'air intelligent, qui associe à la fois des capteurs miniaturisés, plus performants et à bas coût, prenant aussi en compte des polluants jusqu'alors peu comptabilisés (comme l'ammoniac), et de l'IA pour améliorer la mesure et la prévision ;
- un robot autoapprenant pour l'industrie, capable de réaliser de façon autonome des tâches complexes, conçu pour s'améliorer seul et progressivement à l'aide d'intelligence artificielle, sans avoir besoin d'être reprogrammé par l'humain. [SR](#)

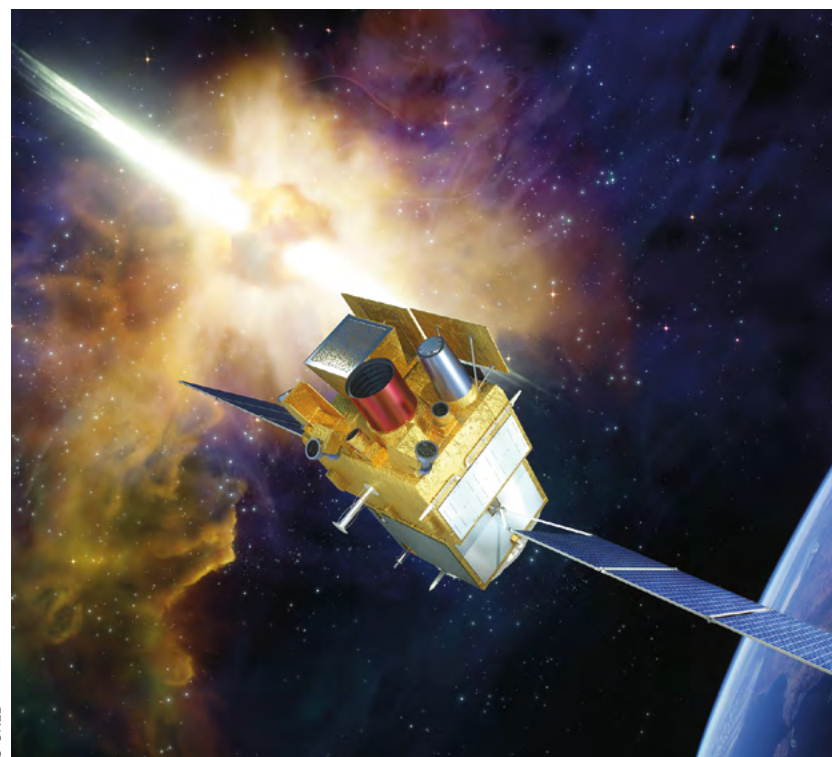
#### ↑ Ci-dessus

Le développement de ces démonstrateurs disruptifs repose sur des technologies à l'état de l'art, comme ici des puces sur silicium ultraminces et flexibles.

#### LEXIQUE

**Blockchain**  
Enchaînement sécurisé de « blocs » ; un bloc étant une sorte de conteneur de données numériques (voir *Tout s'explique*, Les défis du CEA n°239).





© CNES

COLLABORATION INTERNATIONALE

## Mission accomplie pour Svom

Deux instruments du satellite Svom sont livrés par la France à la Chine, en vue d'un lancement prévu depuis Sichuan en 2023. Objectif : mieux comprendre les sursauts gamma et connaître l'Univers jeune.

Défi réussi pour la contribution française, portée par le Cnes, à la mission sino-française d'astronomie Svom. Elle vient de livrer à la Chine deux instruments, Éclairs et MXT, du satellite qui en compte quatre. Éclairs a été développé par le CEA, l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie (IRAP), et le laboratoire AstroParticule et Cosmologie. Il est doté d'une caméra « à masque codé » à grand champ, selon une innovation déjà réalisée par le CEA-Irfu et l'IRAP pour les missions spatiales Sigma (1989) et Intégral (2002). Élément-clé

de Svom, ce masque observera une partie du ciel et, dès qu'il détectera un sursaut gamma, pourra en mesurer les coordonnées célestes. L'objectif de cette collaboration scientifique est l'étude du « ciel transitoire », terme désignant les objets subissant de brusques et retentissants changements, comme l'explosion d'étoiles massives, la fusion d'étoiles à neutrons ou celle de trous noirs. Et c'est à travers les sursauts gamma émis dans l'Univers qu'ils seront observables. Ces messagers de très haute énergie du spectre électromagnétique, dont certains se sont produits environ 500 millions d'années après le Big bang (contre 13,8 milliards aujourd'hui), permettront aussi de renseigner sur les conditions qui régnaient dans la prime jeunesse de l'Univers. **AG**

### LE CHIFFRE

**- 47 000 teqCO<sub>2</sub>**

Alors que le CEA, dans son bilan des émissions de gaz à effet de serre (Beges), s'était fixé l'objectif d'une réduction de 9 000 tonnes équivalent CO<sub>2</sub> (teqCO<sub>2</sub>) sur la période 2017-2020, il a vu ses émissions largement réduire de 47 000 teqCO<sub>2</sub>. S'attachant aux trois grands domaines d'émissions provenant des activités des neuf centres (consommation d'électricité, d'énergie, et transports), les principales actions menées ont porté sur la réutilisation de la chaleur issue de procédés techniques, la fermeture ou déconstruction de bâtiments énergivores, et l'incitation aux transports en commun et covoiturage. De nouvelles actions, notamment relatives à l'optimisation énergétique des bâtiments, ont été lancées pour poursuivre la réduction de l'impact carbone des activités du CEA. **AG**

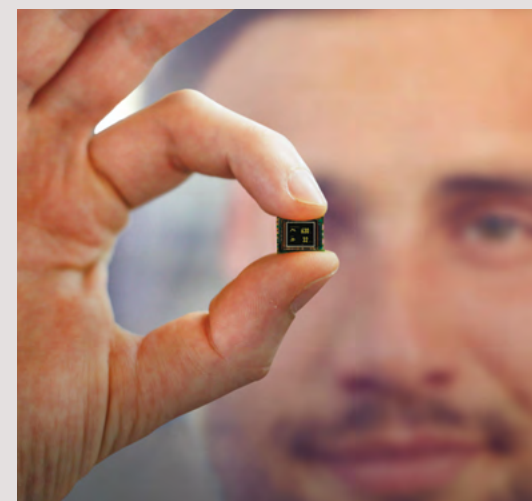
### DÉFENSE

## Accord de R&D sur la propulsion nucléaire

Le CEA, Framatome et Naval Group ont signé le 23 février dernier un accord-cadre portant sur les études et expérimentations de matériaux mis en œuvre dans le cadre de la propulsion nucléaire navale. L'objectif est de mieux maîtriser le cycle, de la conception à la production, des ébauches en acier de gros composants de chaufferies nucléaires. Les résultats bénéficieront à la conception-fabrication des chaufferies propulsant les sous-marins nucléaires d'attaque (SNA) de type Suffren du programme Barracuda, les sous-marins nucléaires lanceurs d'engins de troisième génération (SNLE 3G) et le porte-avions de nouvelle génération. Cet accord contribue à la pérennité et au développement des compétences essentielles à la réussite des programmes nucléaires de défense. **SR**

## LE COIN DES START-UP

PAR AUDE GANIER



© Microoled

## Les micro-écrans de Microoled

« Il fallait être un peu fou pour parier sur un dispositif qui n'existait pas et qui n'intéressait aucun concurrent », avoue Gunther Haas, cofondateur avec Éric Marcellin-Dibon de la start-up Microoled. Nous sommes en 2006. Les deux ingénieurs, en poste chez Thomson, vivent une sorte de « crise existentielle ». La technologie OLED sur laquelle ils travaillent est envisagée pour l'affichage des écrans plats de téléviseurs mais la société, en difficulté, décide de cesser cette activité. C'est au CEA que Gunther Haas trouve « refuge ». « Le CEA-

Leti accepte d'incuber notre projet de start-up pour des micro-écrans OLED et nous pouvons bénéficier de leur savoir-faire et de leurs équipements. En 2009, nous créons un laboratoire commun. » Dès 2011, s'appuyant sur des fournisseurs français et européens de semi-conducteurs, les premiers micro-écrans sortent de la ligne de production de Microoled qui trouve son premier client. Panasonic est en effet séduit, pour ses appareils photos, par la densité exceptionnelle des pixels, leur qualité d'image et leur très faible consommation d'énergie. Dix ans plus tard, la société compte une centaine de salariés et a vendu plus d'un million d'unités à l'international. Parallèlement, elle développe un dispositif de réalité augmentée intégré à des lunettes, notamment pour les sportifs.

« Nous voulions que les gens aiment les porter sans ressembler à des extra-terrestres ! » C'est le concept ActiveLook® aujourd'hui commercialisé par Julbo, Cosmo Connected et Engo (marque de la start-up). « Cette idée fut à l'origine de Microoled. Mais heureusement que nous ne l'avons pas lancée si tôt car nous nous serions plantés ! En 2007, le marché n'était pas prêt », avoue-t-il. ●

**CEA-Leti**  
Institut des micro et nanotechnologies et de leur intégration dans les systèmes (Grenoble).

**↑**  
**Ci-dessus**  
Lunettes de réalité augmentée intégrant le micro-écran.

### MARCHÉS

- **Médical** : microscopes, endoscopes, appareils ophtalmologiques.
- **Défense & sécurité** : lunettes de vision nocturne et infrarouge, caméras thermiques.
- **Sport et loisirs** : lunettes de réalité virtuelle, jumelles, appareils photo.

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

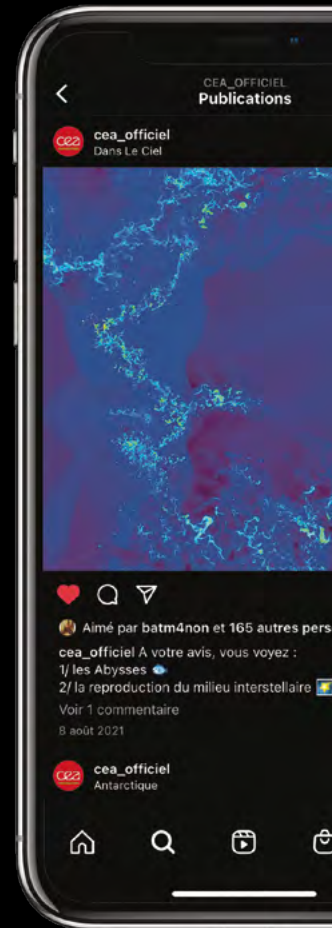
### TECHNOLOGIE

- **OLED** : diode électroluminescente composée de couches nanométriques de matériaux semi-conducteurs organiques.
- **Micro-écran** : dispositif d'affichage de taille inférieure à 2,5 cm de diagonale, avec des sous-pixel de 3 à 6 µm et un dispositif OLED.
- **ActiveLook®** : système d'affichage intégré de 7 grammes, composé d'un micro-écran avec une optique de projection, d'une connexion Bluetooth et d'une micro-batterie d'une autonomie de 12 h.

### DATES-CLÉS

- 2007**  
Création de la start-up
- 2011**  
Fabrication des premiers micro-écrans
- 2020**  
Croissance de 58 % du chiffre d'affaires annuel, s'élevant à 20 millions d'euros
- 2022**  
Projet d'introduction en bourse
- 2023**  
Création d'une troisième ligne de production en France





Suivez #CEA\_Officiel

