

# Les défis

du cea

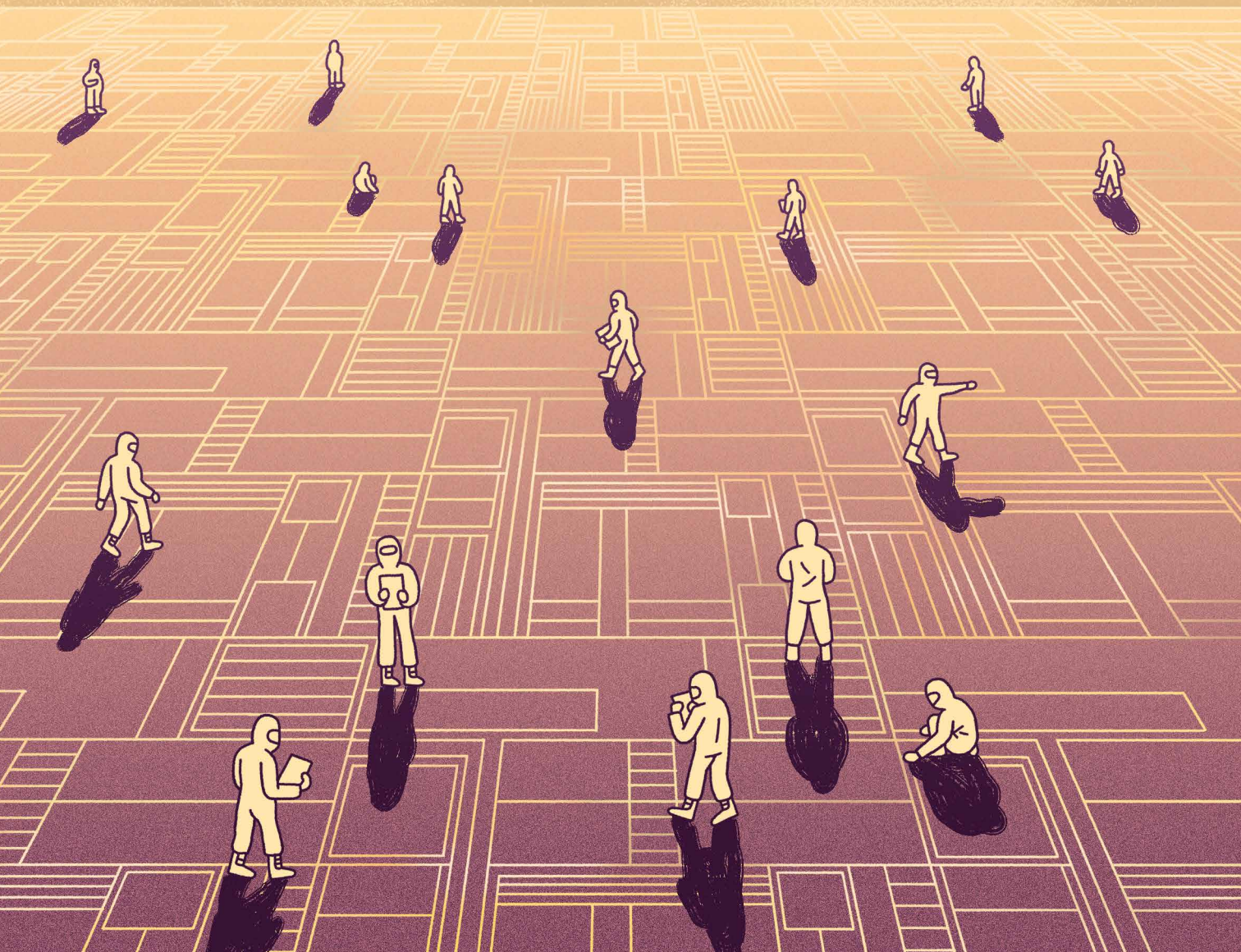
LE MAGAZINE DE LA RECHERCHE IMPLIQUÉE  
#246 – NOVEMBRE / DÉCEMBRE 2021

DOSSIER  
**Électronique  
frugale**

p. 17

Making-of  
**Séparer  
pour mieux  
recycler**  
p. 13

Tout s'explique  
**Le voyage  
spatial  
de Mirim**  
p. 27





### L'humeur de...

Aude Ganier, rédactrice en chef

**Semi-conducteurs, métaux, papier, voire à terme combustibles fossiles... En ces temps de pénuries et de flambée des prix de l'énergie, le modèle CEA fait plus que jamais preuve de son efficacité. Grâce à sa recherche d'excellence et son intégration dans les feuilles de route industrielles, le CEA est taillé pour contribuer à la capacité d'innovation de la France en vue d'asseoir sa souveraineté sur des domaines-clés comme la microélectronique, les énergies bas carbone ou encore le spatial. Innovation nourrie par des performances accrues des technologies, mais également par un souci constant apporté à deux grands impératifs : la frugalité énergétique et l'économie circulaire, via des analyses de cycle de vie de tous ses développements. Car la lutte contre le réchauffement climatique reste prioritaire, et fixe un cadre à l'ensemble de nos travaux.**



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 Cécile Michaut,

Émilie Paul, Bérénice Robert, Vahé Ter Minassian

Comité éditorial Claire Abou, Luc Barbier,

Mathilde Costes-Majorel, Sophie Kerhoas, Elisabeth

Lefèvre-Rémy, Camille Giroud, Sophie Martin,

Frédérique Tacnet, Anne Orliac, Valérie Vandenberghe

Iconographie Micheline Bayard

Illustrations Jeremy Perrodeau (couverture, p. 27-29),

Marta Signori (p. 2, 30)

Conception et réalisation graphique,

secrétariat de rédaction Atelier Marge Design

N° ISSN 1163-619X. Tous droits de reproduction réservés.

Papier Arctic Volume White FSC. Stipa. Décembre 2021.

# SOMMAIRE #246

## EURÉKA

### 03 Imagerie cérébrale

L'IRM le plus puissant au monde

### 04 Systèmes complexes

La prouesse de la modélisation du climat

### 06 Chimie verte

De nouveaux catalyseurs à l'honneur

### 08 Photovoltaïque

Des voiles solaires pour l'espace

### 09 Sécurité alimentaire

Détection express des bactéries

### 10 Efficacité énergétique

Réseaux de chaleur optimisés

### 11 Climat

Ça repart à la hausse

### 11 Contrôle industriel

Imageur 4D pour traquer les défauts

### 12 Intelligence artificielle

Speed sécurise la construction des réseaux de neurones

## MAKING-OF

### 13 Séparer pour mieux recycler

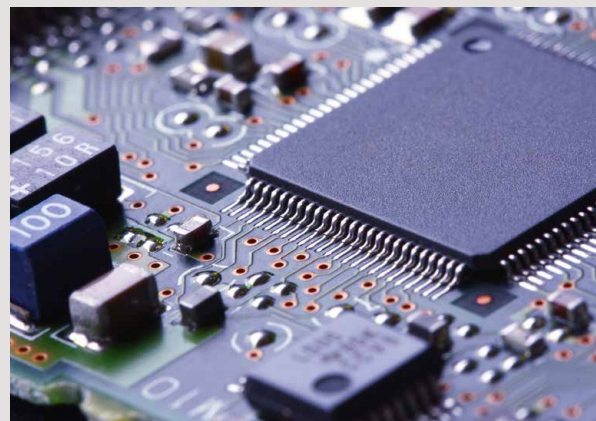
## AGORA

### 32 Genvia, fleuron français de l'hydrogène décarboné

### 32 Énergies bas carbone, vers une reconquête industrielle

## DOSSIER MICROÉLECTRONIQUE

# Souveraineté et frugalité

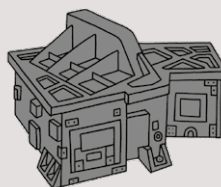


### 18 Les grands enjeux

### 20 Pour une micro-électronique durable

### 22 Vers de nouveaux transistors

### 25 Le calcul est dans la mémoire



## TOUT S'EXPLIQUE

### 27 Mirim, l'imageur du télescope Webb

## REGARDS CROISÉS

### 30 Le prix de l'énergie

Bertrand Charmaison et Matthieu Auzanneau



### 33 Embarqué dans le cloud et l'IA

### 33 Eurohab, le refuge lunaire

### 34 Le CEA au Bike&Run 2021

### 34 Modélisation : jouer pour apprendre

### 34 Zoom sur les maladies infectieuses

## LE COIN DES START-UP

### 35 Aryballe propose un nez électronique universel

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

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

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

# EURÊKA L'ACTU DES LABOS

## IMAGERIE CÉRÉBRALE

# L'IRM le plus puissant au monde

**Avec son champ magnétique de 11,7 teslas, l'IRM du projet Iseult est désormais le plus puissant au monde dédié à la recherche en imagerie cérébrale. Et il vient de livrer ses premières images, celles d'un potimarron !**

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Voir tout l'intérieur d'un potimarron avec des détails de l'ordre de 0,4 mm... Telles sont les performances de l'IRM du projet Iseult, installé à NeuroSpin. Cette première expérience a valeur de test et de démonstration, d'où le choix de ce légume aux caractéristiques rappelant celles d'un cerveau (diamètre, structure interne complexe, richesse en eau). À terme, c'est bien l'organe humain qui sera « photographié », avec une résolution de l'ordre de 0,1 à 0,2 mm, correspondant à un gain de signal « utile » de l'ordre de 10 par rapport aux IRM à 3T couramment utilisés dans les hôpitaux.

### Achever les derniers réglages

À ces échelles, les chercheurs pourront par exemple mieux « voir » le réseau des fibres de matière blanche (qui permettent le transport des informations d'un point à l'autre du cerveau), tout comme les diffé-

rentes couches composant le cortex, ou des zones très enfouies telles l'hippocampe ; ou encore s'intéresser à d'autres éléments que l'hydrogène de l'eau, comme le sodium (marqueur de l'équilibre cellulaire), le phosphore (marqueur du métabolisme énergétique) ou le lithium, utilisé dans le traitement des troubles bipolaires. « *C'est toute l'anatomie du cerveau que nous allons mieux comprendre, mais aussi son fonctionnement dans des tâches cognitives ou des pathologies, les plus étudiées à NeuroSpin étant les maladies neurodégénératives (Alzheimer, Parkinson) et les troubles psychiques* », explique Cécile Lerman, cheffe du projet Iseult à NeuroSpin. À la clé : des applications cliniques majeures attendues dans l'amélioration et la personnalisation des traitements, la détection précoce de pathologies, etc.

D'ici là, l'équipe doit encore achever les derniers ajustements, à la fois sur l'imagerie (clarté, résolution) et sur l'appareil. Par exemple au niveau de l'antenne, dispositif placé autour de la tête du patient, qui envoie les ondes radio vers le cerveau et capte en retour le signal émis par les tissus. Et enfin, obtenir l'approbation des autorités sanitaires avant de passer aux examens sur l'humain. ●

### FOCUS

## Collaboration franco-allemande pour mégaprojet

Le projet Iseult est le fruit d'une collaboration initiée en 2006 par le CEA et aujourd'hui pilotée par ses instituts Joliot et Irfu, associant des partenaires industriels (Siemens Healthineers, Bruker BioSpin, Alstom – intégré depuis à General Electric –, Guerbet) ainsi que l'université de Fribourg. Le cœur de cet IRM unique au monde est un aimant exceptionnel, par ses dimensions impressionnantes, ses performances d'homogénéité du champ magnétique et de stabilité temporelle, et sa conception très innovante.



#### CEA-Joliot

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

#### CEA-Irfu

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

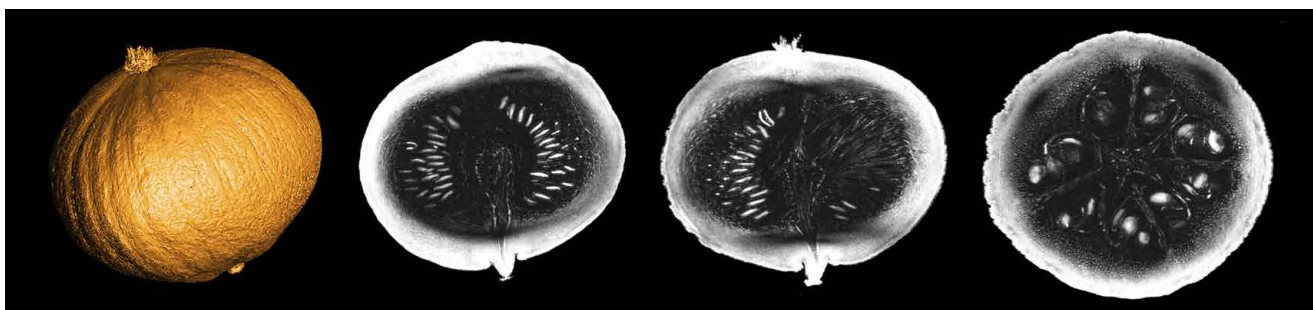
#### NeuroSpin

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



#### CI-dessous

Images du potimarron réalisées  
à partir de l'IRM 11,7 T du projet Iseult.  
Résolution de 400 microns.



## SYSTÈMES COMPLEXES

# La prouesse de la modélisation du climat



**Dès les années 1960, un modèle adapté des premières modélisations de prévision météorologique montrait que la planète allait se réchauffer. La simulation de cette machine complexe qu'est le climat est aujourd'hui saluée par l'attribution du prix Nobel de physique 2021.**

PAR BÉRÉNICE ROBERT

Le 5 octobre dernier, trois scientifiques se voyaient distingués par l'Académie des Nobels : l'Américano-Japonais Syukuro Manabe et l'Allemand Klaus Hasselmann, tous deux spécialistes de la modélisation physique du changement climatique, et l'Italien Giorgio Parisi, théoricien des systèmes complexes (voir focus). Qu'en est-il ? Venkatramani Balaji, climatologue du CEA au LSCE, qui a côtoyé Syukuro Manabe pendant près de 25 ans, explique : « *Manabe a eu l'idée d'utiliser un modèle de circulation générale de l'atmosphère, développé initialement pour la prévision de la météo, et de le coupler à une modélisation océanique pour réaliser un premier modèle simplifié du climat. En le faisant "tourner" jusqu'à l'équilibre et en doublant arbitrairement le paramètre de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub>, il a pu établir, en 1967, que la planète allait se réchauffer du fait de l'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub>. En 1975, il a confirmé cette conséquence avec la version 3D de son modèle.* »

C'est ici que l'apport du deuxième lauréat entre en jeu. Car toute la difficulté fut de pouvoir attribuer ce réchauffement aux émissions d'origine anthropique. « *Hassel-*

*man a joué un rôle pionnier dans ce domaine, poursuit le climatologue, en parvenant à extraire le signal du changement climatique dû aux émissions anthropiques de toutes les variabilités naturelles* ». C'est ce qui fait, selon lui « *la beauté d'un modèle : nous pouvons créer des planètes contrefactuelles, c'est-à-dire qui n'existent pas, sur lesquelles la révolution industrielle n'a pas eu lieu, et comparer ce climat préindustriel au nôtre* ».

## Étudier le passé pour mieux comprendre l'avenir

Cet aspect de la climatologie qu'est la modélisation globale du climat est l'un des domaines de recherche majeurs du LSCE. « *Depuis trente ans, nous travaillons sur ce sujet, dans la droite ligne des recherches initiées par Syukuro Manabe avec ce premier modèle de climat couplant les circulations de l'atmosphère et des océans* », raconte Sylvie Joussaume, spécialiste de la modélisation des climats au LSCE, qui est l'un des coordinateurs du projet international de comparaison des modèles sur les climats du passé. Appelé PMIP et « *soutenu dès son démarrage par Manabe* », ce projet a été lancé il y a 30 ans et en est aujourd'hui à sa quatrième phase. Son objectif : combiner des simulations de climats-clés du passé et en analyser les différences par rapport au climat actuel. Cela permet, en plus de mieux comprendre les changements en cours, d'évaluer les modèles climatiques déjà utilisés. « *PMIP a plusieurs simulations phares à son actif, dont en particulier celle du climat du dernier maximum glaciaire dont Manabe a été un pionnier* », indique la climatologue. Par ailleurs, les travaux



## Page de droite

Simulation de 1000 étés les plus chauds respectant les configurations météorologiques observées (boîtes bleues), et simulation de 1000 étés les plus chauds dont les configurations météorologiques conduisent aux plus fortes températures possibles (boîtes rouges). L'été le plus chaud possible n'a donc pas encore été observé.

## LEXIQUE

### Modèle à l'équilibre

Modèle climatique dont la température moyenne globale obtenue se stabilise, c'est-à-dire ne tendant ni vers un réchauffement ni vers un refroidissement de la planète.

### Dernier maximum glaciaire

Période (- 21 000 ans) au cours de laquelle le froid a atteint son ampleur maximale. Marqué par une extension extrême des calottes de glace et par un niveau minimal des mers, le climat était plus froid d'environ 5°C par rapport à aujourd'hui.

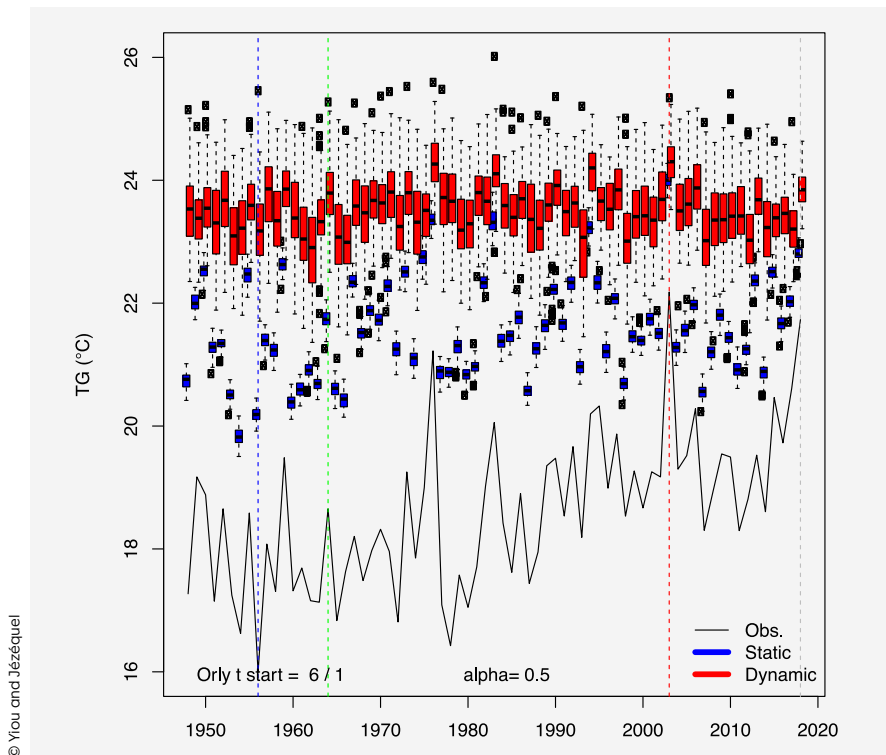
### Stochastique

Se dit d'un phénomène qui, partiellement, relève du hasard et de l'aléatoire et fait l'objet d'une analyse statistique.



## LSCE

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



**« Depuis trente ans, nous travaillons sur ce sujet, dans la droite ligne des recherches initiées par Syukuro Manabe avec ce premier modèle de climat couplant les circulations de l'atmosphère et des océans. »**

**Sylvie Joussaume,**  
spécialiste de la modélisation  
des climats au LSCE

récompensés sont à l'origine d'une nouvelle discipline que Pascal Yiou, spécialiste des événements climatiques extrêmes du LSCE, explore depuis une quinzaine d'années avec son équipe. « Nos recherches forment une sorte de synthèse des travaux des trois

lauréats du prix Nobel de physique. Elles allient la modélisation physique du climat de Manabe, les modèles stochastiques de Haselmann, mais aussi les systèmes chaotiques de Parisi. » En effet, note-t-il, « une propriété fondamentale des systèmes déterministes chaotiques est de pouvoir leur associer une densité de probabilités. Et il se trouve que les outils de modélisation statistiques fonctionnent étonnamment bien pour des systèmes chaotiques comme le climat ».

#### Événements climatiques extrêmes et nouvelle climatologie statistique

Grâce à cette combinaison de techniques, Pascal Yiou et son équipe ont élaboré de nouvelles méthodes d'attribution d'événements climatiques extrêmes aux émissions d'origine anthropique. Elles sont désormais partagées par la Convention de service climatique, qui vise à diffuser données et méthodologies aux industriels et décideurs pour les aider à interpréter les projections climatiques, les événements extrêmes et les contributions nationales aux réductions d'émissions. Pour lui, ce prix signe ainsi « une reconnaissance internationale de la nouvelle discipline qu'est la climatologie statistique ». ●

#### FOCUS

### La physique des systèmes complexes

Prenez un système complexe comme un verre de spin, alliage métallique intégrant un certain nombre d'impuretés réparties au hasard. Un grand nombre d'agents (les spins) interagissent de manière désordonnée et il existe de ce fait un très grand nombre de configurations possibles qui sont presque optimales et peuvent avoir des propriétés physiques différentes. Mais que se passe-t-il si l'on perturbe légèrement le système ?

C'est en cherchant à répondre à cette question que Giorgio Parisi a proposé, entre 1979 et 1983, une solution mathématique d'un modèle de verre de spin très célèbre (modèle de Sherrington-Kirkpatrick). « Avec sa méthode de brisure de symétrie des répliques, Parisi part de l'hypothèse que plusieurs répliques d'un même système désordonné évoluent toutes différemment, mais avec une similarité structurée de manière hiérarchique. Dans un éclair de créativité extrême, il a eu l'intuition de cette solution qui permet désormais de comprendre et d'appréhender le comportement de ces systèmes complexes désordonnés », explique Pierfrancesco Urbani, physicien théoricien au CEA-IPhT, par ailleurs ancien doctorant de Parisi.

Créée avec une mathématique complètement inédite, cette solution a marqué le début d'une discipline, la physique des systèmes complexes. Elle a produit des ramifications dans de nombreux domaines, comme l'algorithmique, les réseaux de neurones ou même la climatologie.



CEA-IPhT

Institut de physique théorique (Saclay).

CHIMIE VERTE

# De nouveaux catalyseurs à l'honneur



« Les organo-catalyseurs étaient déjà connus, mais les lauréats ont eu l'idée de les utiliser en "synthèse asymétrique", c'est-à-dire pour ne fabriquer qu'une seule forme d'une molécule. »

**Davide Audisio**, chef du laboratoire de marquage au carbone 14 du CEA-Joliot



© Edmond Gravel/CEA



#### À droite

Formes gauche et droite de la molécule de limonène, images l'une de l'autre dans un miroir ; à l'instar de la forme de nos mains qui diffèrent lorsqu'on les superpose.



**CEA-Joliot**

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

**Pour fabriquer des molécules d'intérêt biologique, les industriels ont besoin de catalyseurs, des « boosters » de réactions chimiques. Le prix Nobel de chimie 2021 est décerné à deux chercheurs ayant développé une nouvelle famille, les organocatalyseurs « asymétriques », qui présentent bien des intérêts en termes d'économie de ressources et d'impact environnemental.**

PAR CÉCILE MICHAUT

Après un duo de chercheuses en 2020, l'Académie Nobel met à l'honneur en 2021 un duo de chercheurs, l'Allemand Benjamin List de l'institut Max Planck (Allemagne) et l'Écossais David MacMillan de l'université de Princeton (États-Unis).

Comme l'an dernier, ce prix récompense la conception d'un formidable outil pour les scientifiques. Tous deux ont ainsi découvert, indépendamment, une nouvelle manière de synthétiser des molécules asymétriques, très utilisées dans l'industrie pharmaceutique.

# « Une synthèse classique produit un mélange équilibré des deux énantiomères. Il est nécessaire de séparer les deux formes jumelles pour ne conserver que la plus intéressante. »

Davide Audisio

## Deux formes et deux effets d'une même molécule

Également dites « chirales », ces molécules asymétriques existent sous deux formes différentes, un peu comme nos mains qui diffèrent lorsqu'on les superpose. Très semblables chimiquement, leurs deux formes (appelées énantiomères) peuvent cependant avoir des caractéristiques très différentes.

Par exemple, les acides aminés constituant les protéines n'existent que sous la forme « gauche » ; tandis que les sucres, par exemple présents dans l'ADN, sont uniquement de forme « droite ». Dans le cas de la molécule du limonène, l'une exhale une puissante odeur d'orange, l'autre évoquant plutôt le pin ou la térébenthine. Plus grave, l'exemple du thalidomide : cet antinauséux utilisé par les femmes enceintes dans les années 1960 s'est révélé toxique pour les fœtus et de nombreux enfants sont nés avec de graves malformations. En cause, la forme « gauche » de la molécule.

## Savoir ne fabriquer qu'une seule de ces formes

Fabriquer uniquement la forme active des molécules chirales est ainsi devenu crucial pour l'industrie pharmaceutique. « Une synthèse classique produit un mélange équilibré des deux énantiomères, ce qui est un gaspillage de ressources. Par ailleurs, il est nécessaire de séparer les deux formes jumelles pour ne conserver que la plus intéressante », indique Davide Audisio, chef du laboratoire de marquage au carbone 14 au CEA-Joliot.

Pour cela, il est indispensable d'utiliser un catalyseur, c'est-à-dire une substance qui favorise une réaction chimique sans être elle-même consommée. Jusqu'à présent, deux familles de catalyseurs asymétriques existaient : métalliques et enzymatiques. Les métaux sont fragiles, parfois toxiques, et coûtent souvent cher ; tandis que les enzymes sont des molécules complexes utilisables seulement dans des conditions de température compatibles avec la vie.

## Ruée vers l'or des organocatalyseurs asymétriques

Dans les années 2000, les lauréats ont identifié une propriété des organocatalyseurs (molécules organiques, c'est-à-dire contenant du carbone, de l'oxygène, de l'azote et de l'hydrogène) très simples et pourtant incroyablement efficaces (*voir focus*). « Les organocatalyseurs étaient déjà connus, indique Davide Audisio, mais les lauréats ont eu l'idée de les utiliser en "synthèse asymétrique", c'est-à-dire pour ne fabriquer qu'une seule forme d'une molécule. Ils sont aujourd'hui utilisés en routine dans les laboratoires. » Et depuis, c'est la « ruée vers l'or » selon les termes du comité Nobel.

## Intérêt pour l'industrie et la chimie verte

Il faut en effet se rendre compte de l'énorme difficulté que constitue la synthèse de molécules complexes. Par exemple, la strychnine, poison bien connu des lecteurs d'Agatha Christie, est extraite d'un arbre. Sa synthèse classique nécessite 29 étapes de réactions chimiques, chacune pouvant durer jusqu'à plusieurs jours. L'utilisation d'un organocatalyseur permet de réduire le nombre d'étapes à 12, tout en multipliant le rendement par 7 000.

Ils sont, dès lors, devenus incontournables dans la pharmacie, l'agrochimie, l'univers des cosmétiques. Et les scientifiques rivalisent d'ingéniosité pour les optimiser dans une approche de chimie verte. Par exemple, l'équipe d'Éric Doris, chercheur au service de chimie bio-organique et de marquage du CEA-Joliot, travaille à fixer ce catalyseur sur un support solide afin de pouvoir le récupérer facilement et ainsi le réutiliser. « Il s'agit de le rendre insoluble dans le milieu réactionnel en le greffant à des nanotubes de carbone, ce qui permet de le recycler tout en préservant ses propriétés », explique-t-il. ●

## FOCUS

### La découverte des organocatalyseurs asymétriques

C'est par des approches différentes que Benjamin List et David MacMillan sont parvenus à découvrir que des organocatalyseurs permettaient de ne fabriquer qu'une seule des deux formes d'une molécule chirale.

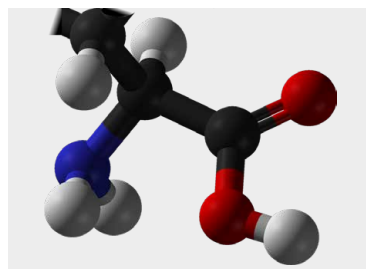
Benjamin List travaillait sur des enzymes. Au sein de ces molécules, très grosses et très complexes, seule une petite zone (le site actif) catalyse les réactions. Il s'est demandé si l'action catalytique demeurerait s'il ne gardait qu'une partie de ce site actif. Dans l'enzyme qu'il étudiait, ce site actif incorporait un acide aminé clé, la proline. Et elle s'est avérée un très bon organocatalyseur asymétrique.

De son côté, David MacMillan travaillait sur les catalyseurs à base de métal, mais ceux-ci étaient trop fragiles et se dégradent rapidement en présence d'oxygène ou d'humidité. D'où son recours à des molécules organiques, qu'il a soigneusement sélectionnées puis testées avec succès.



#### Ci-dessous

Représentation de l'acide aminé proline.



# PHOTOVOLTAÏQUE

## Des voiles solaires pour l'espace

**Les premières voiles solaires européennes viennent d'être conçues pour alimenter en énergie satellites et autres objets spatiaux. Une solution innovante dans un monde en pleine mutation, celui de l'espace.**

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Dans le paysage industriel de l'espace, la révolution Internet et l'arrivée des Gafam bousculent tous les codes établis. « Ces nouveaux entrants innovent, travaillent à bas coût, multiplient les projets de constellation de minisatellites et gagnent des marchés », analyse Delphine Cherpin, du CEA-Liten. Ils imposent au passage aux acteurs historiques, États et grandes agences publiques, de s'adapter à ces nouveaux usages. Cette évolution va de pair avec une augmentation croissante des besoins en énergie des objets de l'espace (satellites, stations, télescopes, etc.), classiquement fournie par des panneaux photovoltaïques (PV). Une question se pose alors : sachant que le volume des lanceurs spatiaux reste restreint, comment répondre à cette demande de puissance électrique supplémentaire sans accroître le nombre, la masse ou le volume de ces panneaux ?

### Deux démonstrateurs

La piste la plus prometteuse est celle des modules fins et flexibles. Plus légers, ils per-

mettent une augmentation de la puissance en watt par kg ou par m<sup>3</sup>. Les Américains ont déjà testé le concept sur au moins deux missions (2011 et 2017). L'Europe spatiale a de son côté lancé le projet Alfama (voir focus), auquel contribue le CEA-Liten. « Nous nous concentrons sur la conception des architectures PV minces et flexibles et sur leurs procédés de fabrication, en nous inspirant des méthodes éprouvées du PV terrestre, 300 à 500 fois moins chères », explique Delphine Cherpin. Un casse-tête scientifique et technique qui consiste à sélectionner de nouveaux matériaux souples et résistants au vide, aux cycles thermiques, aux irradiations, etc., à redéfinir leur empilement dans le panneau, puis à adapter l'assemblage par lamination à ces nouvelles configurations. « Nous venons d'achever la réalisation de deux démonstrateurs de moins de 1 mm d'épaisseur et de grande taille, entre 3 et 5 m<sup>2</sup> », annonce Romain Cariou, chef du projet Alfama au CEA-Liten. Le premier a passé avec succès un test de vibration simulant l'environnement d'un lanceur spatial, au Centre européen de recherche et de technologie spatiales. Le second sera prochainement couplé avec le mécanisme télescopique développé par Airbus Defence and Space pour un test de déploiement. Les prototypes sont désormais entre les mains d'Airbus DS, qui poursuit les développements en vue de leur intégration dans des systèmes spatiaux. ●

### FOCUS

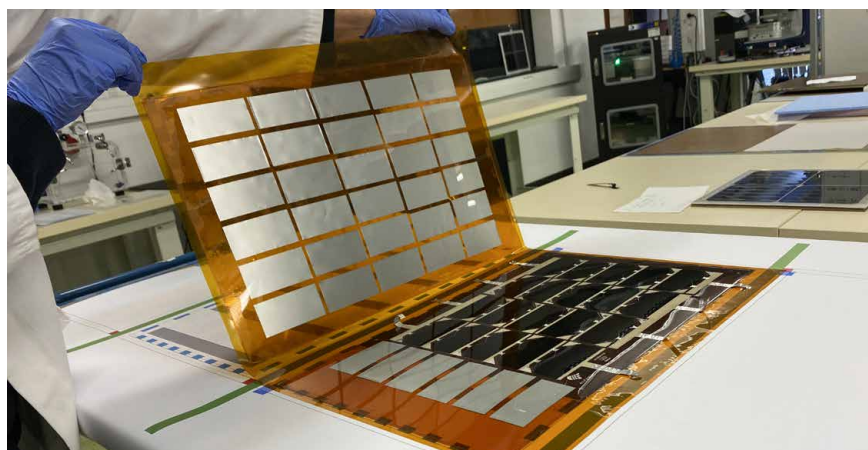
## Le projet européen Alfama

Alfama réunit depuis novembre 2018 huit partenaires issus de trois États-membres de l'UE, leaders dans leur domaine, pour réaliser une technologie de panneaux solaires de rupture, minces et pliables avec des procédés de fabrication à bas coût.

### LEXIQUE

#### Lamination

Procédé consistant à presser, chauffer et faire fondre un empilement de matériaux dans un lamineur.



### ← Ci-contre

Test de pliage d'une partie d'une grande voile solaire (avec des cellules fonctionnelles et factices) réalisée à l'Ines, l'Institut national de l'énergie solaire, piloté par le CEA-Liten.



#### CEA-Liten

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



## SÉCURITÉ ALIMENTAIRE

# Détection express des bactéries

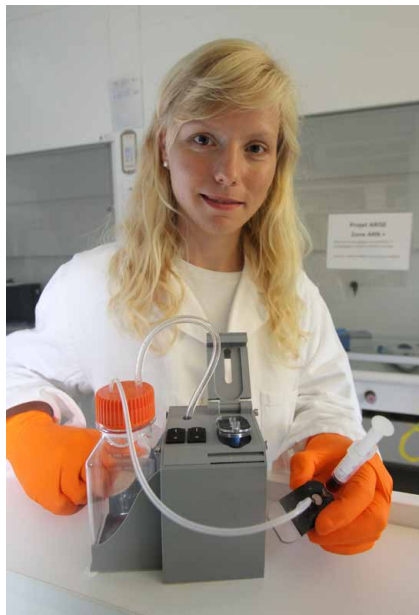
**6 h au lieu de 24 h pour détecter la présence d'éventuelles bactéries pathogènes, c'est le gain de temps que la start-up Direct Analysis propose aux industriels de l'agroalimentaire.**

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Denrées jetées, rappels de produits en urgence, arrêt et nettoyage de chaînes de production, voire intoxications alimentaires... La contamination bactérienne est la bête noire de l'industrie agroalimentaire. Comme le rappelle Thomas Bordy, ex-chercheur au CEA-Leti et cofondateur de Direct Analysis, « il faut environ 24 h pour obtenir le résultat d'un test de détection de bactéries pathogènes dans des aliments par PCR. La méthode standard par culture sur boîte de Petri, la plus utilisée, nécessite quant à elle 48 h à 72 h de traitement ». Des délais bien longs quand il s'agit de gérer des produits frais à durée de vie courte, comme les viandes hachées, les sushis ou les salades composées.

## Mini-laboratoire sur puce

Le test conçu par Direct Analysis change la donne, en fournissant une réponse dans les 6 h. « Notre solution accélère la première phase, celle de la préparation de l'échantillon, qui va du prélèvement à l'extraction des ADN bactériens », détaille l'ingénieur. Le tout tient dans une puce microfluidique, un mini-labo tout en un de la taille d'une carte bleue, dans lequel l'échantillon, déposé, filtré et purifié, va libérer ses ADN bactériens. La mixture est ainsi prête à passer à l'étape suivante : multiplication des ADN par PCR et identification des microorganismes pathogènes. Douze démonstrateurs sont déjà en cours d'évaluation chez de grands acteurs de l'industrie agroalimentaire et fournisseurs de PCR, l'objectif étant de lancer la production industrielle et la commercialisation courant 2022. En ligne de mire, un marché immense : « une grosse usine agroalimentaire réalise entre



© M. Jany/CEA

50 et 250 tests PCR par jour. Au niveau mondial, environ 100 millions de tests sont pratiqués chaque année, avec une progression annuelle de 10 % », précise Thomas Bordy.

## Une solution sans équivalent

L'équipe travaille déjà sur un prototype encore plus avancé, qui permettra de mener l'analyse complète directement sur la carte : extraction d'ADN, mais aussi PCR et lecture du résultat grâce à un petit appareil portable d'imagerie sans lentille. Complètement mobile, il pourrait être déployé à n'importe quel endroit d'une chaîne de production. « Notre solution, née au sein de la branche santé du CEA-Leti, est à ce jour sans équivalent dans le monde. Elle est la plus simple, la plus rapide, la moins chère et répond aux normes internationales de sensibilité », énonce Thomas Bordy. Une prouesse rendue possible « grâce à la magie de ce département du Leti dans lequel chimistes, physiciens, opticiens, biologistes, informaticiens, etc. travaillent ensemble pour imaginer des concepts de rupture ». ●

## LEXIQUE

### PCR

*Polymerase Chain Reaction* (réaction de polymérisation en chaîne). La présence d'une bactérie est ici détectée par multiplication de son matériel génétique (ADN).

### Microfluidique

Technologie permettant la fabrication de dispositifs manipulant de très petites quantités de liquide dans des microvolumes.

### Imagerie sans lentille

Microscope sans optique conçu par le CEA-Leti (voir *Les défis du CEA n° 242*).



### Ci-contre

Dispositif de Direct Analysis pour la recherche de bactéries pathogènes dans des produits alimentaires. À droite, la puce microfluidique.



### CEA-Leti

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

# EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

# Réseaux de chaleur optimisés

**Comment régler le plus finement possible la conduite des réseaux de chaleur pour leur optimisation énergétique ? Le CEA y contribue avec sa suite logicielle DistrictLab-H™.**

PAR AUDE GANIER

La conduite des réseaux de chaleur n'est pas une mince affaire. Il faut déjà gérer les pertes en ligne : selon la distance qui sépare les différents usagers de l'unité de production, la chaleur peut voyager entre 10 minutes et 6 heures au sein des réseaux. Ces derniers doivent par ailleurs intégrer de plus en plus d'énergies renouvelables et de récupération (chaleur issue de la cogénération de la biomasse, de la géothermie ou récupérée d'incinérateurs d'ordures ménagères). Comment, dès lors, anticiper à chaque instant le choix de la température du fluide caloporteur circulant dans les canalisations ? La problématique confiée au CEA-Liten par la Compagnie de chauffage de Grenoble (CCIAG) et par le groupe UEM de Metz a aujourd'hui sa solution.

« L'enjeu est d'avoir le bon niveau de température pour satisfaire la demande des clients. Si elle est insuffisante, cela génère de l'inconfort thermique, si elle est excessive, elle est gaspillée », expose Roland Bavière, ingénieur au CEA-Liten qui a développé la suite logicielle DistrictLab-H™.

### Le 3 en 1 : simuler, prévoir et optimiser les réseaux

Constitué de deux modules logiciels interopérables, DistrictLab-H™ propose un jumeau numérique du réseau, qui en modélise le comportement thermohydraulique. « Cette option nous permet de réaliser des études amont de dimensionnement que nous ne pouvions réaliser auparavant », indique Loïc Giraud de la CCIAG.

Deuxième fonction : l'anticipation de la consommation nécessaire, à partir d'historiques de données des usagers et de capteurs dans les canalisations, qui permettent

à des algorithmes d'apprentissage profond de fournir des modèles de prévision, lesquels s'autoalimentent en données météorologiques.

Enfin, installé en salle de commande, le logiciel aide au pilotage du réseau grâce au calcul en temps réel de plans de production et de distribution optimisés.

### Des gains énergétiques, économiques et environnementaux

Les opérateurs ont financé la R&D sur DistrictLab-H™ dont ils détiennent un droit d'exploitation. Quant à Roland Bavière, il travaille à présent au montage d'une start-up afin de commercialiser la suite logicielle. « Ses bénéfices sont multiples avec des gains énergétiques à la clé, car nous avons pu réduire la quantité d'énergie injectée dans le réseau, occasionnant de fait des gains économiques et environnementaux, en réduisant notamment le recours aux énergies fossiles », indique-t-il. ●



#### CEA-Liten

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



#### Ci-dessous

Au cœur du réseau de chaleur expérimental du CEA-Liten.





© Fotolia

## CLIMAT

## Ça repart à la hausse

**Fin septembre 2021, les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> retrouvaient peu ou prou leur niveau de septembre 2019...**

PAR AUDE GANIER

Le *Carbon Monitor*, initiative de recherche internationale lancée pendant la pandémie à laquelle participe le LSCE, livre ses conclusions : avec le rebond de l'activité économique et malgré des disparités à travers le monde, la diminution des émissions mondiales liée à la pandémie s'avère terminée. Selon elle, la Chine, l'Inde, la Russie et le Brésil ont vu leurs émissions de CO<sub>2</sub> augmenter de 2 à 9 % par rapport à 2019. En revanche, en Europe et aux États-Unis, elles restent inférieures de 4,7 à 3,8 %.

La consommation d'énergie en 2021 ayant augmenté trop vite, les mesures de relance pour augmenter la part des énergies renouvelables n'ont pas eu le temps de porter leurs fruits. Au cours des neuf derniers mois, l'empreinte carbone de la production électrique a augmenté de 3,2 % par rapport à la même période en 2020, du fait notamment de la hausse du prix du gaz entraînant celle de la consommation de charbon.

« À l'avenir, pour parvenir à faire baisser les émissions de CO<sub>2</sub>, indique Philippe Ciaï, codirecteur du projet *Carbon Monitor* au CEA, il faudra satisfaire toute nouvelle demande par des sources non fossiles ». ●



LSCE

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

CEA-List

Laboratoire des systèmes numériques intelligents (Saclay).

## CONTRÔLE INDUSTRIEL

# Imageur 4D pour traquer les défauts

**Avec les nouveaux algorithmes du CEA-List, le procédé de contrôle non destructif accède pour la première fois à la reconstruction de pièces en 3 dimensions et en temps réel.**

PAR CLOTHILDE WALTZ

Nucléaire, automobile, pétrolier... Le procédé de contrôle non destructif (CND) est utilisé dans de nombreux domaines industriels pour inspecter des pièces sans les altérer. Si les signaux acquis permettent la reconstruction d'images en 2D en temps réel, l'équivalent en 3D est beaucoup plus complexe. Pour cause, cela nécessite un très grand nombre de signaux et une puissance de calcul impossible à embarquer dans les dispositifs d'inspection actuels. Pourtant, le CEA-List a relevé ce défi scientifique et technique.

Les chercheurs ont développé de nouveaux algorithmes afin de réduire au

maximum le nombre d'opérations de calcul nécessaires. Ils ont ainsi réalisé un prototype d'imageur 4D (qui est la 3D avec temps réel). Il a été testé et validé avec succès sur des défauts artificiels (fissures, porosités, etc.) réalisés par fabrication additive dans des blocs d'acier sur la plateforme *Additive Factory Hub*. Il a même atteint des performances inédites en visualisant des porosités de 0,6 mm de diamètre, et en les localisant avec une précision de l'ordre du dixième de millimètre.

Pour monter en maturité et pouvoir envisager un transfert technologique, les chercheurs s'appliquent aujourd'hui à augmenter les performances et diminuer les temps de calcul de ces nouvelles méthodes d'imagerie, sans perte de qualité. ●



Ci-dessous

Recherches en contrôle non destructif.



© CEA-List

## INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

# Speed sécurise la construction des réseaux de neurones

**Les réseaux de neurones artificiels ne cessent de s'améliorer et de fournir de nouveaux services.**

**Pour les construire, la mise**

**en commun de bases de données**

**privées peut s'avérer judicieuse.**

**Mais comment les partager en toute confidentialité ? Grâce à Speed.**

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Dans le vaste monde des intelligences artificielles, les réseaux de neurones sont des dispositifs capables de prendre des décisions : reconnaître un objet dans une image, identifier un visage, déterminer si un réseau informatique est dans une situation de cyberattaque ou en fonctionnement normal, etc., sous réserve d'avoir au préalable appris à réaliser ces tâches en s'entraînant sur des milliers de cas. À la manière d'un cerveau, ces réseaux sauront par exemple reconnaître un chat après avoir analysé des milliers de photos de chats. « Parfois, pour construire un système d'intelligence artificielle plus performant, il est nécessaire de mettre en commun plusieurs bases de données privées, détenues par exemple par des industriels, des groupes hospitaliers, etc. », explique Renaud Sirdey, directeur de recherche au CEA-List. Mais ce procédé d'apprentissage collaboratif, qui repose sur le « prêt » de données, ne doit pas se faire à n'importe quelle condition : confidentialité oblige, leur contenu doit absolument rester inaccessible.

## Cryptographie homomorphe...

« Speed résout ce problème en déployant des contremesures, et ce avec un surcoût en

calcul acceptable », annonce Renaud Sirdey. C'est une première ». Car l'une des failles potentielles du processus d'apprentissage collaboratif, c'est le serveur d'agrégation. Cette unité centrale, plaque tournante de toutes les données, est aussi un point de vulnérabilité, ouvrant la porte à un risque d'interception des données par des tiers malveillants. Une menace inacceptable. « Speed permet de faire travailler le serveur en aveugle, sans qu'il voie le contenu des données manipulées, celles-ci ayant été au préalable chiffrées par des techniques de cryptographie homomorphe développées au List. En réalité, la solution est un peu plus subtile, puisque ce ne sont pas les données d'apprentissage elles-mêmes qui sont chiffrées, mais un produit dérivé. »

## ... et confidentialité différentielle

Mais l'affaire ne s'arrête pas là. Un cyber-attaquant pourrait tout aussi bien, à partir d'un réseau de neurones déployé, remonter aux données d'apprentissage et les subtiliser. Histoire de brouiller les pistes, Speed intègre donc un procédé de « confidentialité différentielle » : il ajoute aux données un « bruit de fond », rendant ce type d'attaque, dite « par inversion de modèle », inopérant. « Indice de confiance supplémentaire, chaque fournisseur de données ajoute son propre bruit », souligne l'expert.

La preuve de concept désormais fournie, l'équipe travaille aujourd'hui à construire un prototype en vraie grandeur, en collaboration avec des industriels et des institutions. Avant d'envisager, *in fine*, un transfert technologique. ●

**« Pour construire un système d'intelligence artificielle plus performant, il est parfois nécessaire de mettre en commun plusieurs bases de données privées. »**

**Renaud Sirdey**, directeur de recherche au CEA-List

## LEXIQUE

### Réseau de neurones

Système informatique organisé en couches successives de processeurs, capable d'apprendre une tâche. S'inspirant du fonctionnement des neurones du cerveau, chaque groupe de processeurs reçoit les données produites par le groupe précédent.

### Cryptographie homomorphe

Technique qui élimine toute possibilité d'interception de données en clair.



**CEA-List**

Laboratoire des systèmes numériques intelligents (Saclay).

# MAKING-OF COULISSES D'UN PROJET

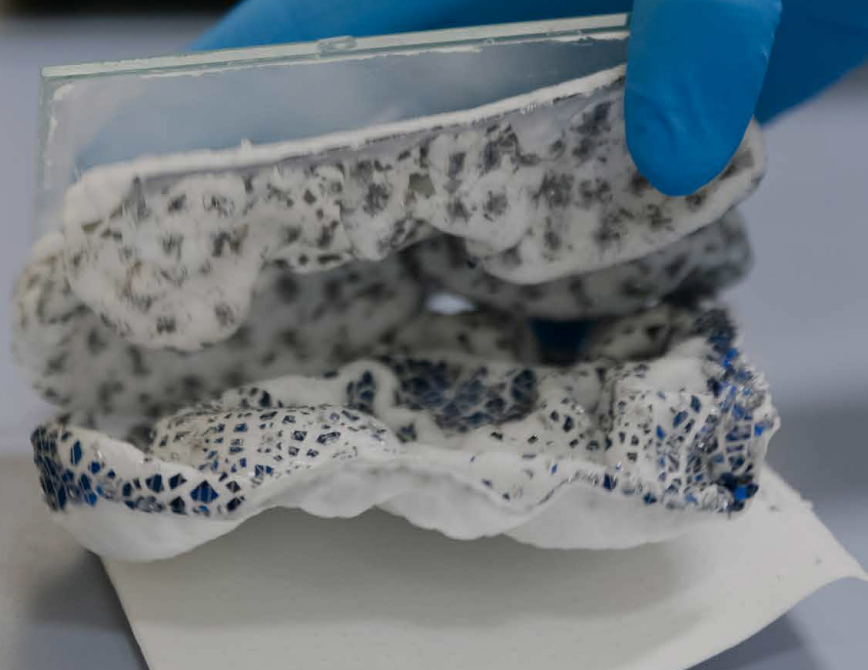
## Séparer pour mieux recycler

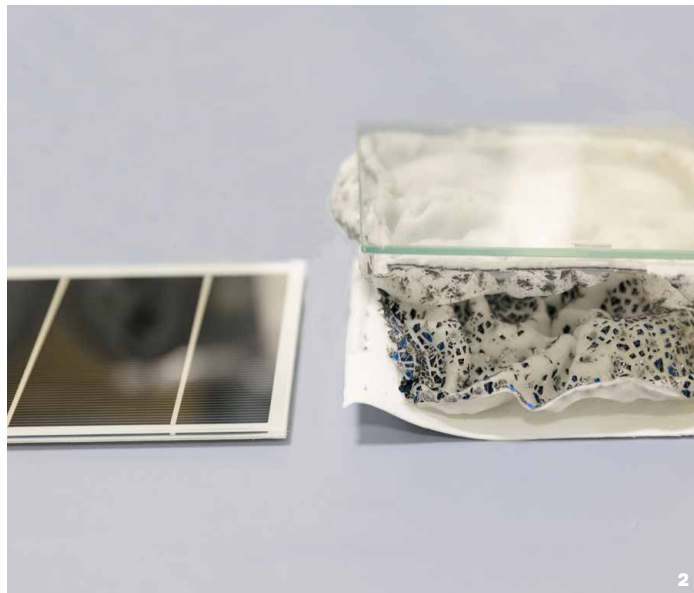
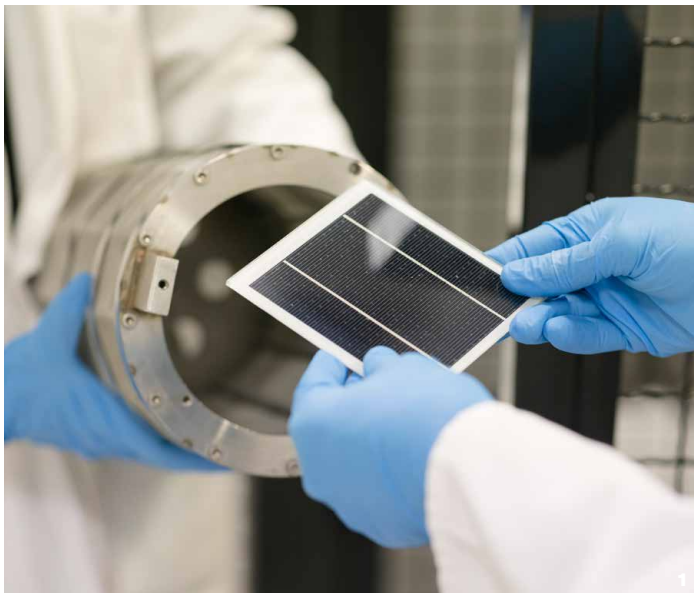
En 2050, la capacité des installations de panneaux solaires photovoltaïques (PV) pourrait atteindre 8 500 gigawatts dans le monde. Composés de métaux critiques (silicium, argent, cuivre) dont l'Europe ne maîtrise pas la production, et avec une durée de vie n'excédant pas trente ans, le recyclage de leurs modules s'avère indispensable. D'autant que ces métaux constituent une ressource ainsi qu'une solution pour répondre à la demande croissante de panneaux PV.

C'est tout l'enjeu du projet européen Photorama que de mettre au point des procédés innovants de recyclage.

Il s'agit de parvenir à séparer les éléments constituant les modules PV afin de les valoriser dans une logique d'économie circulaire. Dans cette optique, le CEA-Isec étudie un procédé de « délamination » par CO<sub>2</sub> supercritique. →

REPORTAGE RÉALISÉ  
PAR ÉMILIE PAUL (TEXTE)  
ET YANN AUDIC (PHOTOS)





### EN IMAGES

① Introduction d'un module PV de 144 cm<sup>2</sup> dans l'autoclave.

② Module avant et après sa délamination.

### FOCUS

#### Photorama

Ces essais ont pour origine des travaux conduits lors d'une thèse au CEA portant précisément sur ce procédé de délamination par CO<sub>2</sub> supercritique. Ils ont donné lieu au projet européen Photorama, lancé en juin 2021 par un consortium de 13 organismes dont le CEA. Objectif : créer en Allemagne une ligne industrielle pilote de recyclage des panneaux solaires photovoltaïques.

Un autre procédé de délamination de ces panneaux, cette fois avec du fil diamanté, est également à l'étude par le CEA-Liten dans le cadre de Photorama.

[www.photorama-project.eu](http://www.photorama-project.eu)



#### CEA-Isec

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

①

## La délamination...

« La délamination garantit une récupération optimale des couches du module photovoltaïque. »

Alexandre Carella, chef de laboratoire

Le module photovoltaïque (PV) d'un panneau est composé de plusieurs couches : verre, cellule PV en silicium encapsulée dans un polymère, et feuille arrière (*backsheet*).

La délamination consiste à séparer les différentes couches du module pour accéder aux éléments d'intérêt à recycler (verre et métaux critiques de la cellule). Elle est effectuée grâce au CO<sub>2</sub> supercritique, état du CO<sub>2</sub> aux propriétés intermédiaires entre liquide et gaz obtenu quand il dépasse son point critique, à 31 °C et 73,8 bars de pression. Ses atouts : une diffusivité importante favorisant sa pénétration dans les solides ; et un faible impact environnemental, car sans recours à des solvants organiques et ne produisant pas d'effluents.

②

## ... par CO<sub>2</sub> supercritique

« Les propriétés du CO<sub>2</sub> supercritique permettent de séparer efficacement et proprement les différentes couches du module photovoltaïque. »

Virginie Basini, cheffe de service

Au sein d'un réacteur, le CO<sub>2</sub> supercritique pénètre la couche du polymère encapsulant la cellule PV en silicium. Une fois le CO<sub>2</sub> suffisamment absorbé, les chercheurs effectuent une dépressurisation. Sous l'effet de ce CO<sub>2</sub> en son sein, le polymère encapsulant se met à gonfler et mousser. Cette déformation entraîne la séparation des différentes couches du module PV qui peuvent ainsi être récupérées individuellement. La déformation est maîtrisée en « jouant » sur différents paramètres, tel que mis en évidence par les différentes études de caractérisation.



3

## Caractérisation

**« De la compréhension des étapes du procédé à petite échelle ressortent plusieurs pistes d'optimisation. »**

Alex Briand, doctorant

Pour comprendre et expliquer les phénomènes à l'œuvre dans le procédé de délamination, l'équipe a développé un dispositif de caractérisation et d'expérimentation *in situ*. Grâce à une caméra couplée à un microscope, le moussage entraînant la séparation des couches du module PV peut être observé à toute petite échelle et en temps réel.

De cela, il en ressort plusieurs pistes d'optimisation. Par exemple, augmenter la vitesse de dépressurisation du CO<sub>2</sub> supercritique pour amplifier les déformations du polymère. Ou encore, perforer le module avant délamination pour améliorer le taux de pénétration du CO<sub>2</sub> supercritique. De même, les paramètres de température et de pression peuvent être affinés.

4

## Échelle industrielle

**« Nous disposons d'outils expérimentaux et de simulation pour étudier la viabilité du procédé à l'échelle industrielle. »**

Antoine Leybros, ingénieur-chercheur

La spécificité du laboratoire est de disposer d'équipements à différentes échelles, allant jusqu'à des réacteurs d'une dizaine de litres. Les chercheurs ont également recours à la simulation numérique pour identifier quel paramètre du procédé est représentatif des changements d'échelles (du laboratoire au semi-industriel). L'objectif ultime est d'utiliser ce modèle, alimenté et validé par les données expérimentales, pour dimensionner un prototype industriel.

Par ailleurs, ils intègrent des études technico-économiques et d'analyse du cycle de vie pour évaluer la viabilité économique et environnementale du procédé lors de toutes les étapes de son développement.

### EN IMAGES

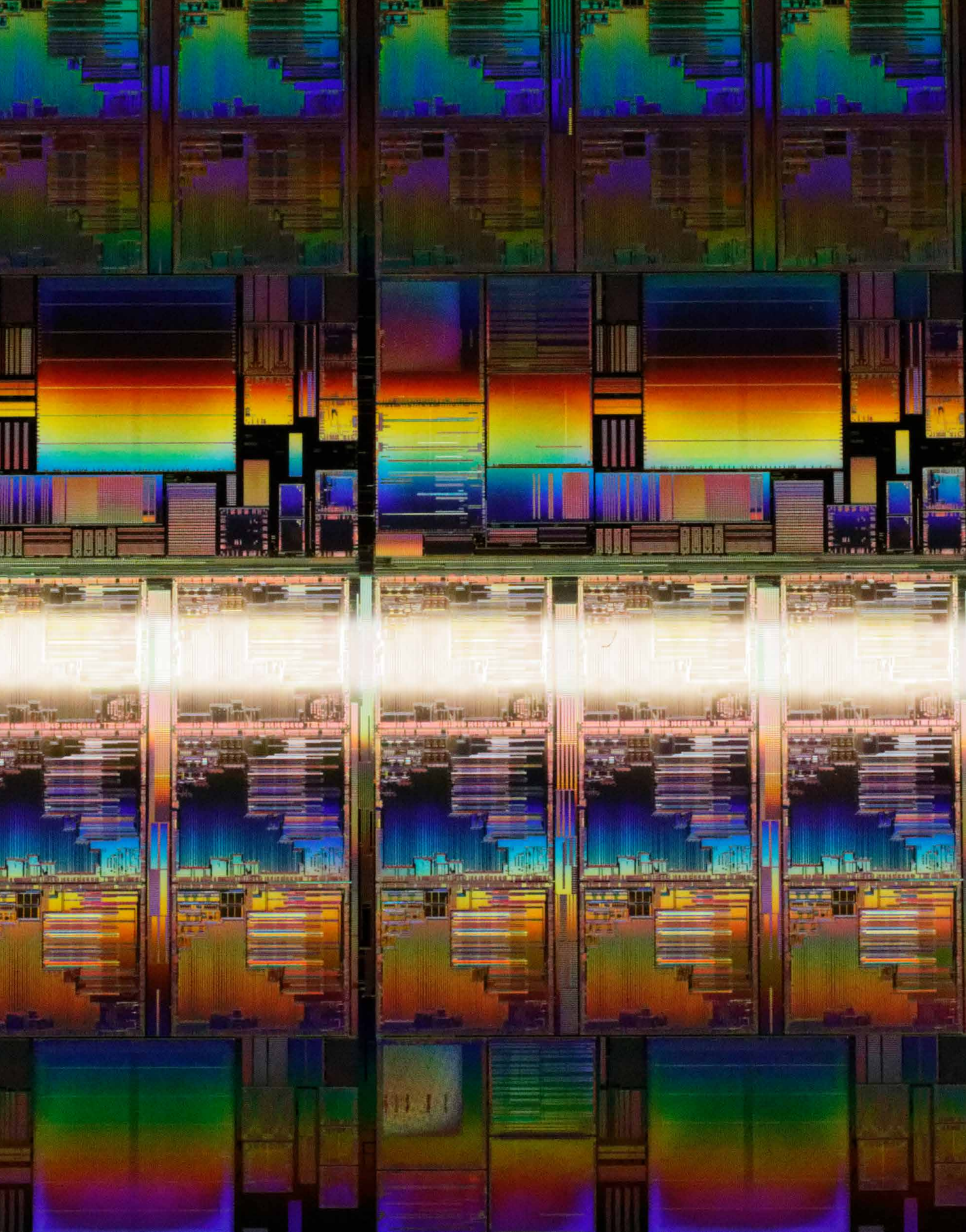
③ Dispositif de caractérisation pour acquérir, traiter et analyser les images de l'avancement du procédé.

④ Réacteur de 12 litres dans lequel est délaminé un module PV de 144 cm<sup>2</sup>.

### FOCUS

#### Le CO<sub>2</sub> supercritique, un fluide multifonctions !

Le premier succès grand public du CO<sub>2</sub> supercritique au CEA date du début du XXI<sup>e</sup> siècle, lorsqu'il a été employé par le chercheur Guy Lumia, pour extraire du liège le trichloroanisole, responsable du goût de bouchon qui pouvait transformer un bon vin en une horrible piquette. Au CEA-Isec, différentes applications possibles du CO<sub>2</sub> supercritique sont expérimentées. Outre la délamination des modules photovoltaïques, on étudie aussi ses capacités d'extraction d'éléments d'intérêt comme les lipides des micro-algues utilisés pour la production de biocarburants, de dépollution et de stérilisation, notamment des masques de protection contre la Covid-19.





**Ci-contre**

Détail d'un wafer  
(plaque de silicium)  
de puces en transistors  
FDSOI.

DOSSIER  
MICROÉLECTRONIQUE

# Souveraineté et frugalité

PAR AUDE GANIER ET VAHÉ TER MINASSIAN

La microélectronique est au cœur du plan France 2030. Objectif : réinjecter de la capacité industrielle en Europe pour faire face à la pénurie de semi-conducteurs et, à terme, garantir son indépendance dans la transformation numérique mondiale. Un enjeu qui mobilise des innovations de rupture et un positionnement différenciant sur les marchés.

Acteur historique de la microélectronique en France, le CEA détient sa feuille de route et met le cap sur la frugalité.



© Fotolia

# Les grands enjeux

**C'est un bon début : le 12 octobre 2021, au moment de la présentation du plan France 2030, Emmanuel Macron a annoncé 6 milliards d'euros d'investissements dans des projets qui offriraient la possibilité, d'ici neuf ans, de doubler la production du pays en matière d'électronique et de sécuriser son approvisionnement en puces.**

En particulier, a-t-il ajouté, les initiatives allant dans le sens des « puces électroniques de plus petites tailles » seraient soutenues. Figurant au milieu d'un discours consacré à la réindustrialisation de la France, la déclaration du chef de l'État n'a pas vraiment surpris les professionnels. Elle s'inscrivait dans la suite logique d'une autre annonce, européenne cette fois. Quelques

mois plus tôt, le 24 juillet, le commissaire Thierry Breton en déplacement à Grenoble où il avait visité le CEA-Leti, avait en effet révélé que Bruxelles s'était fixé comme but d'augmenter la part de l'UE dans le marché des semi-conducteurs, de 10 % à 20 % à l'horizon 2030.

## Des composants omniprésents

Ces vœux seront-ils exaucés ? Ils traduisent, tout au moins, une volonté de la part des pouvoirs publics de reprendre pied dans un secteur délaissé au profit de l'Asie et des États-Unis. Un secteur qui s'est avéré d'importance stratégique au gré des circonstances récentes, et au cœur des grands enjeux de souveraineté des États : l'industrie des semi-conducteurs. Cette dernière est chargée de concevoir, fabriquer et commercialiser les processeurs, les mémoires et d'autres composants souvent à base de silicium présents dans des milliards d'appareils électroniques. Autrement dit, elle produit les fameux circuits électroniques qui équipent les ordinateurs, les voitures, les téléviseurs, les téléphones, les fours et les jouets... c'est-à-dire, à peu de chose près, l'essentiel des objets qui fonctionnent à l'électricité. Longtemps ignorée du public, cette branche ultraspécialisée de la micro-électronique est depuis peu au centre des

préoccupations des décideurs, inquiets de constater son incapacité temporaire à alimenter le marché.

En effet, depuis plusieurs mois, les fabricants peinent à fournir en quantité suffisante les puces nécessaires à tout un pan de l'industrie. Résultat : de nombreuses usines à travers le monde tournent au ralenti ou sont à l'arrêt, notamment dans le domaine de l'automobile dont le manque à gagner s'élèverait pour cette année... à plus de 200 milliards d'euros !

## Une pénurie conjoncturelle ?

Certes, la plupart des experts s'accordent à dire que cette pénurie est conjoncturelle. « Des tensions entre la Chine et les États-Unis, lors de la présidence de Donald Trump, suivies d'une baisse des commandes au moment du confinement, ont vidé les stocks et abaissé la production des "fondeurs" qui fabriquent ces circuits intégrés, principalement aux États-Unis, à Taïwan et en Corée du sud, explique Carlo Reita, responsable des partenariats stratégiques au CEA-Leti. Au moment de la reprise, ces entreprises ont été assaillies de demandes, portant de 4 à 12 mois ou plus le délai des livraisons. Sauf catastrophe géopolitique majeure, un retour à la normale devrait intervenir en 2023. » Mais cette crise, probablement passagère,

## « À la reprise, les entreprises ont été assaillies de demandes, portant de 4 à 12 mois le délai des livraisons. »

Carlo Reita, responsable des partenariats stratégiques au CEA-Leti

en révèle une autre, celle de la dépendance toujours plus grande de continents entiers, dont l'Europe, à des productions extérieures. Son origine est connue. De l'ordre de 450 milliards de dollars en 2020, le marché des semi-conducteurs ne représente qu'une infime partie de celui, tentaculaire et hautement rentable, de l'électronique et du numérique. « Longtemps fluctuant, il était considéré jusqu'à ces derniers événements comme stabilisé, à une croissance de 7% par an. »

### Enjeu de souveraineté

Au cœur de la compétitivité dans ce domaine, se joue notamment la capacité de chacun à graver des quantités astronomiques de transistors de tailles toujours plus réduites, en faisant appel à des machines de photolithographie vendues à des prix phénoménaux, de l'ordre de 100 à 250 millions de dollars l'unité.

Or, compte tenu des investissements considérables nécessaires, beaucoup d'entreprises européennes ont fini par abandonner la fabrication des composants de générations technologiques avancées (ceux des smartphones par exemple) à trois sociétés : TSMC (Taïwan) et Intel (États-Unis) pour les processeurs, et Samsung (Corée du sud) pour les mémoires. Pour autant, elles n'ont pas changé de métier. Certaines ont tout misé sur la conception plutôt que la fabrication, devenant des industries sans usine ou *fabless*. D'autres se sont spécialisées sur la production de composants moins sophistiqués mais à haute valeur ajoutée, comme les capteurs, les microcontrôleurs ou les systèmes de puissance pour l'automobile, l'aéronautique ou l'énergie. Cela fut notamment le cas des deux fleurons européens, le Franco-Italien STMicroelectronics et l'Allemand Infineon. Conséquence de ces choix, à une époque où la question de la souveraineté était moins aigüe : la part de l'Europe dans la production mondiale de puces a chuté en vingt ans de 40 % à

10 % aujourd'hui. Entre-temps, le vieux continent s'est aussi dégagé des marchés pourtant très rentables de la fabrication de téléphones, ordinateurs et autres équipements électroménagers ou d'électronique grand public.

### Des efforts financiers et industriels

Problème : avec l'explosion du numérique, c'est non seulement l'industrie mais toute l'économie qui est devenue dépendante de la fourniture de ces composants de base, constate Thomas Ernst, le directeur scientifique du CEA-Leti. « *Que ces derniers viennent à manquer et c'est l'ensemble du champ de la microélectronique qui sera à l'arrêt, et à travers lui toutes les technologies du monde numérique sur lesquelles se joue la compétition entre les États et les continents, et au bout du compte leur avenir.* » En somme : ce serait le black-out. Reprendre pied dans ce domaine nécessitera de gros efforts financiers. Les sommes à investir sont faramineuses. À elle seule, l'usine de semi-conducteurs qu'est en train de construire TSMC en Arizona va coûter 10 milliards d'euros. Et la prochaine qui sortira de terre à Taïwan, 20 milliards ! Aux États-Unis, ce ne sont pas moins de 50 milliards de dollars que le président Joe Biden a mis sur la table pour sécuriser à court terme les approvisionnements du pays.

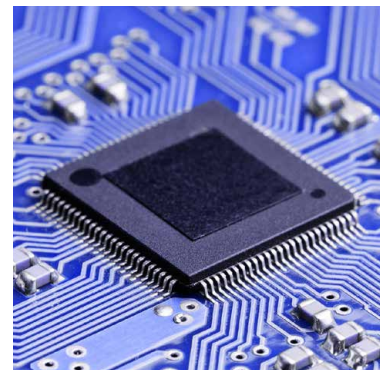
### Poursuivre l'innovation

Pour Thomas Ernst, « *revenir dans la course suppose de rentrer dans une compétition vers la miniaturisation des circuits intégrés où les acteurs ont appris en avançant et où chaque marche est plus haute que la précédente. Maîtriser les procédés de fabrication en masse des composants utilisant les technologies les plus avancées, pour atteindre des taux de rentabilité de l'ordre d'une seule puce défailante sur plusieurs milliards d'unités, suppose un réel savoir-faire. Il ne faut pas seulement réapprendre mais aussi découvrir.* ». La capacité d'innovation sera donc centrale. « *Les technologies développées devront être en mesure de proposer sur le marché des produits avantageux par rapport à ceux de la concurrence* », préconise Jean-René Lèquepeys, directeur adjoint du CEA-Leti. Comment ? Et pourquoi pas en se positionnant, sur un créneau encore insuffisamment exploité : celui des économies d'énergie ? C'est la feuille de route que propose le CEA. ●

### FOCUS

## Le jargon de la microélectronique

Un circuit électronique est un ensemble de composants électroniques interconnectés sur un circuit imprimé (plaque en plastique) dont le but est d'effectuer une tâche ou une application. Ces composants ont des noms génériques : semi-conducteurs, puces ou circuits intégrés. Ils ont surtout des fonctions particulières dans le circuit électronique. Ainsi, les processeurs effectuent les calculs, les mémoires stockent les données nécessaires aux calculs, les accélérateurs effectuent des calculs spécifiques (les processeurs graphiques calculent par exemple les données pour générer des images). Chacun de ces composants est constitué de milliards de transistors, interconnectés entre eux par des « fils » en cuivre, qui véhiculent l'information binaire sous forme de « 0 » et de « 1 ».



© P. Stroppa/CEA



#### Ci-dessus

Processeur sur circuit électronique.



#### Page de gauche

La pénurie actuelle de semi-conducteurs contraint des usines automobiles à tourner au ralenti.

# Pour une microélectronique durable

**La désindustrialisation et les pénuries qui s'en suivent sont autant de contraintes qui dopent l'innovation d'un organisme comme le CEA. Preuve en est, la feuille de route qu'il a présentée lors de la conférence européenne ESSDERC-EESCIRC dédiée aux acteurs du semi-conducteur. Cap donné vers la frugalité microélectronique.**

Nul besoin d'avoir de grandes connaissances en informatique pour le comprendre : l'explosion des technologies du numérique s'est traduite par une hausse considérable des quantités de données en circulation. En dix ans, celles générées par le trafic Internet ont augmenté de plus de 1170% et il en est de même de la téléphonie en croissance... de 20 316% ! Autre constat : la part des informations échangées par les utilisateurs réels au profit des transmissions automatiques entre les appareils électroniques est en chute libre. De 98% en 2010, elle pourrait passer à 10% en 2022, transformant peu à peu le monde du virtuel en une sorte d'agora, pour l'es-

sentiel réservée à des conversations entre machines. C'est le fameux IoT, *Internet of Things*, avec tous ses objets connectés, pour lesquels le CEA réfléchit à leur écoconception dans le cadre du projet *Need for IoT*, cofondé il y a quatre ans avec l'université Grenoble-Alpes.

## Transition énergétique du numérique

Les dizaines de zettaoctets ( $10^{21}$ ) de « 0 » et de « 1 » lancés à travers les circuits intégrés et les réseaux commencent à peser lourdement dans la facture énergétique de la planète. « *Consommant actuellement 4% de la production mondiale d'électricité, le secteur numérique pourrait en avaler jusqu'à 14% en 2030, ce qui ne sera pas neutre en matière d'émissions de gaz à effet de serre* », prévient Jean-René Lèquepeys. Cela, sans même évoquer les conséquences sur l'environnement qu'aurait, à ce niveau, une exploitation anarchique des matières premières nécessaires à l'industrie des semi-conducteurs. En effet, la fabrication d'un circuit intégré fait de nos jours appel à 60 éléments chimiques différents contre une douzaine à peine dans les années 1990.

**« Consommant actuellement 4% de la production mondiale d'électricité, le secteur numérique pourrait en avaler jusqu'à 14% en 2030, ce qui ne sera pas neutre en matière d'émissions de gaz à effet de serre. »**

Jean-René Lèquepeys,  
directeur adjoint du CEA-Leti

À peine 15% d'entre eux sont recyclés. Et certains comme les terres rares, le lithium, le palladium ou le platine ne sont disponibles que dans une poignée de pays (*voir Les défis du CEA n°244*). Un cocktail détonant, annonciateur de nouvelles crises... explosives. Le temps est ainsi venu de revenir à des solutions plus raisonnables en imaginant des technologies avancées qui, à performances égales, seraient moins gourmandes en énergie et en ressources.



## Miniaturiser et embarquer les fonctions-clés

Au sein de la Direction de la recherche technologique du CEA, les scientifiques explorent depuis longtemps plusieurs pistes. Cela leur a notamment permis en 2017 de livrer la technologie FDSOI à haute efficacité énergétique, qui est le second standard mondial du transistor après le FinFET d'Intel. Par ailleurs, un processeur « densifié » étant plus rapide et plus économe en électricité et en matières premières, ils poursuivent dans la voie de la miniaturisation et de l'intégration 3D des circuits intégrés (voir page 22).

Une autre piste repose sur la relocalisation des opérations de calcul et de traitement des données au plus proche du lieu où ces dernières sont générées. Cette approche embarquée offre un gain énergétique certain, en limitant le transport des données vers le *cloud* hébergé dans des *data centers* qui sont parfois situés à des milliers de kilomètres. De plus, elle permet un meilleur service car elle réduit les temps de latence tout en garantissant au citoyen la protection et la confidentialité de ses données.

De façon ultime, certaines équipes explorent aussi la relocalisation du traitement et du stockage au sein d'un même composant : la mémoire (voir page 25).

## Accélérer

Et ce n'est pas tout : pour aller encore plus vite de façon toujours plus économique, des chercheurs envisagent de développer, pour des applications comme l'IA, des accélérateurs dédiés. Fonctionnant un peu à la manière des cartes graphiques dont sont équipés les PC, ces circuits spécialisés seraient chargés de soulager le processeur central de certaines tâches en les réalisant sur l'accélérateur avec une plus grande célérité et, à nouveau, une meilleure efficacité énergétique. D'abord, par des procédés numériques, mais un jour par le recours au calcul quantique. Mais, là, c'est déjà une autre histoire... que commencent également à écrire les chercheurs du CEA. ●



### Page de gauche

Plateforme nanoélectronique 300 mm du CEA-Leti, parmi les cinq meilleures au monde, spécialisée en intégration 3D. C'est là qu'a été développée la technologie FDSOI.

## REPÈRES

# L'empreinte carbone du numérique

Distribution et évolution de la consommation d'énergie finale du numérique par poste pour la **production (45 %)** et l'**utilisation (55 %)**.

### Équipements terminaux 20 % en 2017

+ 10,9 %  
par rapport à 2013

+ 12 % à + 16 %  
projection en 2025  
selon 3 scénarios  
(par rapport à 2017)

### Data centers 19 % en 2017

+ 16,4 %  
par rapport à 2013

+ 21 % à + 30 %  
projection en 2025  
selon 3 scénarios  
(par rapport à 2017)

## 3 000 TWh/an

Consommation d'énergie du numérique en 2017 qui pourrait atteindre 7 300 TWh en 2025.

## + 50 %

Augmentation de la consommation d'énergie du numérique entre 2013 et 2017 alors que la consommation électrique mondiale augmentait de 10 % sur cette même période.

### Production

45 % en 2017  
(ordinateurs 17 %, smartphone 11 %, TV 11 %, autres 6 %)

+ 11 %  
par rapport à 2013

+ 38 % à + 42 %  
projection en 2025  
selon 3 scénarios  
(par rapport à 2017)

### Réseaux

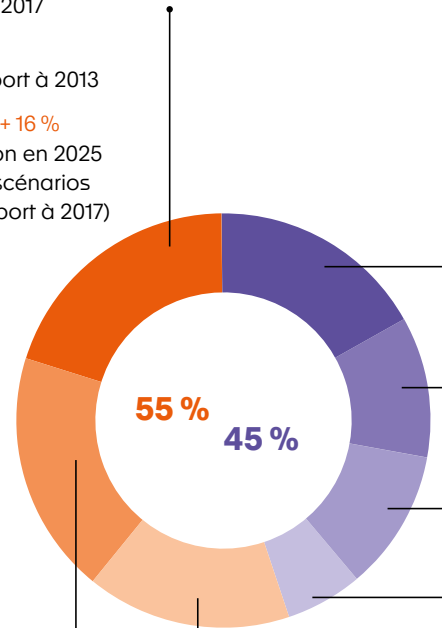
16 % en 2017

+ 2,4 %  
par rapport à 2013

+ 16 % à + 21 %  
projection en 2025  
selon 3 scénarios  
(par rapport à 2017)

## 1,8 GtCO<sub>2</sub>eq

Émissions de CO<sub>2</sub> du secteur numérique en 2017, représentant 3,4 % des émissions mondiales, contre 2 % pour le transport aérien. Elles pourraient atteindre jusqu'à 4,2 GtCO<sub>2</sub>eq, soit 9 % en 2025.





© A. Aubert/CEA

## Vers de nouveaux transistors

**Dans la course à la miniaturisation et au-delà, les chercheurs développent de nouvelles architectures pour des transistors encore plus performants et moins gourmands en énergie.**

Combien de fois l'a-t-on prétendue moribonde ? Et combien de fois, ceux qui avaient prédit sa fin ont-ils dû ravalé leurs propos ? La loi de Moore est au microélectronicien ce qu'est la peau de l'ours au chasseur : une occasion de manifester un peu d'humilité. Formulée en 1965 par Gordon Moore, cofondateur d'Intel, cette règle empirique veut que les progrès de l'industrie des semi-conducteurs aboutissent (pour un prix de revient constant), tous les dix-huit mois, à un doublement du nombre de transistors présents sur une même surface de circuit. « Cette loi s'est longtemps vérifiée mais a changé de nature depuis quelques

années », constate Thomas Ernst, le directeur scientifique du CEA-Leti.

Un processeur comme celui qui équipe notre téléphone portable contient des milliards de transistors connectés les uns aux autres sur une surface de moins d'un centimètre carré. Il fonctionnera d'autant plus vite et consommera d'autant moins d'énergie que ses composants seront plus petits et rapprochés les uns des autres, permettant au courant de passer avec une rapidité croissante.

### Diminuer toujours plus

D'où les efforts fournis par les industriels pour gagner en finesse de gravure des circuits et miniaturiser les transistors en vue de pouvoir en ranger plus dans un même espace. Jusqu'en 2012, ils progressaient au rythme de la loi de Moore, c'est-à-dire qu'ils parvenaient à diminuer les dimensions de ces éléments de 1,4 fois par an.

Aujourd'hui, c'est fini. Car l'augmentation des coûts due à la mise en œuvre de procédés de fabrication toujours plus longs et complexes, ainsi que la baisse des rendements provoquée par le passage à des technologies supportant de moins en moins les défauts, ont ralenti le rythme avec lequel les générations (ou « nœuds technologiques ») de semi-conducteurs se succèdent.

« Non seulement le délai de fabrication s'est allongé, mais la technologie commence à se heurter à des limites de nature physique, explique Denis Dutoit, ingénieur-chercheur du CEA-List. En dessous d'une certaine taille, "l'effet tunnel" à la base du fonctionnement du transistor n'est plus maîtrisable, ce qui provoque des fuites de courant incontrôlées et échauffent les puces. »

### La question de la taille ou « nœud technologique »

Conséquence, indique Carlo Reita : les constructeurs ont tendance à bousculer les définitions. « Alors qu'auparavant une génération de semi-conducteurs était caractérisée par la taille de son plus petit élément, le transistor, de nos jours, les chiffres annoncés sont le fruit d'un calcul complexe sur ses performances. Ils n'ont plus grand-chose à voir avec les dimensions réelles. Les puces "7 nanomètres" d'Intel, de Samsung et de TSMC ont des transistors qui mesurent au mieux 14, 16 et 18 nm. »

Pousser la miniaturisation des processeurs et des mémoires jusqu'à leurs limites ultimes n'est pas un objectif inatteignable. Mais pour espérer franchir le nœud technologique des 2nm, TSMC, Intel et Samsung n'auront d'autres solutions que de recourir à la technologie des nanorubans. L'idée : faire



© A. Aubert/CEA

passer le courant entre la « source » et le « drain » du transistor, par la grille du canal qui est constituée d'une superposition de fils plus ou moins larges de taille nanométrique. Or, c'est précisément le CEA-Leti qui fut en 2005 le précurseur mondial de ce procédé. « Ce dernier est le seul identifié à ce jour qui permettrait de franchir le cap des puces d'un nœud inférieur à 3, 2 voire 1 nm », indique Thomas Ernst.

### Architectures 3D

Cette course vers l'infiniment petit ne bénéficiant pas uniformément à toutes les parties d'un système sur puce, elle va s'accompagner de nouvelles techniques d'intégration 3D. « Une première piste consiste à « désagrégier » les systèmes sur puce en plusieurs circuits plus petits, et seules les parties numériques les plus performantes sont réalisées dans les technologies les plus avancées », explique Alexandre Valentian, chef de laboratoire au CEA-List. Cela aurait pour effet de faire baisser les coûts. Cela serait aussi une première étape avant de parvenir un jour à produire des puces 3D, dans lesquelles les transistors ne seraient plus répartis sur la surface d'une plaquette de silicium mais superposés les uns sur les autres sur plusieurs niveaux pour gagner de la place ! Et c'est possible : le CEA-Leti a

déjà produit des prototypes grâce sa nouvelle technique d'intégration 3D *CoolCube*.

### Le nouvel enjeu énergétique

Enfin, les besoins ont aussi évolué. « La compétition actuelle ne se résume plus à une course à la seule puissance des processeurs, estime Jean-René Lèquepeys. Désormais, il s'agit aussi de réduire leur consommation électrique et de limiter les quantités de matières premières nécessaires à leur fabrication. Il faut aussi apprendre à les recycler. »

Cet impératif, les scientifiques du CEA l'ont bien anticipé, travaillant depuis les années 2000 sur ce qui allait devenir, en 2017, le second standard mondial du transistor : le FDSOI. Industrialisé par STMicroelectronics, il figure au catalogue de grandes entreprises comme Samsung et GlobalFoundries. Son avantage : sa haute efficacité énergétique qui en fait une technologie idéale pour des applications où il s'agit de réduire au maximum la consommation électrique : électronique nomade, Internet des objets, automobile autonome... Initialement proposée en 28 nm, le FDSOI est aujourd'hui commercialisé en 22 nm et des discussions sont en cours pour lui faire franchir le cap des 10 nm. À nouveau, il s'agit de miniaturiser ! ●

### LEXIQUE

#### Transistor

Plus petit élément d'un circuit électronique sous la forme d'un minuscule dispositif à « 3 pattes » : une source émet l'information binaire « 0 » et « 1 » ; le drain la reçoit *via* un canal par lequel transite l'information ; une grille (recouvrant ce canal) sert d'interrupteur, en laissant passer ou non le signal en fonction de la tension électrique qui lui est appliquée. Le transistor est formé par une succession de couches de matériaux dopés, gravées ou imprimées sur un substrat en silicium.

#### Effet tunnel

Phénomène quantique, c'est-à-dire se produisant à de très petites échelles, à l'origine de la transmission d'information entre la source et le drain du transistor.

#### Intégration 3D

Technologies de réalisation de puces dont les transistors ne sont plus connectés sur un plan 2D mais en 3D, ce qui suppose notamment d'amincir leurs couches. On parle de puce amincie.

#### Système sur puce

Circuit intégré constitué de parties analogiques (traitement du signal électrique) et numériques (traitement de l'information binaire « 0 » et « 1 ») répondant à un ensemble de fonctions pour constituer un système applicatif complet.

**« Non seulement le délai de fabrication s'est allongé, mais la technologie commence à se heurter à des limites de nature physique. »**

**Denis Dutoit,**

ingénieur-chercheur au CEA-List



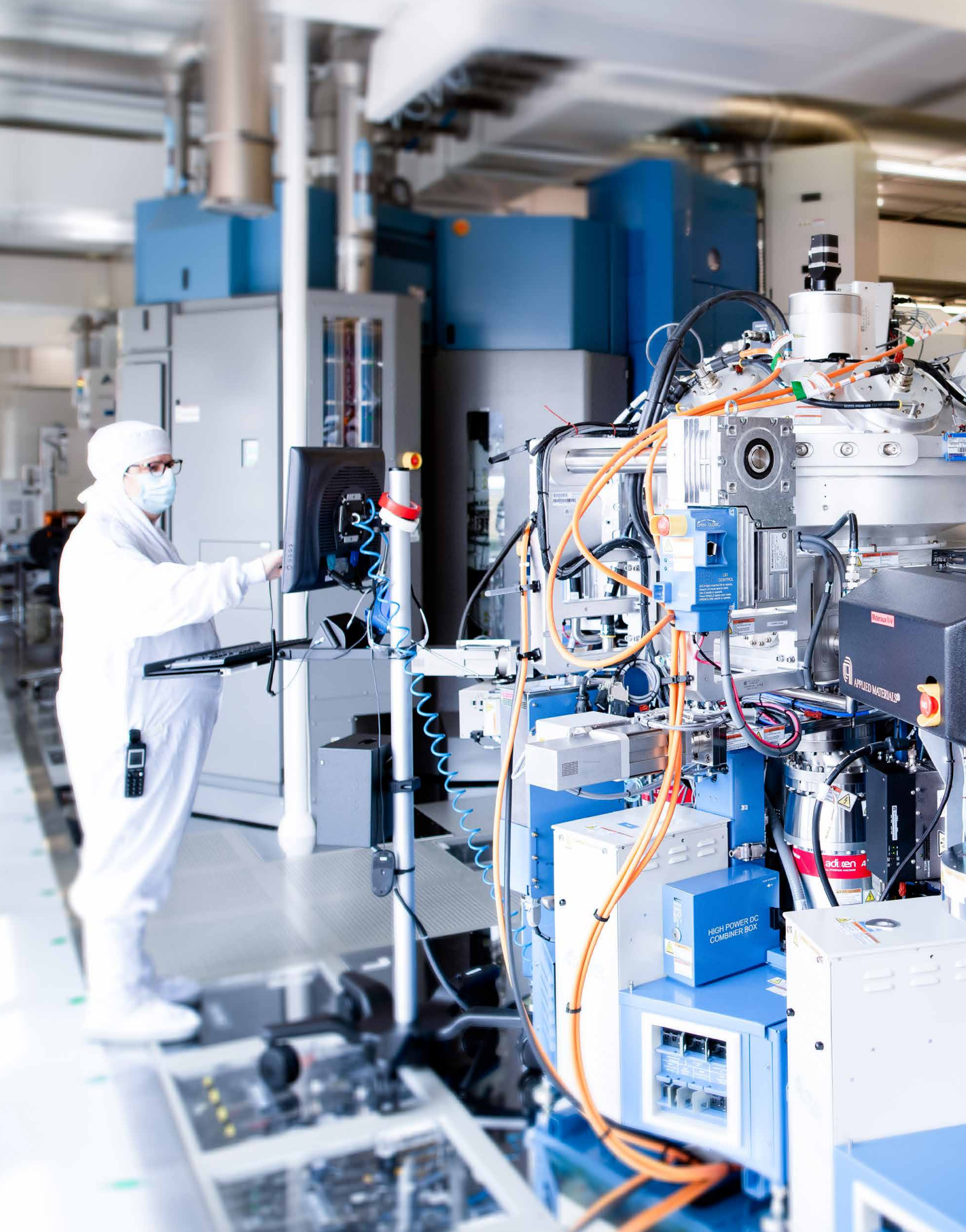
#### Ci-dessus

Mesure d'alignement du collage de puces sur substrat en intégration 3D.



#### Page de gauche

Détection chimique, par microscope électronique à balayage, des défauts de plaques de silicium sur lesquelles sont gravés les circuits intégrés.





# Le calcul est dans la mémoire

De nouvelles architectures pour les mémoires, afin notamment de les doter de fonctions de calcul, et c'est toute une économie d'énergie qui s'opère.

C'est un effet pervers des progrès technologiques. Lorsqu'ils deviennent si rapides, qu'ils aboutissent à doubler les performances tous les dix-huit mois, personne ne voit vraiment l'intérêt d'aller explorer des voies alternatives. Mais que le rythme des avancées vienne à se ralentir et ces solutions bénéficieront soudain d'un regain d'attention. C'est un peu ce qui est arrivé à un grand domaine des composants microélectroniques : les mémoires informatiques.

## Stockage en hiérarchie des données

Dans le circuit électronique d'un ordinateur, elles sont placées à distance des unités de calcul et de contrôle. C'est la fameuse architecture de « von Neumann », la réfé-

rence depuis les débuts de l'informatique qui n'est pas sans présenter deux inconvénients : le premier est le goulot d'étranglement qui se crée entre la mémoire et l'unité de calcul, ce qui limite les performances ; le second est le coût énergétique élevé du déplacement des données.

D'où l'idée, dès les années 1970, d'améliorer cette architecture en remplaçant le lien processeur-mémoire par une « hiérarchie de mémoires ». Celle-ci forme une pyramide de composants de capacités de stockage variables à travers laquelle l'information binaire circule, du haut vers le bas ou du bas vers le haut, vers et depuis le processeur chargé d'effectuer les calculs, qui en occupe le sommet. « *Il s'avère que le temps d'accès au contenu d'un espace*

## LEXIQUE

### Registre

Mémoire placée à l'intérieur du microprocesseur, au sommet de la hiérarchie mémoire au plus près de l'unité de calcul. L'accès aux données stockées est rapide mais la quantité de stockage est extrêmement limitée.

### DRAM (*Dynamic Random Access Memory*)

Mémoire située à l'extérieur du microprocesseur. Elle stocke les données de manière dynamique. D'accès rapide, elle consomme beaucoup d'énergie.

### Mémoires non volatiles

Mémoires qui stockent de manière permanente les données, même lorsqu'elles ne sont pas alimentées. Celles de type « flash » ont une capacité de stockage très importante mais sont d'un accès très lent comparées aux DRAM.

### SRAM (*Static Random Access Memory*)

Mémoire située sur le microprocesseur, proche de l'unité de calcul. Elle stocke les données de manière statique. D'accès un peu plus rapide que la DRAM, elle consomme également beaucoup d'énergie.



### Page de gauche

Dépôt de métallisations avancées pour le développement de mémoires.



### CEA-Leti

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

### CEA-List

Laboratoire des systèmes numériques intelligents (Saclay).

de stockage varie en fonction de la place qu'il occupe dans cette hiérarchie pyramidale», explique Denis Dutoit, ingénieur-chercheur au CEA-List. D'une nanoseconde, lorsque ce dernier est un registre, il peut atteindre plusieurs microsecondes dans le cas d'une mémoire vive de type DRAM. Et encore 100 fois plus pour le disque dur. La conséquence en est un allongement du délai de traitement des calculs et, à nouveau, un surcroît de la dépense d'énergie. «Pas moins de 90% de la consommation électrique part dans ces transferts de données», rappelle Jean-René Lèquepeys, directeur-adjoint du CEA-Leti.

### Des mémoires plus performantes

«Tant qu'on parvenait à augmenter la puissance des processeurs à un rythme exponentiel, personne ne se souciait vraiment de la lenteur de cette hiérarchie de mémoires : le ralentissement occasionné était systématiquement compensé par la hausse des vitesses de calcul», se souvient Henri-Pierre Charles, directeur de recherche au CEA-List. Ce n'est plus le cas de nos jours où l'enjeu est de mettre au point une génération de composants de stockage plus performants, c'est-à-dire permettant aux données d'y circuler plus rapidement. C'est ce que cherchent à faire les équipes du CEA-Leti en essayant de trouver des alternatives aux fameuses mémoires non volatiles de type flash qui équipent les téléphones, les ordinateurs portables, les appareils photos numériques ou encore les clés USB. Le souci avec ces dispositifs ? «Ils enregistrent les données dans des oxydes de grille de transistors dont on ne peut pas réduire sans risques les dimensions au-delà de 45 nanomètres, et qui sont donc limités en vitesse», explique Alexandre Valentian du List. Le CEA voudrait les remplacer par d'autres mémoires

**« Plus nous équiperons de fonction calcul ces espaces de stockage de taille et de lenteur croissantes, plus le gain sera potentiellement important. »**

Henri-Pierre Charles,  
directeur de recherche au CEA-List

non-volatiles dites «résistives», 10 à 100 fois plus rapides que les flashes. Plusieurs technologies sont à l'étude et certaines sont jusqu'à 20 000 fois moins gourmandes en énergie. Elles ont donné lieu au dépôt de plus de 140 brevets et à des transferts vers l'industriel STMicroelectronics.

### Une mémoire qui calcule

Une autre piste de recherche, pour allier rapidité et frugalité énergétique, consisterait tout «simplement» à effectuer les calculs directement dans la mémoire. C'est ce que proposent Henri-Pierre Charles et ses collègues du CEA-List grâce à leur modèle de «von Neumann inversé». Avec le CEA-Leti, ils ont mis au point une mémoire computationnelle «SRAM», utile pour des applications intensives en données : recherche de différences entre deux images ; extraction de contour d'un objet sur un cliché, etc. Cette mémoire pas comme les autres, «C-SRAM», est basée sur une SRAM classique à laquelle sont ajoutées des fonctions de calcul en parallèle sans passer par le processeur central.

### Approche embarquée

L'intérêt de cette approche «embarquée» appelée *computing in memory* (calcul dans la mémoire) est destinée à doter certains types de mémoires d'une capacité de calcul en quelque sorte «à domicile». Depuis la plateforme d'outils logiciel Hybrogen qu'ils ont développée, les scientifiques ont pu effectuer des calculs 30 fois plus rapides et, en limitant les allers-retours avec le cerveau central, diminuer ainsi jusqu'à 50 fois la consommation d'énergie...

Et ce n'est qu'un début ! «Plus nous équiperons de fonctions calcul ces espaces de stockage de taille et de lenteur croissantes, plus le gain sera potentiellement important», explique Henri-Pierre Charles. Après la SRAM, dont la mutation vise à accélérer ou à prolonger la durée d'utilisation des systèmes embarqués de l'IoT (*Internet Of Things*) comme les téléphones portables par exemple, les scientifiques explorent la possibilité de le faire pour les mémoires non volatiles. De quoi, s'ils y parviennent, ouvrir la voie à une nouvelle ère pour les *data centers* chargés de traiter les montages de données d'Internet : celle vertueuse du calcul haute performance à faible consommation d'énergie. ●

## FOCUS

# Les 9 pistes de R&D du CEA

## COMPOSANTS MICROÉLECTRONIQUES

- Nouvelle génération de mémoires non volatiles (horizon 2-3 ans).
- Dispositifs à base de silicium toujours plus petits, aux pertes énergétiques limitées, grâce à l'empilement 3D et aux technologies basse consommation comme la FDSOI (3-5 ans).
- Informatique quantique sur silicium, exploitable rapidement par l'industrie (10 ans).

## ARCHITECTURES ET CIRCUITS ÉLECTRONIQUES

- Empilement 3D des puces amincies pour augmenter la vitesse des circuits et réduire la consommation électrique (horizon 2-3 ans).
- Nouvelles architectures de circuits, à l'aide d'outils d'exploration dopés à l'IA, permettant de choisir la bonne combinaison de technologies transistor-mémoire-intégration 3D, afin de réduire les coûts (3-5 ans).
- Architectures définies par logiciel qui pourront être recompilées en temps réel pour ne plus être dépendantes des données tout en offrant quasiment les performances d'un circuit dédié (5-10 ans).

## LOGICIELS ET ALGORITHMES

- Technologies embarquées pour traiter les données en local et non dans le cloud (horizon 2-3 ans).
- Nouvelles générations d'algorithmes, plus frugaux en données, pour réduire la consommation électrique (3-5 ans).
- Solutions logicielles plus durables, avec des mises à jour à distance, pour étendre la durée de vie des produits par une «dégradation gracieuse» (5-10 ans).

# TOUT S'EXPLIQUE

PAR AUDE GANIER,  
EN COLLABORATION AVEC  
PIERRE-OLIVIER LAGAGE (CEA-IRFU)



## Mirim, l'imageur du télescope Webb

Conçu au CEA, l'imageur Mirim embarquera à bord du télescope Webb jusqu'au point de Lagrange L2, à 1,5 million de km de la Terre. Objectif : observer pendant cinq à dix ans l'Univers dans le large domaine de l'infrarouge, et ainsi en dresser un nouveau portrait.

Le *James Webb Space telescope* (Webb) est amené à remplacer les télescopes Hubble et Spitzer, respectivement lancés en 1990 et 2003. Il sera capable de voir les étoiles et les premières galaxies datant de 200 millions d'années après le big bang, tandis que Hubble ne pouvait voir au-delà des 500 premiers millions d'années. Il pourra également découvrir des parties cachées de notre système solaire, regarder à l'intérieur des nuages de poussière où se forment les étoiles et les systèmes planétaires, et révéler plus en détail la composition des atmosphères des exoplanètes. Concentré de technologies, sa sensibilité est cinquante fois supérieure à celle d'Hubble, et sa résolution angulaire sept fois meilleure que celle de Spitzer. À cet effet, le Webb dispose de quatre instruments (Nircam, Nirspec, Niriss et Miri) à la pointe de la technologie, qui peuvent observer l'Univers à des

longueurs d'onde supérieures à la lumière visible, à savoir dans le proche et le moyen infrarouge.

### Les trois modes d'observation de Mirim

L'un d'eux, Miri, est l'assemblage d'un spectromètre et de l'imageur Mirim dont le CEA a la responsabilité technique et scientifique. Opérant dans la longueur d'onde de l'infrarouge moyen (précisément de 5 à 28 micromètres), Mirim est doté de trois modes d'observation : « imagerie » pour photographier le ciel à diverses longueurs d'onde grâce à neuf filtres interchangeables ; « spectrographie », décomposant la lumière afin d'y rechercher la signature d'éléments et de molécules cosmiques ; « coronographie » permettant « d'éteindre » la lumière d'une étoile pour observer son voisinage.

### FOCUS

#### Une mission internationale

La réalisation et l'exploitation du Webb est une mission de la Nasa (*National Aeronautics and Space Administration*) avec l'Esa (*European space agency*) et l'ASC (Agence spatiale canadienne). À son bord, l'instrument Miri codéveloppé par les États-Unis et l'Europe. La contribution européenne de dix pays (Royaume-Uni, France, Belgique, Pays-Bas, Allemagne, Espagne, Suisse, Suède, Danemark et Irlande) est pilotée par l'Observatoire royal d'Édimbourg. Celle de la France porte sur Mirim, l'imageur de Miri. Sous contrat avec l'Esa, le Cnes en assume la responsabilité générale et a délégué au CEA, via son institut Irfu, la direction des aspects techniques liés à sa construction ainsi que la direction scientifique impliquant trois autres laboratoires (Lesia/Observatoire de Paris, IAS/Université Paris-Sud ; Lam/Marseille).

#### Les composants de Mirim

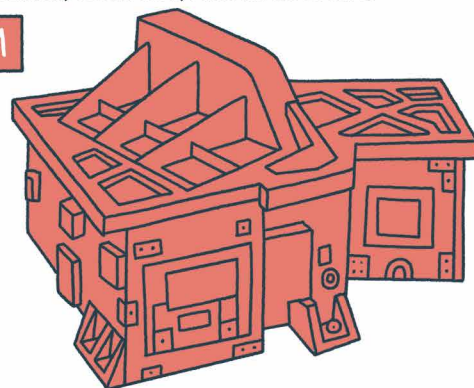
L'imageur est composé de divers dispositifs : banc optique (CEA, France) ; miroirs (CSL, Belgique) ; prismes optiques (université de Cologne, Allemagne) ; coronographes (Lesia, France) ; filtres (Observatoire de Stockholm, Suède, et *Dublin Institute for Advanced Studies*, Irlande) ; cryomécanisme de la roue porte-filtres (MPIA, Allemagne) ; module détecteur (JPL, États-Unis).

# Le voyage de Mirim

Avant de pouvoir observer l'Univers, l'imageur infrarouge moyen Mirim du télescope Webb aura nécessité huit étapes, depuis sa conception au CEA jusqu'à la réception de ses données.

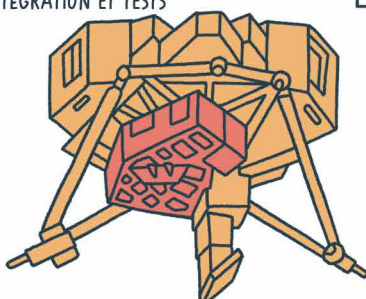
CONCEPTION, RÉALISATION, ASSEMBLAGE ET TESTS

1 **MIRIM**



SACLAY (FRANCE), 2004-2009

INTÉGRATION ET TESTS



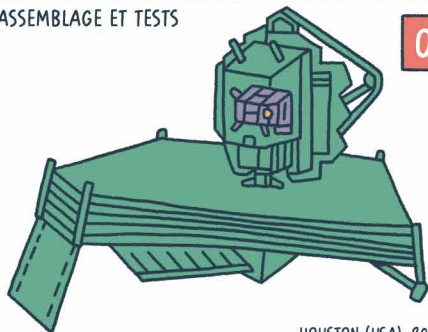
OXFORD (ANGLETERRE), 2009-2012

2 **MIRI**

5 **WeBB**

ASSEMBLAGE ET TESTS FINAUX  
PASADENA (USA)  
PREMIER SEMESTRE 2018

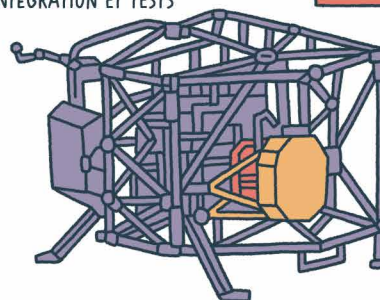
ASSEMBLAGE ET TESTS



HOUSTON (USA), 2017

4 **OTIS**

INTÉGRATION ET TESTS



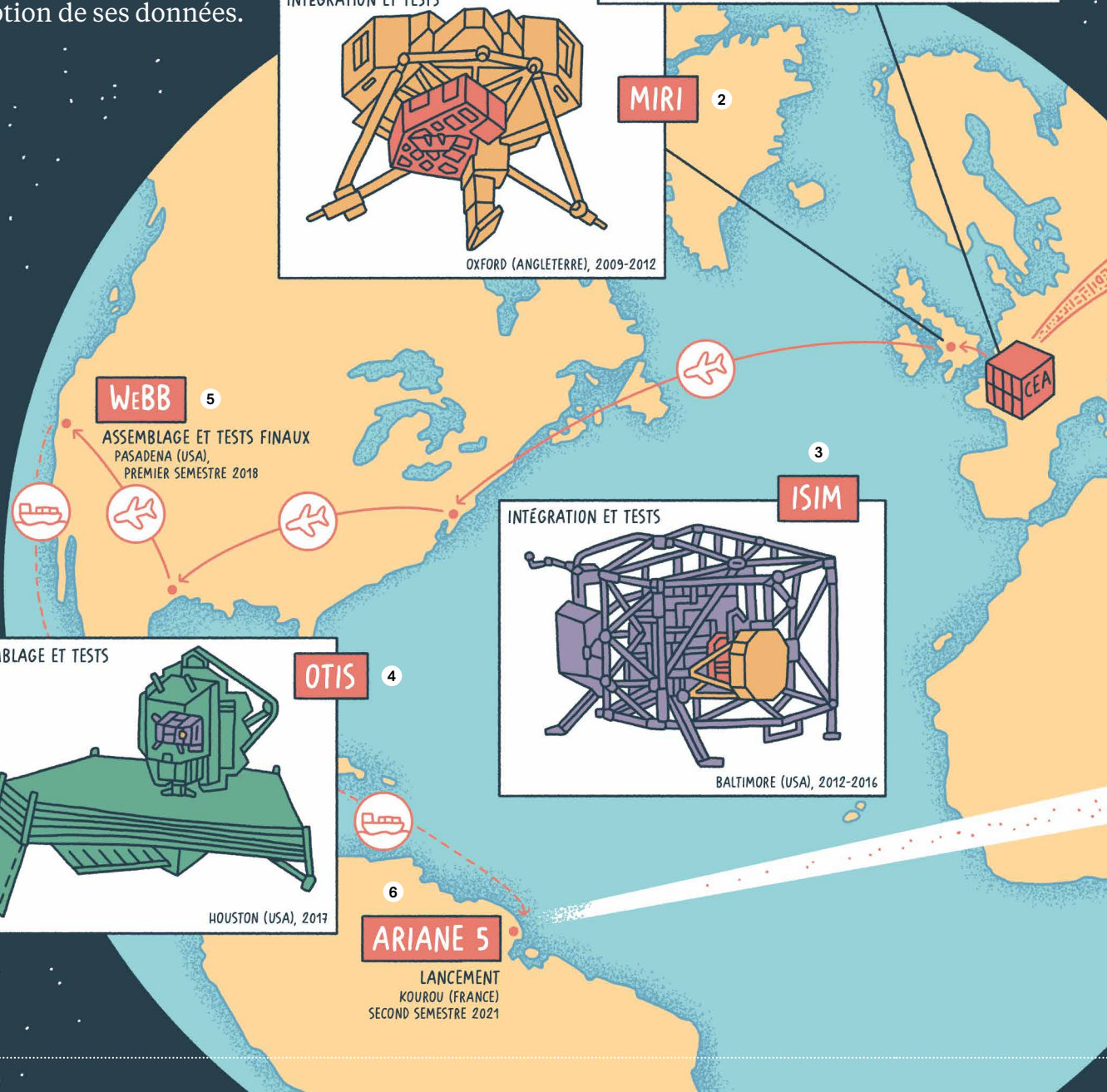
BALTIMORE (USA), 2012-2016

3 **ISIM**

6

**ARIANE 5**

LANCEMENT  
KOUROU (FRANCE)  
SECOND SEMESTRE 2021



**1** Conception au CEA de l'imagerie Mirim, dont les nombreux composants (banc optique, filtres, coronographes, cryomécanismes, détecteurs) sont fournis par différents pays. Réalisation de deux prototypes avant l'assemblage final du modèle de vol, testé par et sous la responsabilité du CEA.

**2** Intégration de Mirim à un spectromètre, par le *Rutherford Appleton Laboratory*, pour former le spectro-imageur Miri. Puis tests de cet ensemble, avec une forte contribution du CEA.

**3** Départ pour le *Goddard Space Flight Center (GSFC)* de la Nasa où Miri est intégré avec les trois autres instruments (Nircam, Nirspec et Niriss) du Webb dans l'Isim (« charge utile » du satellite). Nouvelles séries de tests, mobilisant une équipe du CEA.

**4** Réalisation du télescope (miroirs de 18 segments intégrés sur une structure pliable) et assemblage avec l'Isim pour former l'Otis. Celui-ci subit des tests grandeur nature dans une cuve cryogénique au *Johnson Space Center (JSC)* de la Nasa, avec la participation du CEA.

**5** Assemblage, par l'industriel américain *Northrop Grumman AeroSpace*, de l'Otis aux derniers composants du Webb : la plateforme d'alimentation électrique et de communication, et le bouclier thermique permettant de refroidir les instruments qui observent dans l'infrarouge.

**6** Après un long voyage en bateau, le Webb est installé dans le lanceur de la fusée *Ariane 5* sur la base spatiale du Cnes.

**7** Déploiement en vol du bouclier thermique et des miroirs du Webb, arrivée au point de Lagrange L2 (à 1,5 million de km de la Terre), puis démarrage et tests des instruments pendant cinq mois.

**8** Réception des données, notamment au CEA qui anime le centre d'expertise français et européen et pourra exploiter les données au prorata du temps d'observation accordé par la mission.

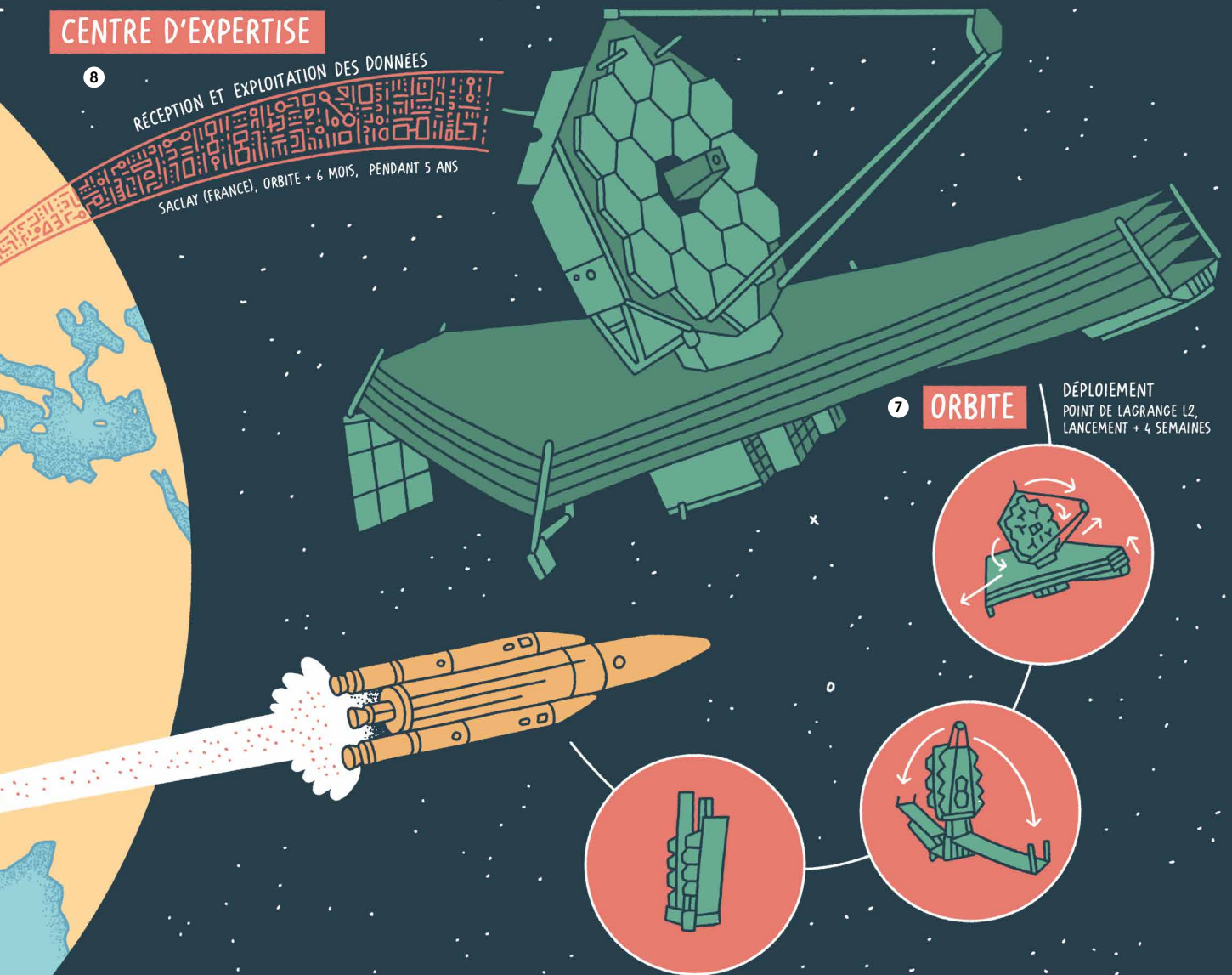
**CENTRE D'EXPERTISE**

**8** RÉCEPTION ET EXPLOITATION DES DONNÉES

SACLAY (FRANCE), ORBITE + 6 MOIS, PENDANT 5 ANS

**7** ORBITE

DÉPLOIEMENT POINT DE LAGRANGE L2, LANCEMENT + 4 SEMAINES



# REGARDS CROISÉS

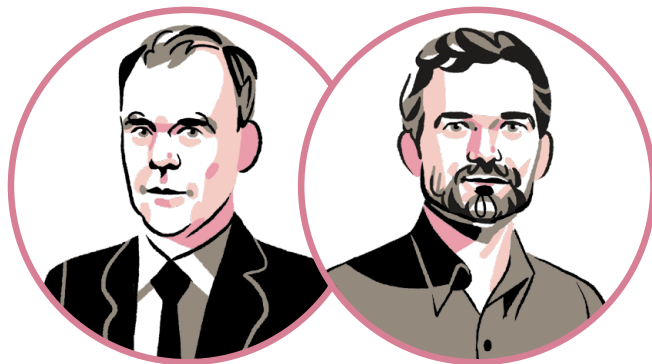
## Le prix de l'énergie

### Bertrand Charmaison

directeur de l'Institut I-Tésé à la Direction des énergies du CEA.

### Matthieu Auzanneau

directeur du *think tank* The Shift Project et auteur, notamment, du livre *Pétrole, le déclin est proche* (éditions du Seuil).



**Explosion des prix du gaz, de l'électricité, du pétrole. Qu'en est-il, qu'en sera-t-il ? Et quid de la disponibilité des ressources et des investissements massifs à réaliser pour pérenniser un mix énergétique, tant du point de vue climatique qu'économique ? Le point avec deux spécialistes.**

### La flambée des prix

**Bertrand Charmaison** Depuis début 2021, nous assistons à une flambée des prix de marché du gaz fossile : ceux-ci ont plus que triplé sur la période ! Les prix des marchés de l'électricité en Europe ont franchi cet automne la barre des 200 €/MWh, des niveaux de prix jamais atteints jusqu'à présent (ils évoluaient avant la crise Covid-19 autour de 50 €/MWh). Les prix des quotas d'émission de CO<sub>2</sub> ont quant à eux plus que doublé depuis début 2021, passant environ de 30 € à 70 € la tonne.

Au sein du CEA, l'institut I-Tésé analyse les marchés de l'énergie et la manière dont se forment leurs prix pour éclairer les aspects économiques de la transition vers la neutralité carbone. Aujourd'hui, le lien entre prix de marché du gaz et prix de marché de l'électricité est très fort, même

s'il n'y a pas d'indexation directe. Schématiquement, les gestionnaires européens du réseau électrique, comme RTE en France, comparent chaque jour la demande d'électricité prévue pour le lendemain à l'offre de production disponible. Afin qu'il y ait toujours un équilibre entre demande et offre, ils établissent un niveau de prix suffisant pour couvrir les coûts de la dernière unité de production appelée. Le prix de marché va ainsi refléter le coût marginal de production du système électrique à un instant donné.

### La formation des prix de l'électricité

Actuellement, la dernière unité de production appelée est souvent une centrale thermique utilisant du gaz fossile comme combustible : c'est donc son coût de production qui va déterminer le prix de l'électricité. D'où ce lien avec les prix du gaz fossile et, dans une moindre mesure, celui des quotas d'émission de CO<sub>2</sub> (une centrale gaz émet environ 400 kg de CO<sub>2</sub> pour produire 1 MWh d'électricité). À court terme, les prix de marché du gaz en Europe devraient rester élevés du fait d'une forte croissance de la demande liée à la reprise de l'activité économique, des niveaux de stock bas et des incertitudes de nature géopolitique liées à la forte dépendance au gaz russe. À long terme, certains éléments *a priori* conjoncturels

pourraient devenir structurels et peser sur les équilibres. Par exemple, l'allongement exceptionnel de la période de mousson en Asie du Sud-Est cette année a engendré des besoins accrus en climatisation, générant une importante demande additionnelle de gaz et de charbon pour les centrales électriques. Et, d'après les analyses du Giec, ces événements climatiques extrêmes devraient être de plus en plus fréquents.

### Causes structurelles et déclin des énergies fossiles

**Matthieu Auzanneau** Je pense que les problèmes conjoncturels sont bien souvent une succession de problèmes structurels.

**« À long terme, certains éléments *a priori* conjoncturels pourraient devenir structurels et peser sur les équilibres. D'après les analyses du Giec, les événements climatiques extrêmes devraient être de plus en plus fréquents. »**

Bertrand Charmaison

PROPOS RECUEILLIS  
PAR AUDE GANIER

Et nous avons aujourd'hui, structurellement, une demande de gaz qui est partie pour croître et, tout aussi structurellement, une production d'Europe occidentale (celle de la mer du Nord) qui est vouée à se tarir. Tout le monde veut du gaz car il est considéré comme un moindre mal sur la voie de la transition énergétique pour pallier l'intermittence des énergies renouvelables. Depuis 2016, on observe une hausse de la consommation en Europe, auparavant en baisse à cause de la désindustrialisation. Cette reprise tient en particulier à l'Allemagne, suite à sa sortie du nucléaire tout en cherchant à se passer du charbon. Côté offre, et l'on en parle trop peu, la production gazière en mer du Nord est en déclin systémique.

Pareil pour le pétrole, dont l'Agence internationale de l'énergie et la direction de BP (*British Petroleum*) redoutent de possibles pénuries à l'horizon 2025. C'est pour cela qu'au Shift Project nous disons qu'il n'y a pas qu'une seule excellente raison de sortir des énergies fossiles, à savoir le climat. La seconde est le déclin des réserves mondiales du brut. À cause de ce déclin, le pétrole conventionnel, qui constitue plus des trois quarts de la production mondiale, a franchi de façon inexorable son pic de production en 2008.

Concernant le charbon, la situation est très différente. L'Europe, particulièrement l'Allemagne, la Pologne et l'Ukraine, dispose de siècles de réserves. En revanche, les données officielles montrent que la Chine ne disposerait que d'une quarantaine d'années de réserves au rythme de production actuel. Derrière ses engagements climatiques, je pense qu'il y a aussi la crainte de problèmes de disponibilité de la ressource.

## L'impact sur les énergies bas carbone

**B. C.** Le déclin inéluctable des ressources fossiles, tout comme l'impératif climatique, soulignent l'urgence de basculer le système énergétique vers les énergies bas carbone.

**« Au Shift Project, nous répétons depuis des années qu'il est beaucoup plus compliqué pour la France de sortir des énergies fossiles sans le nucléaire. Mais le nucléaire exige une stratégie industrielle à long terme. Or, depuis la fin des années 1990, la France n'a cessé de tergiverser. »**

Matthieu Auzanneau

Pour ce faire, il va falloir investir massivement (3 à 4 % du PIB mondial chaque année d'ici 2050), à la fois pour développer les capacités de production et pour décarboner les usages, notamment en les électrifiant. Or, la très grande volatilité des prix de marché renchérit considérablement le financement de ces investissements, tant pour les producteurs que pour les consommateurs. *A contrario*, les énergies fossiles utilisent des infrastructures souvent amorties. Ainsi, même si elles coûtent plus cher à l'usage que les énergies bas carbone, il s'avère difficile d'accélérer la transition énergétique et de financer les investissements requis.

**M. A.** La rentabilité n'est pas le seul facteur à considérer. La question fondamentale est celle de la décarbonation de l'économie. On peut toutefois noter que le rapport de RTE montre qu'un mix énergétique reposant à 100 % sur les énergies renouvelables est sensiblement plus cher qu'une solution s'appuyant sur le nucléaire.

Au Shift Project, nous répétons depuis des années qu'il est beaucoup plus compliqué

pour la France de sortir des énergies fossiles sans le nucléaire. Mais le nucléaire exige une stratégie industrielle à long terme. Or, depuis la fin des années 1990, la France n'a cessé de tergiverser.

La France dispose de tous les atouts nécessaires pour ouvrir la voie de la sortie des énergies fossiles. À condition d'adopter rapidement un plan cohérent et audacieux pour y parvenir. Le Shift Project a commencé à publier, secteur par secteur, sa vision d'un tel plan.

## L'impact sur les factures des consommateurs

**B. C.** Les effets des hausses massives des prix de l'énergie sur les factures des consommateurs varient d'un pays européen à l'autre. Dans de nombreux pays, elles vont se traduire par des hausses annuelles de plusieurs centaines d'euros pour les ménages. En France, pour ce qui concerne l'électricité, la plupart des consommateurs bénéficient de mécanismes reliant une partie importante des prix qu'ils payent aux coûts de production de l'électricité nucléaire, qui sont eux restés stables sur la période récente. Ceci amortit considérablement l'impact des hausses des prix de marché, sans toutefois les annihiler. Par ailleurs, le bouclier tarifaire instauré par le gouvernement français a gelé les prix du gaz au 1<sup>er</sup> octobre 2021. Mais il s'agit là d'un blocage pour quelques mois qui devra être compensé à terme et dans le temps par les consommateurs. Car, contrairement aux prix de l'électricité, ceux du gaz fossile sont exclusivement établis sur des marchés internationaux, sans lien direct avec les coûts de production. ●

→ [theshiftproject.org](https://theshiftproject.org)

# AGORA L'ACTU DU CEA

VISITE

## Genvia, fleuron français de l'hydrogène décarboné



© CEA

Fortement engagé dans la stratégie hydrogène, le CEA créait avec Schlumberger le 1<sup>er</sup> mars 2021 Genvia<sup>1</sup>, qui inaugurerait la première ligne pilote d'électrolyseurs haute température. Un fleuron technologique qu'a visité le 16 novembre dernier, le président de la République Emmanuel Macron, accompagné de l'administrateur général du CEA François Jacq, et de la P.-D. G de Genvia Florence Lambert, ancienne directrice du CEA-Liten. À cette occasion, François Jacq a souligné que Genvia constitue « un excellent exemple du rôle que joue le CEA au service de l'État,

*de l'économie, des territoires et des citoyens : développer des solutions technologiques de pointe et accompagner leur industrialisation, afin de hisser la France et l'Europe au plus haut niveau de la compétition, scientifique, technologique et industrielle mondiale ».* AG

<sup>1</sup> Genvia associe également Vinci Construction, Vicat et l'Agence régionale énergie climat d'Occitanie.

↑  
Ci-dessus

Le président de la République et l'administrateur général du CEA lors de leur visite de Genvia.

## CONTRAT DE FILIÈRE Énergies bas carbone, vers une reconquête industrielle

**Le contrat de filière des nouveaux systèmes énergétiques 2021-2023 a été signé par la ministre de la Transition écologique et par la ministre déléguée chargée de l'Industrie, en présence de l'administratrice générale adjointe du CEA.**

2020, en pleine crise sanitaire, l'État entreprenait un vaste plan de relance afin d'accélérer les transformations écologique, industrielle et sociale du pays. 100 Mds € furent budgétés pour soutenir des actions autour de trois volets : écologie et transition énergétique (30 Mds €) ; compétitivité des entreprises (34 Mds €) ; cohésion des territoires (36 Mds €).

### 4 axes de développement

C'est dans ce cadre que fut signé le premier contrat stratégique de filières des nouveaux systèmes énergétiques. Il est aujourd'hui renouvelé pour la période 2021-2023 et compte quatre axes : développer une offre d'énergie renouvelable et décarbonée compétitive ; optimiser l'efficacité énergétique et l'usage des énergies ; engager une reconquête industrielle stratégique ; et fédérer la filière autour de dynamiques transverses et d'accompagnement du changement. « Ce contrat est le fruit de l'implication de tous, en particulier des chercheurs du CEA dont l'excellence est reconnue dans la R&D des énergies bas carbone, au service de la convergence entre le nucléaire et les énergies renouvelables. L'occasion pour le CEA de réaffirmer son engagement dans les domaines de l'hydrogène, des batteries et du solaire photovoltaïque avec un objectif fort de contribution à la réindustrialisation », témoigne Stéphane Sarrade, directeur des programmes énergies du CEA. AG



## INVESTISSEMENTS D'AVENIR

### Embarqué dans le cloud et l'IA

**75 % des capacités européennes de stockage des données numériques sont détenues par les géants du web que sont Google, Facebook, Amazon, etc. De quoi interpeller sur la maîtrise et la protection des données, lesquelles sont indispensables pour développer l'intelligence artificielle.**

Dans ce contexte, ainsi que celui de la réindustrialisation de la France pour préserver sa souveraineté, l'État continue sa mobilisation. Ainsi, le 2 novembre dernier, le secrétaire d'État chargé de la Transition numérique présentait la stratégie nationale en matière de *cloud*, en attribuant un cofinancement privé-public (notamment *via* France 2030) et européen d'un montant de 1,8 Md €. Le 8 novembre, c'était au tour de la ministre de la Recherche de dévoiler la deuxième phase de la feuille de route sur l'intelligence artificielle (IA), dotée elle de 2,2 Mds €.

#### Le CEA sollicité

Ces domaines stratégiques voient le CEA impliqué aux avant-postes puisqu'il copilotera avec l'Inria le « Programme et équipements prioritaires de recherche » (PEPR) sur le *cloud*, qui se voit allouer un budget de 66 M€. Le CEA sera également associé au CNRS et à l'Inria pour piloter les 134 M€ du PEPR IA. Pour ces deux thématiques, il s'agira d'organiser les recherches afin de développer des technologies de rupture allant du matériel au logiciel, de la consommation frugale d'énergie à la cybersécurité. Pour rappel, le Programme d'investissements d'avenir – qui en est à sa quatrième édition avec France 2030 – a identifié 15 secteurs nécessitant des stratégies d'accélération. Le CEA s'est déjà vu confier, en 2020, le copilotage des PEPR Hydrogène, Quantique et Cybersécurité. [AG](#)

## PARTENARIAT

# Eurohab, Le refuge lunaire

**Quelle est cette curieuse structure gonflable vue sur le pavillon français de l'Exposition universelle et lors du Congrès international d'astronautique IAC 2021 organisés à Dubaï? Le projet d'habitat lunaire de la start-up Spartan, associant le CEA et Air Liquide.**

Au sein de l'incubateur *Tech The Moon*, Spartan Space propose de concevoir un habitat refuge pour soutenir les futures missions d'exploration lunaire. « *Autonome, Eurohab pourrait être déployé sur le sol lunaire avant l'arrivée des équipes. Il permettrait aux scientifiques de s'éloigner de la base de vie principale quelques jours pour mener à bien leurs recherches. Ce refuge serait également très adapté à des interventions terrestres en milieux hostiles* », indique Michel Ida, expert Impact sociétal de la Direction de la recherche

technologique du CEA, qui réfléchit avec Spartan Space à la mise en œuvre de cet ambitieux projet. S'agissant de l'autonomie énergétique du refuge, le CEA-Liten envisage l'intégration de panneaux photovoltaïques souples haute performance directement sur la structure gonflable, le recours au vecteur hydrogène, ainsi qu'un système de gestion optimisée de l'énergie. Sont également à l'étude, avec la Direction des énergies, des procédés de fabrication additive, par exemple à base de matières localement sourcées telles que la régolithe lunaire, pour assurer la production de pièces pour la maintenance de l'habitat. EuroHab a été récompensé par un prix d'architecture Jacques Rougerie au pavillon français, tout comme il s'est distingué au 72<sup>e</sup> congrès IAC le 25 octobre dernier. [AG](#)





© Pierrick Blancard/CEA

## ÉVÉNEMENT SPORTIF

### Le CEA au Bike&Run 2021

Faire courir et rouler en binôme des étudiants et des managers d'entreprises sur 6 ou 13 km avec un VTT pour deux : voilà le concept du Bike&Run grandes écoles et universités. Cet événement est une manière originale de créer du lien entre les étudiants et les entreprises. Les uns construisent un réseau professionnel, apprennent à mieux connaître de potentiels employeurs et leurs métiers; les autres découvrent des profils d'étudiants pour leurs propres recrutements. Le tout sur fond d'esprit d'équipe, de partage et de solidarité. Près de 200 sportifs, dont pour la première année 17 membres du CEA, ont participé à la dernière édition le 21 octobre dernier à Évry. Avec un beau succès pour l'organisme, qui a compté cinq présents sur les six podiums par catégorie! **SR**

↑  
Ci-dessus  
Duo CEA-EPP

## FORMATION

# Modélisation : jouer pour apprendre

**La modélisation de phénomènes physiques et systèmes complexes a aujourd'hui fait ses preuves en recherche et dans l'industrie. Mais son utilisation est loin d'être généralisée.**

En cause : ses langages et outils, souvent perçus comme complexes par les utilisateurs, et un manque de compétences pour manier ces approches abstraites. Pour y remédier, des chercheurs du CEA-List, de l'université de Lille et de la Fondation Bruno Kessler (Italie) ont imaginé PapyGame, pour un apprentissage ludique.

Ce *serious game* (jeu sérieux) s'appuie sur Papyrus, la plateforme *open source* d'ingénierie par l'utilisation de modèles numériques

développée par le CEA-List. À l'usage des professionnels, celle-ci utilise les technologies informatiques pour décrire, au travers de modèles, concepts et langages, à la fois le besoin, par exemple l'optimisation d'une chaîne de montage automobile, et la solution. PapyGame reprend les codes des jeux en ligne et propose des parties successives, des défis, des niveaux, des récompenses, etc. Les joueurs, tout en s'amusant, se familiarisent ainsi avec cet univers virtuel et apprennent le langage associé UML (*Unified Modeling Language*). Après une première édition remarquée en 2020, les organisateurs du jeu ont lancé Challenge 2021, le nouveau défi de l'année. **SR**

→ [www.papygame.com](http://www.papygame.com)



© CEA

## EXPOSITION

# Zoom sur les maladies infectieuses

Bactéries, virus, parasites, champignons, prions... ces microorganismes, lorsqu'ils sont pathogènes, sont responsables de tout un panel de maladies infectieuses : Sida, Ebola, Chikungunya, Covid-19 et bien d'autres encore. Une vaste exposition virtuelle, réalisée par les équipes de Fontenay-aux-Roses du CEA Paris-Saclay, est consacrée à ces sujets. Elle propose de nombreux

contenus : conférences, ateliers pédagogiques, infographies, vidéos... L'occasion de découvrir les recherches menées par le CEA sur ces maladies, leurs mécanismes d'action et les pistes thérapeutiques associées. **SR**

À découvrir ici :

→ [https://fontenay-aux-roses.cea.fr/far/Lists/StaticFiles/exposition\\_maladies\\_infectieuses/index.html](https://fontenay-aux-roses.cea.fr/far/Lists/StaticFiles/exposition_maladies_infectieuses/index.html)

# LE COIN DES START-UP

PAR SYLVIE RIVIÈRE

## Aryballe propose un nez électronique universel

« C'est par biomimétisme que nous avons conçu notre nez électronique NeOse Advance », raconte Tristan Rousselle, cofondateur de la start-up Aryballe avec deux chercheurs du CEA. Il combine des capteurs biochimiques imitant ceux du nez et un module d'analyse de données imitant le bulbe olfactif. Ce renifleur numérique peut reconnaître des milliers d'odeurs, des plus délicates (fleurs, parfums, fruits et suivi de leur maturation) aux moins agréables (putréfaction, ammoniac...).

L'idée est née en 2014 lorsque cet entrepreneur, désireux de « lancer un projet d'innovation de rupture à l'interface de plusieurs technologies », se tourne vers le CEA, qu'il connaît bien pour avoir déjà fondé une précédente start-up avec l'un de ses laboratoires. Le thème de l'olfaction digitale émerge alors très vite, le CEA-Inac<sup>1</sup> proposant le biocap-



© Aryballe

teur, et le CEA-Leti ses compétences en photonique. « Il y avait une forte attente, notamment de la part de l'industrie des arômes et fragrances, à la recherche d'outils de reconnaissance d'odeurs délivrant une information objective, qui soient légers, rapides et moins coûteux que la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse. »

D'autres marchés se disent intéres-

sés, comme celui de l'électroménager. « Les industriels imaginent par exemple des fours s'arrêtant automatiquement lorsque le plat est cuit », illustre Tristan Rousselle. De belles promesses sont également attendues dans le secteur de la santé, pour la détection de pathologies, à l'instar de ces chiens éduqués à la reconnaissance olfactive d'un cancer du sein ou de la prostate. ●

### MARCHÉS

- **Parfumerie** : contrôle qualité des matières premières, détection de contrefaçons...
- **Agroalimentaire** : contrôle qualité, suivi de la conservation...
- **Automobile (location, autopartage)** : contrôle de l'odeur des habitacles avant utilisation
- **Électroménager** : suivi de la cuisson et de la conservation des aliments
- **Santé** : détection de certaines pathologies

### TECHNOLOGIE

Association de 64 nanocapteurs biochimiques (des peptides captant les molécules odorantes volatiles) greffés sur un microréseau optique (photonique sur silicium). Les interférences entre une source de lumière et les complexes capteurs/molécules odorantes sont mesurées grâce à un photodétecteur. Chaque odeur génère ainsi sa propre empreinte visuelle, identifiée par comparaison à une base de données olfactives construite par *machine learning*.

### DATES-CLÉS

- 2014** Création de la start-up
- 2016** Levée de fonds de 3,6 millions d'euros; investisseur industriel: Asahi Kasei
- 2018** Lancement de NeOse Pro
- 2019-2020** Levée de fonds de 14 millions d'euros; investisseurs industriels: Seb, Samsung, Hyundai, International Flavors & Fragrances Inc.
- 2021** Lancement de NeOse Advance; ligne pilote de production industrielle, en salle blanche.



#### Ci-dessus

Analyse olfactive d'échantillons de fragrances avec le nez électronique NeOse Advance.



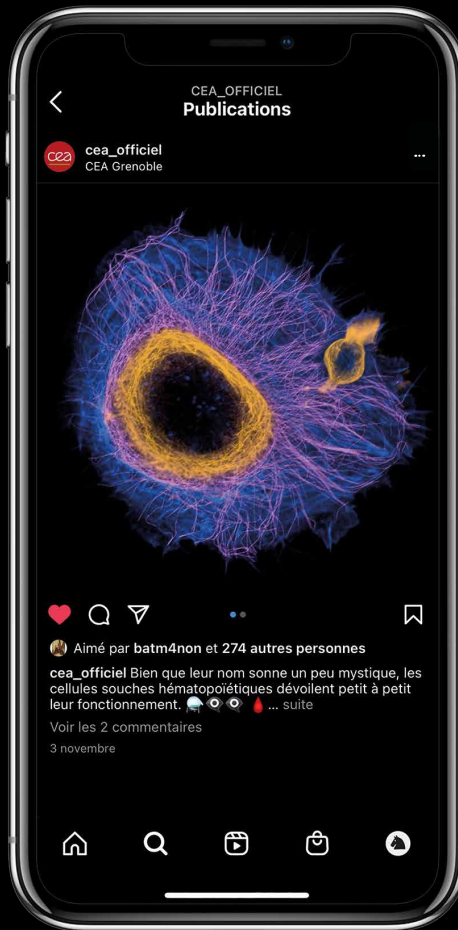
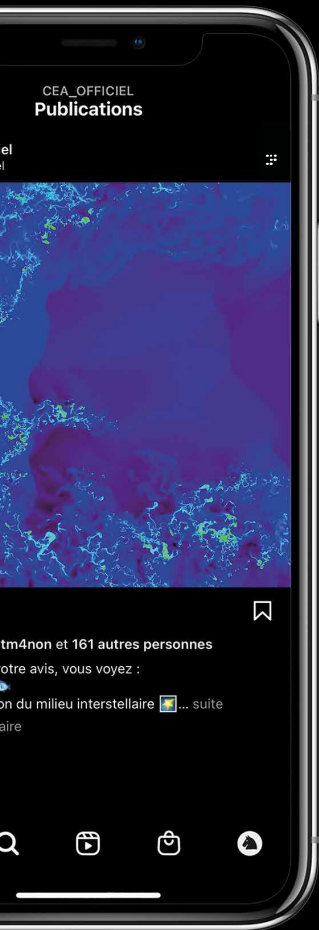
#### CEA-Leti

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

#### CEA-Irig

Institut de recherche interdisciplinaire de Grenoble.

1. Les équipes de l'ex-Inac font depuis partie du CEA-Irig.



Suivez #CEA\_Officiel

