

Les défis

LE MAGAZINE DE LA RECHERCHE IMPLIQUÉE
#247 – JANVIER / FÉVRIER 2022

du cea

DOSSIER L'usine du futur

p. 17

Making-of
**Microalgues
pour bio-
carburants**
p. 13

Tout s'explique
**Le réacteur
à sels fondus**
p. 27





L'humeur de...

Aude Ganier, rédactrice en chef

Holistique, cet ensemble supérieur à la somme de ses parties, l'usine du futur s'apprête à le devenir. Ou quand l'humain et le robot bâtissent main dans la main – le second apprenant du premier –, des solutions à la compétitivité de l'industrie nationale. Holistique l'est aussi la science-fiction quand elle vient au secours du réel et de l'imaginaire pour interroger les futurs possibles, ceux de nos interactions sociales avec les techniques, et ceux de notre humanité. Holistique, comme l'activité des chercheurs du CEA qui se consacrent aux enjeux de la santé (en particulier en ces temps de pandémie), de l'énergie et du numérique, préparant ainsi des futurs possibles.



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, 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
 Impression Papier Arctique Volume White FSC. Stipa.
 Février 2022 - N° ISSN 1163-619X. Tous droits de reproduction réservés.

ABONNEMENT
 GRATUIT SUR
bit.ly/abonnement-defis

SOMMAIRE #247

À LA UNE

03 Covid-19
 Expertise préclinique

EURÉKA

07 Analyse du cycle de vie
 Quelle empreinte environnementale pour le solaire?

09 Efficacité énergétique
 Climatisation sobre

09 Électronique
 Des puces doublement protégées

10 Biologie
 Le gel antistress des tardigrades

11 Imagerie cérébrale
 Rupture technologique prometteuse

12 Stockage thermique
 Conserver la chaleur avec du sucre!

12 Santé
 Prothèse connectée

MAKING-OF

13 Microalgues pour biocarburants

AGORA

32 Grenoble, capitale verte 2022

32 Doper la puissance de calcul de la France

32 Cap 1000 alternants

33 Le Webb est arrivé

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

DOSSIER NUMÉRIQUE

L'usine holistique réinvente l'industrie



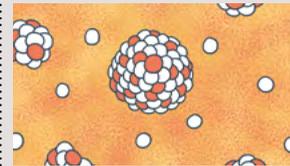
17 L'usine holistique réinvente l'industrie

20 Gérer l'usine grâce à son avatar

21 La question de la sécurité

23 Quand le robot collabore avec l'humain

25 Indispensable intelligence artificielle



TOUT S'EXPLIQUE

27 MSR, convertisseur d'actinides?

34 Sécuriser les opérations numériques du citoyen

34 Une charte pour les partenaires industriels

34 Le nouveau supercalculateur Exa1

REGARDS CROISÉS

30 Penser les futurs grâce à la science-fiction
 Roland Lehoucq et Sylvie Lainé



LE COIN DES START-UP

35 Extractive valorise les déchets industriels

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

À LA UNE



© L. Godart / CEA

COVID-19

Expertise préclinique

Dès le début de la pandémie de Covid-19, il y a maintenant deux ans, la mobilisation des chercheurs du CEA a été massive. De nombreux projets ont émergé de ses instituts pour développer des méthodes de détection du virus, comprendre la maladie et participer à la recherche de traitements et vaccins. Notamment au sein de l'infrastructure Idmit, sollicitée par la communauté scientifique nationale et internationale pour son expertise dans les études précliniques.

PAR SYLVIE RIVIÈRE

30 janvier 2020 : un mois après l'annonce officielle par la Chine de premiers cas d'une forme grave de pneumonie d'origine inconnue, l'OMS déclare que l'épidémie constitue « une urgence de santé publique de portée internationale ». À Fontenay-aux-Roses, au sein du CEA-Jacob, Roger Le Grand sait déjà qu'Idmit, l'infrastructure nationale en biologie et santé qu'il dirige, aura un rôle à jouer : « nous avons très vite été sollicités par les autorités sanitaires françaises, notamment par Reacting (voir Focus) ». Et pour cause. Idmit centralise en un même lieu à la fois des experts venant de plusieurs organismes et des équipements de pointe pour

↑ Ci-dessus

L'imageur TEP-TDM d'Idmit (Tomographie par émission de positons – Tomodensitométrie à rayons X) a été adapté au confinement biologique de niveau 3 pour étudier les maladies infectieuses. Cet équipement est unique en France.

FOCUS

Reacting

Ce consortium multidisciplinaire, piloté par l'Inserm, a été créé en 2013 pour coordonner la recherche française en cas d'épidémie liée à des maladies infectieuses émergentes et réémergentes. Il a fusionné le 1^{er} janvier 2021 avec l'ANRS (ex. Agence nationale de recherche sur le sida et les hépatites virales) pour devenir « ANRS | Maladies infectieuses émergentes », agence autonome de l'Inserm.

1. La chloroquine et son homologue l'hydroxychloroquine ont le même mode d'action, mais un profil d'utilisation différent.

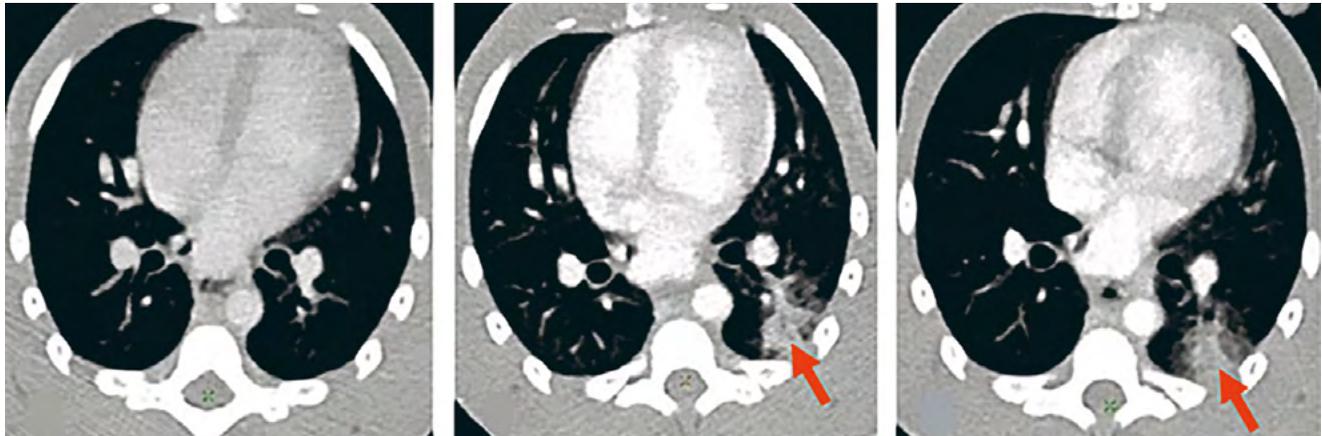
2. AMM (autorisation de mise sur la marché) provisoire délivrée en cas d'urgence de santé publique. Elle peut devenir une AMM standard si les fabricants des vaccins fournissent toutes les données scientifiques nécessaires à son établissement, selon un calendrier défini.

3. Chiffres au 28 janvier 2022.



Ci-dessous

La Covid-19 cause des lésions pulmonaires visibles en imagerie TEP-TDM : contrôle avant infection (à gauche), 2 jours après (au milieu, flèche rouge) et 5 jours après (à droite, flèche rouge).



© Idmit / CEA

se consacrer à la recherche sur les maladies infectieuses, avec la possibilité de pouvoir conduire des études précliniques sur des primates non humains (PNH). Celles-ci restent encore aujourd'hui un passage obligé pour tester des solutions thérapeutiques et vaccinales avant de les étudier chez l'humain. Elles y sont conduites dans un cadre réglementaire très strict et selon la règle éthique dite des 3R (réduction, raffinement, remplacement).

De l'importance d'un modèle animal

Dès la fin février 2020, la souche, isolée par l'Institut Pasteur, arrive dans le laboratoire de haute sécurité d'Idmit. L'urgence est alors de mettre au point un « modèle animal » de l'infection par le virus, mimant le développement de la maladie chez l'humain. Ce sera chose faite dès la mi-mars, avec un modèle de PNH. « *Les macaques s'infectent naturellement par le SARS-Cov-2 – le virus responsable de la Covid-19 – et ont un système immunitaire très proche de celui de l'humain*, indique Roger Le Grand. *La Covid-19 se manifeste chez eux avec les mêmes symptômes et selon une évolution clinique très comparable, ce que nous avons pu montrer.* » Grâce à ce modèle, les équipes vont mener de front trois chantiers : étudier la physiopathologie de la Covid-19, c'est-à-dire décrypter ses mécanismes de transmission et d'infection, tester des vaccins et des traitements.

Repositionner des médicaments

Pour l'être humain, la maladie est totalement nouvelle. Aucun traitement efficace n'existe. La voie la plus rapide pour espérer trouver une solution est de « piocher » dans les molécules thérapeutiques existantes,

dont on pense qu'elles pourraient avoir une action contre la Covid. Autrement dit, faire du « repositionnement thérapeutique ». Très vite, la chloroquine (un antipaludéen), propulsée sur le devant de la scène médiatique par le Pr Didier Raoult le 25 février, s'invite dans le débat scientifique. Son dérivé, l'hydroxychloroquine, connu pour provoquer moins d'effets secondaires¹, sera inséré dans l'essai clinique européen *Discovery* conçu pour évaluer quatre traitements expérimentaux. L'étude est lancée le 22 mars 2020. Idmit participe aux travaux et teste les effets de la molécule chez le PNH dans plusieurs configurations, seule ou en association avec l'azithromycine (un antibiotique), aussi bien avant qu'après l'exposition au virus (immédiatement, puis à J + 5), à forte comme à faible dose. « *Dans aucune des situations, nous n'avons vu un impact sur la réplication virale, y compris dans les poumons, siège majeur de l'infection. Le traitement n'est pas efficace sur nos modèles animaux* », assure Roger Le Grand. Les résultats seront rapidement communiqués à l'OMS, puis publiés dans la revue *Nature* en juillet 2020.

Depuis deux ans, une dizaine de molécules de repositionnement ont ainsi été testées à Idmit, sans qu'aucune ne se soit révélée efficace. « *L'ivermectine, antiparasitaire vétérinaire, également très médiatisé, n'a pas fonctionné, tout comme des anti-VIH. Au vu de nos résultats précliniques sur ces derniers, les deux essais cliniques prévus en France, l'un en traitement, l'autre en prévention, n'ont d'ailleurs pas été lancés.* »

Trouver de nouveaux traitements

Partout dans le monde, de nouvelles stratégies thérapeutiques sont explorées, parmi



© L. Godard / CEA

lesquelles des anticorps monoclonaux. Le président Donald Trump en avait d'ailleurs bénéficié en octobre 2020, dans un traitement expérimental. « *Nous avons étudié plusieurs anticorps monoclonaux dirigés contre la souche virale initiale, certains en collaboration avec des industriels, d'autres avec des structures académiques. Depuis 2012, nous avons en effet construit un grand réseau de partenariats, notamment en Europe. C'est pourquoi ces équipes internationales sont naturellement venues nous solliciter* », commente Roger Le Grand. Dans les études précliniques, ces macromolécules sont efficaces en prévention ou peu de temps après l'infection, mais beaucoup moins en thérapie. Mais compte tenu de leurs prix, il s'agit d'un marché de niche, réservé pour l'instant aux personnes les plus fragiles. « *Nous participons actuellement à un grand consortium européen nommé Care, qui développe de nouvelles générations d'anticorps, plus efficaces et plus abordables* », ajoute l'expert. L'autre classe de molécules thérapeutiques explorée est celle des antiviraux, à l'instar du traitement Paxlovid de Pfizer, qui agissent en diminuant la capacité du virus à se répliquer, freinant ainsi la maladie.

Des vaccins et des rappels

Face à une telle pandémie, la question de la mise au point d'un vaccin s'est d'emblée

posée. Deux ans plus tard, dix vaccins bénéficiant d'une autorisation d'utilisation d'urgence par l'OMS sont déjà utilisés dans le monde, dont cinq en Europe sous autorisation d'utilisation conditionnelle², délivrée par l'Agence européenne du médicament. Malgré cela, plus de 300 candidats-vaccins sont encore en cours de développement, dont 140 en essais cliniques³. Et ce, pour plusieurs raisons que Roger Le Grand détaille : « *les vaccins à ARN messenger, comme ceux de Pfizer et Moderna, très efficaces en première intention, souffrent d'une courte durée d'efficacité. Face à un virus qui persiste dans l'environnement, des rappels sont nécessaires, mais nous avons peu de recul sur l'utilisation répétée de technologies à ARNm. En revanche, nous disposons d'un long historique sur le fonctionnement, l'efficacité et l'innocuité de formules plus classiques, comme celles à base de protéine recombinante, même si leur production est plus longue et plus coûteuse. J'ajoute que la recherche doit aussi continuer à explorer d'autres possibilités* ».

La piste des vaccins protéiques...

Plusieurs de ces candidats-vaccins protéiques sont fondés sur des approches innovantes, comme la formule développée au CEA-Irig par l'équipe de Winfried Weissenhorn, initialement développée pour un vaccin contre le VIH et ici adaptée au



Ci-contre

Le microscope biphotonique pour l'imagerie *ex et in vivo* à l'échelle cellulaire permet de suivre les interactions hôte-pathogène.

LEXIQUE

Étude préclinique

Le développement d'un médicament ou d'un vaccin comporte une série d'étapes. La phase préclinique correspond aux études *in vitro* ou sur modèle animal, indispensables avant le passage aux essais cliniques chez l'humain (qui se déroulent en trois phases).

Anticorps monoclonaux

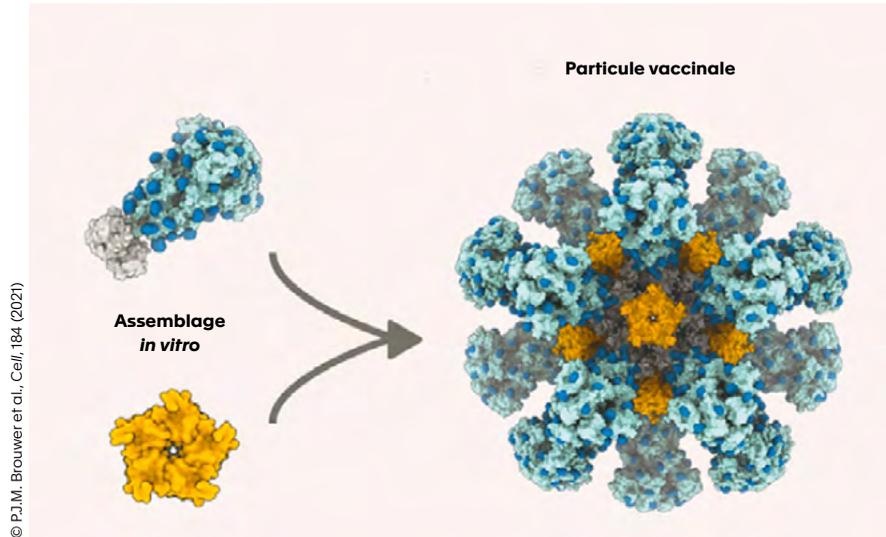
Les anticorps sont des protéines de défense produites par notre système immunitaire. Les anticorps monoclonaux sont produits en laboratoire par des cellules sélectionnées en culture pour leur capacité à produire un anticorps particulier, dirigé contre un seul antigène (molécule étrangère à notre organisme, par exemple appartenant à un virus, une bactérie pathogène, etc.). Plus de 30 anticorps monoclonaux thérapeutiques sont commercialisés en France (source : Vidal).

ARN messenger

Copie transitoire d'une portion de l'ADN correspondant à un ou plusieurs gènes (ici, du virus), utilisée comme intermédiaire par les cellules pour la synthèse des protéines.

Liposome

Vésicule lipidique artificielle, à cœur aqueux, dont la membrane est constituée d'une ou plusieurs bicouches de lipides.



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

↑ Ci-dessus

Architecture de la particule vaccinale testée à Idmit, constituée de 20 protéines Spike associées à 12 autres protéines (des pentamères de ferritine).

« Nous avons montré que le virus se répliquait tout aussi bien chez les nourrissons que chez les adultes, mais avec des signes d'inflammation et de pneumonie très faible. »

Roger Le Grand,
directeur d'Idmit, au CEA-Jacob

CEA-Jacob

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

4. Une collaboration entre l'université de Harvard, le CEA, l'Inserm et l'université Paris-Saclay. Financement : la Fondation Bill et Melinda Gates.

SARS-Cov-2. « Ce sont des liposomes synthétiques recouverts de la protéine Spike du virus (qui lui permet de pénétrer dans les cellules humaines). Ces structures que nous avons testées en études précliniques, ressemblent par leur taille et leur configuration de surface à des particules virales », précise Frédéric Martinon, chercheur à Idmit. Une autre approche, développée dans le cadre d'une collaboration entre Idmit et le *Vaccine Research Institute* (Inserm, université Paris-Est Créteil), consiste à fusionner une protéine du virus avec un anticorps monoclonal ciblant des cellules immunitaires majeures, dites dendritiques, faisant ainsi d'une pierre deux coups : l'anticorps, en se fixant sur les cellules dendritiques, délivre la protéine virale exactement au bon endroit, là où commence la réponse immunitaire. « Nous avons aussi testé, en collaboration avec l'université d'Amsterdam, un assemblage entièrement constitué de protéines. Tel un Lego®, il comprend 20 protéines Spike associées à 12 autres protéines (des pentamères de ferritine au préalable testées pour leur innocuité), l'ensemble atteignant environ la taille d'un petit virus. » Comme le pressentaient les chercheurs, toutes ces stratégies basées sur la présentation de protéines virales ont obtenu d'excellents résultats précliniques, avec une forte production d'anticorps neutralisants, protecteurs contre l'infection, ouvrant la voie au lancement d'essais cliniques.

... et celle des vecteurs viraux

Parmi les stratégies vaccinales, l'utilisation de vecteurs viraux, connue de longue date,

est aussi une option explorée. L'idée est de faire produire dans l'organisme une protéine du SARS-CoV-2 en se servant de la machinerie d'un autre virus, inoffensif. De très beaux résultats ont ainsi été obtenus avec un vecteur nommé AAVCovid, appartenant à une famille de virus non pathogènes pour l'homme⁴. « Le gène codant la protéine Spike y a été introduit, de sorte que celle-ci soit directement exprimée dans les cellules humaines. Nos tests ont montré une réponse immunitaire forte et stable pendant au moins huit à douze mois, et ce, avec une seule dose que l'on peut conserver à température ambiante », s'enthousiasme Frédéric Martinon. Les essais cliniques sont déjà envisagés dans différentes régions du monde.

Comprendre la pathologie

Il est aussi crucial de comprendre le fonctionnement de cette nouvelle maladie, tout comme l'impact des différents variants du virus, dont les principaux sont testés à Idmit (alpha, bêta, delta, omicron...). Pourquoi tel variant est-il plus transmissible ou plus actif qu'un autre ? Est-ce dû à son organisation moléculaire ? Contourne-t-il mieux la réponse immunitaire de son hôte ? Ces pistes sont toutes explorées, toujours en collaboration avec d'autres instituts. La Covid-19 affecte également le microbiote intestinal, comme pour la grippe. La maladie altère ainsi un allié indispensable à notre système immunitaire, notamment via les acides gras qu'il produit. Des déséquilibres importants ont été en particulier observés entre les différents microorganismes – principalement des bactéries, mais aussi des virus, parasites et champignons – qui le composent. Dès le début de la pandémie, des pédiatres ont questionné les équipes de Fontenay-aux-Roses sur la susceptibilité des nouveau-nés à l'infection. « Nous avons montré que le virus se répliquait tout aussi bien chez les nourrissons que chez les adultes, mais avec des signes d'inflammation et de pneumonie très faibles », résume Roger Le Grand. Une découverte importante, confirmant aussi le rôle des enfants, et même des plus jeunes d'entre eux, dans la propagation de l'épidémie. Ces résultats ne sont qu'un extrait des multiples études réalisées au sein d'Idmit, qui consacre aujourd'hui 40 à 50 % de ses activités à la lutte contre la Covid-19. Un ratio qui devrait, selon toute vraisemblance, perdurer encore un certain temps. ●

EURÉKA L'ACTU DES LABOS



© D. Guillaudin / CEA

ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Quelle empreinte environnementale pour le solaire ?

↑ Ci-dessus

Plateforme solaire de production de cellules photovoltaïques du CEA.

Consommer de l'électricité produite à partir d'énergie solaire permet à un usager de réduire considérablement son empreinte carbone par rapport aux énergies fossiles. Mais jusqu'à quel point ? Et avec quelles conséquences sur l'environnement ? C'est ce que peuvent déterminer les ingénieurs du CEA-Liten pour n'importe quelle technologie, même à l'état de recherche amont. L'occasion de confirmer la voie prometteuse des cellules solaires « tandem ».

PAR VAHÉ TER MINASSIAN

Guider les chercheurs et concepteurs de modules photovoltaïques vers des choix technologiques toujours plus vertueux : voici ce que propose le logiciel ÉcoPV mis au point par Nouha Gazbour et ses collègues du CEA-Liten à l'Institut de transition énergétique Ines.2S. Cet outil inédit fournit l'analyse du cycle de vie (ACV) de toutes les catégories existantes de cellules solaires à base de silicium. Grâce à lui, il est désormais possible d'évaluer en amont de la phase de réalisation l'intérêt des innovations vis-à-vis de l'environnement. « Les logiciels d'ACV disponibles dans le commerce sont généralistes, car conçus pour fonctionner dans n'importe quelle branche industrielle et pour des technologies matures, explique l'ingénieure-chercheuse. Par ailleurs, leur utilisation nécessite des connaissances dans le domaine de l'environnement que ne sont

pas tenus de posséder les ingénieurs travaillant en recherche amont. En pratique, ils ne s'en servent pratiquement pas. »

Du sur-mesure pour le photovoltaïque

D'où les efforts conduits depuis 2015 par l'Ines.2S en vue de concevoir une plateforme d'ACV adaptée aux besoins des spécialistes du secteur du photovoltaïque. Doté d'une interface graphique qui le rend facile d'emploi, ce logiciel a été développé grâce à un réseau d'experts coordonné par Nouha Gazbour lors de sa thèse. Ces derniers alimentent régulièrement une banque de données, avec les informations techniques et économiques qu'ils récoltent dans leurs domaines d'activité respectifs. Modification de la taille ou de l'épaisseur des wafers en silicium entrant dans la fabrication des cellules photo-



© D. Guillaudin / CEA

voltaïques, remplacement de l'aluminium du cadre des modules par un autre matériau, nouvel usage des installations, introduction du recyclage des panneaux solaires... l'ÉcoPV est ainsi à même d'évaluer l'impact sur l'environnement de n'importe quel procédé nouveau en le comparant à une technologie de référence. Et cela, en tenant compte de l'évolution du marché ou de l'emplacement des sites de production industrielle, ainsi que d'une large palette de filières technologiques. «*En effet, une grande partie de notre activité est consacrée à agrandir notre bibliothèque de référence*», précise-t-elle.

La première banque de données des matériaux des cellules tandem

Concernant les seules cellules solaires, l'Éco-PV comprenait jusqu'à présent les six technologies en silicium cristallin les plus répandues. À commencer par la PERC¹ qui, avec un rendement de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique de 21,5%, occupe aujourd'hui 90% du marché. Ou encore la voie prometteuse de l'hétérojonction sur silicium explorée depuis 2007 par le CEA-Liten qui détient le record mondial de 25% de rendement. La plateforme s'enrichit aujourd'hui d'une analyse supplémentaire: celle des cellules solaires «tandem». Ces dispositifs, étudiés également au CEA depuis 2017, sont constitués d'une *top cell* (cellule avant) à base

de minéraux pérovskites et d'une *bottom cell* (cellule arrière) en silicium à hétérojonction. Avec un rendement record de 30%, ils pourraient un jour révolutionner le domaine du photovoltaïque même si leur efficacité n'a pour l'instant été démontrée qu'en laboratoire sur des surfaces de l'ordre de 1cm². Mais, à nouveau, avec quel impact sur l'environnement? C'est ce qu'a voulu savoir l'équipe de Nouha Gazbour en constituant la première banque de données d'inventaires pour les matériaux potentiels de la *top cell* et leurs procédés industriels de dépôts. Puis en élaborant à partir de ces informations un «module tandem» de référence utilisable pour des ACV.

L'énorme potentiel de ces cellules pérovskite-silicium

Le résultat? Il montre que cette technologie offre un énorme potentiel en matière de protection de l'environnement. Par comparaison avec celle des PERC, une filière industrielle à base de cellules tandem serait largement meilleure pour le climat: elle générerait 2,5 fois moins de gaz à effet de serre et même 5 fois moins si ces équipements étaient fabriqués non pas en Chine mais en Europe. Elle serait aussi quatre fois moins polluante et gourmande en ressources.

Reste à la mettre définitivement au point. Ce à quoi s'emploient déjà les chercheurs de l'Ines.2S. ●



Ci-contre

Laboratoire dédié aux cellules solaires tandem pérovskite/silicium.

FOCUS

L'analyse du cycle de vie

À l'étude depuis 2009 au CEA, l'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode normalisée pour quantifier les impacts environnementaux d'un produit industriel, d'une technologie ou encore d'un scénario économique. Elle prend en compte toute la chaîne de valeur depuis l'acquisition des matières premières au recyclage, en passant par la fabrication, le transport, l'installation et l'usage. Alors qu'un bilan carbone livre uniquement une information sur les gaz à effet de serre, une ACV fournit des données sur seize indicateurs identifiés par l'Union européenne:

- Changement climatique
- Particules fines
- Épuisement des ressources en eau
- Épuisement des ressources énergétiques
- Usage des terres
- Épuisement des ressources minérales
- Appauvrissement de la couche d'ozone
- Acidification des écosystèmes
- Radiation ionisante
- Qualité de l'air
- Eutrophisation terrestre (excès d'azote)
- Eutrophisation marine
- Eutrophisation eau douce
- Toxicité de l'eau
- Toxicité cancérigène
- Toxicité non cancérigène

1. *Passivated Emitter and Rear Cell*: émetteur passivé et contact arrière.



CEA-Liten

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

EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE Climatisation sobre

Alors que la climatisation représente 17% de la consommation électrique mondiale, des chercheurs du CEA-Liten développent un nouveau système de climatisation économe en énergie et qui peut même produire de l'électricité!

PAR AUDE GANIER

Dans un climatiseur, un fluide réfrigérant est évaporé à basse température; ce changement de phase (liquide à gazeuse) induit un refroidissement de l'air. Le fluide évaporé est alors à basse pression et il doit être comprimé pour pouvoir décharger la chaleur accumulée et effectuer un nouveau cycle de réfrigération. Or, les compresseurs consomment beaucoup d'énergie.

C'est pourquoi les ingénieurs du CEA-Liten se sont orientés vers des dispositifs à absorption. Ils reposent sur la capacité de certains liquides à absorber et désorber de la vapeur pour générer, grâce à une pompe, le changement de pression. Et cela, avec une

faible consommation énergétique. «*Nous avons choisi d'associer l'ammoniac comme fluide réfrigérant et de l'eau comme transporteur. Concernant l'énergie motrice, nous valorisons la chaleur issue de l'industrie (80 °C à 200 °C)*», indique Hai Trieu Phan, dont l'équipe a développé un générateur de vapeur d'ammoniac de très grande pureté. Cette vapeur alimente le cycle de réfrigération, en totalité ou partie car elle peut également être dirigée vers une turbine afin de produire de l'électricité. Protégé par plusieurs brevets, ce nouveau type de climatiseur consomme dix fois moins d'énergie qu'une version classique. ●



CEA-Liten

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

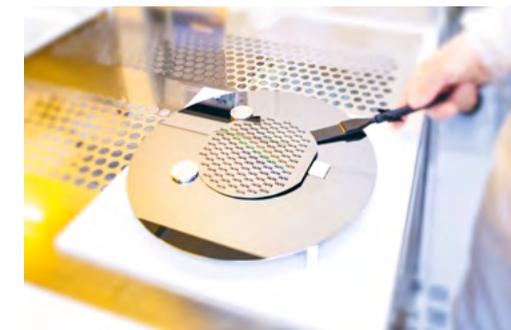


Ci-dessous

Banc de test du dispositif à absorption.



© H.T. Phan / CEA



© A. Aubert / CEA

ÉLECTRONIQUE Des puces doublement protégées

Le CEA-Leti propose un nouveau blindage pour augmenter le niveau de protection des puces électroniques.

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Se protéger toujours plus contre les attaques malveillantes: telle pourrait être la devise des concepteurs de circuits électroniques (ou puces). Le CEA-Leti propose ainsi un tout nouveau bouclier appelé Chaxa, assurant une protection à la fois passive et active contre l'observation des données sensibles contenues dans une puce et les attaques par perturbation du signal. Une couche de particules de ferrite, déposée sur la surface de la puce, forme un premier niveau de protection par blindage passif. Un peu à la manière d'un mur antibruit, il atténue à la fois le signal émis par la puce (gênant ainsi les interceptions malveillantes) ainsi que celui qui pourrait être introduit, notamment en cas d'attaque par injection de fautes électromagnétiques. Ajoutées à ce blindage passif, des bobines de ferrite sont disposées de part et d'autre de la puce. Elles se comportent comme des sondes d'émission et de réception, créant une barrière magnétique active à même de détecter des sondes électromagnétiques «espion» à base de ferrite, proches de la surface du circuit, ou encore de générer un bruit électromagnétique aléatoire destiné à entraver les attaques dites par canaux cachés. ●



Ci-dessus

Étape d'implantation ionique.



CEA-Leti

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

BIOLOGIE

Le gel antistress des tardigrades

Les tardigrades sont des animaux microscopiques qui résistent à presque tous les stress. Par quels mécanismes ? Une équipe du CEA-Irig propose l'implication d'un gel protecteur.

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Voilà l'une des plus branches les plus intrigantes du règne vivant : les tardigrades. On en dénombre à ce jour plus de 1 000 espèces qu'on trouve dans de nombreux milieux, depuis les plus hautes montagnes jusqu'au fond des mers. Inutile de le chercher à l'œil nu, l'animal est microscopique. Long d'environ 1 mm, il est dodu, invertébré, pourvu de huit courtes pattes griffues et vit entre un et trois ans. Selon la littérature, cette branche serait vieille d'environ 500 millions d'années. Si ces animaux fascinent tant les chercheurs, c'est parce qu'ils résistent à peu près à tout : températures extrêmes (de 80 °C à -273 °C, soit le zéro absolu), pressions allant jusqu'à 7,5 gigapascals¹,

rayons X intenses et même vide spatial (on le sait parce qu'une fusée russe² en a emporté en 2007). Pour arriver à ces prouesses, le tardigrade a une parade : face à un stress extrême, il se déleste de quasiment toute son eau et stoppe tout métabolisme. Dans cet état, il peut survivre pendant un temps indéfini, puis revenir à la vie grâce à une simple goutte d'eau.

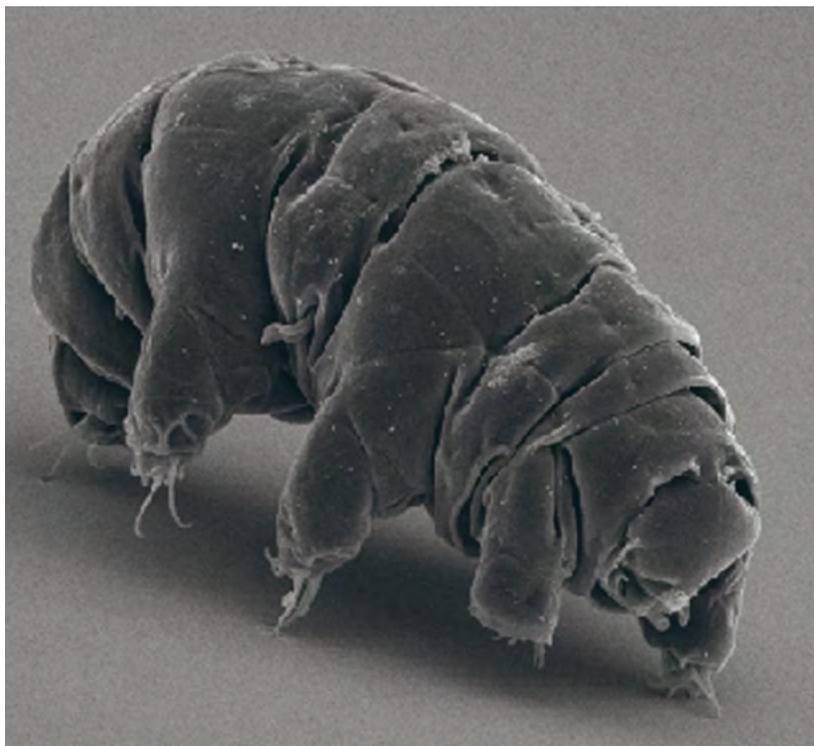
Des protéines « en gelée »

Quels en sont les mécanismes moléculaires sous-jacents ? Une équipe du CEA-Irig s'est intéressée à Cahs-8, une protéine propre aux tardigrades, dont on sait qu'elle joue un rôle dans cette réponse aux stress. Cahs-8 fait en réalité partie d'un groupe de protéines partageant une même caractéristique : elles sont parfaitement opérationnelles sans avoir de structure en 3D stable. Les chercheurs ont donc regardé de plus près la forme et le comportement de Cahs-8, en combinant résonance magnétique nucléaire, microscopie à force atomique et techniques de diffraction de la lumière et des rayons X. « Cahs-8 présente des bras désordonnés et hautement flexibles entourant un long domaine hélicoïdal central. Ce dernier a un comportement très dépendant de la température. En condition de stress, les protéines Cahs-8 peuvent s'associer via une partie de leur domaine hélicoïdal pour former des fibres, lesquelles forment à leur tour un hydrogel », explique Martin Blackledge, du CEA-Irig. Pour comprendre le rôle de ce gel, les chercheurs ont eu l'idée d'y piéger d'autres protéines : elles y ont conservé une structure intacte, tout en ayant des mouvements ralentis. Ils font aujourd'hui l'hypothèse que la formation de ce gel à l'intérieur des cellules du tardigrade permettrait d'emprisonner et de protéger ses biomolécules pour les protéger des effets délétères des stress environnementaux. ●

1. Plus de 74 000 fois la pression atmosphérique.
2. Dans une mission de l'Agence spatiale européenne.

CEA-Irig
Institut de recherche
interdisciplinaire de Grenoble.

↓
Ci-dessous
Tardigrade vu au microscope
électronique à balayage.



IMAGERIE CÉRÉBRALE

Rupture technologique prometteuse

Sans pareil pour mesurer l'activité neuronale, les équipements de magnétoencéphalographie restent toutefois chers. Au sein de sa start-up Mag4Health, une équipe du CEA-Leti propose une nouvelle technologie, éprouvée dans le spatial, qui change la donne.

PAR VAHÉ TER MINASSIAN

La magnétoencéphalographie, ou MEG, est une technique d'imagerie du cerveau s'appuyant sur la mesure du champ magnétique généré par les neurones. Utilisée en neurochirurgie (épilepsie, tumeurs, etc.) et dans le domaine de la recherche clinique (maladie d'Alzheimer), elle est la seule à même de fournir des enregistrements en temps réel de l'activité neuronale. Mais, du fait de la taille et du prix de ses équipements – de l'ordre de 4 millions d'euros –, elle reste encore peu répandue. Des chercheurs du CEA-Leti pourraient avoir trouvé le moyen de démocratiser cette méthode en remplaçant les capteurs SQUID de ces appareils par des magnétomètres à pompage optique fonctionnant à température ambiante. Pour mesurer l'activité cérébrale d'un patient, la plupart des MEG ont recours à des casques équipés au niveau de leur surface de 308 SQUIDS. « Ces capteurs sont dotés de boucles supraconductrices sensibles aux faibles champs magnétiques générés. Mais pour fonctionner, ils doivent être portés à des températures extrêmement basses : -269 °C », indique Mathieu le Prado, président de la start-up du Leti Mag4Health. Résultat : un équipement MEG classique comprend un énorme réservoir d'hélium liquide et un cryostat, le tout pesant pas moins de 500 kg et devant être installé dans une chambre blindée de 10 tonnes et de 15 m² ! Initialement conçus pour les besoins de la défense et du spatial – les trois mini-satellites de la mission Swarm de l'ESA lancée en 2013 et dédiée à la mesure du champ magnétique terrestre en sont



dotés – les magnétomètres à pompage optique pourraient constituer une alternative. « Ces dispositifs mesurent les champs magnétiques grâce à un système d'amplification du signal faisant appel à un laser et à un gaz qui se trouve être aussi de l'hélium, détaille le chercheur, et ils ont l'avantage de fonctionner à température ambiante. »

Gain de poids et de place

Une MEG ainsi équipée verrait son poids chuter à quelques kilos et pourrait tenir dans une chambre blindée de la taille d'une cabine téléphonique. Mais fonctionnerait-elle ? C'est ce qu'a pu vérifier la start-up en déployant dans sept centres hospitaliers universitaires européens des

prototypes de casques munis de cinq de ces capteurs innovants. La version à 64 capteurs du casque est attendue pour 2023 et le premier MEG commercial en 2026. Les usages devraient, dès lors, commencer à se multiplier, notamment au centre de neuro-imagerie NeuroSpin du CEA. ●

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

↑
Ci-dessus
Magnétoencéphalographe du centre
Clinatex du CEA.



© F. Aclito / CEA

STOCKAGE THERMIQUE

Conserver la chaleur avec du sucre !

Stocker de la chaleur dans le sucre est une chose, la récupérer en est une autre. C'est tout l'enjeu d'une thèse menée au CEA-Liten qui propose non pas une, mais deux solutions combinées.

PAR AUDE GANIER

Les réseaux de chaleur, vastes canalisations acheminant de l'eau chaude dans toute la ville, sont une solution prometteuse pour réduire les émissions de CO₂ liées au chauffage urbain. Cependant, il est nécessaire de conserver la chaleur entre sa production et sa consommation. Au CEA, des chercheurs proposent de la stocker dans des matériaux à changement de phase, directement dans les caves des immeubles. Le principe est le suivant : de l'eau chaude est injectée dans un dispositif pour faire fondre le matériau qui emmagasine ainsi la chaleur ; pour la récupérer, de l'eau froide circule et cristallise le matériau qui la restitue alors. Plusieurs matériaux sont à l'étude, comme les paraffines, les alcools gras et du sucre ! Issu du bouleau, ce sucre non toxique

et peu coûteux se révèle le plus performant en matière de capacité de stockage. Toutefois, les chercheurs se heurtent à un obstacle : il est très difficile de cristalliser du sucre. Différentes options sont proposées par la communauté scientifique et c'est en cherchant à les comprendre que Louis Piquard est parvenu à une bien meilleure solution : en combinant deux ! « Il s'agit d'amorcer la cristallisation par l'ajout de premiers cristaux, et de produire des bulles dans le sucre fondu ce qui accélère sa cristallisation d'un facteur dix. Nous l'avons vérifié dans notre démonstrateur qui permet par ailleurs de restituer très rapidement toute la chaleur stockée dans le sucre », explique-t-il. ●



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



Ci-dessus
Injection de cristaux de sucre dans le démonstrateur.

SANTÉ Prothèse connectée

Le système multicapteurs de la prothèse de genou *Followknee* facilite sa pose, optimise la rééducation et détecte précocement les problèmes mécaniques et les infections pour éviter la réopération du patient.

PAR AUDE GANIER

Du fait du vieillissement des populations et de l'augmentation de l'obésité, les experts estiment que la pose de prothèse de genou pourrait croître de 650 % dans le monde et représenter 3,5 millions d'interventions par an en 2030. Aussi le Pr Éric Stindel, du CHU de Brest, cherche-t-il à optimiser cet acte chirurgical et son suivi. C'est le projet *Followknee* qu'il coordonne et pour lequel le CEA-Leti a mis au point et intégré un système multicapteurs : « dans la prothèse, un capteur mécanique de déformation et un accéléromètre aident autant le chirurgien lors de la pose que le kinésithérapeute lors de la rééducation », explique l'ingénieur Olivier Fuchs. Quant à la détection d'infections, elle repose sur la combinaison, inédite au sein d'une prothèse, d'un capteur de pH et de température.

L'avantage de ce dispositif, qui tient dans un dé à coudre, est de se passer de batterie. « Le système s'allume dès que l'on pose sur la jambe une interface qui recueille en même temps les données et les envoie à un dispositif pour qu'elles soient analysées par les médecins. » Extrapolable aux prothèses d'épaule ou de hanche, le démonstrateur intéresse des spécialistes des implants médicaux. ●



© CEA



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

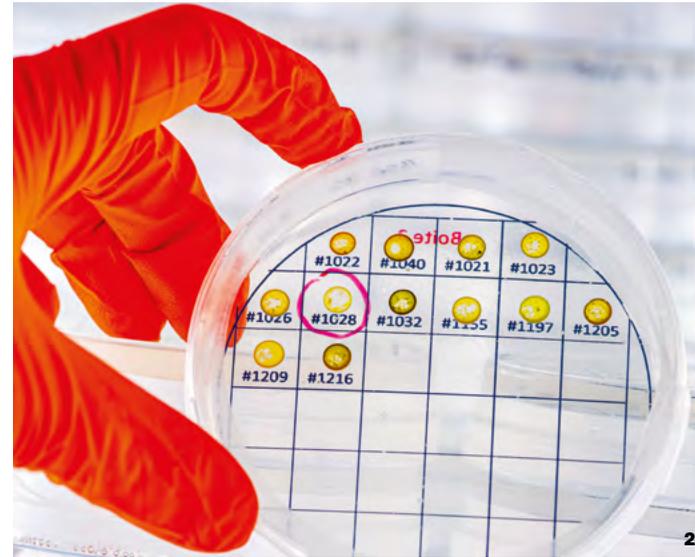
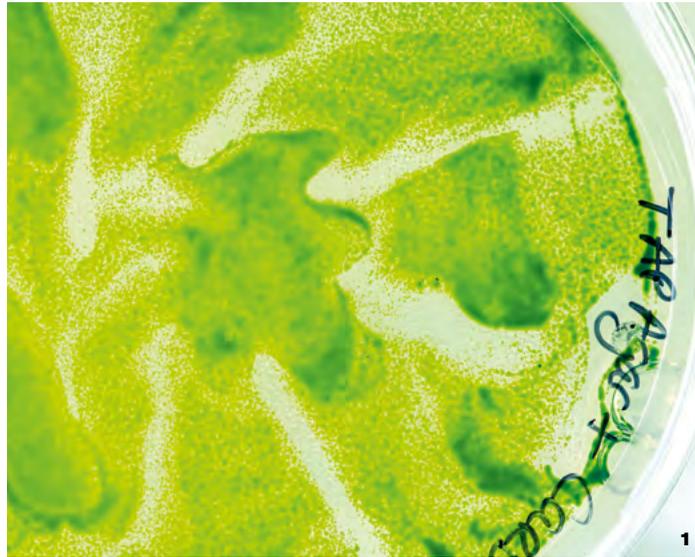
MAKING-OF COULISSES D'UN PROJET

Microalgues pour biocarburants

Face au réchauffement climatique, les scientifiques cherchent de nouvelles alternatives aux hydrocarbures fossiles pour les secteurs du transport et de la pétrochimie. L'une des pistes explorées repose sur des microalgues. Les huiles qu'elles produisent par photosynthèse – des glycérolipides – constituent des réserves d'énergie qui peuvent être transformées en biocarburants par voie chimique. Avantage : un bilan neutre en CO₂, le gaz carbonique libéré par le carburant consommé étant compensé par celui absorbé par la plante. Pour transformer cette solution en un procédé industriel économiquement viable, quelques verrous restent encore à lever, notamment ceux de la vitesse de croissance des microalgues et de leur productivité en huile. Un chantier auquel s'attèle le CEA, dans une collaboration pérenne avec TotalÉnergies, impliquant plusieurs de ses instituts : l'Irig à Grenoble (objet de ce reportage), le Biam à Cadarache ainsi que CEA Tech Paca. →

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





EN IMAGES

① Collection de microalgues comprenant des espèces marines et terrestres, qui couvre une biodiversité allant des algues vertes, algues rouges, diatomées, eustigmatophytes, à certaines espèces non photosynthétiques.

② Comparaison de colonies de microalgues témoins et modifiées par ingénierie génétique.

FOCUS

Des biocarburants pour qui ?

Le marché des biocarburants s'adresse en priorité aux gros porteurs : avions, bateaux, poids lourds routiers. Peu indiqués pour la propulsion électrique, du fait du volume et de la courte autonomie des batteries, ces modes de transport nécessitent encore des carburants liquides. Les biocarburants fournis par les microalgues font partie des alternatives bas carbone étudiées, en complément d'autres sources de biomasse.

LEXIQUE

Omiques

Ensemble de disciplines visant la caractérisation et la quantification collectives de pools de molécules biologiques. Génomique : analyse des gènes ; transcriptomique : analyse des ARN messagers ; protéomique : analyse des protéines ; lipidomique : analyse des lipides.

1 Génomique fonctionnelle

« Nous travaillons sur des microalgues marines et terrestres. Méconnues, elles présentent pourtant un fort potentiel. »

Éric Maréchal (CEA), chef de laboratoire

Pour les équipes du CEA-Irig, bien comprendre le fonctionnement des microalgues est un prérequis indispensable. Leurs mécanismes moléculaires et cellulaires, qui gouvernent la photosynthèse, l'architecture cellulaire, le métabolisme carboné (il produit toutes les molécules du vivant à partir du CO₂) ainsi que leurs réponses aux variations environnementales sont en effet encore très mal connus. Pour y remédier, les chercheurs déchiffrent les fonctions de gènes impliqués dans ces mécanismes. Comment ? Par des technologies omiques : génomique, transcriptomique, protéomique, lipidomique. Ces nouvelles connaissances sont utilisées pour développer des lignées de microalgues optimisées pour la production d'huiles énergétiques.

2 Ingénierie génétique

« Chaque étape d'ingénierie génétique vise à comprendre et optimiser les propriétés de nos microalgues. »

Juliette Salvaing (Inrae), chercheuse

C'est par ingénierie génétique que les chercheurs améliorent les lignées de microalgues, de sorte qu'elles produisent davantage d'huiles tout en ayant une croissance optimale. Grâce à l'outil d'édition génétique Crispr-Cas9 – sorte de ciseaux moléculaires –, ils créent des modifications ponctuelles dans des gènes d'intérêt, impliqués par exemple dans une voie métabolique, un système de régulation, un complexe moléculaire, etc. Les chercheurs se servent aussi de ces gènes d'intérêt comme critère de recherche pour sélectionner de nouvelles espèces de microalgues dans les collections publiques et dans tous les compartiments de l'environnement (neige, sources chaudes, mer, etc.).

3 Stabilité des souches

« Les algues que nous sélectionnons doivent être stables vis-à-vis des conditions de culture et produire des huiles à haut potentiel énergétique. »

Juliette Jouhet (CNRS), responsable de la plateforme Lipang

Les chercheurs sélectionnent les souches les plus productives et s'assurent de leur robustesse, c'est-à-dire du maintien de leur productivité (quantité et qualité des huiles produites par litre et par jour) selon les conditions de culture. Ils disposent pour cela, en plus d'un parc de chambres climatiques, d'une plateforme analytique appelée Lipang (*Lipid Analysis in Grenoble*). Cet équipement unique en France permet la qualification la plus précise et la plus exhaustive possible des différents glycérolipides présents dans un échantillon : extraction, identification, analyse structurale, quantification, etc. Toute la chaîne métabolique est ainsi finement analysée, incluant les molécules précurseurs des huiles et celles qui en découlent.

4 Préparer l'industrialisation

« Nous sommes encore dans une phase de recherche. Les retours d'expérience de l'industriel sont essentiels pour optimiser à la fois les souches et les procédés de culture. »

Alberto Amato (CEA), chercheur en génie génétique

Il faut aussi transformer le procédé de culture développé en laboratoire en un système industriel, déployé à plus grande échelle. Dans un photobioréacteur mimant en partie les conditions industrielles, les chercheurs jouent sur les concentrations, les milieux, l'apport en CO₂, etc., afin d'optimiser les cultures. Car les huiles ne sont produites qu'en condition de stress. L'enjeu est donc de trouver le bon compromis entre stress (par exemple une carence en nutriment) et croissance rapide des algues. Les souches et procédés optimisés sont ensuite transmis à l'industriel, ici TotalEnergies, qui évalue la montée en échelle.

EN IMAGES

③ Les microalgues sont mises en culture en milieu liquide stérile, sous agitation, à l'intérieur de chambres climatiques éclairées et thermostatées.

④ Mise en culture en photobioréacteur. Ce système permet de comparer les performances obtenues dans des fioles cultivées en chambres climatiques, avec celles mesurées dans des conditions mimant certains systèmes pilotes pré-industriels.

FOCUS

Ailleurs au CEA

À Cadarache, les équipes du CEA-Biam et de CEA-Tech Paca s'intéressent tout particulièrement à la production d'hydrocarbures volatils dans la phase gazeuse du milieu de culture des algues, notamment grâce à l'expression d'une enzyme prometteuse qu'elles ont découverte, la FattyAcid Photodecarboxylase. Celle-ci permet de transformer certains acides gras des microalgues en hydrocarbures à l'aide de l'énergie lumineuse.

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

**Ci-contre**

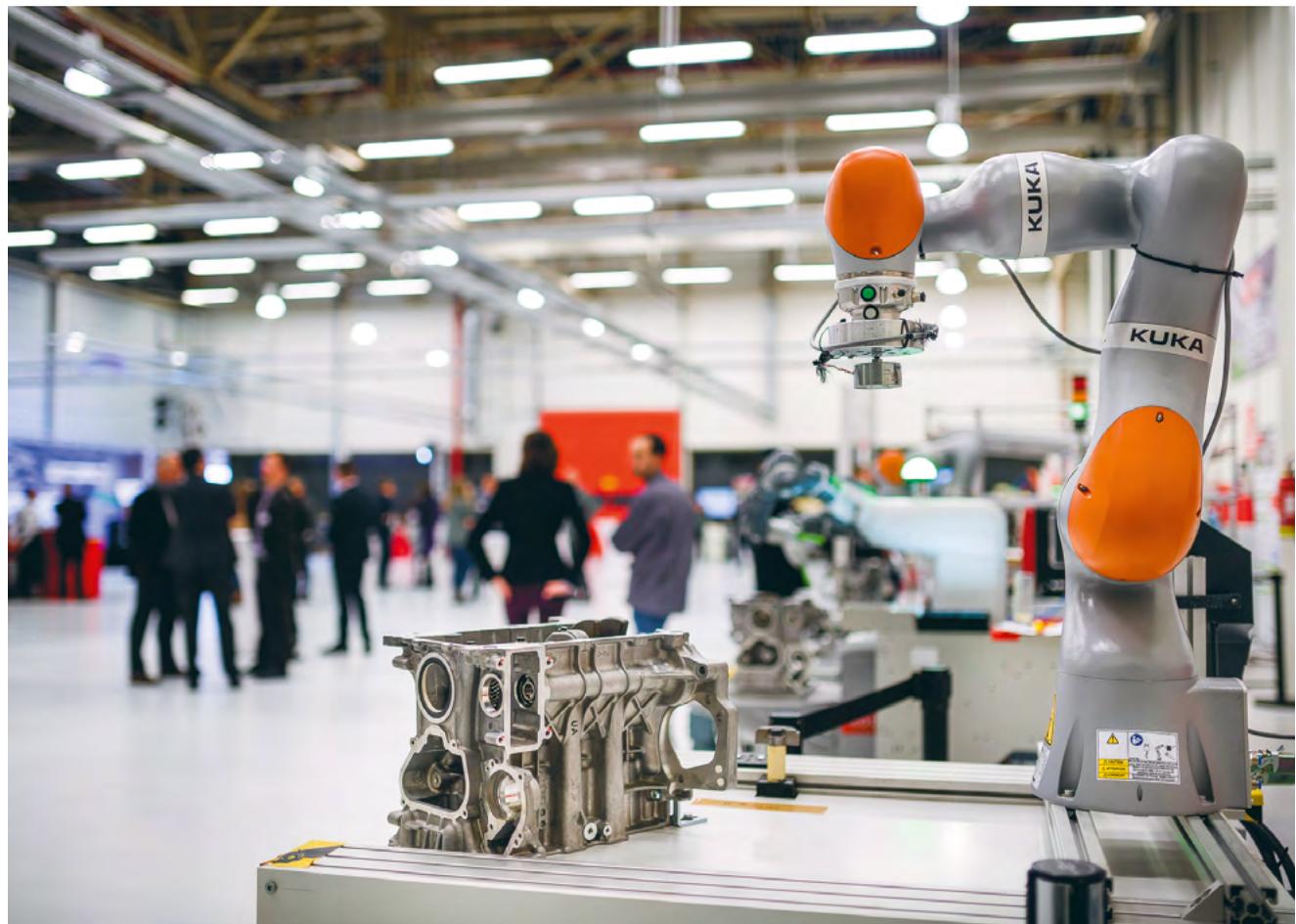
Formation au geste via le pilotage virtuel d'une opération avec un exosquelette de main.

DOSSIER NUMÉRIQUE

L'usine holistique réinvente l'industrie

PAR CÉCILE MICHAUT

C'est grâce aux nouvelles technologies que nous pourrions faire revenir les usines dans notre pays. Acteur incontournable du numérique, le CEA développe et intègre capteurs intelligents, robots collaboratifs et intelligence artificielle, qui seront indispensables pour une production efficace et flexible, en phase avec les besoins actuels.



© J. Baudouin / CEA

Et si les progrès technologiques permettaient de réindustrialiser la France ? C'est l'enjeu de l'usine du futur : une usine où la technologie ne viendrait pas concurrencer les humains, mais travailler avec eux. « La compétitivité est prépondérante dans l'industrie », assure Alexandre Bounouh, directeur du CEA-List. « C'est ce qui conduit à la solution actuelle d'aller là où la main d'œuvre est moins chère. Mais on peut aussi diminuer les coûts de production en automatisant les usines, avec des capteurs, l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA), la 5G et la 6G. C'est notre vision de l'usine du futur 4.0 et 5.0. »

Flexibilité et petites séries

Le concept d'usine 4.0 a été lancé en Allemagne en 2010, dans le but de gagner en compétitivité. C'est une réussite, notamment dans l'automobile, qui sait automatiser efficacement. Cependant, la structure de l'industrie française est différente : 90% des entreprises sont des TPE et PME et manquent de moyens pour automatiser

leur production. Elles recherchent davantage de flexibilité car elles ne produisent pas de gros volumes d'un même produit. « Elles ont souvent affaire aux petites séries : les donneurs d'ordre souhaitent une pièce pendant trois mois, puis une autre les mois suivants », observe Alexandre Bounouh. « Ce n'est pas compatible avec une automatisation complète. Il faut un outil de production plus flexible. Et la crise sanitaire de la Covid-19 l'a bien montré, lorsqu'il a fallu adapter en urgence des lignes de production standard pour fabriquer des masques ou du gel hydroalcoolique. »

La flexibilité est aussi nécessaire pour répondre aux demandes de la société : nous sommes à l'ère de la personnalisation avec des productions en quantités variables pour lesquelles les chaînes industrielles doivent pouvoir se reconfigurer automatiquement et fabriquer ainsi des objets différents sur une même ligne de production. Or, un robot industriel est un robot qui se programme, et ce n'est pas simple. Les PME ne possèdent pas ces compétences, elles

« Il faut un outil de production plus flexible, ce qui n'est pas compatible avec une automatisation complète. »

Alexandre Bounouh,
directeur du CEA-List

↑ Ci-dessus

Plateforme de transfert technologique Fflor du CEA à Metz, dédiée à la robotique collaborative.

doivent donc faire appel au fabricant pour reprogrammer. Coûteux ! « Nous travaillons à baisser ces barrières, avec de nouveaux paradigmes de programmation basés sur l'IA qui ne nécessitent pas de compétences, s'enthousiasme Alexandre Bounouh. Le principe est d'apprendre aux robots par mimétisme. » (voir p. 23)

L'humain au cœur de l'usine 5.0

Avantage : on ne supprime pas l'humain de l'usine qui devient, de fait, le formateur de ce que l'on appelle désormais le cobot, dans une approche collaborative qui signe la singularité de l'usine 5.0. Cette usine du futur nécessite de nombreuses avancées technologiques. Tout d'abord, l'installation sur les machines de nombreux capteurs connectés (IoT), à la fois peu coûteux et peu consommateurs d'énergie, notamment pour la maintenance prédictive grâce à l'IA. D'autre part, des calculs « embarqués », c'est-à-dire au plus près des capteurs, ce qui nécessite d'adapter les algorithmes. Enfin, les interfaces homme-machine, avec notamment les « technologies à retour haptique » (permettant de ressentir une force quand le robot touche quelque chose), ou les réalités virtuelle et augmentée.

Du sur-mesure en toute sobriété

Une autre technologie s'invite dans l'usine du futur : la fabrication additive, c'est-à-dire la version industrielle de l'impression 3D qui permet de fabriquer facilement des pièces différentes et personnalisées tout en utilisant moins de matière que les procédés de fabrication traditionnels. Cependant, plusieurs défis restent à relever. D'abord, accélérer la fabrication d'objets par impression 3D, afin notamment d'intégrer ce type de fabrication au cycle classique d'une usine. D'autre part, contrôler en temps réel cette fabrication, afin d'éviter les rebuts. « En cas de dérive, il est possible d'arrêter le processus au plus tôt, ou de mieux se connecter au module de conception pour tenir compte de ces défauts et changer le design en temps réel. » Simple à programmer, gardant une place importante à l'humain, et diminuant ses impacts énergétiques et environnementaux, l'usine du futur est bien en phase avec les problématiques d'aujourd'hui et de demain. ●

FOCUS

Sobriété de l'Internet des objets

Dans l'usine du futur, beaucoup d'informations circulent. Elles proviennent des différents postes et remontent vers un système de traitement, puis les commandes d'actions redescendent vers ces postes. Pour cela, les réseaux sans fil sont très souples et facilement déployables. Mais les difficultés ne manquent pas. Comment par exemple éviter les interférences pour que l'information se propage correctement ? Comment faire durer 5 à 10 ans les capteurs sans changer leur pile ? Ces questions sont celles de l'Internet des objets

(IoT), qui fait lui aussi l'objet de nombreuses recherches. « Nous développons des protocoles de communication sobres, afin d'échanger le moins de données possibles, le moins souvent possible », explique Éric Mercier, chef-adjoint de service au CEA-Leti. « Il faut au maximum traiter en local pour minimiser la quantité d'information à transmettre à des niveaux plus hauts. C'est le Mobile Edge Computing, ou MEC, qui consiste à traiter au plus près du capteur pour ne communiquer que lorsqu'il y a nécessité de le faire. »

L'usine du futur a besoin de la 5G

Pourquoi la 5G, voire la 6G, sont-elles indispensables à l'usine du futur ? Parce que celle-ci est bardée de milliers de capteurs qui surveillent le bon fonctionnement de la chaîne et font remonter les données vers le cloud ou vers un cloud local. Or, cela passe par la 5G. « Aujourd'hui, la gestion des usines selon le concept 4.0 n'a pas atteint tout son potentiel, car il n'est pas possible de gérer autant de données IoT avec la 4G », souligne Alexandre Bounouh. « Grâce à son débit plus élevé et davantage de bande passante, la 5G garantit un temps de traitement en quasi temps réel (moins de 10 millisecondes) pour pouvoir prendre les décisions très rapidement. » « Ce qui n'est pas le cas de la 4G, renchérit Éric Mercier, chef-adjoint de service au CEA-Leti. Elle permet également d'utiliser davantage de réseaux de communication en parallèle, avec la possibilité de découper le réseau en "tranches" et d'en réserver certaines pour une application déterminée. » Enfin, la 5G utilise des bandes de fréquences qui vont permettre de diriger les faisceaux de

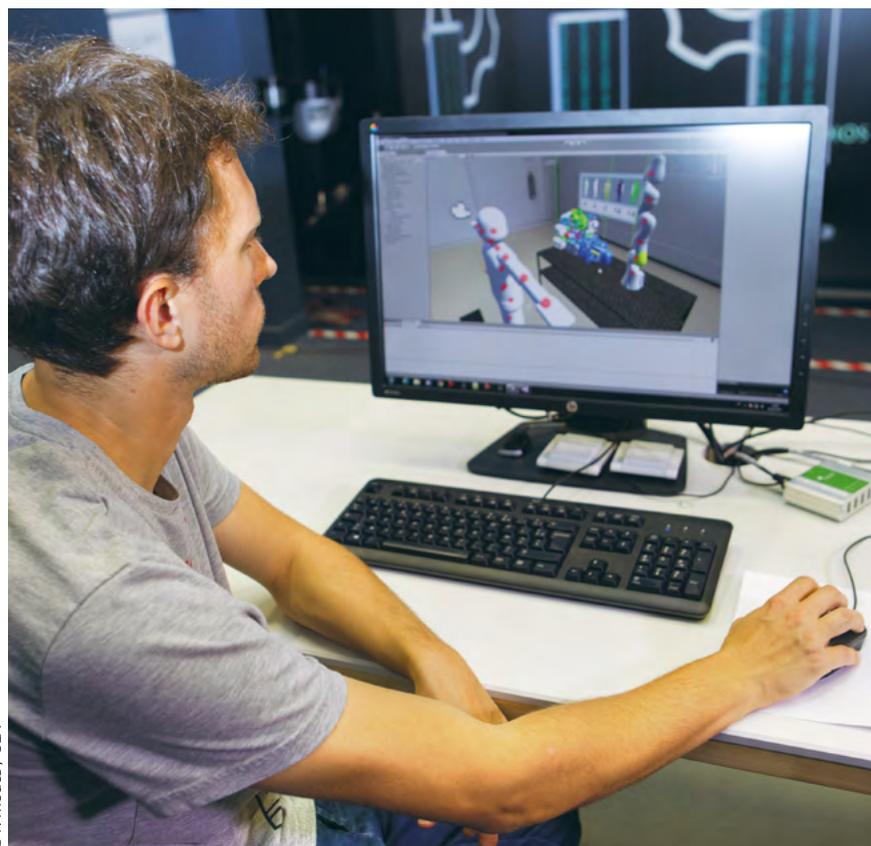


© CEA

communication, alors que la 4G parvient au mieux à couvrir un secteur géographique. « Il est ainsi possible de viser un point précis avec lequel on souhaite communiquer et minimiser les interférences », se réjouit le spécialiste. Quant à la 6G, elle s'intéressera à la fiabilité de l'intelligence traitant l'information reçue en plus de la fiabilité de la donnée. Et elle sécurisera la donnée échangée entre les capteurs et les acteurs. « Ce sera un saut technologique énorme sur lequel nous travaillons depuis trois ans », annonce Emilio Calvanese Strinati, directeur de programme au CEA-Leti.

↑ Ci-dessus

Démonstrateur 5G du CEA.



© F. Thodes / CEA

Gérer l'usine grâce à son avatar

Essayer et se tromper coûte cher dans la vie réelle, beaucoup moins dans le virtuel. D'où l'intérêt de tester numériquement le fonctionnement de l'usine avant de la construire ou de la modifier « en vrai ». Et cela, grâce au jumeau numérique holistique...



Ci-dessus

Analyse des mouvements d'un avatar pour établir la cotation ergonomique d'un poste.

Jumeau numérique holistique: drôle de nom pour ce qui pourrait être une révolution dans l'industrie. Imaginez qu'avant de construire une usine, on soit déjà capable de la créer sur ordinateur et de la faire interagir avec le monde réel. La clé: créer son jumeau numérique. Et « holistique » alors? Ce qualificatif signifie que l'on tient compte de toutes les dimensions et composants des produits fabriqués, et de l'usine dans son ensemble, qui évoluent dans le temps et l'espace; ce qui pourrait aussi s'appliquer à une ville.

Grâce à cet avatar, on serait capable d'analyser la manière dont les opérateurs utilisent un équipement pour produire un objet, puis d'améliorer numériquement leurs conditions de travail, notamment d'un point de vue ergonomique, de les simuler pour les valider. Et ce n'est que lorsque tout serait réglé et optimisé que serait lancée la pro-

duction de cet objet, par ailleurs bardé de capteurs (température, déplacement, corrosion...) connectés, dont les données seraient intégrées au jumeau numérique pour une optimisation dynamique et continue.

Soudure de voiture et réacteur nucléaire

Par exemple, sur une ligne de ferrage, où les pièces métalliques des voitures sont soudées, le jumeau numérique permettra de dimensionner la ligne pour que le flux soit continu sans jamais manquer de pièces. Dans un réacteur nucléaire, il servira à tester son fonctionnement à la fois avec des outils de simulation et sur l'installation tangible. Autre avantage: le jumeau numérique préparera les opérations de maintenance dans le monde virtuel avant de les transposer dans le réel. Plus économique, cette voie permet également de mieux maîtriser l'opération en prévoyant, par exemple, les pannes grâce à l'intelligence artificielle (IA). Celle-ci donnera aussi l'opportunité de corriger un processus au fur et à mesure, soit pour continuer la production malgré une défaillance, soit pour l'optimiser.

« On considère que la généralisation des jumeaux numériques permettrait de réaliser des économies d'énergie substantielles ainsi qu'une réduction importante des émissions de CO₂ », estime Alexandre Bounouh, directeur du CEA-List.

Traiter l'information au plus près

Dans l'usine du futur, les capteurs mesureront de nombreuses données qui viendront alimenter le jumeau numérique holistique, lequel saura voir l'usine dans son ensemble. Mais, du fait des modèles numériques à manipuler et de la quantité de données à traiter, cette technologie a un coût, celui des ressources en calcul et donc en énergie nécessaires. « Nous développons des algorithmes et des outils numériques plus sobres », expose Alexandre Bounouh. Par exemple, au lieu de remonter systématiquement toutes les données dans le cloud pour qu'elles soient traitées, on les traite au fur et à mesure pour n'en garder que quelques-unes en mémoire, ce qui se fait localement. »

Plusieurs avantages: réduction du nombre d'informations qui remontent, augmentation de la robustesse du système, meilleure localisation de l'origine des données. Faire mieux avec moins semble à la portée de l'usine de demain. ●

La question de la sécurité

Comme tout système numérique, une usine basée sur les logiciels, l'Internet des objets et le jumeau numérique est vulnérable. Il faut donc la protéger.

En mai 2017, le constructeur automobile Renault a dû stopper plusieurs usines. La raison: un logiciel malveillant exigeant une rançon (*ransomware* ou *rançongiciel*) baptisé Wanacry a infecté son système informatique, tout comme celui de nombreux autres industriels. Un évènement rappelant la vulnérabilité des usines, pourtant bien moins connectées que ne le sera l'usine du futur. La cybersécurité est dès lors un enjeu national, car si la capacité de production d'un pays est touchée, c'est tout le pays qui devient vulnérable.

Une communication fiable et rapide

Dans l'usine du futur, le numérique est un rouage-clé. S'il connaît une défaillance, l'usine produit des objets de mauvaise qualité, s'arrête, ou laisse fuiter des secrets industriels. Il faut donc sécuriser ses moyens de communication. « C'est comme pour la sécurisation des achats en ligne, mais avec quelques différences », explique Florent Kirchner, chef de laboratoire au CEA-List. Celle de l'usine est plus exigeante, par exemple, on peut vouloir qu'un ordre soit correctement envoyé et qu'il soit transmis très rapidement, dans des temps de quelques millisecondes. »

Le CEA a notamment collaboré avec la start-up Systemer sur un logiciel de communication au sein de l'usine, OPC-UA, basé sur un protocole ouvert (dont les lignes de code sont accessibles à tous) et aujourd'hui commercialisé. « À présent, on sait formellement sécuriser



© CEA

les logiciels embarqués classiques connus depuis des décennies. Mais il reste du travail à effectuer, en particulier sur la manière de sécuriser l'intelligence artificielle, qui sera incontournable dans les usines du futur », prévient l'expert.

S'intéresser à la chaîne d'approvisionnement

La sécurité d'une industrie ne dépend pas que de la sécurisation de ses usines, celle de la chaîne d'approvisionnement compte tout autant. En effet, il faut s'assurer que les composants soient ceux prévus, avec la qualité exigée, et produite par le fournisseur prévu. C'est là où la *blockchain* entre en jeu. Par exemple, un fabricant déclare qu'il a produit tant de lots de telle pièce avec tels critères. Il l'inscrit dans la *blockchain*, et cette information devient immuable et vérifiable par tous les acteurs de la chaîne.

Le CEA a ainsi développé une solution avec la start-up Connecting food. Leur offre: un service numérique de traçabilité alimentaire. Il s'agit de vérifier de manière non falsifiable certains critères comme l'origine, la fraîcheur

du produit ou le bien-être animal. « La même approche peut être utilisée dans d'autres secteurs, par exemple la fabrication additive (impression 3D) de pièces », souligne Sara Tucci, cheffe de laboratoire au CEA-List. La *blockchain* assure que le produit est imprimé selon le modèle envoyé au fournisseur, et permet même d'établir un identifiant unique aux pièces, signé numériquement par le producteur. » Aujourd'hui, la France est bien positionnée pour préparer l'usine du futur comme l'assure Florent Kirchner: « Nous avons l'écosystème industriel et académique, les technologies et les conditions pour collaborer. Nous avons aujourd'hui l'opportunité d'innover plus vite, plus loin que des pays comme le Japon et l'Allemagne. » ●



Ci-dessus

Développement de solutions pour renforcer la sécurité des technologies de type *blockchain*.

1. La *blockchain* est un registre de transactions, où chacun peut valider et vérifier la véracité d'une opération.

Quand le robot collabore avec l'humain

Dans l'usine du futur, finie la séparation entre humain et robot. Tous deux travailleront ensemble, pour combiner l'efficacité du robot et la flexibilité de l'humain. C'est la cobotique.

Habituellement, « robotique » et « collaboratif » sont deux mots contradictoires. La plupart du temps pour des raisons de sécurité, là où sont les robots, les humains sont absents. Le robot est programmé pour travailler seul dans une cellule et ainsi éviter tout mouvement imprévu, du robot ou de l'humain, qui engendrerait de graves blessures.

Pourtant, depuis une dizaine d'années, est apparue la notion de robotique collaborative : celle de robots, appelés alors « cobots », travaillant avec des humains soit dans un même espace (pour gagner en efficacité), soit en partageant des tâches (par exemple, un robot saisit une pièce et la tient pendant que l'opérateur effectue une action sur cette pièce). Parfois même, le robot est l'extension de la personne. C'est le cas des exosquelettes, ces prothèses motorisées destinées à préserver les opérateurs lors d'actions physiquement difficiles ou répétitives.

Exigence de sécurité

Si le robot collaboratif commence à se déployer, c'est que des architectures robotiques plus sûres ont pu être mises au point, grâce notamment au déploiement de capteurs. La réglementation a également évolué pour admettre ce nouveau type de robots. Leur intérêt est évident pour Gregorio Ameyugo, chef de département au CEA-List : « si on peut associer l'humain et le robot, on combine la vitesse et la performance du robot avec la flexibilité de l'humain ».

Les robots collaboratifs ont d'abord été développés pour l'industrie nucléaire et la médecine. Dans le nucléaire, par exemple, ils manipulent à distance des

objets radioactifs. Ils sont capables de percevoir une résistance et s'y adaptent. « Ils s'arrêtent immédiatement s'il y a un obstacle, précise Gregorio Ameyugo. J'ai eu plusieurs fois des "chocs" avec des robots, sans aucune conséquence. C'est intrinsèquement sûr. »

Des robots intelligents

Certains robots collaboratifs « comprennent » nos intentions : si on recule, il recule. D'autres savent faire la différence entre une interaction volontaire (on touche le robot) et une situation accidentelle (un mouvement non intentionnel). D'autres encore deviennent « transparents » : l'humain opère dans la pièce comme si le robot n'existait pas. Ce dernier effectue la partie pénible de la tâche (par exemple, porter une charge lourde) et suit automatiquement les gestes de l'opérateur.

Car l'une des caractéristiques des robots est leur facilité d'apprentissage. Ainsi, la start-up Isybot du CEA-List fabrique des cobots qui apprennent par mimétisme. « On les prend par la main pour leur enseigner les gestes, s'enthousiasme Gregorio Ameyugo. Ily a seulement deux boutons. Le robot sort du camion, entre dans l'usine, et peut commencer à travailler quelques minutes plus tard. C'est très intuitif. » Isybot vend ces robots depuis deux ans aussi bien à de grandes entreprises françaises comme la SNCF ou Airbus qu'à l'export. Ils sont par exemple bien adaptés aux tâches de polissage et de finition de surface, auparavant automatisées avec un coût élevé (car nécessitant beaucoup de capteurs) ou réalisées à la main. Autre exemple, développé pour Safran : le montage d'une pièce de 80 kg qui mobilisait avant trois personnes sur

FOCUS

Un marché en expansion

Les robots collaboratifs représentent aujourd'hui 3,7 % des robots industriels. Et leur intégration augmente de 23 % par an, alors que la robotique classique est en décroissance. « Dans l'automobile, qui est l'industrie la plus robotisée, on a atteint l'apogée de la robotisation dans les années 90, souligne Gregorio Ameyugo, chef de département au CEA-List. Depuis, elle n'a cessé de diminuer, car on avait trop perdu en flexibilité. » De plus, la robotique classique demande des investissements importants, de l'ordre du million voire de la dizaine de millions d'euros. Si un modèle de voiture ne trouve pas son marché, les pertes sont gigantesques. D'autre part, nos préférences évoluent de plus en plus vite. « Les robots collaboratifs sont moins chers, (20 000 à 30 000 € en moyenne), nécessitent moins d'intégration et de programmation, et peuvent être plus facilement reprogrammés pour être utilisés ailleurs. Ils permettent donc une production flexible dans notre pays. C'est une arme potentielle contre la désindustrialisation ! »

À gauche

Intervention à distance, en téléopération, grâce à un bras-maître.



© J. Baudouin / CEA

« Si on peut associer l'humain et le robot, on combine la vitesse et la performance du robot avec la flexibilité de l'humain. »

Gregorio Ameyugo,
chef de département au CEA-List

↑
Ci-dessus

Robot collaboratif Cobomanip du CEA qui peut mettre en apesanteur des objets lourds, gérer en temps réel l'anticollision avec l'environnement et assurer des fonctions de guidage virtuel.

trois heures, peut aujourd'hui s'effectuer en 30 minutes grâce à un cobot, au préalable formé 15 minutes par un opérateur.

Simplifier la programmation

Les industriels ne s'y trompent pas : tous s'intéressent à la robotique collaborative, et les pilotes se multiplient dans les usines. Il reste cependant de nombreux freins à lever avant que ce nouveau type de robotique prenne toute sa place. Le premier est réglementaire, mais cela est en train d'évoluer. Le second reste l'apprentissage, point crucial pour cette robotique qui doit devenir encore plus robuste et fluide, tout en permettant d'apprendre des tâches et des fonctions de plus en plus complexes. « C'est comme l'informatique dans les années 1970, compare Gregorio Ameyugo. Les ordinateurs existaient mais ils étaient trop complexes, puis des technologies ont émergé pour les rendre plus simples. On attend la même chose en robotique collaborative : doter le robot d'une intelligence afin de le

reprogrammer facilement et de lui faire effectuer des tâches complexes. Cela passera par une convergence entre la robotique collaborative, l'intelligence artificielle et les jumeaux numériques. »

Apprentissage progressif

La capacité du robot à interagir de manière fluide, à apprendre progressivement, le rendra donc facile à déployer en usine. D'autant qu'il restera sous la supervision des humains, maîtres du processus. Mais, note le spécialiste : « aujourd'hui, on doit encore programmer les robots collaboratifs, ils ne prennent pas bien en compte ce que font les humains, et n'apprennent pas de manière fluide ».

D'où le projet « Robot Compagnon » du CEA, où le robot serait capable de dire à l'opérateur : « je ne sais pas faire cette tâche ». L'opérateur lui montrerait, ou lui faciliterait la tâche, comme le feraient deux collègues. Le robot comme aide plutôt que comme concurrent. ●

Indispensable intelligence artificielle

Détecter des défauts, optimiser la production, automatiser les tâches, voire assister l'interaction des humains avec les machines : l'intelligence artificielle a de multiples rôles à jouer dans l'usine du futur. À condition de savoir l'adapter à ses contraintes.

À quoi sert l'intelligence artificielle dans l'usine du futur ? « À tout ! s'exclame François Terrier, directeur de programme au CEA-List. Elle a notamment trois grandes fonctions : l'automatisation des tâches et des processus, leur optimisation, et enfin l'interaction humain-machine. » L'intelligence artificielle (IA) est inspirée de l'intelligence humaine afin d'en réaliser les fonctions. Une de ses approches très répandue repose sur les neurones artificiels et son fonctionnement est basé sur l'apprentissage. Pour la reconnaissance d'images, on nourrit l'IA de très nombreuses images annotées (par exemple avec la description des formes, contours, couleurs, défauts, etc.), et de leur position dans l'image) et l'IA apprend ainsi à les classer pour les identifier.

Contrôler la qualité des pièces

Le contrôle visuel de la qualité des objets fabriqués en usine peut ainsi être effectué par des systèmes d'analyse d'image qui font une détection des défauts à la volée. Et les techniques d'IA ont considérablement augmenté les performances de l'analyse d'images. Le CEA a ainsi développé un algorithme à base de réseaux de neurones pour Arcelor Mittal, qui souhaitait optimiser le contrôle qualité de ses barres d'acier chauffées à blanc en sortie de laminoir. « Aujourd'hui, l'ensemble des barres d'acier qui défile à la vitesse de 2 mètres par seconde est analysé en temps réel par une caméra dotée d'une IA qui détecte les défauts de moins de 2 millimètres », raconte François Terrier. Un prototype est en place



CEA-List

Laboratoire des systèmes numériques intelligents (Saclay).

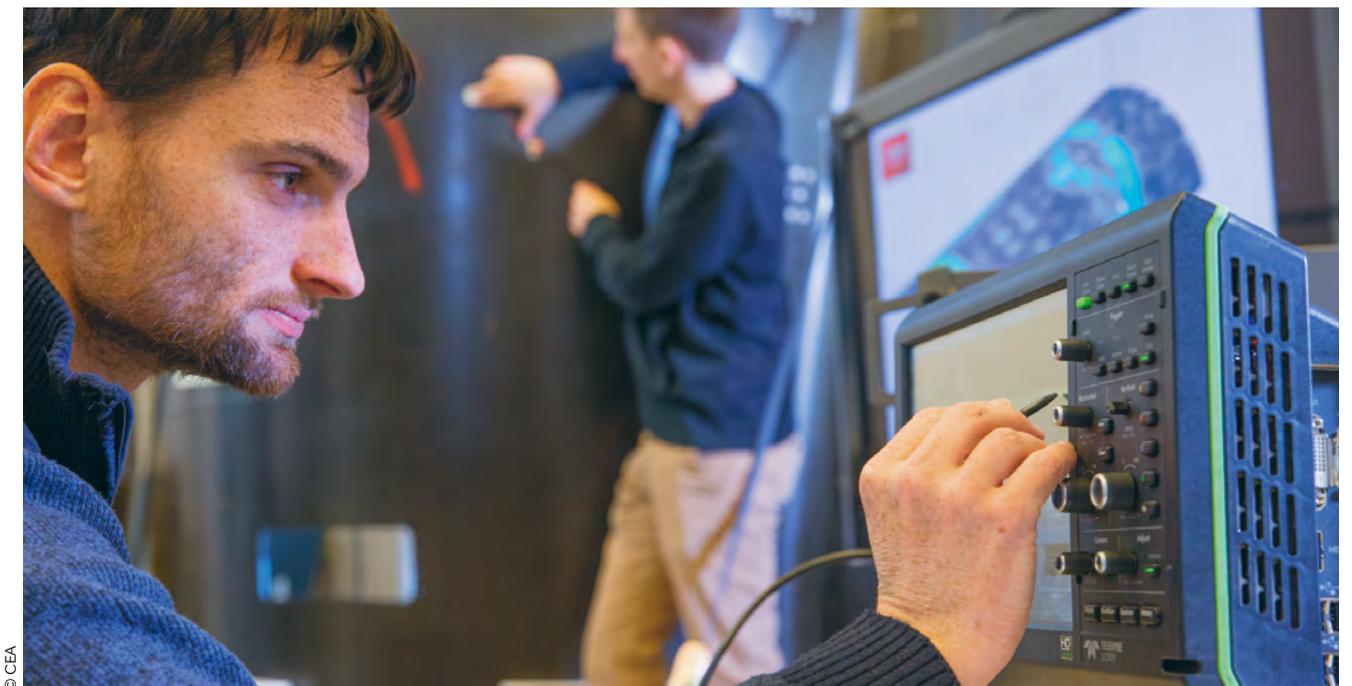
CEA-Leti

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

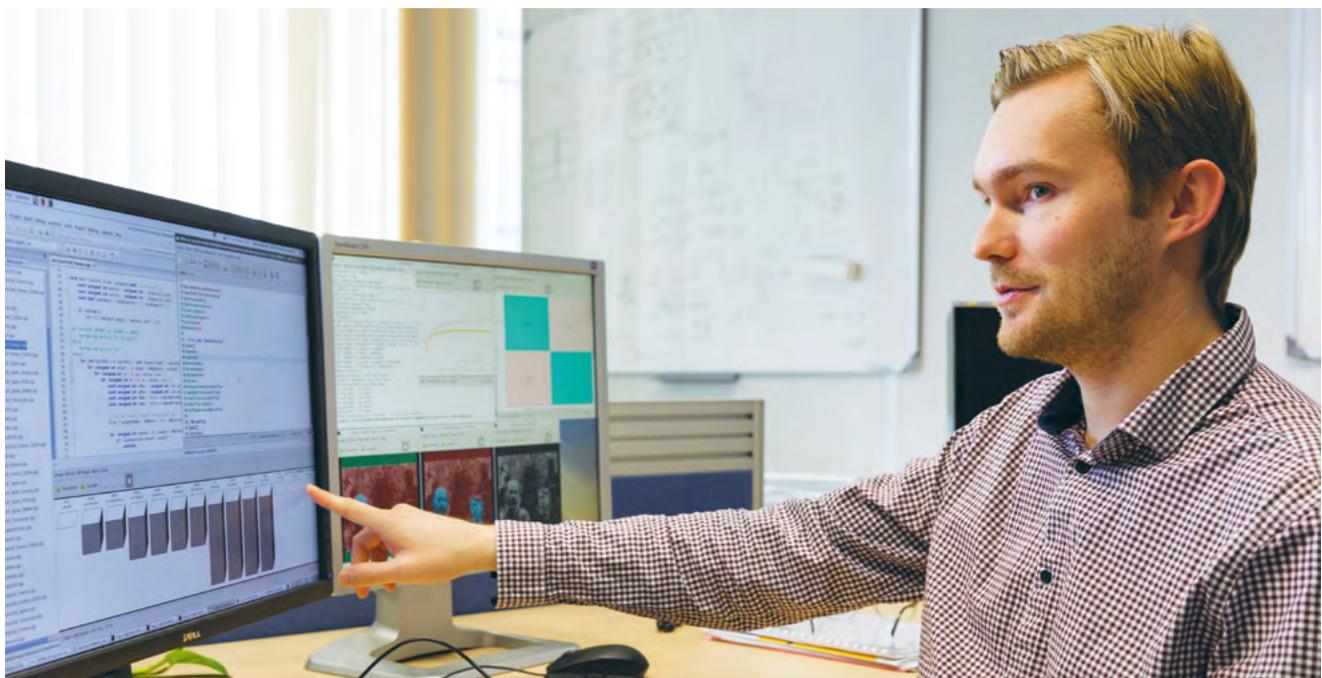


Ci-dessous

Contrôle de structures aéronautiques avec des méthodes d'IA qui permettent d'automatiser la classification des défauts.



© CEA



© CEA

et a prouvé son efficacité en matière de cadence et de détection de défauts. Reste à le généraliser à tous les types de défauts, de contextes de fabrication et d'installations. « *L'objectif n'est pas de remplacer l'humain, mais de faire plus de contrôles, de détecter plus tôt les défauts, pour re-router les produits défectueux* », rappelle l'expert.

Optimiser la production

Si l'efficacité de l'IA est déjà bien connue pour la reconnaissance visuelle, ce n'est pas son seul rôle. D'autres technologies de contrôle non destructif peuvent en bénéficier : les rayons X, les vibrations, l'infrarouge, etc. Le CEA développe ainsi des techniques d'identification des défauts sur des matériaux composites pour les pales de moteurs d'avions. Pas le droit à l'erreur, il en va de la sûreté des futurs vols ! Il est important de trouver le bon mode de coopération entre l'IA et les ingénieurs sécurité.

Au-delà du contrôle, l'IA permet d'optimiser la production, en bardant les machines-outils de capteurs divers. Elle peut ainsi déclencher la maintenance au bon moment. Autre possibilité : surveiller la qualité de la production en corrélant des informations provenant des équipements à chaque étape de la fabrication. C'est ce que fait la société Roquette pour sa production de glucose, afin de mesurer en continu la

qualité des données de paramétrage des différents équipements. L'IA peut ainsi alerter lorsqu'il existe une dérive et complète l'analyse qualité par échantillonnage.

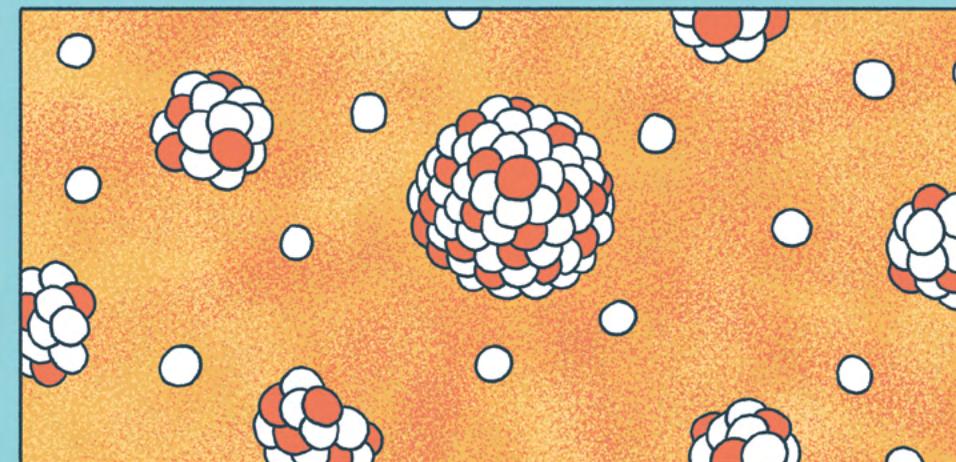
Adapter l'IA aux contraintes de l'usine

Mais intégrer l'IA en usine n'est pas toujours facile. L'apprentissage peut être long (quelques jours à quelques semaines de calcul sur des calculateurs puissants) car l'IA trouve seule le réglage de paramètres. Le CEA possède un ordinateur dédié à cet usage à Bruyères-le-Châtel (Essonne), l'un des premiers dotés des processeurs de dernière génération. Une fois l'apprentissage réalisé, on vérifie que l'IA fait bien son travail en la testant avec des images brutes et en voyant si elle détecte bien les défauts. Et lorsque le niveau de performance convient (par exemple 90 % de défauts détectés), elle est mise en service.

Cependant, « *en usine, les calculateurs locaux sont souvent moins puissants que les nôtres, car ils doivent répondre à d'autres contraintes (résistance à la température, à la vapeur, à la présence d'huile, etc.)* », souligne François Terrier. *C'est pourquoi nous avons développé des technologies d'optimisation de nos réseaux de neurones, afin qu'ils puissent fonctionner sur les calculateurs industriels. C'est une des spécificités du CEA-List que d'aider à embarquer l'IA dans l'environnement contraint d'une usine*. ●

TOUT S'EXPLIQUE

PAR AUDE GANIER,
EN COLLABORATION AVEC
GUILLAUME CAMPIONI (CEA-ISAS)



ZOOM

2 familles de réacteurs

Il existe différentes filières de réacteur à fission nucléaire : neutrons thermiques, neutrons rapides, cogénérateur, incinérateur, etc. La plupart utilisent du combustible solide sous forme de pastilles d'oxyde (cas des réacteurs actuels et de ceux à neutrons rapides) ; d'autres, du combustible liquide sous forme de sels fondus. Tous contiennent de l'uranium et parfois du plutonium.

Sûreté : un arbre des défaillances réduit

Un arbre des défaillances est une représentation des grandes caractéristiques d'un système (en l'état, un réacteur nucléaire) pouvant générer des incidents, voire des accidents. Chaque caractéristique (par exemple, la forte pression) requiert des systèmes de surveillance et de contrôle (branches de l'arbre). Or, ces derniers peuvent être défaillants. Des parades sont prévues par des sous-systèmes, ce qui complexifie le réacteur. Un des intérêts d'un réacteur à sels fondus est que son arbre des défaillances est réduit. Ses principaux avantages pour la sûreté sont :

- Équilibre homéostatique du combustible liquide : la stabilité intrinsèque du système ne nécessite pas de barres de commande a priori pour être piloté.
- Évacuation de la puissance résiduelle grâce à des systèmes de vidange et de refroidissement passif.
- Pas de forte pression : le système fonctionne à pression atmosphérique.
- Pas de réaction chimique explosive avec le sel.



MSR, convertisseur d'actinides ?

Ébauchée dans les années 1960, la technologie des réacteurs à sels fondus revient sur le devant de la scène nucléaire.

De nombreuses sociétés s'y intéressent, telles Orano ou Terrapower soutenue par Bill Gates, tandis que la Chine s'apprête à mettre en service un réacteur expérimental et annonce une commercialisation pour 2030. Au CEA, le réacteur à sels fondus MSR (*Molten Salt Reactor*) fait l'objet d'un projet pour en étudier la faisabilité et identifier les verrous techniques. Au-delà de la production d'énergie, le concept sélectionné vise la fermeture du cycle uranium-plutonium en y intégrant la transmutation des actinides mineurs (voir p. 29).

L'enjeu de la transmutation

Depuis la loi Bataille de 1991, le CEA a analysé la faisabilité de la transmutation en considérant différentes technologies de réacteurs. Ses études ont mis en évidence l'intérêt des réacteurs à neutrons rapides (RNR) lors d'essais

réalisés dans le réacteur Phénix. Elles ont également révélé des difficultés techniques et industrielles : dosimétrie accrue lors des opérations de fabrication du combustible ; augmentation de la puissance thermique des matières impactant cette fabrication par métallurgie des poudres ; conditions de réalisation des transports entre les usines du cycle et le réacteur.

La piste des MSR

Dès lors, le CEA explore la piste d'un réacteur à neutrons rapides à sels fondus. L'élément différenciant : le combustible liquide qui peut notamment rester en quasi-continu dans le cœur du réacteur. Par ailleurs, les opérations de traitement du combustible peuvent se dérouler en partie *in situ*, en chaîne blindée. Pour l'heure, la maturité technologique d'un MSR convertisseur d'actinides est basse et ses verrous importants, essentiellement dus à la méconnaissance de la chimie du sel chlorure et de la résistance des matériaux à la corrosion. C'est l'objectif d'un projet proposé par le CEA, Orano, EDF, Framatome et le CNRS en vue du soutien de la BPI.

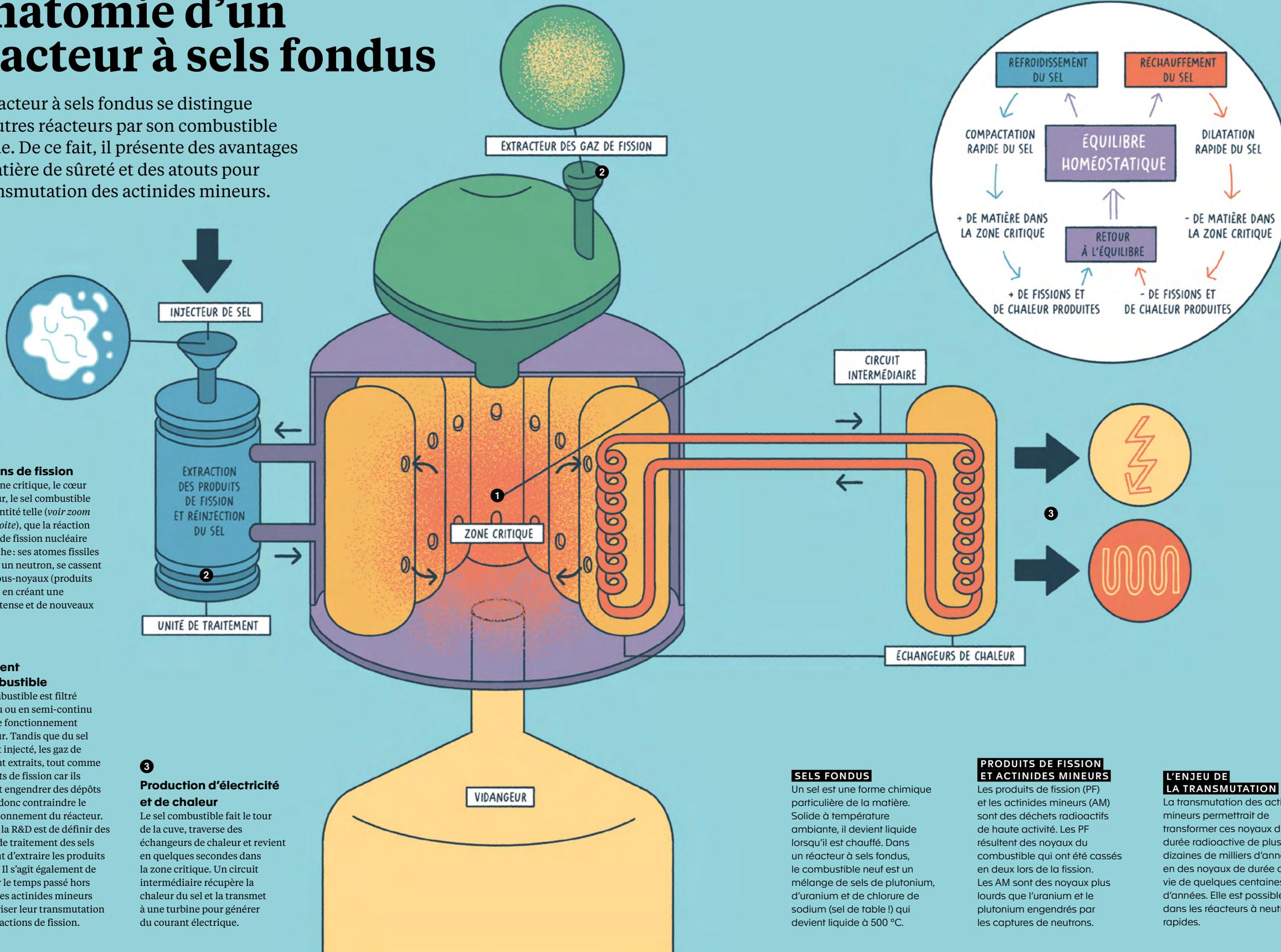


Ci-dessus

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

Anatomie d'un réacteur à sels fondus

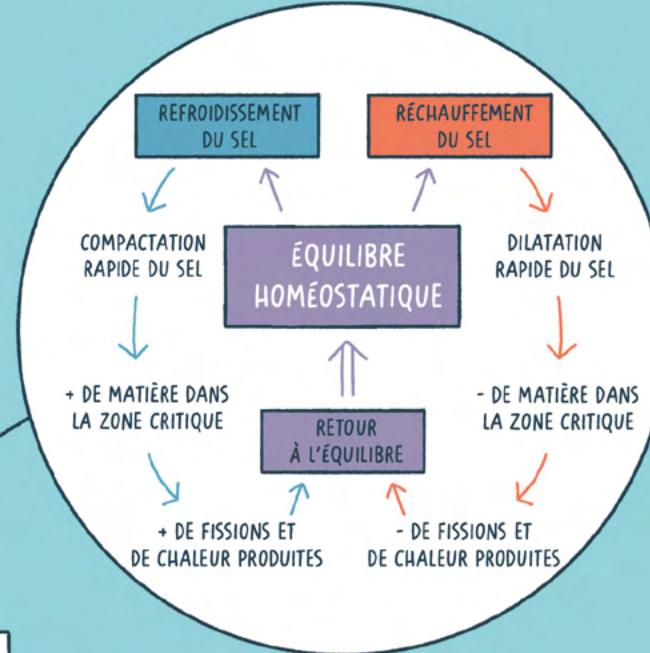
Un réacteur à sels fondus se distingue des autres réacteurs par son combustible liquide. De ce fait, il présente des avantages en matière de sûreté et des atouts pour la transmutation des actinides mineurs.



1 Réactions de fission
 Dans la zone critique, le cœur du réacteur, le sel combustible est en quantité telle (voir zoom page de droite), que la réaction en chaîne de fission nucléaire se déclenche : ses atomes fissiles absorbent un neutron, se cassent en deux sous-noyaux (produits de fission) en créant une chaleur intense et de nouveaux neutrons.

2 Traitement du combustible
 Le sel combustible est filtré en continu ou en semi-continu pendant le fonctionnement du réacteur. Tandis que du sel « neuf » est injecté, les gaz de fission sont extraits, tout comme les produits de fission car ils pourraient engendrer des dépôts solides et donc contraindre le bon fonctionnement du réacteur. L'enjeu de la R&D est de définir des procédés de traitement des sels permettant d'extraire les produits de fission. Il s'agit également de minimiser le temps passé hors du cœur des actinides mineurs pour favoriser leur transmutation lors des réactions de fission.

3 Production d'électricité et de chaleur
 Le sel combustible fait le tour de la cuve, traverse des échangeurs de chaleur et revient en quelques secondes dans la zone critique. Un circuit intermédiaire récupère la chaleur du sel et la transmet à une turbine pour générer du courant électrique.



ZOOM Homéostasie du combustible, un bonus pour la sûreté
 Un réacteur à sels fondus est un système homéostatique c'est-à-dire qu'il s'autorégule. Lorsque la température du sel combustible augmente, il se dilate et une partie sort de la zone critique qui en contient donc moins. De fait, le nombre de réactions diminue, ainsi que la chaleur de fission nucléaire produite. Inversement, si la température baisse, le sel se contracte et revient au centre, ce qui augmente le nombre de fissions et la température. Cet ajustement naturel permet l'équilibre entre le nombre de fissions et la quantité de matière dans la zone critique. Gage de stabilité, il s'effectue à une vitesse très rapide, de l'ordre de la microseconde.

SELS FONDUS
 Un sel est une forme chimique particulière de la matière. Solide à température ambiante, il devient liquide lorsqu'il est chauffé. Dans un réacteur à sels fondus, le combustible neuf est un mélange de sels de plutonium, d'uranium et de chlorure de sodium (sel de table !) qui devient liquide à 500 °C.

PRODUITS DE FISSION ET ACTINIDES MINEURS
 Les produits de fission (PF) et les actinides mineurs (AM) sont des déchets radioactifs de haute activité. Les PF résultent des noyaux du combustible qui ont été cassés en deux lors de la fission. Les AM sont des noyaux plus lourds que l'uranium et le plutonium engendrés par les captures de neutrons.

L'ENJEU DE LA TRANSMUTATION
 La transmutation des actinides mineurs permettrait de transformer ces noyaux de durée radioactive de plusieurs dizaines de milliers d'années en des noyaux de durée de vie de quelques centaines d'années. Elle est possible dans les réacteurs à neutrons rapides.

RÉACTEUR À NEUTRONS RAPIDES
 Les réacteurs à neutrons rapides permettent de créer des atomes fissiles à partir d'atomes fertiles (devenant fissiles par absorption d'un neutron) : ils peuvent donc produire du plutonium à partir d'uranium appauvri. Le bilan est tel qu'ils peuvent produire autant de matière fissile qu'ils en consomment. Avec un stock de 350 000 tonnes d'uranium appauvri, la France dispose ainsi d'une capacité de production de 40 siècles d'électricité.

REGARDS CROISÉS

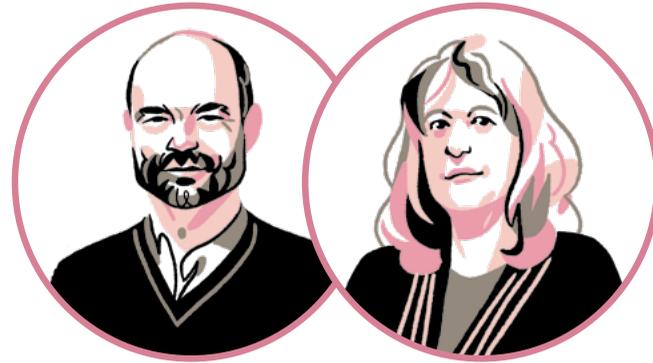
Penser les futurs grâce à la SF

Roland Lehoucq

Astrophysicien au CEA-Irfu et président du festival international de science-fiction Les Utopiales

Sylvie Lainé

Professeur à l'université Jean Moulin Lyon 3 et autrice de science-fiction



La science-fiction est un art. Sans limites, les ambiances et alternatives qu'elle met en scène interrogent nos sociétés, nos interactions avec la technique, notre humanité. Vectrice de réflexions, elle offre à dessiner les contours des futurs possibles. Échange entre un astrophysicien du CEA passionné et une universitaire autrice de nombreuses nouvelles.

Le genre politique et social

Roland Lehoucq Il y a tellement de sous-genres dans la science-fiction (SF) qu'il est difficile de la définir. Celle que j'aime revêt des aspects d'anticipation politique et sociale, celle qui à partir d'une trame scientifique parvient à en tirer des conséquences civilisationnelles qui donnent à réfléchir sur l'interaction entre les sciences, les techniques et les groupes humains.

Sylvie Lainé Ce que raconte la SF, c'est que le moindre changement dans une technologie, dans un environnement ou dans notre biologie transforme immédiatement les relations interpersonnelles et la société. Ce qui nous pousse à réfléchir autrement à l'éthique et aux valeurs. Elle permet également de relativiser ce qui

pourrait être perçu comme irréversible. Personnellement, si elle n'existait pas, j'aurais été beaucoup plus fataliste, avec l'impression que nous sommes enfermés dans un futur inévitable. En mettant en scène plein de trajectoires différentes, la SF donne envie d'agir.

Répertoire des possibles

R. L. Oui ! La SF nous sort du *There is no alternative* car elle montre qu'il y a plein d'alternatives. Cela signifie qu'il n'y a pas d'un côté l'apocalypse, de l'autre le paradis. La SF n'est pas binaire, elle construit un répertoire des possibles très inspirant. C'est un terreau de réflexion, comme le dit Sylvie. Certains disent également que la SF est une expérience de pensée sociale. Car on ne peut pas faire d'expérience sociale pratique, comme par exemple enfermer dix personnes dans une boîte ! La boîte devient alors ce vaisseau spatial qui parviendra à destination dans 200 ans. Comment s'organise la communauté à bord ? La SF permet d'aborder différentes problématiques, qu'elles soient pratiques ou psychologiques.

Garder le plaisir de la science

R. L. La SF repose sur la science en ce qu'elle est une anticipation rationnelle.

Le contexte qu'elle narre est logique et matériel, et place des humains dans des situations qui ne pourraient pas se produire sans un objet technique, certes parfois imaginaire. Cet objet peut outrepasser l'état de l'art de la science mais le propos de la SF, qui est avant tout un art, n'est pas de la faire progresser. Justement, elle puise dans le réservoir d'idées farfelues ou expérimentales, de prototypes, de trucs où les idées grouillent ! Par exemple, la SF actuelle ne met plus en scène de Sélérites car on sait aujourd'hui qu'il n'y a pas d'êtres vivants sur la Lune. Elle « éjecte » ce qui est compris pour ne garder que les choses scientifiques pas claires, un peu mystérieuses, vectrices d'imaginaire.

« Si la science-fiction n'existait pas, j'aurais été plus fataliste. En mettant en scène des trajectoires différentes, elle donne envie d'agir. »

Sylvie Lainé

PROPOS RECUEILLIS
PAR AUDE GANIER

S. L. Tout comme Roland, je ne suis pas sûre que la SF contribue beaucoup aux avancées scientifiques. En revanche, les auteurs de SF, scientifiques ou non, ont en commun d'aimer la science. Lorsque l'on suit une carrière scientifique, on est très contraints par des processus de publication, de recherche de financements, etc. Et la meilleure manière que je connaisse de garder du plaisir avec la science, c'est de lire ou d'écrire de la SF. Car on dispose d'un terrain de jeu illimité, où la hardiesse des hypothèses que l'on peut tester n'est limitée que par notre imagination. Mais une fois lancées, on doit jouer sérieusement avec elles. C'est aussi ce qu'attend le lecteur, que l'auteur prenne son jeu très au sérieux. Qu'il y mette toute son intelligence, sa passion, son émotion et aussi sa rigueur, sans quoi son récit n'est pas crédible et il ne pourra susciter une immersion dans l'imaginaire, ce lâcher-prise dans les possibles.

La promesse d'un futur différent

S. L. La SF est également capable de beaucoup d'humour, avec un regard très décalé sur les absurdités de notre monde qu'elle peut même réussir à rendre réjouissantes. C'est peut-être une joie perverse mais cela fait partie de celles que j'éprouve quelquefois !

R. L. À mon sens, il n'y a pas vraiment de SF joyeuse. La vision du futur y est toujours un peu sombre et pessimiste, et c'est sans doute plus intéressant de créer des histoires de type apocalyptique ou post-apocalyptique. Mais, après tout, l'apocalypse est la promesse d'un futur différent. Tout a été détruit alors cela laisse l'espoir d'un nouveau départ. On efface tout et on recommence ! Dans le cas du post-apocalyptique, il s'agit de faire du passé table rase ce qui laisse également la possibilité de construire un futur différent.

S. L. Par ailleurs, le fait de pouvoir avoir des trajectoires de vie et des histoires personnelles positives, dans des univers plus

« La science-fiction "éjecte" ce qui est compris pour ne garder que les choses scientifiques pas claires, un peu mystérieuses, vectrices d'imaginaire. »

Roland Lehoucq

sombres que le nôtre, est en soi un message d'espoir. Et ce n'est pas parce que notre confort se dégraderait qu'on ne pourrait pas vivre des expériences intéressantes, au contraire ! C'est plutôt réjouissant d'avoir des visions qui vont à contre-courant des messages récurrents selon lesquels la réduction de notre consommation énergétique et consommation en général serait une calamité. La SF est aussi une manière de dire que l'on peut vivre des choses enrichissantes sans détruire notre environnement.

Un cadre tangible d'appropriation et de projection

R. L. Oui, la SF permet de se projeter dans des futurs possibles. Prenons l'exemple des scénarios du rapport de RTE sur les futurs mix énergétiques à l'horizon 2050. Ces scénarios n'ont pas vocation à se produire mais permettent d'éduquer la réflexion. Ils sont réalisés par des ingénieurs, de manière globale, technique et argumentée. Mais comment les partager au grand public ? Ce qui est intéressant, c'est que la SF permet de créer une histoire en mettant en scène dans ce cadre de projections, non pas un réseau électrique, mais des humains. Et l'on peut ainsi s'identifier, à l'échelle

individuelle de l'*ethos* et du *pathos* : par exemple, qu'est-ce qu'un mix énergétique à 100 % d'énergies renouvelables change à mon quotidien, comment évolue ma vie dans ce contexte, etc. ?

C'est dans cette démarche que nous avons réalisé un ouvrage collectif *Nos futurs*. Nous avons convié des experts (en sciences naturelles ou sciences humaines) et des auteurs de SF autour des objectifs de développement durable de l'ONU. Sylvie a fait partie de l'aventure sur la question de la place des femmes dans la gestion du monde.

Acceptabilité de la science

S. L. Oui, j'ai adoré cette expérience de collaboration sur une thématique imposée. Je travaille actuellement sur une nouvelle commandée par la revue *Futura* autour de la thérapie génique. J'y pose la question de l'acceptabilité et de la crédibilité du discours scientifique, un peu comme ce qu'interroge le film *Don't look up : déni cosmique* ! Concrètement, et c'est une question d'actualité : en quels termes un médecin doit-il s'exprimer pour convaincre ses patients les plus réticents et les plus inquiets ? Est-ce que le discours scientifique est toujours acceptable, pour tout le monde, et en toutes circonstances ? Peut-être que ce discours fait peur, qu'il est entendu comme une fatalité car indiscutable. Justement, la SF nous réconcilie avec la science en ce qu'elle nous dit que nous avons le droit d'en discuter, de poser des questions impertinentes. La science n'est pas une parole sacrée mais interrogeable, et cela fait partie de sa définition.

R. L. Pour en revenir au film que tu cites, il a été visionné 150 millions de fois dès la deuxième semaine de sa sortie fin décembre 2021, dépassant largement le cadre des gens qui discutent du réchauffement climatique. Cela montre la force de frappe de l'imaginaire, du cinéma et de la SF, en ce qu'ils créent des images mentales, alliant la raison et l'émotion. ●

AGORA L'ACTU DU CEA



© Grenoble Alpes Métropole Lucas Frangella

EUROPE

Grenoble, capitale verte 2022

La ville de Grenoble est la « Capitale verte européenne » de l'année 2022. Ce prix, créé en 2010 par la Commission européenne, lui a été décerné pour ses actions en faveur de la transition écologique, dont voici quelques exemples : plan climat local (qui a permis de réduire de 30 % ses émissions de gaz à effet de serre entre 2005 et 2018), mobilité durable (tramways, vélo en ville, etc.), réseau de chaleur alimenté à 80 % par une énergie renouvelable et de récupération, etc. Plus de 250 partenaires locaux ont rejoint cette aventure, dont le CEA-Grenoble, très impliqué dans la recherche de solutions et technologies pour réussir la transition écologique,

et engagé au quotidien (gestion durable des espaces verts, véhicules électriques et 1 000 vélos à disposition des salariés, etc.).

Événements à venir

Tout au long de l'année, de nombreuses initiatives viendront célébrer cette distinction. Parmi lesquelles deux événements portés par le CEA, sur l'hydrogène et le numérique frugal, ainsi que les *Summer games*, compétition multisports ouverte aux chercheurs européens et 100 % durable! [SR](#)

→ greengrenoble2022.eu
→ summergamesgrenoble.com

PLATEFORME

Doper la puissance de calcul de la France

Enjeu de souveraineté et de compétitivité, la puissance de calcul intensif de la France s'enrichit d'un nouveau service.

Lancée le 4 janvier dernier au CEA par les ministres des Armées et de la Recherche, ainsi que par le secrétaire d'État chargé de la Transition numérique, la plateforme nationale de calcul hybride mêlera supercalculateurs et accélérateurs quantiques. Depuis le centre de Bruyères-le-Châtel (Essonne), à la Direction des applications militaires du CEA, elle sera mise en œuvre par le CEA, Genci et Inria, en concertation avec le CNRS et la CPU. La plateforme hébergera des ordinateurs quantiques qui seront hybridés aux supercalculateurs conventionnels du « Très grand centre de calcul » du CEA. Elle sera mise à disposition des chercheurs et des industriels pour qu'ils s'approprient ces nouvelles technologies qui permettront, à terme, d'effectuer certains calculs inaccessibles avec les moyens classiques. Il s'agira dès lors de développer cet ordinateur hybride avec un accélérateur quantique opérationnel « imparfait » de première génération, adossé aux premières suites logicielles quantiques dès l'horizon 2023. À cette fin, l'État s'engage à hauteur de 72 millions d'euros et compte sur un effet de levier pour un cofinancement de 100 millions d'euros supplémentaires par les industriels et l'Europe. [AG](#)

FORMATION

Cap 1 000 alternants

Accueillir 1 000 alternants avant le 31 déc. 2021 : l'objectif ambitieux que s'était fixé le CEA a été relevé. La démarche s'insère dans le plan gouvernemental « 1 jeune 1 solution » lancé à l'été 2020. L'idée est d'accompagner, former et faciliter l'entrée dans la vie professionnelle, à un moment où les formations ont été perturbées par la pandémie. 750 000 jeunes diplômés sont ainsi arrivés sur le marché du travail en septembre 2020, auxquels s'ajoutent ceux sans activité ou sans formation. Pour le CEA, qui devra renouveler un tiers de ses effectifs d'ici 2029, l'alternance est un outil de recrutement supplémentaire. Fidéliser ces nouvelles recrues et augmenter leur taux de CDI et CDD est l'un de ses objectifs. [SR](#)



© Nasa

MISSION SPATIALE

Le Webb est arrivé

Le télescope Webb est arrivé à son point d'orbite. Ce bijou de technologies est le fruit d'une collaboration entre l'Agence spatiale américaine (Nasa) et ses homologues européen (Esa) et canadien (Eca), qui implique fortement le CEA.

En cette soirée du 24 janvier 2022, la communauté internationale s'est réjouie de l'arrivée du télescope à bon port, à savoir au point Lagrange 2, à 1,5 million de km de la Terre. Depuis le 25 décembre, date de son lancement à bord de la fusée Ariane 5, les chercheurs ont retenu leur souffle. Car le

déploiement de ses 22 mètres d'envergure, étalé sur 28 jours, était annoncé comme l'opération la plus complexe jamais réalisée au cours d'une mission spatiale. Cela a commencé par le déploiement de ses panneaux solaires et de son antenne de communication, puis de son bouclier thermique qui maintiendra ses instruments à - 233 °C lorsqu'il fera face au Soleil. Puis ses deux miroirs, recouverts d'or pour mieux capter la lumière infrarouge venue du fin fond de l'Univers, se sont ouverts.

Au total, 344 points de défaillance ont été évités, ce qui augure du bon fonctionnement du Webb, qui entre à présent dans une phase de tests. Les scientifiques vont notamment procéder aux réglages de ses instruments, dont ceux du CEA-Irfu, qui assure la responsabilité technique et scientifique de l'imageur Mirim du spectro-imageur Miri. Les premières images sont



attendues pour cet été. Et le CEA sera encore à la manœuvre car il héberge sur son site de Saclay le centre d'expertise de traitement des données, tel que décidé par les laboratoires français ayant participé à la construction de Miri. De quoi conforter le rôle prépondérant de l'Europe dans la fabuleuse mission du Webb : étudier l'histoire cosmique, depuis notre système solaire jusqu'aux galaxies les plus éloignées de l'Univers (*voir Les défis du CEA n° 246*). [AG](#)

→ Pour suivre la mission : <https://www.jwst.fr/>

↑ CI-dessus

Télescope Webb replié pour son installation dans la fusée ; lancement depuis Kourou avec succès ; tout comme son déploiement dans l'espace salué par les chercheurs.



© CEA

COLLABORATION Sécuriser les opérations numériques du citoyen

«Le numérique est un enjeu de compétitivité, de souveraineté et de vie sociale. Présent sur toute la chaîne de valeur, le CEA joue un rôle national pour en maîtriser les technologies essentielles et les transférer à l'industrie. Cette collaboration avec Idemia, acteur majeur dans le domaine de la sécurité, l'intelligence artificielle et la Privacy, nous permet de renforcer la capacité d'innovation française au cœur des activités digitales qui s'établissent dans le monde actuel», a expliqué le directeur de la recherche technologique du CEA, Stéphane Siebert, lors de la signature d'un nouveau contrat de collaboration avec Idemia, l'un des plus importants centres de R&D français. Les partenaires mettront en œuvre leurs expertises au service des nombreux enjeux liés à la protection de l'identité : protéger les données personnelles ; sécuriser la diversité des paiements ; lutter contre la fraude à l'identité ou le piratage à grande échelle ; assurer la confidentialité des données ; garantir aux personnes autorisées un accès rapide aux zones sécurisées. **AG**

↑
Ci-dessus
Système de détection d'intrusion sur le réseau du CEA.

PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

Une charte pour les partenaires industriels

Premier organisme de recherche déposant de brevets en France et premier déposant français en Europe, avec environ 700 dépôts par an et plus de 7 000 familles de brevets actives, le CEA a développé depuis plus de vingt ans une stratégie de propriété intellectuelle qui porte ses fruits. Il publie aujourd'hui sa charte de propriété intellectuelle afin de mieux faire connaître son expertise auprès de ses partenaires actuels et à venir (PME, grands groupes, start-up, etc.). La charte réaffirme les objectifs du CEA en la matière,

notamment sa vocation de mettre à disposition de ses partenaires son portefeuille de brevets, leur assurant ainsi un avantage compétitif en cohérence avec leurs intérêts stratégiques.

Enjeu de souveraineté
Cette stratégie de propriété intellectuelle, déployée aussi bien en France qu'à l'étranger, est également un élément-clé pour assurer la capacité de la France à préserver sa souveraineté technologique. **SR**

ÉQUIPEMENT DE POINTE

Le nouveau super-calculateur Exa1

14^e sur les 500 plus puissants au monde : tel est le classement de la première partition du tout nouveau supercalculateur Exa1 déployé en novembre dernier à la Direction des applications militaires du CEA. Fruit d'une collaboration avec l'industriel Atos, la machine développe une puissance soutenue de 23,2 pétaflops (millions de milliards d'opérations par seconde) et présente les meilleures performances du marché en matière d'efficacité énergétique, grâce à sa solution de refroidissement à l'eau tiède. Exa1 a été conçu pour répondre aux besoins du programme Simulation du CEA, dont le but est de garantir la sûreté et la fiabilité des armes nucléaires françaises. Ce programme repose notamment sur des simulations numériques

qui reproduisent la complexité du fonctionnement des armes par une modélisation physique très poussée. **SR**

↓
Ci-dessous
Première tranche du supercalculateur Exa1.



© CEA / Cadam

LE COIN DES START-UP

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Extractive valorise les déchets industriels

«Nous traitons les déchets industriels solides complexes pour en extraire des matières premières valorisables», explique Frédéric Goettmann, le PDG d'Extractive. Une idée née de son parcours à l'ancienne Direction de l'énergie nucléaire du CEA (aujourd'hui Direction des énergies) et d'une première collaboration avec Eramet, la plus grande entreprise minière française. «S'atteler en 2015 à ce marché des déchets solides, à une période où les regards étaient tournés vers le traitement des rejets industriels liquides, c'était faire un pari sur l'avenir!» Très vite, l'entrepreneur perçoit le besoin des industriels de disposer non seulement de procédés de recyclage adaptés à leurs besoins, mais aussi de pouvoir déléguer leurs totales mises en œuvre. La start-up rachète alors et remet sur pied en 2017 une entreprise positionnée sur le recyclage de matériaux réfractaires et abrasifs. Mais la force d'Extractive réside dans sa capacité à développer des solutions innovantes. Ainsi en est-il de PHYre®, qui permet l'extraction des fibres de carbone de matériaux composites usagés par



© Extractive

solvolyse. «Le marché pour ces matériaux résistants et légers est énorme, confie Frédéric Goettmann. Et notre procédé est très concurrentiel, sur la qualité et la longueur de la fibre récupérée.» Depuis 2016, Extractive poursuit la montée en échelle de PHYre®. Elle vise, pour début 2023, la réalisation d'un démonstrateur

capable de traiter 340 tonnes de composites par an, ultime étape avant la construction d'une usine, envisagée en 2024. D'autres idées sont déjà en cours de développement, assure Frédéric Goettmann. Comme le recyclage du lithium et du zinc, à l'heure de la course aux matériaux stratégiques. ●

MARCHÉS

- Fonderies.
- Producteurs de matériaux réfractaires.
- Éolien, aéronautique et spatial, automobile (pour la fibre de carbone).

TECHNOLOGIE

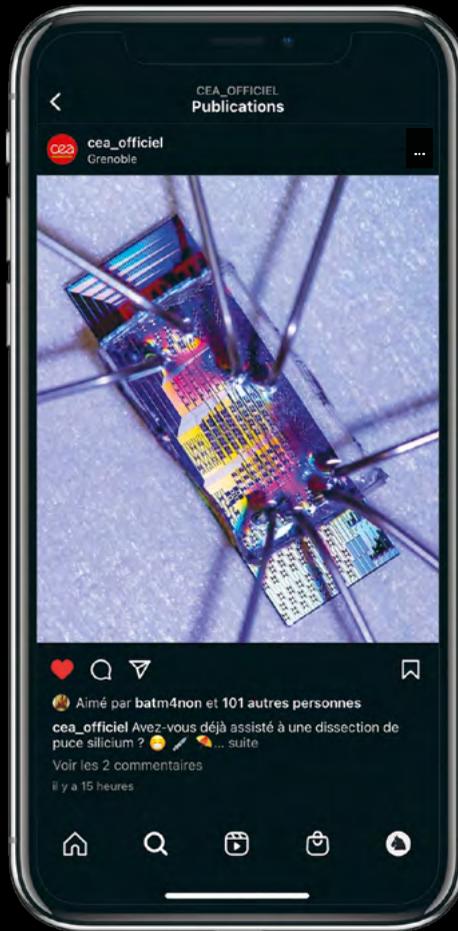
- **Matériaux réfractaires** (internes aux fours) et **abrasifs** (produits de sablage) : broyage et réalisation de poudres de matières premières de différentes finesses (carbure de silicium, alumine).
- **Fibres de carbone** : solvolyse (dissolution par des solvants de la résine entourant les fibres).

DATES-CLÉS

- **2015**
Création de la start-up
- **2017**
Achat de l'usine de Sorgues pour le traitement des matériaux réfractaires et abrasifs
- **2019**
Levée de fonds de 3,1 millions d'euros
- **2020**
Mise en service de l'unité pilote (800 l) de recyclage de composites à base de fibres de carbone
- **2021**
Levée de fonds de 1,5 million d'euros

↑
Ci-dessus
Cuve de l'unité pilote de recyclage des composites à base de fibres de carbone.

→ www.extractive-industry.com



Suivez #CEA_Officiel

