

# 04 LA REVUE DU CEA

SOLAIRE

**Quelle filière  
photovoltaïque  
pour l'Europe ?**

- Page 14

ISEULT

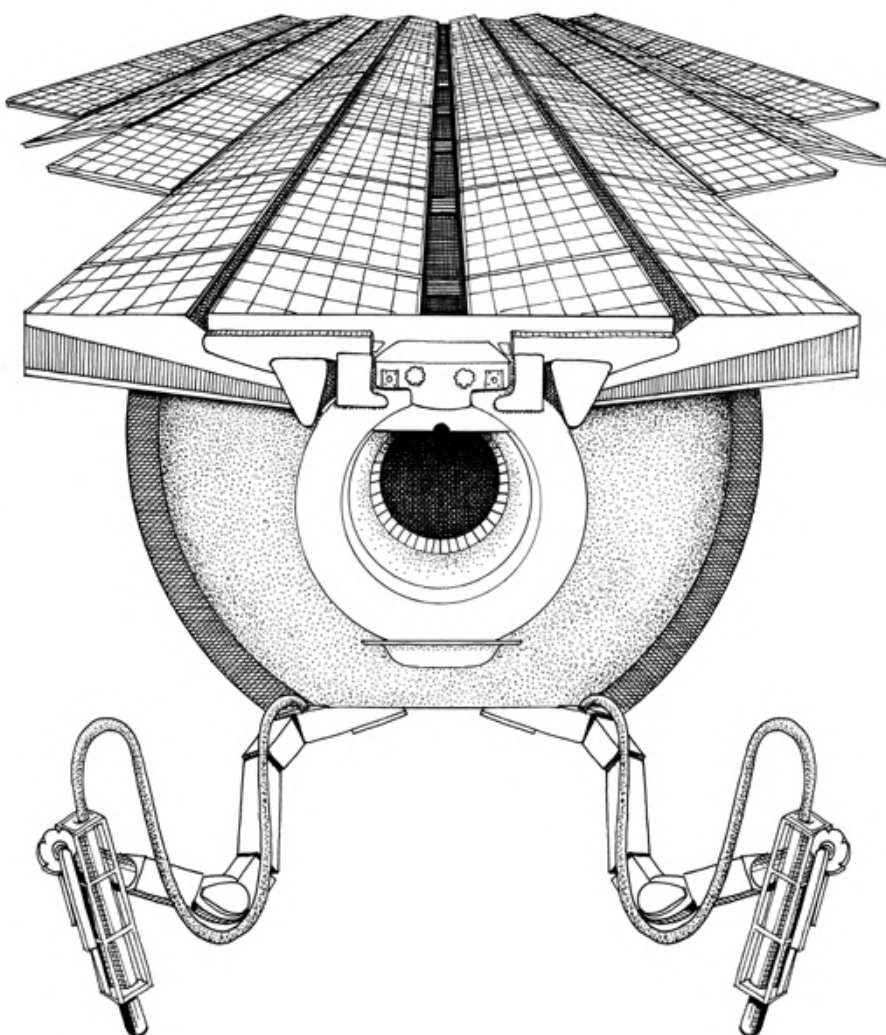
**L'IRM  
la plus puissante  
du monde**

- Page 27

ASSAINISSEMENT-  
DÉMANTÈLEMENT

**Place à  
l'innovation**

- Page 42



**Revue éditée par le CEA**

Direction de la communication  
91191 Gif-sur-Yvette cedex – FR

**Directeur de la publication**

François Jacq

**Coordination**

Boris Le Ngoc

**Rédaction en chef**

Laetitia Baudin

**Rédaction**

Laetitia Baudin, Audrey Dufour, Sylvie Rivière  
et Hugo Leroux

**Iconographie**

Christelle Comoy

**Comité éditorial**

Renaud Blaise, Vincent Coronini, Anne Guérin,  
Valérie Vandenberghe.

Avec le concours scientifique de Gilles Bordier,  
Philippe Chomaz, Hervé Desvaux, Étienne Klein,  
Serge Palacin et Olivier Vacus.

**Illustration de couverture**

La Hache illustration

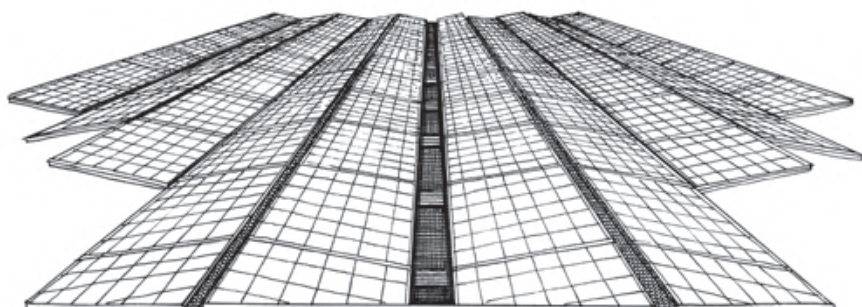
**Conception graphique**

bearideas

**Des remarques, des suggestions ?**

Écrivez-nous à [revue@cea.fr](mailto:revue@cea.fr)

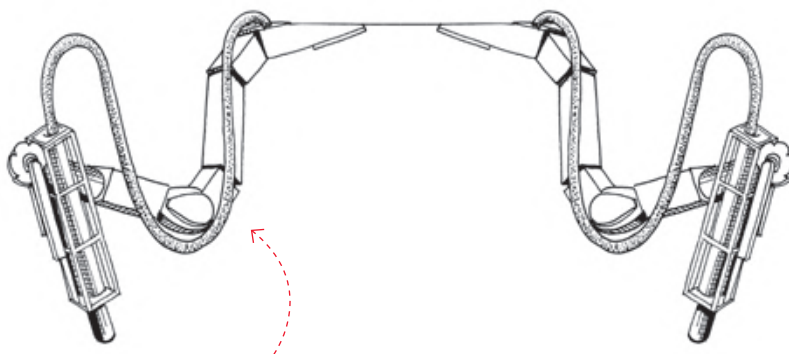
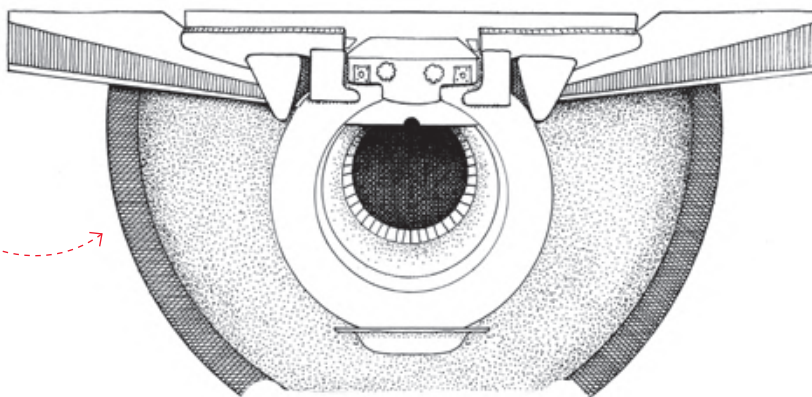
**ISSN 2999-926X**



*Des panneaux photovoltaïques à perte de vue... Mais d'où viennent-ils ? À travers le monde, le soleil brille inégalement sur le secteur, et l'Europe est bien décidée à relancer son industrie. On vous explique les dessous de cette reconquête.*

## La couverture déchiffrée

*Une rétine qui nous fixe ? Non, c'est bien plus que cela. Voici Iseult, l'IRM la plus puissante du monde ! Développé par les ingénieurs chercheurs du CEA, cet aimant de 130 tonnes permet de réaliser des clichés à 11,7 teslas soit une intensité inégalée et ouvre de belles perspectives pour les recherches sur le cerveau.*



*Deux bras qui visent juste. Un impératif quand il s'agit de découpe laser de haute précision dans une installation nucléaire en fin de vie. Ce type de procédé est à l'image des multiples innovations que le CEA apporte à ce secteur.*

**2.** Ses explications sont aussi éclairantes que le solaire!  
**Stéphane Guillerez** est chef du programme « Production solaire photovoltaïque » au CEA, après avoir été à la tête du Service des modules photovoltaïques. De la technique à la stratégie géopolitique, il décrypte les enjeux du secteur.

© Y.Audic / CEA

**1.** L'IA et les technologies du numérique, **Lorène Allano** les connaît bien. Sa thèse, soutenue à l'institut Mines Telecom en 2009, y était déjà consacrée. Aujourd'hui adjointe de la direction des programmes de l'Institut List du CEA, dont la vocation est de développer les systèmes numériques intelligents, elle les met au service de l'industrie et du nucléaire.

© CEA

# Les invités de la revue

**7.** Chef du Laboratoire d'études des aimants supraconducteurs du CEA, **Lionel Quettier** a suivi la construction de l'aimant d'Iseult, avant de prendre la direction du projet en 2017. Il garde un souvenir ému de la collaboration avec les équipes d'Alstom à Belfort et n'a jamais compté le nombre d'allers-retours effectués.

© E. Lemaitre / CEA

**3.** Spécialiste des affaires européennes, **Bertrand Bouchet** est aujourd'hui représentant du CEA à Bruxelles. Pour ce numéro, il revient sur le long parcours du règlement *Net Zero Industry Act* et son impact sur la filière photovoltaïque.

© L. Godart / CEA



**6.** Engagement collectif, performance et amélioration continue... Ces valeurs, **Magali Saluden**, chef du programme de R&D du CEA pour l'assainissement et le démantèlement, les porte avec énergie au sein de ses équipes pour maintenir la barre au plus haut et booster l'innovation. Une évidence pour cette ancienne perchiste de haut niveau !

© Y.Audic / CEA



# Éditorial

**4.** Directeur de l'institut List du CEA et président de l'association des instituts Carnot, **Alexandre Bounouh** est convaincu qu'il faut intensifier la collaboration entre les entreprises et la recherche publique. Car la recherche partenariale est un levier puissant pour la souveraineté technologique et la réindustrialisation de nos territoires.

© CEA

**5.** Spécialiste de l'imagerie par résonance magnétique et pilote scientifique du projet Iseult, **Nicolas Boulant** compare volontiers Iseult à un télescope et notre cerveau à l'Univers qui nous entoure. Il espère de cette IRM la plus puissante du monde la validation de certaines hypothèses, mais aussi des découvertes inattendues.

© CEA

Penser le temps long, c'est l'essence des travaux menés au CEA. Ce goût du « durable », nous le puisons dans les responsabilités qui nous incombent, qu'il s'agisse de se mettre au service de la Défense nationale ou d'accompagner une transition énergétique aussi massive que vitale, où les effets d'aubaines sont plus nombreux que les évidences.

Il y a deux décennies, nous lançons le chantier d'Iseult, désormais plus connu sous le nom de « l'IRM la plus puissante au monde ». Projet titanesque pour un objet unique, qui marque l'impérieuse nécessité de disposer d'une recherche fondamentale forte, socle de toute connaissance scientifique.

Des décennies toujours, lorsque nous démantelons minutieusement nos anciennes installations nucléaires, conscients que c'est un prérequis indispensable pour tisser une confiance avec la société.

La patience, également nécessaire pour (re)bâtir une filière photovoltaïque européenne aujourd'hui meurtrie par les assauts constants de l'Asie. Filière qui pourtant fourmille de nouvelles idées, au CEA et ailleurs. Car dans le solaire, le nucléaire, la médecine et bien d'autres domaines, ce temps long ne nie pas l'innovation. Bien au contraire.

**La rédaction**

## Merci également à

Thierry Advocat  
Julien Audouin  
Philippe Azaïs  
Michel Bottlaender  
Ronan Botrel  
Virginie Broutin  
Romain Cossec  
Stanislas Dehaene

Renaud Demadrille  
Juliette Duault  
Luc Federzoni  
Nouha Gazbour  
Patrick Jouenne  
Denis Le Bihan  
Florent Lemont  
Andréa Macario Barros

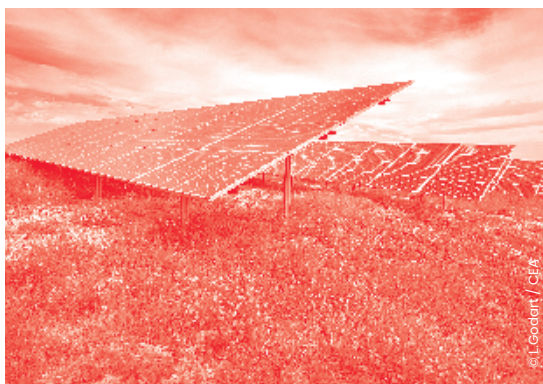
Catherine Madec  
Pascal Martinez  
Valérie Morar  
Christophe Oudot  
Frédéric Oswald  
Laurence Petit  
Pierre-Jean Ribeyron  
Stéphanie Riché

François Sudreau  
André Syrota  
Vincent Testard

Et tous ceux qui  
ont aidé à réaliser  
cette revue !

## 01

### Quelle filière photovoltaïque pour l'Europe ? **14**



Enjeux et analyse **14**

Trois technologies en rupture **20**

Photovoltaïque :  
la grande installation **22**

Mieux produire, mieux recycler **24**

#### Et aussi...

**Dans les coulisses du CEA 8**

**Portfolio : la fusion, une histoire en construction 38**

**Making-of : figer les éclairs 56**

**Ancrage : le CEA... à Paris-Saclay 58**

**Carte blanche : entre les entreprises et la recherche publique, une collaboration qui doit s'intensifier 62**

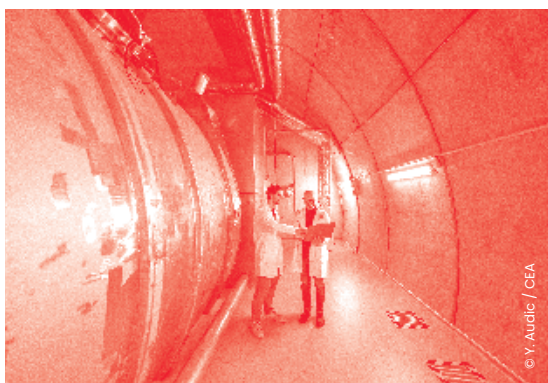
**Playlist 64**

**À vous de jouer 66**

Cette revue  
est imprimée  
dans le  
Limousin.

# 02

## Iseult, l'IRM la plus puissante du monde 27



Les premières images d'Iseult 28

Iseult, une aventure humaine 30

Demain : décrypter le cerveau ? 36

# 03

## L'assainissement et le démantèlement au CEA 42



Le CEA, moteur de la filière A&D 44

Interview de Christophe Oudot,  
directeur de l'assainissement-  
démantèlement au CEA 48

L'A&D, c'est aussi de la science ! 49

Numérique, l'allié incontournable 50

Des procédés innovants  
et des transferts industriels 52

Focus sur deux chantiers 54

# Dans les coulisses du CEA

De la neige qui saigne, notre engagement en faveur  
de l'environnement et un invité VIP...  
c'est le tour d'horizon des dernières actualités  
qu'il ne fallait pas manquer !

## À votre avis, c'est...

- A. SpaceFWD**, un concept  
de vaisseau spatial pour  
l'exploration lointaine
- B. XPist**, un modèle de piston  
révolutionnaire pour l'industrie
- C. Archéos**, un projet  
de générateur nucléaire  
thermique

Pour en savoir  
plus sur la bonne  
réponse et le projet,  
rendez-vous sur le  
compte Instagram  
du CEA !



Réponse C



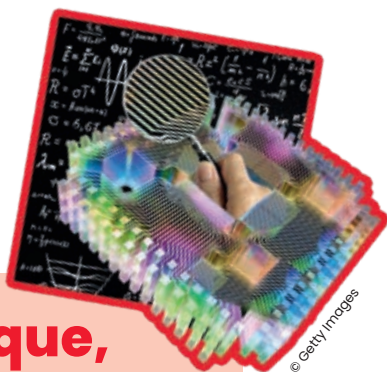
© A. Aubert / CEA

# 3%

## C'est la part d'électricité

dont la filière française des carburants de synthèse (e-fuels) estime avoir besoin à l'horizon 2035 pour monter des projets de taille industrielle.

La réglementation européenne prévoit un taux d'e-fuels d'au moins 5 % dans l'aviation à cette échéance. Acteur de référence sur le sujet, le CEA travaille à optimiser les procédés de fabrication pour ces carburants, qui nécessitent une électricité bas carbone dans une logique vertueuse.



## Le quantique, version pratique

Construire un objet est plus facile si l'on utilise des outils déjà à disposition. Et l'informatique quantique ne fait pas exception ! Des chercheurs du CEA et du CNRS ont mis au point un qubit – un bit quantique – à partir des matériaux et des procédés standards en microélectronique. De quoi envisager un jour une industrialisation du système, et pas seulement une version qui reste en laboratoire. Pour l'instant, un seul de ces qubits a été fabriqué, ne permettant pas de calcul, mais l'équipe vise l'assemblage de plusieurs d'entre eux sur une même puce.

# « Nous développons des rhinocéros, c'est comme des licornes, mais en beaucoup plus gros »

Start-up du nucléaire, vulgarisation scientifique, et rôle de l'hydrogène : retrouvez le témoignage de **Stéphane Sarrade**, directeur des programmes énergie au CEA, dans la vidéo CEA-ptivant.







*l'invité prestigieux*

Le PDG de Microsoft, Satya Nadella, s'est rendu deux fois sur le stand du CEA au CES de Las Vegas en janvier dernier ! Des visites qui lui ont notamment permis d'échanger avec les représentants d'Eclypia, une start-up issue du CEA qui a mis au point un capteur de mesure de la glycémie sans piqûre.

## Un Venture Builder au CEA

Acteur historique de la deeptech, le CEA crée des start-up depuis plus de 50 ans, au travers de programmes d'essaimage de ses collaborateurs et d'accompagnement d'entrepreneurs externes. Avec le *Venture Builder*, il ajoute une 3<sup>e</sup> corde à son arc : un programme conçu pour structurer des équipes et créer des entreprises autour de technologies d'avenir, identifiées comme stratégiques par le CEA, et nécessitant un accompagnement renforcé en moyens et ressources, notamment dans le domaine de la microélectronique. Ce projet est porté par le CEA en partenariat avec Technofounders, spécialiste du lancement de start-up deeptech, et la société de gestion Supernova Invest.

## Peser un virus

Les virus jouent dans la catégorie poids plume. Pourtant, connaître avec précision leur masse aiderait à les identifier plus facilement. Des chercheurs du CEA ont donc mis au point une « balance », sur le modèle de la spectrométrie de masse, pour peser chaque nanoparticule. Ces travaux ont reçu le soutien de l'ERC et de l'ANR.



© Getty Images

## Sur son 31

Le CEA figure cette année encore parmi les 100 premiers acteurs mondiaux de l'innovation, à la 31<sup>e</sup> place selon Clarivate Analytics. Il est le seul organisme de recherche français à maintenir un tel niveau de présence dans ce classement, qui évalue plus de 3 000 entreprises et organismes de recherche ayant déposé au moins 100 brevets d'invention durant les cinq dernières années. « Cela vient conforter notre politique de valorisation de nos innovations, qu'elles soient transférées à nos partenaires industriels ou qu'elles mènent à la création de start-up. C'est un élément essentiel pour remplir nos missions de soutien à la compétitivité économique et à la souveraineté technologique », s'est félicitée Marie-Astrid Ravon-Berenguer, secrétaire générale du CEA.

# 36,8 milliards de tonnes

C'est le poids des émissions de CO<sub>2</sub> d'origine fossile pour l'année 2023, selon le Global Carbon Project, une initiative mondiale à laquelle participe le CEA. Bien loin du net zéro. Conséquence : pour la première fois, le seuil de réchauffement de 1,5°C par rapport à l'ère préindustrielle a été dépassé pendant douze mois consécutifs.

**Ce qui m'intéresse, c'est comprendre comment ceux qui ont eu des idées ont eu des idées. [...] On s'aperçoit qu'il faut s'affranchir de notre expérience quotidienne. Ainsi, on fait en sorte que le monde décoïncide d'avec ce qu'il nous donne à voir.**

À l'occasion du Paris-Saclay Summit, **Etienne Klein**, directeur de recherche au CEA, échangeait avec Alain Aspect, prix Nobel de physique 2022. Cette conférence et toutes les autres sont à (re)voir ici.







## BBBRRRRR!

Non, nous ne sommes pas au cœur d'un polar nordique... Si la neige « saigne » sur ce cliché, c'est uniquement en raison de la présence d'une algue microscopique, *Sanguina nivaloides*. Des chercheurs du CEA, en collaboration avec le CNRS, l'Inrae, Météo-France et l'université Grenoble-Alpes, étudient cet organisme présent dans la neige, un environnement pourtant extrêmement pauvre en nutriments et très riche en luminosité. Publiés dans *Nature Communications*, leurs travaux sont soutenus par l'ANR, dans le cadre du programme AlpAlga, et par la fondation Kilian Jornet. Alors qu'elle est menacée par le changement climatique et la réduction de l'enneigement, il est urgent de mieux comprendre le cycle de vie de cette algue, non cultivable en laboratoire.

**Cette déclaration collective marque notre volonté de relever les défis de la transition écologique pour un développement soutenable.**

C'est par ces mots que 16 organismes nationaux de recherche, dont le CEA, ont pris en janvier dernier une série d'engagements sur leur stratégie de recherche et le pilotage de leurs établissements.

# 51%

C'est la part des Français qui est favorable à un chauffage urbain alimenté par SMR, un petit réacteur nucléaire modulaire, situé dans leur commune, selon un sondage publié dans *Challenges*. Un signal positif alors que se pose la question de leurs futures implantations.

## Une cybercape d'invisibilité

Issue du CEA et créée en 2021, Snowpack a remporté le Prix de la start-up au Forum InCyber – Europe, pour sa technologie baptisée *Virtual & Invisible Private Network* qui rend ses utilisateurs invisibles sur Internet. Brevetée à l'issue de six années de recherche, cette technologie de rupture anonymise, sans les voir, les données de ses utilisateurs en les fractionnant en « flocons » pendant leur migration de l'émetteur au récepteur. Une garantie de confidentialité qui évite attaques et compromissions.



© Getty Images

## Le recyclage du combustible en

### 3 ÉTAPES

Le Conseil de politique nucléaire a validé en début d'année la poursuite du retraitement et du recyclage du combustible nucléaire, et des investissements importants pour La Hague. Le combustible utilisé contient 4 % de déchets, 1 % de plutonium et 95 % d'uranium. En France, ces deux derniers sont recyclés, une seule fois ; c'est le monorecyclage. Il permet de réduire d'un facteur 10 les combustibles usés à entreposer et d'économiser 20 % d'uranium naturel.

1

Le combustible usé est transporté à La Hague, où il est entreposé en piscine pour 5 à 7 ans, le temps de refroidir et de perdre en radioactivité.

2

Il est ensuite cisailé et dissout. L'uranium de retraitement et le plutonium sont récupérés et purifiés ; les déchets sont conditionnés et entreposés dans l'attente de leur stockage.

3

Le plutonium sert à fabriquer du combustible MOX, sur le site de Melox dans le Gard. Ce MOX fournit 10 % de l'électricité d'origine nucléaire. L'uranium de retraitement est ré-enrichi et réutilisé dans des réacteurs d'EDF. Des travaux en cours étudient la faisabilité de recycler plusieurs fois ces matières, ce qu'on appelle le multirecyclage en REP.



# QUELLE FILIÈRE PHOTOVOLTAÏQUE POUR L'**EUROPE** ?

**Bien que leader dans l'innovation, l'Europe s'est fait distancer dans la production de panneaux photovoltaïques par les pays asiatiques, notamment la Chine.**

**Mais des laboratoires du CEA jusqu'au Parlement européen, de nouvelles synergies se mettent en place pour préserver le savoir-faire photovoltaïque et recréer une filière industrielle robuste.**





A large array of solar panels is installed in a field of tall grass and wildflowers. The panels are arranged in rows, and the field is lush with green grass and small blue and yellow flowers. The sky is clear and blue. The text is in the top right corner, and the page number is in the bottom right corner.

ces panneaux sont fort peu « verts ». « Nos calculs montrent que le bilan du photovoltaïque actuellement installé en France se situe entre 30 et 40 grammes équivalent carbone par kWh produit, une empreinte qui pourrait tomber à 20 grammes avec une

Prévisions 2024 15

Un module photovoltaïque comprend successivement une plaque de verre, une première membrane encapsulante (EVA ou autres polymères), des cellules génératrices d'électricité, une deuxième membrane, et une face arrière en polymère ou en verre.

Même constat si l'on remonte la chaîne industrielle : la Chine fabrique la quasi-intégralité des wafers (les plaques de semi-conducteurs), et la majorité des **polymères encapsulants et des backsheets** (les faces arrière). Cette mainmise, couplée à des capacités de production démesurées et une main-d'œuvre bon marché, lui permettent de casser les prix, avec des panneaux jusqu'à 10 centimes d'euros du watt.

Fabriqués à partir d'une énergie très carbonée et transportés à travers le globe, ces panneaux sont fort peu « verts ». *« Nos calculs montrent que le bilan du photovoltaïque actuellement installé en France se situe entre 30 et 40 grammes équivalent carbone par kWh produit, une empreinte qui pourrait tomber à 20 grammes avec une*



## La guerre en Ukraine a montré que dépendre d'un partenaire pour l'énergie n'est pas une bonne solution. Ne mettons pas notre transition énergétique à la merci des tensions géopolitiques »

Pierre-Jean Ribeyron, en charge de l'offre technologique au CEA Liten

*production européenne* », affirme Stéphane Guillerez, chef de programme « Production solaire » au CEA. Une fabrication locale serait donc plus cohérente avec les ambitions climatiques européennes, et générerait de la richesse et de l'emploi. « *Nous ne serions pas immédiatement compétitifs par rapport à la Chine, mais il est essentiel de sécuriser dès à présent une partie du marché européen, pour faire croître un écosystème industriel de taille critique et gagner ensuite en compétitivité* », rappelle Pierre-Jean Ribeyron.

Car en attendant, les entreprises européennes mettent la clé sous la porte ou s'en vont, à l'image de Meyer Burger, qui a annoncé la fermeture de son usine en Allemagne – 500 emplois – et son départ pour les États-Unis. Fin 2022, Washington a mis en place l'*Inflation Reduction Act*, qui favorise la production sur le sol américain avec des crédits d'impôts et d'importantes subventions. Idem en Inde, où le programme PLI (*Production Linked Incentive*) entend développer les industries locales. En Europe, le *Net-Zero Industry Act*, qui vient de faire l'objet d'un accord entre le Conseil de l'UE et le Parlement européen, devrait rééquilibrer quelque peu la balance, en intégrant des critères de durabilité et de résilience, et non plus seulement de prix, dans le cadre des procédures d'achats publics. Il vise qu'en 2030, au moins 40 % de la demande de l'UE pour l'ensemble des technologies stratégiques nécessaires à la neutralité carbone soit satisfaite par la production européenne. Des politiques publiques peuvent aussi aider à limiter les écarts de prix. « *En France, les véhicules électriques produits en Chine sont par exemple exclus du bonus écologique depuis le début d'année*, rappelle Pierre-Jean Ribeyron. *Pourquoi ne pas envisager un dispositif similaire pour le photovoltaïque ?* »

### UNE QUESTION D'INDÉPENDANCE

Renforcer la production en Europe permettrait surtout de regagner en indépendance. « *Ne reproduisons pas les mêmes schémas qu'avec le gaz et le pétrole !* » martèle Pierre-Jean Ribeyron. « *La guerre en Ukraine a montré que dépendre d'un partenaire pour l'énergie n'est pas une bonne solution. Ne mettons pas notre transition énergétique à la merci des tensions géopolitiques* », poursuit-il. La pandémie a, elle aussi, montré à quel point des pans entiers de l'industrie européenne dépendaient de l'Asie.

Pour autant, est-ce réaliste ? A-t-on les compétences, humaines comme matérielles, pour une filière européenne du photovoltaïque ? « *La première étape consiste à récupérer et purifier du silicium*, liste Stéphane Guillerez. *Les capacités existent, même si elles devraient être développées pour atteindre la production souhaitée.* » Le polysilicium obtenu doit être transformé en lingots, puis en wafers. Là, la situation est plus critique. « *Le CEA est le seul et dernier organisme de recherche européen à maîtriser la technique de cristallisation pour faire des lingots, un savoir-faire que l'on cherche à faire perdurer par transfert industriel* », poursuit-il.

De fait, le CEA a noué des contacts étroits avec l'écosystème industriel en France et en Europe. Il accompagne la création de la gigafactory de Carbon à Fos-sur-Mer

# 30

milliards de dollars

C'est la valeur globale des exportations de photovoltaïque de la Chine en 2021, selon l'AIE.

Qu'est-ce que l'hétérojonction ? Les explications avec notre infographie.





### HELIUP, DES PANNEAUX ULTRALÉGERS

Développer le photovoltaïque sur le bâti existant permet d'éviter l'artificialisation des sols, mais toutes les toitures ne supportent pas le poids des structures classiques, en moyenne 15 kg/m<sup>2</sup>. Start-up issue du CEA, Heliup commercialise donc des panneaux ultralégers, autour de 5 kg/m<sup>2</sup>. Ce poids plume est permis par un verre ultramince, innovation protégée par des brevets du CEA. Destinés aux bâtiments tertiaires (hangars, entrepôts, parkings, supermarchés, etc.), ces panneaux offrent le même niveau de rendement que des modules classiques.

(Bouches-du-Rhône). Cette usine mise sur une technologie dite « **TOPCon** », sur laquelle le CEA a mobilisé son expertise. *« Nous travaillons aussi avec l'énergéticien italien Enel, auquel nous avons transféré la technologie hétérojonction dès 2018, rappelle Stéphane Guillerez. Nous les accompagnons désormais pour la montée en puissance de leur gigafactory de Catane (Sicile), qui doit entrer en production très prochainement, notamment pour sélectionner et qualifier les équipements, ainsi qu'en avance de phase sur les composants. »*

Les cellules TOPCon possèdent une face arrière différente des cellules standards de type PERC et elles ont un rendement plus important.

### UN AVENIR EN TANDEM

Côté recherche et innovation, les techniques ne cessent de s'améliorer, pour plus de performance et moins de matériaux. Alors qu'en 2022, 15 % de l'approvisionnement mondial en argent servait au photovoltaïque, le CEA a démontré fin janvier qu'il était possible de diminuer de moitié la part d'argent dans une cellule de référence bifaciale. De quoi améliorer l'impact environnemental et réduire les coûts.

Pour l'avenir, une course féroce se dessine sur la technologie dite « tandem », qui utilise des cellules pérovskites sur silicium.

→  
Inspection des interconnexions de modules photovoltaïques à l'Ines (Chambéry).



# 56

## gigawatts

Ce sont les nouvelles capacités photovoltaïques installées en Europe en 2023.

Là encore, les équipes du CEA ne sont pas en reste : un rendement de 28,4 % a été atteint avec Enel, pour une cellule de 9 cm<sup>2</sup> – à titre de comparaison, les meilleures cellules industrielles actuelles ont un rendement autour de 25 %. « *Le record mondial sur tandem est de plus de 33 %, mais avec une cellule d'1 cm<sup>2</sup>, précise Stéphane Guillerez. Nous avons fait le choix d'une cellule plus grande pour que nos avancées technologiques soient plus rapidement et plus facilement transférables. Il est facile de faire des prouesses en laboratoire, encore faut-il les reproduire en usine !* » L'industrialisation de cellules tandem est prévue à l'horizon 2030.

Dès lors, faut-il investir dans des chaînes industrielles sur les technologies existantes ? Pourquoi ne pas attendre celles à venir ? « *Jouer le coup d'après est toujours plus risqué*, réplique Pierre-Jean Ribeyron. *Reconstruire tout un écosystème industriel est déjà assez compliqué, si nous attendons que la technologie tandem arrive à maturité, nous serons encore une fois en retard.* » Surtout que l'adaptation des futures gigafactories sera relativement aisée, avec l'ajout de quelques étapes pour le dépôt des pérovskites. Seule une filière industrielle solide permettra de mener à bien les investissements pour développer ensuite l'avenir avec les pérovskites.



© PAVAN / CEA

↑ Caractérisation électrique et thermique de modules photovoltaïques.

Au-delà des cellules tandem, le CEA travaille également sur du photovoltaïque plus spécialisé. Les cellules photochromes pourraient par exemple offrir une solution élégante en architecture, tandis que le photovoltaïque dit « organique » utilise des matériaux plus abondants et plus faciles à recycler (voir focus p. 24). Ces dernières recherches sont pour l'instant encore très amont, avec un faible niveau de **TRL**.●

L'échelle TRL (Technology Readiness Level) évalue le niveau de maturité d'une technologie jusqu'à son industrialisation. Elle compte neuf niveaux, le niveau 1 étant la recherche la plus fondamentale et le 9 la dernière étape avant l'industrialisation.

Retrouvez la vision du CEA sur le mix énergétique.





Cette revue  
a une empreinte  
carbone équivalente  
à la production  
d'une orange.



© L. Godart / CEA

## « L'Europe doit regagner en capacité »

**Bertrand Bouchet,**  
représentant du CEA à Bruxelles

### **L'Europe vient d'adopter le Net-Zero Industry Act, après plusieurs mois de discussions. Qu'est-ce qui bloquait ?**

— Deux points étaient particulièrement débattus. Tout d'abord, la place du nucléaire dans la liste des technologies stratégiques qui pourront bénéficier des dispositions réglementaires. Il est finalement bel et bien intégré dans la version définitive. Le deuxième aspect concernait les mesures de protection du marché européen pour les technologies bas carbone. Le texte de l'accord prévoit d'imposer la prise en compte de critères de durabilité et de résilience, et non plus seulement de prix, dans les procédures d'achats publics. Il fixe par ailleurs un objectif global, mais non contraignant, de couvrir au moins 40 % de la demande des pays de l'UE en technologies « net zéro » par la production européenne, et d'une part de marché mondiale de 15 % pour les produits européens.

Il y avait urgence à un tel outil de politique industrielle, car tous les acteurs européens de la transition énergétique se disent victimes de la concurrence mondiale. L'*Inflation Reduction Act* américain a entraîné en retour une pression encore plus forte sur l'Europe, qui devient le principal marché d'exportation pour Pékin.

### **Mais avec des prix cassés, les panneaux photovoltaïques chinois favorisent les installations...**

— J'entends les arguments de compétitivité sur les coûts, mais rien ne dit qu'une fois en situation de monopole complet, la Chine ne va pas augmenter ses prix. Les autres régions du monde font de la maîtrise industrielle des filières de transition (énergétique, numérique...) des objectifs géopolitiques. Il s'agit pour l'Europe de regagner en capacité, et donc en autonomie et en souveraineté. Le comble, c'est que la plupart de ces technologies ont été développées en Europe.

On voit aujourd'hui dans le photovoltaïque le même schéma que l'on a déjà connu par le passé. Les différentes crises – covid et guerre en Ukraine notamment – ont mis en lumière la forte dépendance européenne à des pays producteurs qui peuvent couper l'approvisionnement à tout moment.

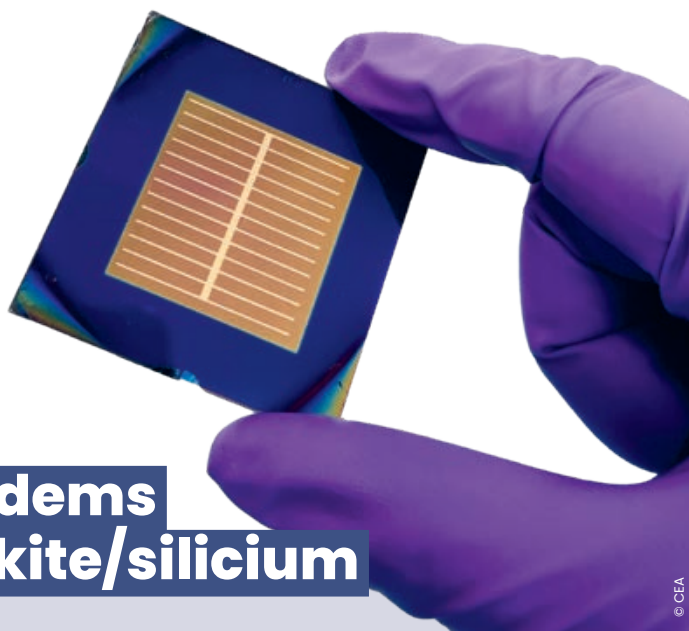
### **Reconstruire une filière prend du temps. N'est-ce pas trop tard si l'on veut tenir nos objectifs de transition énergétique ?**

— La crise climatique ne s'arrêtera pas à l'échéance des objectifs actuels, en 2050, et nous aurons toujours besoin des technologies bas carbone. Pour avoir un jour une industrie européenne compétitive, il faut bien commencer quelque part et à un moment. Commençons ici et maintenant ! Il sera d'autant plus difficile de construire des filières industrielles lorsque toute capacité européenne aura disparu.



# En rupture

Les panneaux photovoltaïques silicium continuent d'évoluer pour offrir des rendements toujours plus élevés, mais se rapprochent de leurs limites. Le CEA travaille donc sur les prochaines générations et également sur des pistes plus amont. Le tout avec des matériaux permettant d'aller au-delà de la limite du silicium, plus faciles à mettre en œuvre et moins coûteux à produire, avec des technologies plus respectueuses de l'environnement, et beaucoup de défis à relever !



## Les tandems pérovskite/silicium

### C'est quoi ?

Une cellule photovoltaïque constituée d'une cellule silicium, pour convertir la partie moins énergétique du spectre solaire, et d'une cellule à base de pérovskite, qui est également un matériau semi-conducteur optimisé pour convertir la partie la plus énergétique du spectre solaire.

#### Les avantages

- Des matériaux pérovskites moins coûteux et sans risque de tension d'approvisionnement
- Des procédés de fabrication moins consommateurs d'énergie
- Un potentiel de rendement nettement plus élevé, avec une limite théorique au-delà de 40 % (contre 29 % pour le silicium)

#### Les défis à relever

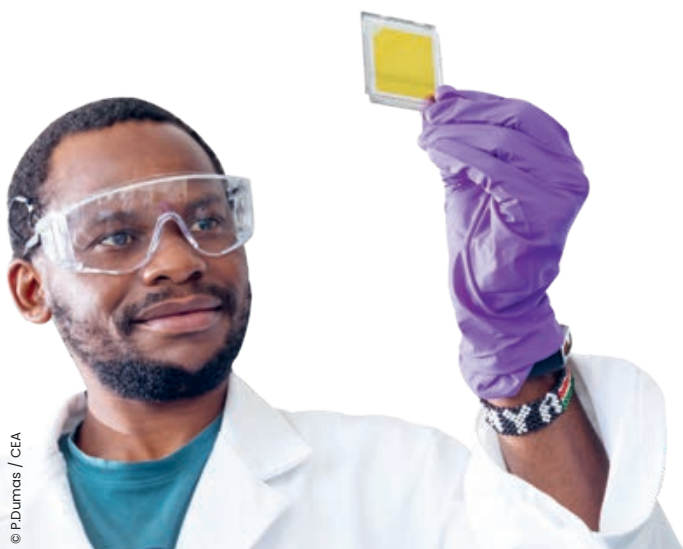
- Industrialiser la méthode de dépôt de la couche pérovskite
- Démontrer un rendement suffisant sur des cellules de taille industrielle
- Améliorer la stabilité et la durabilité, car les pérovskites se dégradent vite, notamment en présence d'humidité

#### Degré de maturité

Industrialisation prévue dans les dix ans à venir.

#### Et pour la suite ?

Les chercheurs du CEA réfléchissent déjà aux cellules tandems pérovskite/pérovskite, sans silicium.



© P.Dumas / CEA

## Les cellules photochromiques

### C'est quoi ?

Des cellules sans silicium, mais contenant un composant coloré qui varie en opacité et en couleur selon le niveau d'illumination, comme certaines lunettes qui foncent au soleil.

#### Les avantages

- Des matériaux et des procédés de fabrication peu coûteux
- Des performances peu affectées par l'orientation de l'installation
- Du photovoltaïque adapté aux besoins de l'architecture et qui peut s'intégrer facilement dans des vitres pour produire de l'énergie tout en offrant une protection lumineuse et thermique

#### Les défis à relever

- Démontrer la stabilité de l'effet photochromique dans la durée
- Améliorer le rendement, pour l'instant bien moindre que le photovoltaïque classique

#### Degré de maturité

Pas avant une trentaine d'années

#### Et pour la suite ?

Les chercheurs du CEA travaillent à de nouveaux colorants, plus faciles à produire et plus respectueux de l'environnement.

## Les cellules PV organiques

### C'est quoi ?

Des cellules où le silicium et les composants de la couche active sont remplacés par des polymères ou de petites molécules issues de la chimie organique.

#### Les avantages

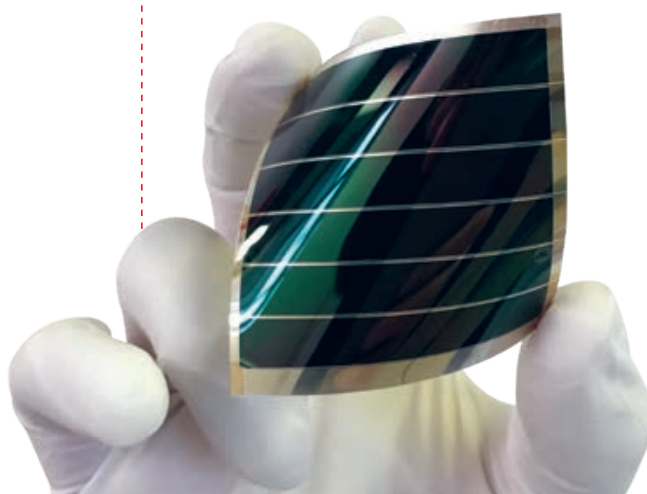
- Des matériaux organiques abondants, peu coûteux et faciles à recycler
- Un impact environnemental très faible
- Des cellules très flexibles, légères et aisément intégrables sur de nombreux objets

#### Les défis à relever

- Améliorer le rendement en conditions réelles, qui est pour l'instant autour de 19 % en laboratoire
- Améliorer la stabilité et la durabilité, car ces systèmes sont très sensibles à l'oxygène, à l'eau et aux rayons UV

#### Degré de maturité

Encore très amont, mais certains laboratoires travaillent à des marchés spécialisés, comme les voiles de bateaux ou des panneaux à enrouler autour des mâts d'éoliennes.



© Toyobo / CEA

# Photovoltaïque : la grande installation

Les explications de Stéphane Guillerez,  
chef de programme « Production solaire » au CEA.

« En France, l'objectif est de quasiment multiplier par 10 la puissance installée, pour atteindre 100 gigawatts en 2050. Cela nécessite de favoriser les installations, qu'il s'agisse de grandes centrales solaires, de panneaux sur des toits résidentiels ou des bâtiments tertiaires, voire de panneaux flottants, de routes solaires ou d'agrivoltaïsme dans les champs. La loi APER de 2023 facilite ainsi l'installation de panneaux solaires sur des terrains déjà artificialisés comme les parkings, les hangars, etc. Il faut profiter de toutes ces surfaces où il n'y a pas de concurrence d'usage !

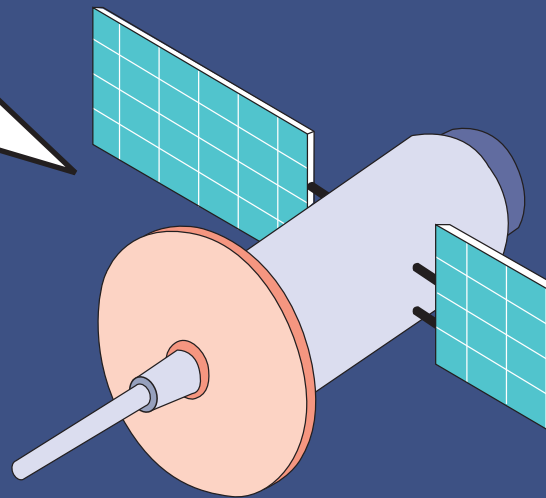
Plusieurs projets testent des panneaux sur les routes ou sur les lacs, avec des interrogations sur l'usure. Des installations verticales peuvent aussi être intéressantes pour produire de l'énergie le matin et l'après-midi, au lieu de l'habituel pic de production à midi. La plupart des modules sont aujourd'hui bifaces, c'est-à-dire qu'ils fournissent de l'énergie également sur leur face arrière. Pourquoi ne pas en tirer profit pour les mettre à la verticale ? »

## Un manque de place ?

On peut installer en moyenne un mégawatt de puissance par hectare de terrain. Donc, strictement parlant, la France possède une superficie suffisante pour ses ambitions. Mais, en réalité, les surfaces « intéressantes » et disponibles sans concurrence d'usage sont moins nombreuses. Les principaux freins à l'installation de panneaux sont aujourd'hui l'accès au foncier et l'acceptation sociale, qui peut aller jusqu'à des recours administratifs. Si vous devez couper des arbres pour installer une centrale solaire, comment vont réagir les riverains et les défenseurs de l'environnement ?

## Et l'espace ?

Le CEA travaille au photovoltaïque dans le domaine spatial, notamment pour les petits satellites du *new space*. Ce secteur tire la R&D, car il s'agit de développer des technologies extrêmement fiables, durables, autonomes, et à des coûts compétitifs.

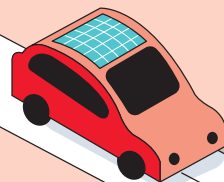


## Favoriser l'agrivoltaïsme ?

Il existe un vif débat autour de l'agrivoltaïsme, et la loi APER fixe un cadre pour préserver le foncier agricole. Le principal problème est que si l'on installe des panneaux fixes au-dessus des terres, celles-ci reçoivent logiquement moins de lumière, donc les rendements agricoles baissent. Or, il faut que l'agriculture reste l'activité principale de la parcelle ! Des installations photovoltaïques pilotables offrent une meilleure solution pour les terres agricoles. En orientant les panneaux, on peut laisser passer le soleil pour les cultures ou bien, au contraire, les protéger des intempéries ou leur faire de l'ombre l'été et éviter l'évapotranspiration. Le photovoltaïque rend alors un service complémentaire et non concurrent. Le problème pour les agriculteurs reste le coût d'investissement dans ce type d'installations.

## Des panneaux sur des voitures ?

L'objectif n'est pas de développer un véhicule 100 % solaire, mais d'apporter un complément d'autonomie aux véhicules électriques. Pour avoir du sens, le système global (incluant le module photovoltaïque et ses périphériques) doit avoir un impact environnemental positif et être parfaitement intégré au véhicule d'un point de vue sécurité et esthétique. Le CEA y travaille.



# Mieux produire,

**Alors que le nombre d'installations photovoltaïques augmente, le CEA travaille à tous les niveaux pour réduire leur impact environnemental et favoriser la récupération des matériaux.**

© Y. Audic / CEA



Au-delà des questions sur l'origine des panneaux photovoltaïques (voir analyse p. 14) et sur les lieux d'installation (voir p. 22), leur multiplication implique une meilleure gestion environnementale. En France, l'éco-organisme Soren est chargé de collecter et trier les panneaux usagés, pour les valoriser au mieux.

S'il est relativement facile de récupérer et recycler les cadres en aluminium, les modules, eux, finissent souvent au broyage. Les résidus obtenus passent ensuite par des étapes de nettoyage et de séparation pour récupérer certains matériaux, au prix de quantité de solvants chimiques et d'énergie. C'est ici, au cœur des cellules, que se trouve la valeur ajoutée, avec notamment du silicium très pur, de l'argent et de l'indium. « *La filière photovoltaïque consomme aujourd'hui autour de 15 % de l'argent mondial, chiffre Philippe Azaïs, en charge du programme « Efficacité énergétique et réseaux ». Pour éviter des tensions d'approvisionnement alors que le*

*nombre de panneaux augmente, il est vital de diminuer cette part d'argent ou de le récupérer au recyclage.* »

## Comme du pop-corn !

Outre des travaux pour diminuer la quantité de matériaux utilisés à la fabrication, le CEA cherche à améliorer les procédés de recyclage, pour récupérer les éléments de valeur et diminuer l'impact environnemental. L'organisme pilote le projet européen Photorama, qui réunit chercheurs et industriels et a bénéficié d'un soutien de 8 millions d'euros du programme Horizon Europe. « *Plutôt que de broyer pour séparer ensuite, nous souhaitons dissocier directement les différentes couches du module (verre, polymères encapsulants et cellule), indique Stéphanie Riché, responsable du programme « Économie circulaire des matériaux ». Nous travaillons sur des procédés mécaniques tels que le sciage ou le ponçage, ou encore sur la délamination par voie thermique ou chimique.* »

Les premiers sont les plus avancés, et vont être intégrés à des pilotes industriels. La délamination par voie chimique, une recherche plus amont, fait appel à du CO<sub>2</sub> dit « supercritique ». « *Il possède alors des propriétés intermédiaires entre liquide et gaz : il s'infiltre partout et réagit avec les polymères qui enrobent la cellule, décrit Philippe Azaïs. Ce qui a pour effet de faire gonfler le module et de séparer les différentes couches.* » Un peu comme du pop-corn ! Avantage de cette technique : elle permet de récupérer facilement le verre et la cellule, débarrassée des polymères qui l'entourent. « *Le principe est démontré, mais nous avons encore besoin de R&D pour parvenir à un procédé industriel, avec une capacité de traitement et un coût économiquement intéressants* », explique Stéphanie Riché.

## Des outils de simulation pour l'écoconception

Le CEA travaille également à concevoir dès le départ des modules plus facilement recyclables en fin de vie.



Module photovoltaïque avant et après délamination par CO<sub>2</sub> supercritique.

# mieux recycler

Attention, « cela nécessite de prendre en compte l'intégralité du cycle de vie pour comparer ce qui est le plus vertueux », poursuit Stéphanie Riché. Des panneaux facilement recyclables mais offrant des performances inférieures n'auraient pas forcément de sens aux niveaux économique et environnemental ! »

Pour analyser toutes les étapes et repérer celles qui peuvent être améliorées, le CEA a conçu différents outils de simulation. « Nous avons mis au point EcoPV, qui concerne les modules seuls, et EcoSPV, qui concerne l'ensemble du système et offre une analyse pour tous les composants d'une centrale solaire, y compris les câbles, les onduleurs, etc., explique Nouha Gazbour, responsable écoconception des systèmes PV. Ces outils prennent en compte 16 critères d'analyse du cycle de vie. EcoSPV propose aussi une simulation par rapport à une centrale de référence, pour mesurer l'impact du changement d'un paramètre sur l'ensemble. »

L'experte ne le nie pas : au-delà de la volonté environnementale, « il faut regarder le réel en face » et tenir compte des contraintes économiques et de rendement. Mais elle se veut confiante, notamment pour les tech-

nologies tandem à venir. Comme entre les chercheurs et l'industrie, « l'écoconception est un dialogue permanent, où l'on ajuste la technologie en regardant en parallèle son impact ». ●

## **SolReed, des panneaux à forte valeur environnementale et sociale**

Le marché de la seconde main, ça vaut aussi pour le photovoltaïque ! Actuellement en incubation au sein du CEA, la start-up SolReed est pionnière dans ce secteur et récupère des modules abîmés ou simplement vieux auprès des exploitants de grandes centrales solaires – le projet n'est pas ouvert aux particuliers pour des raisons de volume minimal à traiter. L'état et la performance de ces modules sont ensuite auscultés grâce au savoir-faire issu du CEA et l'INES, et les éventuels défauts sont réparés par des salariés en insertion, avec le soutien du réseau d'insertion Envie. Pour les modules qui n'offrent plus les performances attendues sur le marché mais fonctionnent toujours, les équipes réfléchissent à ouvrir une filière vers les personnes en situation de précarité énergétique. « On ne peut plus se permettre de produire puis de jeter les choses à la poubelle dès qu'elles sont vieilles ou abîmées, estime Luc Federzoni, fondateur de la start-up. Le photovoltaïque était une industrie très linéaire et nous sommes fiers chez SolReed de la rendre enfin circulaire. »

**Dans l'IRM  
qui révolutionne  
la connaissance  
du cerveau,  
il y a l'engagement  
du CEA...**



**Et celui d'Ivy et Bosco,  
neuroscientifiques  
chez nous.**

Nos énergies pour l'avenir

**cea**

Rejoignez-nous !  
[www.cea.fr](http://www.cea.fr)



L'IRM

LA PLUS

PUISSANTE

DU MONDE

DOSSIER

02

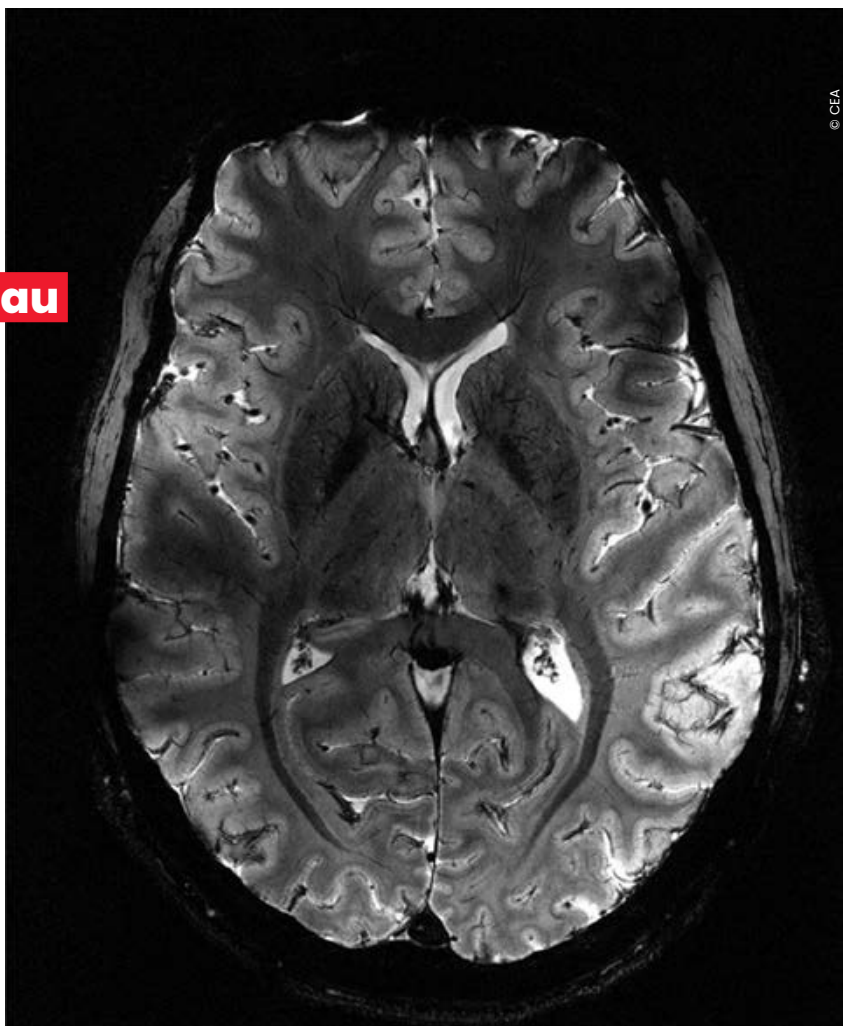


**C'est une première mondiale d'envergure dans le domaine de l'imagerie cérébrale. Les équipes du CEA ont réalisé des clichés IRM à la puissance inégalée de 11,7 teslas sur volontaires sains. Les résultats sont remarquables et ouvrent de nouvelles perspectives pour explorer le cerveau sain et pathologique. En voici quelques exemples...**

**Le plus beau cliché**



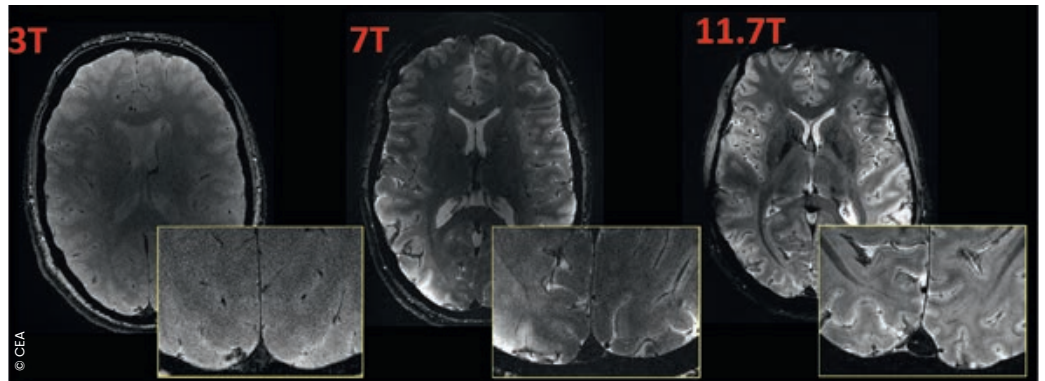
Cinq minutes d'acquisition pour accéder à des détails ultrafins (ici une coupe axiale de cerveau). Ce cliché a été pris à la résolution de 0,19 mm dans le plan et 1 mm de profondeur, soit environ le volume d'un millième de goutte d'eau ! Il montre que la qualité des images attendue d'Iseult est bien au rendez-vous et tout indique que l'on peut aller encore plus loin. Par exemple, certaines techniques d'acquisition, notamment de correction des mouvements des patients dans l'IRM, nécessitent d'être optimisées pour rendre les résultats plus robustes.



© CEA

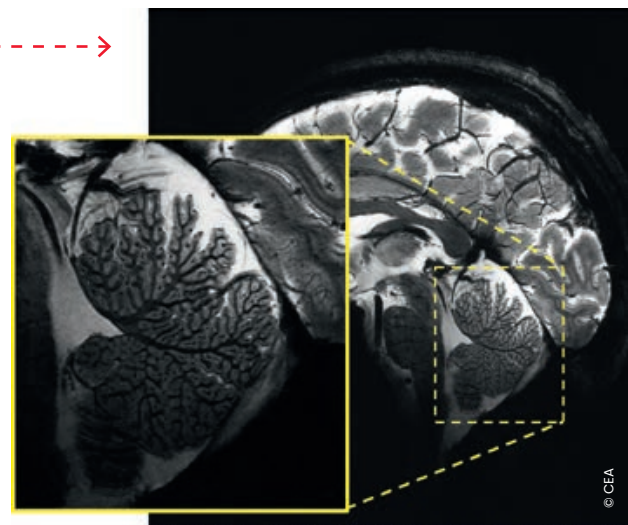
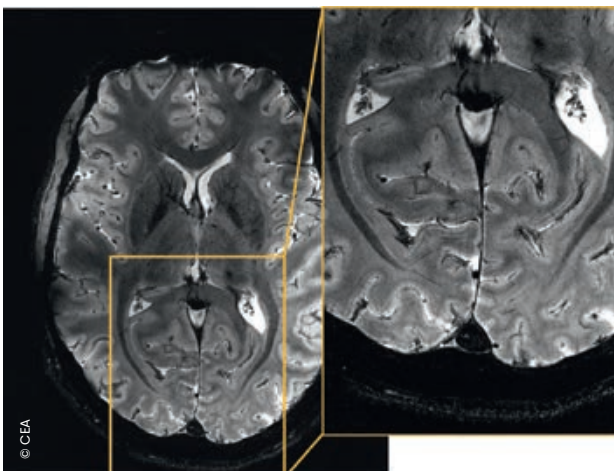
## Pourquoi aller jusqu'à 11,7 teslas ?

Petit exercice de comparaison : une même résolution (0,2 mm dans le plan, 1 mm d'épaisseur), un temps d'acquisition identique (environ quatre minutes), mais une intensité différente du champ magnétique. Ces coupes axiales de cerveau sur différents volontaires, avec un zoom sur le lobe occipital (impliqué dans la vision), démontrent qu'à 3 et 7 teslas, la précision et la netteté sont moindres. À 11,7 teslas, Iseult fournit un réservoir de signaux et de contrastes entre les tissus biologiques qui permet une exploration plus fine.



## Déjà des détails impressionnants

Obtenue avec des voxels de 0,2 mm de côté et 1 mm de profondeur, et en un peu plus de quatre minutes seulement, l'image révèle, à droite, un niveau de détails très prometteur avec ce temps d'acquisition, notamment des variations de signal dans le cortex du lobe occipital.



Avec la même taille de pixels, mais en huit minutes ici pour encore plus de clarté, c'est l'arborescence du cervelet (contrôle des mouvements et des gestes), en vue sagittale, qui se dévoile dans toute sa poésie.





**Nicolas Boulant,**  
pilote scientifique d'Iseult

**Lionel Quettier,**  
chef du Laboratoire d'études des  
aimants supraconducteurs au CEA

© E. Lemaître / CEA

## Rappelez-nous ce qu'est Iseult.

**Nicolas Boulant** — Iseult est une IRM à ultrahaut champ dont la pièce maîtresse est un aimant corps entier de 11,7 teslas. Inégalée aujourd'hui dans le monde, cette puissance nous permet de pousser la résolution spatio-temporelle des images cérébrales pour sonder *in vivo* le cerveau humain à l'échelle mésoscopique (amas de quelques dizaines de milliers de neurones). Voir des détails subtils du point de vue cognitif, et décrypter par exemple les mécanismes d'apprentissage de la lecture ou des mathématiques ; explorer l'anatomie du cerveau dans ses moindres détails, notamment celle de l'hippocampe qui est impliqué dans le développement de la maladie d'Alzheimer ; ou encore mieux comprendre la biochimie responsable du fonctionnement cérébral en observant des espèces telles que le sodium et le phosphore. Ce projet est né au début des années 2000 sur l'intuition visionnaire et l'impulsion de Denis Le Bihan et André Syrota (voir p. 32-33), et il est également le fruit d'un partenariat franco-allemand associant le CEA à plusieurs industriels, Guerbet et Alstom-GE côté français, Siemens Healthineers et Bruker côté allemand, et à l'université de Fribourg.

## Pourquoi le CEA ?

**Nicolas Boulant** — Le CEA était déjà très investi dans le domaine des neurosciences avec son service hospitalier Frédéric Joliot et disposait à l'époque de la première IRM à 3 teslas en France. Le projet était jugé peu réaliste à l'époque par la communauté et seul le CEA avait les compétences pour concevoir et prototyper un aimant de 11,7 teslas, notamment grâce à l'expertise des

# Iseult, *une aventure humaine*

**Grâce à la double compétence de ses équipes - d'une part dans le domaine de l'IRM et des neurosciences, d'autre part dans la conception, la fabrication et l'opération d'aimants supraconducteurs, le CEA a mené à bien le projet Iseult. Un projet visionnaire au début des années 2000, devenu réalité fin 2023.**

équipes de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu). Il s'agissait ici de marier physique et biologie. Entretemps, le CEA s'est doté d'une IRM commerciale à 7T – le premier aussi en France, ce qui lui a permis de préparer l'arrivée d'Iseult en développant les outils nécessaires à son exploitation.

**Lionel Quettier** — Effectivement, les équipes de l'Irfu travaillaient déjà depuis une trentaine d'années sur le développement d'aimants supraconducteurs pour la physique des particules, au profit des détecteurs du *Large Hadron Collider* au Cern, et pour la physique des hautes énergies. Notre institut réunissait donc l'ensemble des compétences nécessaires à leur conception (magnétisme, mécanique, cryogénie, contrôle-commande, prototypage). En outre, il a la culture du travail avec l'industrie, que ce soit *via* du transfert de technologie ou du suivi de fabrication. Enfin, il a aussi l'expérience de la gestion de grands projets scientifiques et technologiques sur des durées de plus de 10 ans.

### Comment les rôles ont-ils été répartis ?

**Nicolas Boulant** — L'Irfu s'est chargé de la conception de l'aimant, en relevant au passage de nombreux défis technologiques. Sans eux, rien n'aurait pu se faire. C'est Alstom ensuite qui a fabriqué cet aimant sous la supervision des équipes du CEA. Pendant la phase de prototypage et de fabrication, l'Institut Joliot a travaillé aux côtés de l'Irfu pour réceptionner les équipements, vérifier le cahier des charges IRM et mener à bien l'installation du scanner comprenant l'aimant, mais aussi les équipements périphériques fournis par Siemens Healthineers. Lors de la montée en champ, les deux instituts ont œuvré ensemble pour étudier les interactions entre les équipements périphériques et l'aimant, afin de les sécuriser dans l'exploitation. Cette période a été très enrichissante avec des interactions entre de nombreux experts réunissant des compétences multiples.

→ Console de l'IRM pour l'acquisition des images.



### LE SAVIEZ-VOUS ?

L'histoire d'Iseult ayant été mise en musique à la fois par Richard Wagner (*Tristan und Isolde*) et par Claude Debussy (*Pelléas et Mélisande*), c'est ce nom qui a été choisi pour le projet comme symbole du partenariat entre la France et l'Allemagne.

**Lionel Quettier** — J'aimerais souligner que sans Alstom, sans sa connaissance des équipements supraconducteurs et sa capacité à produire de très gros objets, il n'y aurait pas d'aimant aujourd'hui. Nous avons un coup d'avance, et pour quelques années encore ! C'est un travail extraordinaire qui a été accompli par les équipes de Belfort durant les sept années de fabrication de l'aimant. Une véritable collaboration s'est instaurée entre nous au fil du temps et le lien de confiance entre nos équipes a souvent permis de résoudre les problèmes techniques qui survenaient quotidiennement. Un de nos collègues a même vécu là-bas et intégré l'équipe Alstom pour faciliter les échanges, et on ne compte plus le nombre de missions que nous avons réalisées !

Cette revue est  
imprimée à 3 000  
exemplaires.  
Pas un de plus.



↑ L'aimant dans l'usine d'Alstom avant son départ pour Saclay.



↑ Vue de l'unité cryogénique qui assure le refroidissement constant de l'aimant de l'IRM Iseult à  $-271^{\circ}\text{C}$ , grâce à de l'hélium superfluide.

## L'avis de... André Syrota

président du Board of Directors de l'infrastructure de recherche européenne EBrains et ancien directeur des sciences du vivant du CEA



© A. Marouani/Inserm

« La conception et la construction d'un aimant 11,7 teslas « corps entier » par le CEA concrétisent une aventure commune entre des scientifiques du CEA – biologistes, médecins et physiciens – et des partenaires industriels qui ont été impliqués dans ce projet monumental dès le début. Les premières magnifiques images ont pu être obtenues chez l'homme après 20 ans d'effort, ce qui constitue aujourd'hui une performance inégalée alors que d'autres équipes dans le monde ont échoué. Il faut donc savoir être persévérant, ce qu'a su faire le CEA ! »

## Quels sont les défis qu'il vous a fallu relever ?

**Nicolas Boulant** — Il faut bien comprendre que le milieu hospitalier utilise majoritairement des IRM de 1,5 tesla et, si l'on trouve de plus en plus de machines à 3 teslas, il n'y a qu'une centaine de sites de recherche dans le monde (dont le CEA) qui disposent d'aimants de 7 teslas. Passer à 11,7 teslas nécessitait donc de recourir à un arsenal de méthodes et technologies pour résoudre les problèmes de physique rencontrés. Il y a toujours un compromis à trouver entre la résolution spatiale et le temps d'acquisition. Plus la résolution est grande, plus le temps d'acquisition est long avec le risque que le patient bouge : il faut donc essayer d'atteindre des résolutions élevées le plus rapidement possible. Un autre défi de taille est l'inhomogénéité du champ radiofréquence utilisé pour exciter la matière. Ce phénomène lié au champ

## EN CHIFFRES

Une IRM mesurant **5 mètres de long** et **5 mètres de diamètre** pour un poids total de **132 tonnes** • **1 500 ampères** circulant dans la bobine • Un aimant refroidi à  **$-271,35^{\circ}\text{C}$**  grâce à **7 500 litres** d'hélium liquide et parcouru par 182 km de fils supraconducteurs • Un champ magnétique de **11,7 teslas** générant une fréquence de **500 mégahertz** (soit un peu moins que la téléphonie mobile 5G). C'est le maximum qu'il est possible d'atteindre avec un alliage niobium-titane qui, au-delà de 12 teslas, perd ses propriétés supraconductrices • **5 heures** pour une montée en courant • Une ouverture centrale de **90 cm** pour étudier le corps humain entier, la plus grande au monde.



## L'avis de... **Denis Le Bihan,**

directeur de recherche au CEA  
et premier pilote stratégique du projet Iseult



« Ce sont les compétences uniques du CEA qui ont permis la réussite du projet Iseult mis en lumière dans ces pages. Convaincu dès le départ de la nécessité de disposer d'un champ magnétique de 11,7 teslas pour explorer finement le cerveau humain, je suis très heureux et fier d'avoir lancé ce projet fou, que je décrirais en paraphrasant Mark Twain : « *Ils ne savaient pas que c'était impossible, alors ils l'ont fait.* » Si nous avons accompli aujourd'hui la moitié du chemin, la seconde partie s'annonce pleine de promesses : Iseult permettra de vérifier nos hypothèses sur la façon dont fonctionne le cerveau, mais aussi de mieux comprendre certaines pathologies neurologiques ou psychiatriques, et surtout, j'espère, de réaliser des découvertes inattendues ! » »

magnétique élevé peut induire des zones d'ombre dans les clichés cérébraux obtenus, donc les rendre très difficiles à exploiter. Nous nous sommes appuyés sur notre expertise et nos méthodes perfectionnées sur plus d'une dizaine d'années à 7 teslas.

**Lionel Quettier** — Dès le départ, il était évident que les technologies utilisées à l'époque n'étaient pas adaptées. Il a donc fallu réfléchir à de nouvelles solutions, ou utiliser des technologies déjà utilisées pour des aimants destinés à la physique des particules ou la fusion, mais jamais pour l'IRM. Un plan de développement de plusieurs années a permis de valider les différents choix techniques et de fabriquer un aimant remplissant les spécifications propres à l'IRM. Par exemple, le champ d'un aimant d'IRM doit être très homogène pour garantir la qualité et la précision des clichés, un peu à l'instar d'une baignoire dont le volume d'eau ne doit pas varier d'une seule goutte. Nous avons également développé un système de protection inédit pour assurer en permanence la sécurité du patient. Nous avons ainsi exploré de très nombreux designs et, une fois l'IRM assemblée, réalisé beaucoup de mesures pour tester près de 1 300 défauts de fonctionnement. Au total, environ 200 personnes ont été impliquées, à un moment ou un autre, sur la durée du projet.

→ Avec un diamètre intérieur de 90 cm, l'IRM Iseult permet le passage d'un corps humain entier.



**Nicolas Boulant** — Une IRM, c'est toute une chaîne de dispositifs électroniques qui doivent fonctionner ensemble. C'est comme un château de cartes : s'il y a un élément qui dysfonctionne, tout s'écroule et les images ne sont pas de bonne qualité. Et augmenter le champ magnétique laisse encore moins de marge d'erreur. Restait ensuite à la tester « en réel ».

### C'est là qu'intervient la campagne que vous avez menée avec vingt volontaires ?

**Nicolas Boulant** — Nous avons d'abord réalisé, en 2021, des images sur un potimarron dont le volume est à peu près comparable à une tête humaine. Sa structure fibreuse et ses détails rendaient aussi cette courge intéressante pour nos premiers tests. Puis nous avons travaillé au protocole médical pour tester un groupe de volontaires, après accord des autorités compétentes (voir p. 35). Il faut savoir que, jusqu'alors, le champ le plus élevé auquel des volontaires sains avaient été exposés était de 10,5 teslas aux États-Unis, à Minneapolis, sans aucun problème particulier rapporté.

La prudence restait cependant de mise. La campagne réalisée au 2<sup>e</sup> semestre 2023 était fondamentale pour la suite de la vie d'Iseult, car il fallait confirmer l'innocuité de son champ magnétique. Et je suis heureux de dire que c'est le cas ! Nous avons profité de ces examens – qui duraient une heure trente – pour réaliser des clichés cérébraux et démontrer que la qualité attendue était bien au rendez-vous.

### Quelles sont les prochaines étapes ?

**Lionel Quettier** — Comme Iseult est entré dans sa phase d'exploitation, nous n'assurons plus que sa maintenance, pour remplacer certains équipements comme des cartes électroniques qui ont tendance à

s'user ou assurer les contrôles périodiques des éléments les plus critiques de l'installation. Le succès d'Iseult a conforté un peu plus la position de l'Irfu, qui est internationalement reconnu comme l'un des meilleurs instituts travaillant sur les aimants supraconducteurs, et nous sommes ainsi sollicités régulièrement pour participer à des projets d'aimants encore plus puissants !

**Nicolas Boulant** — Pour nous, c'est la préparation d'une nouvelle campagne, toujours sur des volontaires sains, mais en plus grand nombre. Nous ambitionnons de mieux comprendre les différences entre le cerveau pathologique et le cerveau sain. Pour cela, il nous faut d'abord développer et améliorer nos méthodes d'acquisition et garantir des données de la meilleure qualité possible. Le CEA coordonne le projet européen Aroma (*Accurate, Reliable and Optimized functional MAGnetic resonance imaging*) qui bénéficie d'un financement du programme H2020 à hauteur de 3,6 M€ sur cinq ans (2021- 2025) pour justement développer les outils qui permettront une exploitation optimale d'Iseult. À plus long terme, on cherchera à explorer certaines pathologies neurodégénératives (Parkinson, Alzheimer), mais aussi des maladies qui relèvent davantage de la psychiatrie, comme la schizophrénie ou les troubles bipolaires. Sans oublier les sciences cognitives !

Soutenue par un Equipex, Iseult sera une plateforme ouverte, mettant son IRM à disposition d'équipes portant des projets d'envergure. Nous apporterons les méthodes, les outils et le support nécessaires pour qu'elles obtiennent les plus belles données possible.





↑ Vue des coulisses  
de l'IRM Iseult.

### Et pour finir, un souvenir qui vous a particulièrement marqué ?

**Lionel Quettier** — Nous avons vécu des moments exceptionnels, comme le transport d'Iseult à travers la France ou encore la première montée au courant nominal pour laquelle nous avons passé toute une nuit en salle de commande. Je crois pouvoir dire que, de Belfort à Saclay, nous sommes tous très fiers de cette réussite collective !

**Nicolas Boulant** — Très fiers et très impatients aussi ! Voir se dévoiler les premières images sur l'homme a été un moment émouvant. Avec Iseult, c'est un monde inconnu qui s'ouvre devant nous et nous avons hâte de l'explorer. ●

## PREMS : un protocole millimétré

« Tout projet de recherche clinique visant à évaluer un dispositif médical est soumis à accord des autorités compétentes », rappelle d'emblée le docteur Michel Bottlaender, responsable de l'équipe neurologie-neuropharmacologie au CEA. « Il s'agissait ici non seulement de vérifier la qualité des premiers clichés cérébraux pris par Iseult, mais surtout de confirmer l'innocuité du champ magnétique sur des personnes en bonne santé, toutes volontaires », explique-t-il.

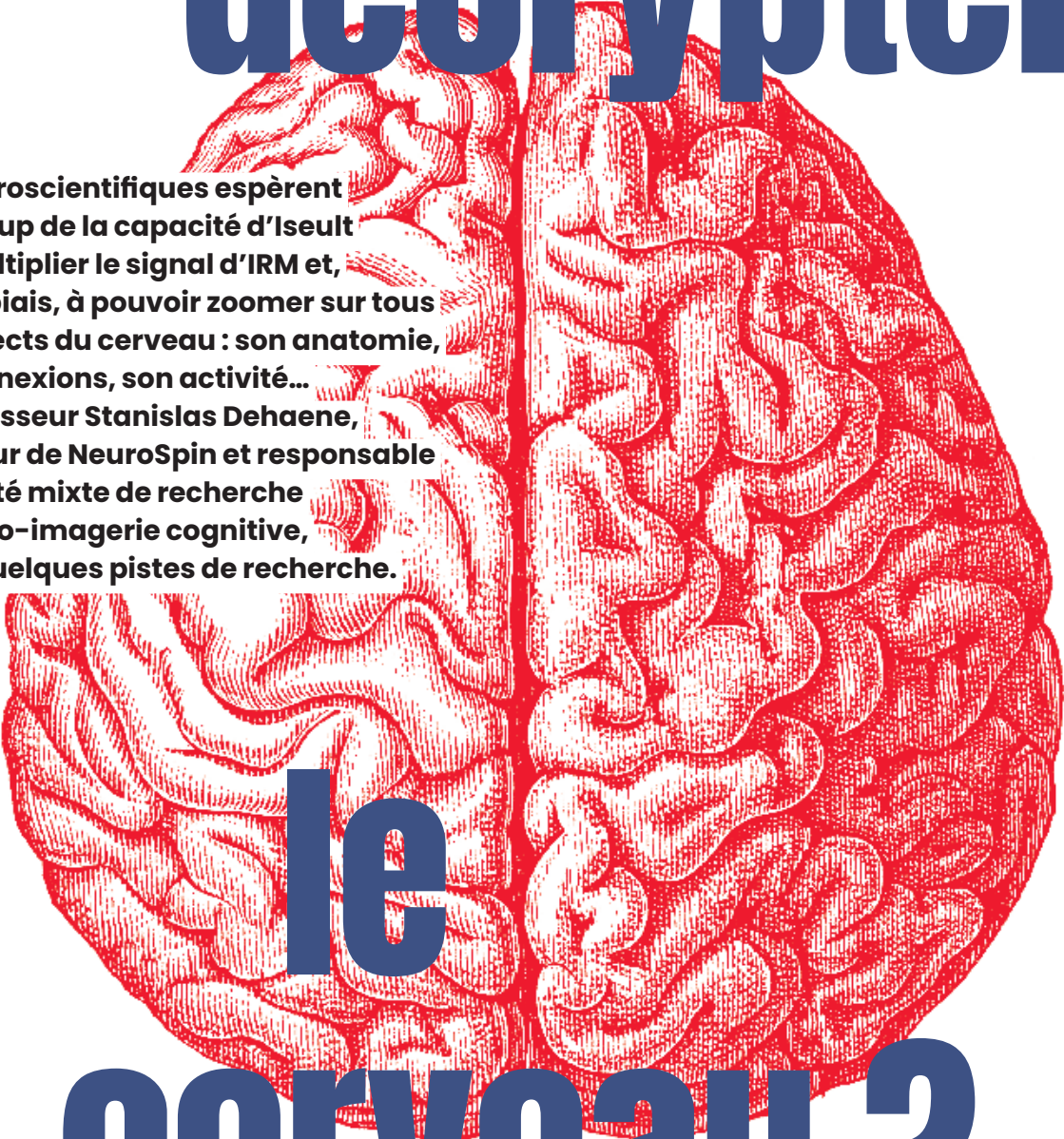
Le protocole mis en place pour cette première campagne a été pensé dans les moindres détails. Les 40 adultes sélectionnés ne devaient présenter aucune contre-indication à l'IRM (tatouages, piercings, pacemakers, mais aussi mal des transports), ni un score d'anxiété élevé, ni avoir subi une opération chirurgicale – « une précaution supplémentaire sur cette phase », précise Michel Bottlaender. Tous sont passés dans l'IRM, mais seule une moitié d'entre eux a réellement passé l'examen. « Pour les dix autres, on a fait comme si l'IRM était en fonctionnement alors que ce n'était pas le cas, en simulant le bruit de la machine avec des haut-parleurs, raconte-t-il. L'objectif était de faire la part des choses entre les éventuels effets dus au champ magnétique, par exemple une sensation de goût métallique dans la bouche ou des vertiges, et le ressenti des patients. Parmi ceux qui n'ont pas réellement passé l'IRM, certains se sont plaints d'étourdissement ou de fatigue ! » Tous les volontaires font l'objet d'un suivi médical rigoureux, avant et après l'examen. Ils sont soumis à différents tests : prise de sang, effet sur la marche et l'équilibre, génotoxicité. Réalisé par un laboratoire indépendant, ce dernier test mesure si le génome humain a été affecté par le champ magnétique. Résultat ? Négatif pour l'ensemble des volontaires. Une étape cruciale qui ouvre la voie à une nouvelle campagne d'évaluation.



# Demain : décrypter

Les neuroscientifiques espèrent beaucoup de la capacité d'Iseult à démultiplier le signal d'IRM et, par ce biais, à pouvoir zoomer sur tous les aspects du cerveau : son anatomie, ses connexions, son activité...

Le professeur Stanislas Dehaene, directeur de NeuroSpin et responsable de l'Unité mixte de recherche en neuro-imagerie cognitive, trace quelques pistes de recherche.



# le cerveau ?

### Voir le cerveau humain en activité

Comment l'information est-elle codée dans chacune des aires du cerveau ? Comment l'activation d'une succession de « code neuraux » nous permet-elle, par exemple, de faire des calculs, de lire ou de parler, parfois dans plusieurs langues ? Grâce à Iseult, nous espérons accéder facilement à des voxels de l'ordre d'un demi-millimètre de côté, soit quelques milliers de neurones seulement. En accédant à l'ensemble des neurones du cerveau à cette échelle microscopique, il sera possible de déterminer précisément la topologie de leur activation et la manière dont il encode toutes nos représentations mentales. Déjà à 7 teslas, nous avons découvert récemment que ce que nous croyions être une seule aire cérébrale dédiée à la lecture est en fait subdivisée en une galaxie de petits « patchs » de cortex ultraspécialisés. Chez les bilingues anglais-chinois, par exemple, certains de ces patchs réagissent spécifiquement aux idéogrammes, tandis que chez les bilingues anglais-français, ils sont indifféremment activés à la lecture des deux langues écrites dans le même alphabet latin. De même a-t-on découvert que deux codes neuraux distincts sont activés successivement lorsqu'on additionne des nombres : le premier pour la perception de ces nombres, le second pour représenter le résultat de l'opération. Avec la puissance d'Iseult, nous espérons parvenir à une meilleure compréhension non seulement de ces codes neuraux, mais aussi de leur perturbation dans des pathologies telles que la dyslexie ou la dyscalculie. Autre axe de recherche : les états de conscience. Que se passe-t-il dans notre cerveau quand on s'endort ou qu'on subit une anesthésie générale ? Nos recherches contribuent à découvrir des « signatures » cérébrales de l'état de conscience, cruciales pour mieux comprendre les processus à l'œuvre dans les états végétatifs ou les comas.

### Scruter l'anatomie du cerveau et ses pathologies

Iseult donne d'ores et déjà des informations exceptionnelles sur les détails de l'anatomie cérébrale, et cela aura des applications en recherche médicale. Prenez, par exemple, les formes graves d'épilepsie qui résistent à tout traitement. En zoomant fortement, nous espérons identifier avec précision où se niche le foyer de la maladie, qui trouve souvent son origine dans des anomalies de la migration neuronale. Détecter ces amas anormaux de neurones pourrait ensuite aider le chirurgien à opérer avec une précision accrue et ainsi soulager le patient.

Dans le domaine du métabolisme cérébral, la puissance d'Iseult permettra de voir des signaux faibles, par exemple les résonances du sodium ou du lithium. Cela pourrait éclairer l'action de certains médicaments – le lithium, par exemple, utilisé pour traiter les troubles bipolaires. En accédant à une meilleure connaissance de sa distribution, les traitements pourront être mieux ciblés.

De même attend-on des informations plus précises sur les malformations vasculaires cérébrales congénitales ou acquises, ainsi que sur les maladies des petits vaisseaux à l'origine de déficits cognitifs lors du vieillissement – avec à la clé un meilleur diagnostic.

Enfin, le très haut champ d'Iseult devrait permettre d'affiner notre vision de la distribution cérébrale de certaines molécules comme le glutamate et le glucose, activement impliquées dans le métabolisme cérébral, avec en ligne de mire de multiples pathologies, depuis la neurodégénérescence chez la personne âgée jusqu'à la caractérisation des gliomes qui peuvent se former chez l'enfant et l'adolescent.

### Comprendre la singularité du cerveau humain

On dit souvent que « *le rire est le propre de l'homme* », mais qu'est-ce qui fait réellement la singularité de son cerveau par rapport à celui des autres espèces animales ? Comment s'est-il développé et adapté ? Nous planifions des expériences qui placeront primates humains et non-humains dans une même situation, par exemple la vision d'une succession rapide d'images. En comparant leurs activités cérébrales respectives, l'objectif est de comprendre comment notre cerveau a évolué pour devenir la puissante machine qu'il est aujourd'hui. L'origine du langage et des symboles caractéristiques de l'espèce humaine devient aujourd'hui accessible à l'expérimentation.



# LA FUSION, UNE HISTOIRE EN CONSTRUCTION

En décembre dernier, le plus grand tokamak au monde, JT-60SA, était inauguré au Japon. Une aventure qui a impliqué l'expertise en fusion nucléaire du CEA qui possède son propre tokamak, West.

**1**

L'installation est impressionnante. Dans ce hall du centre de Cadarache, le tokamak West joue à cache-cache derrière quantité de tuyaux et d'équipements.

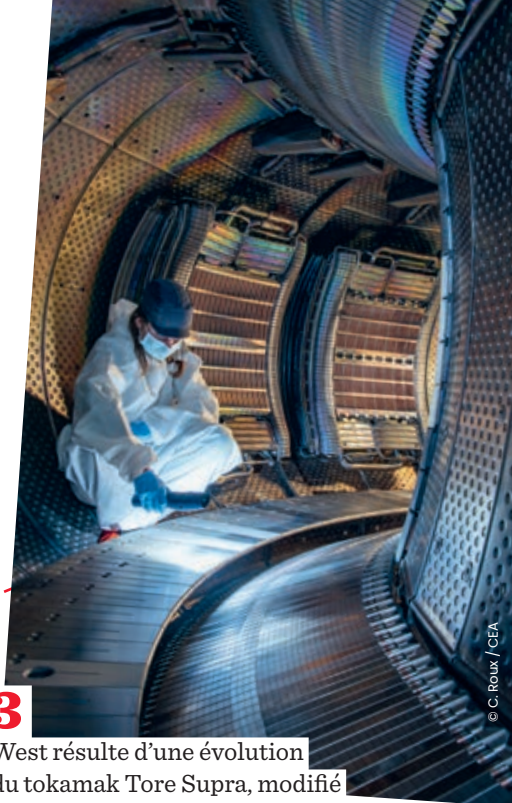
Depuis 2017, West produit des plasmas pour tester et qualifier différents composants du projet Iter, situé à quelques kilomètres de là.





**2**

Plus de 300 chercheurs travaillent au sein de l'Institut de recherche sur la fusion magnétique (IRFM) pour exploiter West, étudier et simuler les plasmas de fusion et développer des technologies de pointe.



**3**

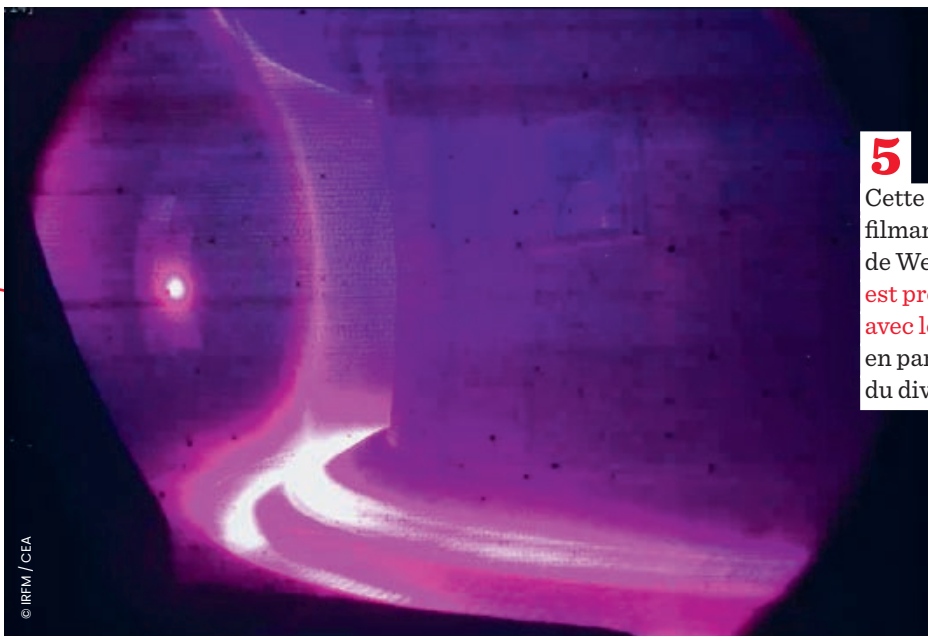
West résulte d'une évolution du tokamak Tore Supra, modifié entre 2013 et 2016 pour être plus représentatif d'Iter. West est doté d'un divertor (la pièce ici inspectée) qui est essentiel pour contrôler l'interaction plasma-paroi et évacuer la chaleur. Ce divertor est en tungstène, comme il le sera dans Iter.

**4**

À l'intérieur du tokamak, le plasma qui circule lors des expériences dépasse allégrement les 50 millions de degrés. Pour minimiser l'effet du contact avec les parois, un champ magnétique intense généré par des bobines confine le plasma.







5

Cette image est issue d'une caméra filmant les plasmas à l'intérieur de West. La lumière visible est produite par l'interaction du gaz avec le plasma à sa périphérie, en particulier dans la région du divertor.

6

Au-delà du tokamak et de ses composants, la fusion nucléaire nécessite le développement de nouveaux outils, comme ici un bras robotique d'inspection. Ce robot est composé de plusieurs segments articulés avec une caméra embarquée, pour opérer dans l'enceinte.





8

Outre le tokamak West, l'IRFM dispose de deux plateformes de réalité virtuelle et de réalité augmentée. Ces systèmes permettent de faciliter la conception des composants, et de tester des procédures et des gammes de montage en amont de leur installation dans West ou dans Iter.



© L. Godart / CEA

7

Le savoir-faire et l'expertise du CEA sont reconnus à l'international. En décembre dernier, c'est le tokamak JT-60SA qui était inauguré au Japon, après plusieurs années de travail des équipes du CEA.











# ASSAINISSEMENT DÉMANTÈLEMENT

DOSSIER  
03

## Place à l'innovation !

En France, c'est au CEA que se concentre l'essentiel des chantiers d'assainissement et démantèlement d'installations nucléaires en fin de vie. Expert et acteur central d'une filière en devenir, le CEA apporte ses innovations technologiques qu'il transfère à des industriels, et prépare l'avenir en formant des centaines d'étudiants à ces métiers spécifiques et exigeants. Ces chantiers sont aussi, pour l'ensemble des entreprises spécialisées en assainissement-démantèlement, des lieux uniques de formation *in situ*. Des compétences et expériences qu'elles valorisent déjà à l'international, et qui leur seront nécessaires dans les décennies à venir pour démanteler les installations nucléaires en fin de vie. Savoir assainir et démanteler est aussi une composante essentielle au développement durable du nucléaire d'aujourd'hui et de demain, pour léguer à nos générations futures des solutions énergétiques intégrant un impact environnemental minimal.



Unité pilote à l'échelle 1 d'un nouveau procédé de traitement thermique pour les déchets radioactifs complexes, Dem&Melt, sur le centre CEA de Marcoule.

# Le CEA, moteur de la filière A&D



**Les nombreux chantiers d'assainissement-démantèlement du CEA, par leur unicité et leur spécificité, s'avèrent être d'excellents lieux d'essais et de formation pour tous les prestataires de cette filière, sur les plans opérationnels comme technologiques.**

↑ Assainissement d'une cellule blindée sur le site CEA de Fontenay-aux-Roses.





u CEA, le sujet du démantèlement et de l'assainissement (A&D) de ses installations en fin de vie, aujourd'hui au nombre d'une quarantaine, est aussi complexe que capital. Issues des activités historiques en matière d'énergie nucléaire pour les applications civiles et militaires, elles sont en effet d'une extraordinaire diversité. *« Le CEA a exploité des laboratoires et des ateliers dédiés à la transformation du plutonium, à l'enrichissement de l'uranium, à la fabrication ou au retraitement du combustible nucléaire, mais aussi des réacteurs expérimentaux de toutes les générations possibles, et enfin des installations d'entreposage ou de traitement de déchets historiques »*, énumère Thierry Advocat, chef de l'unité traitement et déchets du centre de Cadarache. Des installations anciennes, construites dans une période où leur futur démantèlement, bien lointain, n'était pas encore anticipé, et où les référentiels de sûreté étaient moins exigeants qu'aujourd'hui. Ces installations uniques constituent autant de cas particuliers à traiter : *« Nous n'avons pas d'effet de série possible comme pourra l'avoir EDF pour son parc de réacteurs nucléaires de production d'électricité relativement standardisé »*, ajoute l'expert. Cette diversité

est pourtant synonyme d'opportunités pour l'ensemble de la filière nucléaire : *« Il n'y a pas un sujet que l'on doit couvrir pour nos propres besoins que l'on ne retrouvera pas chez d'autres exploitants. Cela implique une large gamme de compétences de nos propres équipes, mais aussi de nos prestataires »*, estime Magali Saluden, chef de programme R&D pour l'A&D.

### Des étapes réglementaires à respecter

Le CEA a acquis une expertise et un savoir-faire sur l'ensemble des étapes de l'A&D. *« La première consiste à caractériser l'état initial de l'installation : volumes de déchets à traiter, configuration des locaux, cartographie radiologique, etc. »*, décrit Thierry Advocat. S'ensuit la définition de scénarios de démantèlement : quels procédés et technologies mobiliser pour chaque opération, quels outils pour reprendre chaque type de déchets, etc. ? *« On arrête un scénario final sur la base de plusieurs critères incluant notamment la solution technique retenue devant être proportionnée aux enjeux, le montage industriel avec son planning et les coûts, l'analyse des risques, l'objectif étant toujours de garantir des chantiers les plus sûrs possibles pour les opérateurs »*, poursuit l'expert.

Enfin, après constitution d'un dossier de demande d'autorisation auprès de l'autorité de sûreté nucléaire, l'ASN, dont l'instruction peut prendre trois à cinq ans, le chantier d'A&D peut débuter. Avec là encore des défis opérationnels : *« Malgré toute la préparation possible, chaque chantier dévoile son lot d'incertitudes. Il faut savoir analyser ce niveau de risque avant de contractualiser les travaux avec des prestataires »*, souligne Thierry Advocat. Une culture de l'exigence qui profite à l'ensemble des prestataires opérant sur les chantiers du CEA. *« La méthodologie de conduite de projet d'A&D est une discipline très spécifique. Elle nécessite des compétences généralistes (mécanique, procédés, électricité, contrôle-commande, génie civil...), une fine connaissance des*



**L'ASSAINISSEMENT** consiste à enlever la radioactivité résiduelle (grattage, déconstruction partielle du génie civil, etc.) présente dans une installation nucléaire. Cette étape nécessite des équipements de radioprotection adaptés.

**Le DÉMANTÈLEMENT** consiste à démonter et évacuer les équipements assainis présents dans l'installation.

8 000 m<sup>3</sup>

de déchets radioactifs annuels, expédiés vers les filières de gestion gérées par l'Andra. 80 % d'entre eux sont de très faible activité.

80 %

des déchets de l'A&amp;D sont des déchets conventionnels (gravats, métaux...).

*filières de gestion appropriées pour chaque type de déchet, la maîtrise du moindre détail en matière de logistique et de pilotage de chantiers, de suivi des marchés et contrats, et une expérience du travail en environnement radiologique », résume Thierry Advocat.*

### Des terrains d'expérimentation pour des procédés innovants

Avec un tel éventail de chantiers et d'opérations à mener, des innovations techniques sont bien souvent nécessaires. Elles viennent parfois des sous-traitants, qui proposent des procédés permettant de répondre aux cahiers des charges des chantiers, à l'image de cette scie circulaire téléopérée utilisée pour la découpe multi-matériaux sur le chantier du réacteur Ulysse à Saclay (voir article p. 54). Dans d'autres cas, le CEA met à profit son statut d'organisme de recherche pour développer ses propres technologies qu'il transfère ensuite à des partenaires industriels, ou pour en codévelopper avec eux. Menés avec des exploitants comme Orano ou EDF, mais aussi avec de grands groupes d'ingénierie comme Assystem, Veolia ou Onet, ces partenariats ont permis d'industrialiser des procédés à fort potentiel, comme la découpe laser téléopérée ou le traitement de déchets de typologies complexes (voir article p. 52), éprouvés en France, mais aussi testés au-delà des besoins nationaux sur le site japonais de Fukushima.

La volonté d'innover ne s'arrête pas là : « Nous accompagnons aussi des ETI et PME pour les aider à amener des solutions prometteuses au bon niveau de maturité technologique. Cela peut passer par un appui technique ou une expertise, mais aussi par la possibilité de tester ces technologies sur des chantiers-pilotes », souligne Magali Saluden. C'est ainsi que la société helvète Flyability a pu éprouver un système d'investigation aérien par drone dans l'enceinte du réacteur G2 (première génération de réacteurs à l'uranium naturel graphite gaz

utilisés pour la production de plutonium à usage militaire), sur le site de Marcoule. « Ce type de test sur le terrain contribue fondamentalement à fiabiliser ces technologies en les qualifiant en environnement réel, et ainsi à les rendre plus légitimes pour de futurs prospects », insiste Magali Saluden. Le CEA inclut enfin dans ses missions un volet de recherche plus prospective, voire académique, afin d'anticiper les besoins de futurs chantiers d'A&D en réponse à ses propres besoins et pour promouvoir la filière nucléaire française à l'horizon d'une décennie (voir article p. 49).

### Une filière qui gagne en compétence

Doté d'un budget annuel de 740 millions d'euros et employant près de 1 350 personnes sur cette thématique, le CEA entend bien devenir un moteur pour l'ensemble de la filière : « Nous contribuons à bâtir une filière française très performante pour participer au développement durable du nucléaire d'aujourd'hui et de demain, pour relever de futurs défis dans l'Hexagone, mais aussi pour capter des marchés à l'international », exprime la chef de programme R&D pour l'A&D. Preuve de sa force d'entraînement, le CEA collabore avec 214 intervenants académiques ou industriels de l'A&D, et représente une part importante de cette activité avec plus de 250 marchés supérieurs à 200 000 € passés en 2021-2022 et plus de 260 appels d'offres





↑ Installation d'entrepasage de déchets de moyenne activité à vie longue sur le centre CEA de Cadarache, dans l'attente de la mise en service de Cigéo (Andra).

sur les trois prochaines années. Il déploie aussi sa volonté de structuration de la filière au niveau international : « *En raison de notre double statut d'exploitant nucléaire et de développeur de solutions technologiques, mais aussi de la diversité des sujets que nous traitons dans nos chantiers, nous sommes idéalement positionnés pour coordonner des projets européens visant à définir les stratégies et feuilles de route pour améliorer la sûreté et limiter le coût des chantiers d'A&D* », souligne Magali Saluden. ●

**Travailler en assainissement-démantèlement, c'est comment ?**



## La formation : enjeu clé... et grandes opportunités

L'effectif total de la filière française dans l'A&D se situe aujourd'hui autour de 6 000 personnes. « *Or d'ici une petite dizaine d'années, les besoins en personnel augmenteront d'au moins 50 %, si ce n'est plus, pour satisfaire les chantiers lancés par les trois grands exploitants français que sont le CEA, Orano et EDF...* », estime Vincent Testard, responsable pédagogique à l'INSTN. L'institut, centre de formation majeur du CEA, propose 34 cursus sur cette thématique et forme chaque année 700 travailleurs dans tous les corps de métier de la filière : ingénieurs, chercheurs, chefs de projets, techniciens, opérateurs...

Aux indispensables formations de haut niveau, l'institut ajoute une offre davantage tournée vers les métiers plus opérationnels. « *Nous visons en particulier des formations initiales pour des métiers d'opérateur ou de technicien qualifiés, pour lesquels les besoins vont être très importants à l'avenir en raison de la massification des chantiers* », assure Valérie Morar, responsable pédagogique sur la thématique assainissement et déchets. Pour ce faire, l'INSTN mise sur des outils pédagogiques à la pointe. L'établissement inaugurera en 2025 la plateforme multimodale Invictus, financée dans le cadre d'un appel à projets France Relance. Étendue sur 1 800 m², elle simulera notamment un environnement représentatif d'un chantier d'A&D : zones d'accès restreint, équipements industriels, etc. « *C'est un outil précieux qui permettra aux étudiants de se frotter au terrain dans des conditions réalistes* », complète Florent Lemont, chef de l'unité d'enseignement INSTN.

Reste un enjeu : inciter les jeunes talents à s'engager dans cette filière... qui ne manque pourtant pas d'arguments ! Un panel de spécificités qui la rend passionnante, à des lieues de l'imaginaire rébarbatif qu'on lui associe trop souvent, et de très vastes opportunités professionnelles. « *Beaucoup de formations garantissent un emploi à la clé, ce qui est appréciable dans le contexte actuel, et les opportunités d'évolution de carrière seront nombreuses, soutenues par des dispositifs de formation continue* », commente Valérie Morar. « *Les arguments sont déjà là, à nous de les faire connaître auprès des publics* », résume Vincent Testard.





# ***Nous priorisons les chantiers qui permettent de réduire les risques.***



**Christophe Oudot,**  
directeur de l'A&D

## **Quelle est la stratégie du CEA sur ses chantiers d'assainissement-démantèlement ?**

— En accord avec les autorités de sûreté, le CEA a entrepris dès 2016 de prioriser les opérations d'assainissement-démantèlement en tenant compte des moyens financiers et humains qui lui sont alloués. Cette hiérarchisation, qui a abouti en 2018, a été établie sur la base d'une évaluation des risques potentiels sur l'environnement en cas de situation accidentelle, à partir de la radioactivité présente dans les installations. Elle prend aussi en compte la qualité de conditionnement des déchets et la robustesse de l'installation. C'est ainsi que nous avons identifié nos projets prioritaires. Pour la plupart d'entre eux, il s'agit de chantiers de reprise et de conditionnement de déchets qui ont été entreposés il y a plusieurs dizaines d'années selon les normes de l'époque. Nous conduisons aujourd'hui une centaine de projets en parallèle, dont une dizaine de première priorité, avec des échéances qui s'étalent jusqu'à la fin du siècle.

## **Peut-on donner un exemple de projet prioritaire ?**

— Nous pouvons citer le projet « dégainage » sur le site de Marcoule, qui consiste à reprendre des

déchets en fosse par des moyens téléopérés, puis à les conditionner. Il s'agit de plus de 1600 tonnes de gaines en magnésium qui protégeaient les combustibles des réacteurs à uranium naturel graphite gaz. Ces déchets seront ensuite individuellement caractérisés et envoyés, selon leur radioactivité, vers un des sites de stockage de l'Andra ou conservés au CEA en attendant la mise en service de Cigéo, le futur site de stockage des déchets radioactifs en couche géologique profonde. Ce projet nécessite donc la construction au CEA d'une installation d'entreposage répondant aux normes actuelles. Eden, c'est son nom, est actuellement en phase d'avant-projet détaillé.

## **L'objectif pour toute installation est-il toujours le « retour à l'herbe » ?**

— C'est bien ce que nous avons réalisé sur le site de Grenoble avec une déconstruction complète des bâtiments des installations nucléaires. Le déclassement réglementaire a

d'ailleurs été prononcé en 2023. Néanmoins, pour nos autres sites qui ont vocation à conserver une activité nucléaire, nous privilégions un assainissement total sans destruction des murs, ce qui réduit de fait la quantité de déchets générés et permet l'implantation de nouvelles activités industrielles.

## **La vision A&D est-elle intégrée dès la conception des futures installations ?**

Celles-ci sont effectivement conçues en prenant en compte la gestion de leur fin de vie. Cela passe par l'étude de la cinématique du démantèlement, l'accessibilité des zones et le choix des matériaux. Ce dernier permet notamment de réduire le volume des déchets. Par exemple dans le cadre du chantier du démonstrateur de fusion nucléaire de niveau industriel Iter à Cadarache, des équipes du CEA interviennent pour définir quel sera le meilleur scénario d'assainissement-démantèlement. ●

# L'A&D, c'est aussi de la science !

L'assainissement-démantèlement, ce sont des chantiers, de l'innovation technologique... mais pas seulement. Au CEA, il implique aussi une recherche plus prospective sur des sujets à fort potentiel d'innovation. Des actions menées au sein d'importants programmes de recherche institutionnels européens ou internationaux, mais aussi en interne, *via* une vingtaine de thèses dédiées. Aperçu à travers deux d'entre elles, qui permettront d'imaginer des chantiers toujours plus simples et plus sûrs pour les opérateurs.



**De nouvelles techniques de caractérisation de la pollution radioactive**

*Julien Audouin*

« Dans tout chantier d'A&D, la caractérisation préliminaire de la contamination radioactive est fondamentale. Aujourd'hui, les opérateurs prélèvent des échantillons de surface par grattage, qu'ils envoient ensuite en laboratoire pour analyses. Ce processus, qui peut s'avérer long et coûteux, pourrait un jour être remplacé par **des techniques plus directes basées sur la détection par fluorescence des sous-espèces chimiques générées par l'interaction des particules ionisantes issues de la radioactivité avec l'eau**. Mon travail de thèse a permis de mieux comprendre certains de ces phénomènes chimiques, notamment ceux qui se déroulent dans le « pic de Bragg », une zone située à la fin des traces d'ions énergétiques, particulièrement difficile à étudier. Cette recherche fondamentale ouvre l'espoir à long terme de pouvoir caractériser différents types de pollution radioactive sur site et en quasi-temps réel. »

« Une étape préliminaire mais cruciale de l'A&D consiste à **établir une cartographie en 3D de l'état radiologique de l'installation à partir de mesures ponctuelles**. Aujourd'hui, les opérateurs reportent à la main leurs résultats de mesure dans une matrice spatiale représentant la pièce à cartographier. Lors de cette thèse, nous avons mis au point un prototype portable qui permet de réaliser ce report de façon automatique, et ce même dans les environnements non accessibles au GPS, grâce à deux caméras stéréo et à un accéléromètre comparable à celui de nos smartphones. De futurs travaux auront pour objectif d'embarquer l'algorithme chargé de la reconstruction 3D au sein du prototype pour l'obtention d'un système complètement autonome. »



*Andréa Macario Barros*

**Une cartographie 3D automatique pour les mesures de radioactivité**

# Numérique, l'allié incontournable

**Jumeaux numériques, robotique, traitement de données, intelligence artificielle... Le numérique s'est aussi imposé dans le secteur de l'assainissement-démantèlement. Il est même devenu un puissant outil de travail pour mieux préparer et optimiser les séquences des chantiers. En témoignent les développements ambitieux et transversaux portés par le CEA.**

Nous sommes dans une installation nucléaire du CEA. L'équipe se prépare pour le chantier de démantèlement d'un de ses anciens laboratoires. La tâche qui les attend est complexe : l'installation, par sa construction et sa configuration, est unique en son genre, et il n'existe quasiment pas de retours d'expérience de chantiers équivalents. Sur sa tablette, le chef d'équipe commence par parcourir le modèle 3D du local auquel les opérateurs vont s'attaquer. Ici, de larges tuyaux qui obligent à travailler couché. Là, une imposante cuve de forte épaisseur à découper. Il superpose à ces vues une cartographie de l'ambiance radiologique : chacun repère immédiatement les « points chauds », qui requièrent des précautions particulières ou des manipulations spécifiques. Après avoir enfilé leurs équipements de protection, les opérateurs, sereins et préparés, pénètrent enfin dans la pièce. Cette scène, désormais courante dans les chantiers d'A&D, illustre l'apport des outils numériques pour faciliter les travaux et optimiser la protection des travailleurs. *« Le numérique est désormais un allié performant et incontournable, qui peut intervenir à toutes les phases des chantiers »,* atteste Magali Saluden, chef de programme R&D pour l'assainissement et le démantèlement au CEA.

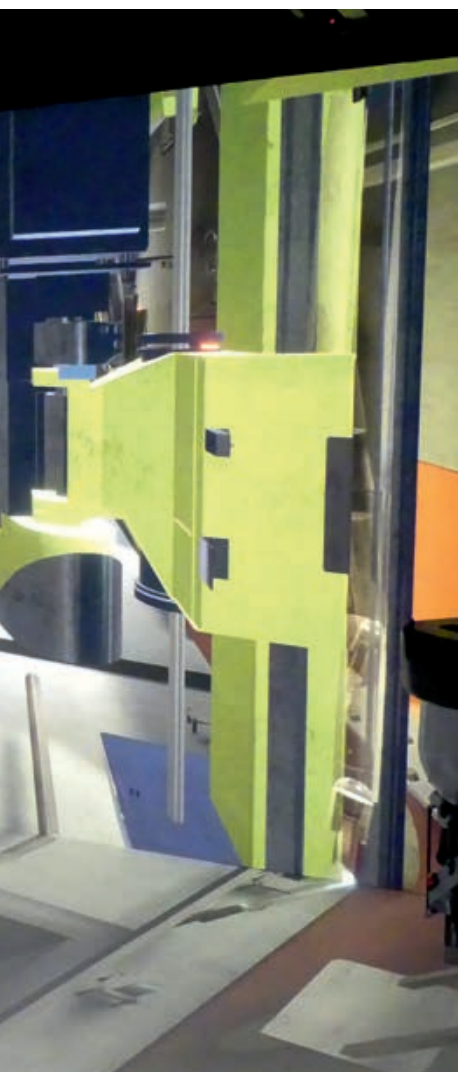


© CEA



## « Le numérique est désormais un allié performant et incontournable, qui peut intervenir à toutes les phases des chantiers »

Magali Saluden, chef de programme R&D pour l'assainissement et le démantèlement au CEA



### Des outils dopés à l'IA

Avant même le début du chantier, des technologies de traitement de données permettent de mieux caractériser l'état de l'installation. « Nos algorithmes d'intelligence artificielle spécialisés dans l'interprétation des signaux viennent renforcer la qualité de mesure de nos capteurs radiologiques. Ils nous aident notamment à maîtriser les incertitudes associées », détaille l'experte. D'autres techniques permettent d'élaborer des plans d'échantillonnage robustes en extrapolant les mesures radiologiques ponctuelles pour obtenir une vision globale des risques en n'importe quel point de l'installation... « C'est primordial pour des chantiers étendus où il est en pratique impossible de mesurer chaque cm<sup>2</sup> », précise Magali Saluden. Autant de techniques qui se révèlent indispensables sur le chantier-pilote des usines de diffusion gazeuse de Pierrelatte, pour lequel il s'agit de caractériser plusieurs millions de m<sup>2</sup> de sols et de parois et d'enregistrer des niveaux de radioactivité parfois très faibles et difficilement mesurables, jusqu'à l'état de trace. « Ces outils nous ont permis d'avoir la précision d'information suffisante pour instruire le dossier d'autorisation de déclassément de l'installation auprès de l'autorité de sûreté », explique-t-elle.

À l'instar de la scène présentée en introduction, « des jumeaux numériques » peuvent ensuite guider la conduite des chantiers. « Ce sont des modèles 3D d'installations fabriqués à partir d'acquisition de caméras 3D ou de lidars. On obtient un nuage de points, à partir duquel des algorithmes reconstruisent un modèle complet », explique Lorène Allano, directrice adjointe des programmes de l'Institut List. L'équipe a développé un savoir-faire unique en la matière : « Nous utilisons des suites logicielles disponibles sur le marché, mais développons également nos propres briques logicielles. L'environnement de développe-



Préparation d'une intervention grâce à la réalité virtuelle.

ment XDE Physics permet par exemple de simuler la manipulation et les interactions de composants d'une maquette numérique en prenant en compte la physique », ajoute la spécialiste. Au jumeau numérique d'une installation peut ensuite être adossée une cartographie dosimétrique en 3D dopée à l'IA. « Le tout permet aux équipes d'évaluer l'accessibilité et la faisabilité des différentes opérations, et de phaser le chantier de façon réaliste », résume Magali Saluden. Cette maquette permet en outre de remonter tous types d'indicateurs pratiques en temps réel : quantité et typologies de déchets évacués, nombre d'heures travaillées en fonction de l'environnement radiologique, évaluation de la coactivité...

### S'entraîner en mode virtuel

L'autre atout du jumeau numérique est que cette technologie ne sert pas uniquement à modéliser des installations, mais aussi des procédés. Le CEA a ainsi développé des jumeaux numériques de deux systèmes téléopérés déployés sur une des installations de Marcoule pour récupérer des fûts de déchets « historiques » entreposés dans des alvéoles d'entreposage fermées. Nommes Murène et Gobie, ces deux systèmes manœuvrables à distance – respectivement un bras de manipulation de fûts et un système d'aspiration conçu pour assainir le sol des alvéoles – peuvent ainsi désormais être simulés. De quoi valider leurs performances en fonctionnement nominal et prévoir des situations opératoires dégradées. « Actuellement, nous étudions grâce aux jumeaux numériques des possibilités de remorquage du système Murène en cas de panne, par le système Gobie », illustre Magali Saluden. Le numérique s'avère enfin précieux pour la formation des opérateurs. « Le CEA acquiert et développe aussi des outils d'interaction entre les données et l'utilisateur. À l'image de cette salle de réalité virtuelle dans laquelle les opérateurs peuvent se perfectionner sur la réalisation d'opérations ou sur l'utilisation de moyens téléopérés pour l'A&D, comme la technologie de découpe laser », détaille Lorène Allano. En somme, un métavers industriel avant l'heure, au service de l'amélioration de l'efficacité et de la sûreté des chantiers. ●

# Des procédés innovants et des transferts industriels

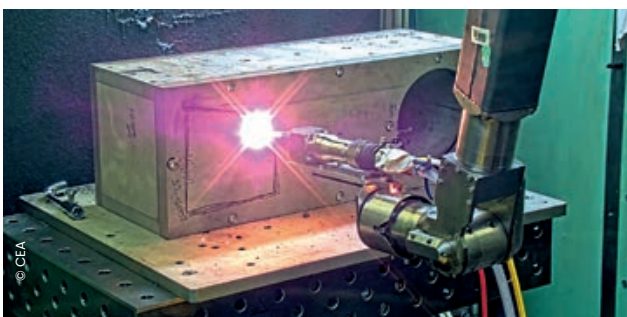
**Conduire des chantiers d'assainissement-démantèlement, quand ils sont complexes, exige d'associer expertise scientifique et technique, et créativité !**

**Le CEA développe ainsi des outils et des technologies spécifiques pour le traitement, le conditionnement et la caractérisation des déchets. Avec à la clé des transferts industriels majeurs.**

**100** C'est le nombre de brevets déposés à ce jour par le CEA sur des sujets liés à l'A&D. Une volonté d'innovation conséquente réalisée à la fois sur fonds propres, mais aussi en partenariat avec des industriels. « À côté de l'innovation opérationnelle qui vise des solutions très rapidement applicables, nous avons un volet R&D visant des applications dans dix ans, sur des procédés qui seront, à sûreté équivalente, technico-économiquement optimisés », détaille Magali Saluden. Sept de ces projets sont aujourd'hui financés dans le cadre du programme Investissements d'avenir avec des acteurs incontournables de la filière comme Onet, Orano, Assystem, Veolia... « Le CEA innove pour répondre à ses propres besoins, mais aussi à ceux d'autres donneurs d'ordre de la filière, et pour soutenir la filière française dans son rayonnement international », résume l'experte. Zoom sur trois projets liés à une compétence clé du CEA : la caractérisation, le traitement et le conditionnement des déchets.

## La découpe laser téléopérée testée à Fukushima

Ce n'est plus à prouver : le laser est un outil très efficace pour couper tous types de matériaux et dans de nombreuses configurations. Le CEA a donc adapté cette technologie pour les opérations d'A&D avec plusieurs objectifs. D'abord, celui de minimiser le dégagement de poussières et d'aérosols, potentiellement radioactifs, pendant les phases de découpe. Ensuite, de pouvoir découper en milieu contraint, par exemple sous l'eau ou en zone en accessibilité contrainte. Et enfin d'accompagner le procédé de son jumeau numérique. « Cela nous permet de simuler des opérations de façon virtuelle, et ainsi de pouvoir procéder à la formation de l'opérateur. Si l'on dispose du jumeau numérique de l'environnement de travail, nous pouvons étudier la trajectoire de découpe, les contraintes associées et évaluer l'opérabilité du système porteur », résume Magali Saluden. Une technologie de pointe aujourd'hui transférée à la société Onet, qui l'a éprouvée en France lors du démantèlement de la centrale nucléaire EDF de Brennilis, et l'expérimente sur le site de Fukushima pour la découpe du corium, mélange de combustible nucléaire fondu et de béton.



↑ Découpe laser de maquettes représentant des éléments internes d'un réacteur.





## Dem&Melt, un traitement thermique pour déchets de typologies complexes

Ce procédé de traitement thermique développé en partenariat avec Orano se veut « omnivore » : l'objectif est de traiter des déchets de compositions chimiques variées et complexes, comme des boues d'effluents, qui ne peuvent trouver d'exutoires satisfaisants d'un point de vue technico-économique. Dem&Melt se veut aussi compact et agile pour s'adapter à des chantiers où les volumes à traiter ne justifient pas la création d'une usine dédiée. Pour ce faire, le procédé utilise directement le conteneur de déchets comme creuset de vitrification, en lui faisant subir un protocole de chauffe adapté. *« Des solutions techniques existent, mais ne permettent d'incorporer ce type de déchets qu'à hauteur de quelques pour cent, contre plusieurs dizaines de pour cent ici »,* précise Magali Saluden. Aujourd'hui à l'état de prototype au CEA, le procédé est en phase d'industrialisation avec Orano, il a déjà été testé pour le traitement de déchets secondaires issus du traitement des eaux de Fukushima, et pourrait répondre aux besoins de traitement de déchets entreposés sur le site américain d'Idaho.

↑ Unité pilote à l'échelle 1 du procédé de traitement thermique des déchets Dem&Melt.

## Tomis, un scanner transportable pour analyser les déchets

La tomographie aux rayons X, utilisée pour les radiographies médicales, est une technologie aujourd'hui largement mature, permettant notamment d'analyser le contenu des colis de déchets. Elle a été adaptée pour caractériser certains déchets entreposés dans des installations historiques ne pouvant pas être transportés jusqu'au lieu d'analyse pour des raisons de sûreté radiologique. Tomis vise donc à rendre cette technologie transportable pour l'apporter au plus près des déchets, à niveau de performance égal à celui que l'on pourrait avoir dans des laboratoires d'analyse fixes. *« Cela permettra de compléter ou conforter des données d'inventaires de déchets, quand les données manquent ou que la composition des déchets peut avoir évolué au cours du temps »,* précise Magali Saluden. Tomis intègre un système de protection radiologique, ainsi qu'un dispositif d'introduction et de rotation des colis de déchets pour faciliter leur acquisition en 3D. Développé depuis 2018 au CEA, Tomis est testé depuis 2023 sur l'une des installations d'entreposage du CEA pour caractériser plusieurs milliers de colis de déchets et ainsi être qualifié en fonctionnement industriel. *« À terme, quelques systèmes Tomis – entre deux et cinq – pourraient équiper la filière nationale. Les cas d'usage à l'international seront également nombreux »,* prévoit Magali Saluden.



# Focus sur deux chantiers

**Fruits des activités historiques du CEA en matière de R&D nucléaire, ces installations sont uniques. D'où des chantiers d'assainissement-démantèlement parfois complexes, mais toujours riches d'enseignements pour le CEA comme pour l'ensemble des entreprises sollicitées. La preuve en deux projets menés à bien.**

↓ Le bâtiment du réacteur Ulysse, à la fin du démantèlement.



## Le réacteur Ulysse

### Lieu

Centre Paris-Saclay

### Installation

Réacteur de recherche de faible puissance (100 kW thermique). Mis en service en 1961, il était principalement utilisé pour l'enseignement à l'INSTN (l'école de formation du CEA) et pour des expérimentations de recherche, avant d'être arrêté en 2007.

### Spécificités

Accord de l'autorité de sûreté pour considérer le béton du bloc du réacteur selon deux zones – une à déchets conventionnels, non activée, et une à déchets nucléaires – et d'adapter les procédés de découpe en conséquence. Les blocs de béton « conventionnels » ont été entreposés sur site jusqu'à la fin du démantèlement, le temps que l'IRSN (l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) confirme qu'ils ne présentaient aucune activation.

### Déroulement du chantier

5 ans de travaux (août 2014 à août 2019) séquencés selon trois phases : chantiers conventionnels, chantiers nucléaires et enfin assainissement final du hall et de la cavité sous cœur. Le déclassement administratif de l'installation ayant été publié en juillet 2022, les locaux sont désormais prêts à être réinvestis par l'INSTN.

### Défi

Découpe de tous les matériaux au moyen d'une scie circulaire refroidie à l'eau et commandée à distance. Les eaux de découpe, récupérées et retraitées, ont été conditionnées à la fin du démantèlement dans des matrices en béton pour ne pas générer d'effluents radioactifs.

## La « salle de casse »

### Lieu

Centre DAM-Île-de-France (Bruyères-le-Châtel)

### Installation

Le bâtiment D (1959-1996) accueillait les activités de transformation du plutonium, matériau utilisé pour la fabrication des armes nucléaires de dissuasion. Les équipements servant à manipuler le plutonium étaient démantelés dans la « salle de casse », c'est-à-dire découpés et transformés en pièces de plus petite dimension en vue de leur évacuation vers les filières de déchets adaptées.

### Spécificités

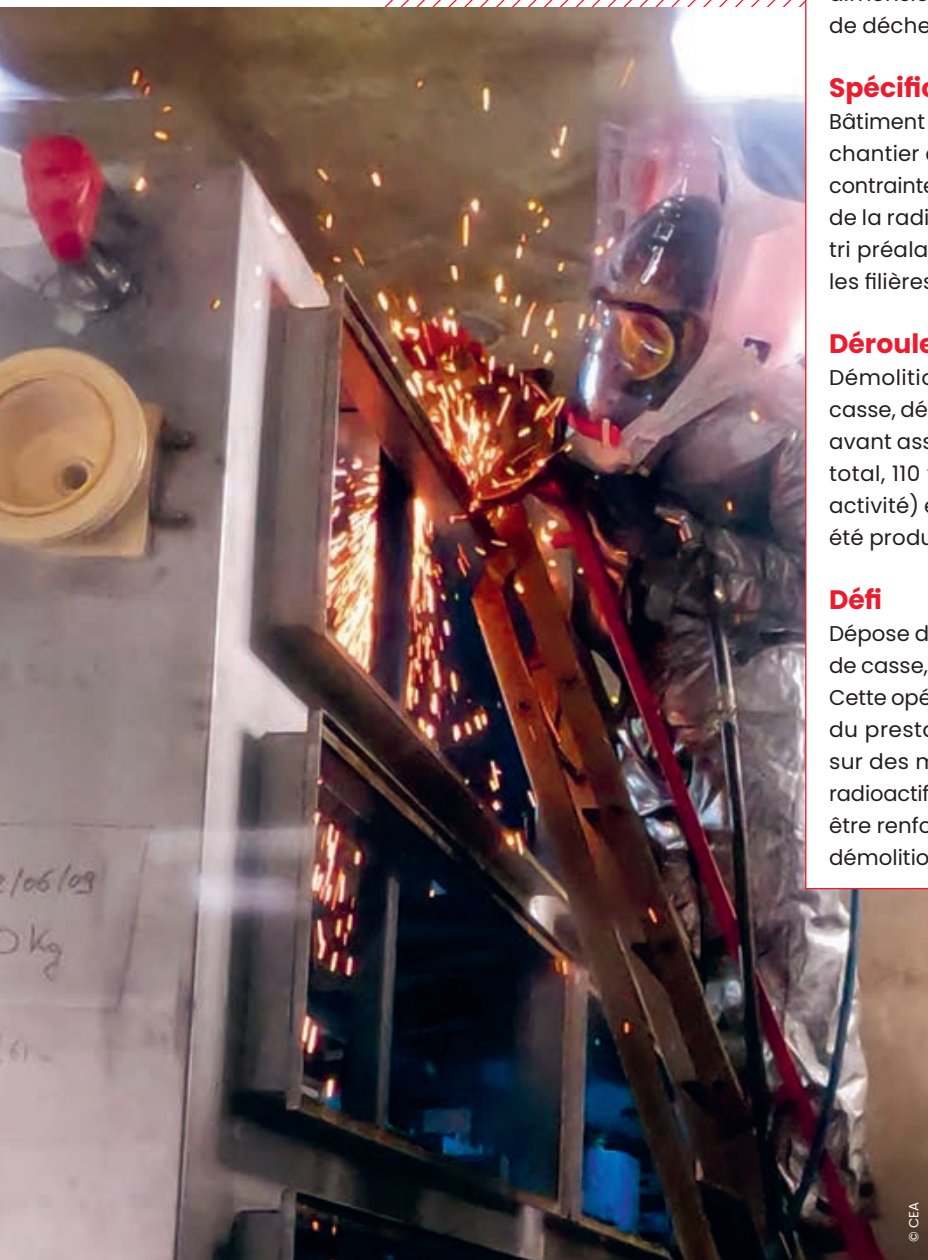
Bâtiment enterré et exiguïté des locaux, à l'inverse d'un chantier de BTP à l'air libre, entraînant d'importantes contraintes pour le chantier, à concilier avec la garantie de la radioprotection des opérateurs et le nécessaire tri préalable des déchets avant leur orientation vers les filières adaptées.

### Déroulement du chantier

Démolition des cloisons des 11 locaux de la salle de casse, découpe des équipements, puis tri des déchets avant assainissement de la dalle (2022-mi-2024). Au total, 110 tonnes de gravats de type TFA (très faible activité) et 410 fûts de déchets FA (faible activité) ont été produits.

### Défi

Dépose du cuvelage métallique qui recouvrait la salle de casse, non seulement posé mais soudé sur la dalle. Cette opération a nécessité l'adaptation des pratiques du prestataire et l'entraînement de ses opérateurs sur des maquettes taille réelle, hors environnement radioactif. Le soutènement du sous-sol a également dû être renforcé pour supporter le passage de l'engin de démolition, d'un poids de 2 tonnes.



Opération de découpe d'un équipement dans une salle de casse en exploitation.

# Figer les éclairs

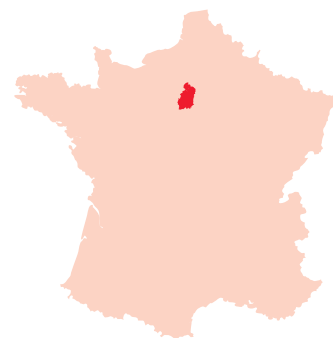
**Un corail électrique ?** Cette photo n'a pourtant pas été prise dans des fonds marins. Elle provient des laboratoires du CEA à Valduc, où a été mis au point le procédé Hanetec, pour « figer des éclairs » à partir d'un mécanisme réactif entre un plasma et un liquide. Une sorte de cristallisation qui donne lieu à **une nouvelle classe de nanomatériaux** et permet la création de mousses métalliques et de nouveaux alliages. Grâce à la structure poreuse et à des filaments mille fois plus fins qu'un cheveu, la surface réactive est immense, avec un minimum de matière et un poids plume. Une **découverte aux multiples applications**, comme des batteries de voiture plus légères.







# Le CEA... à Paris-Saclay

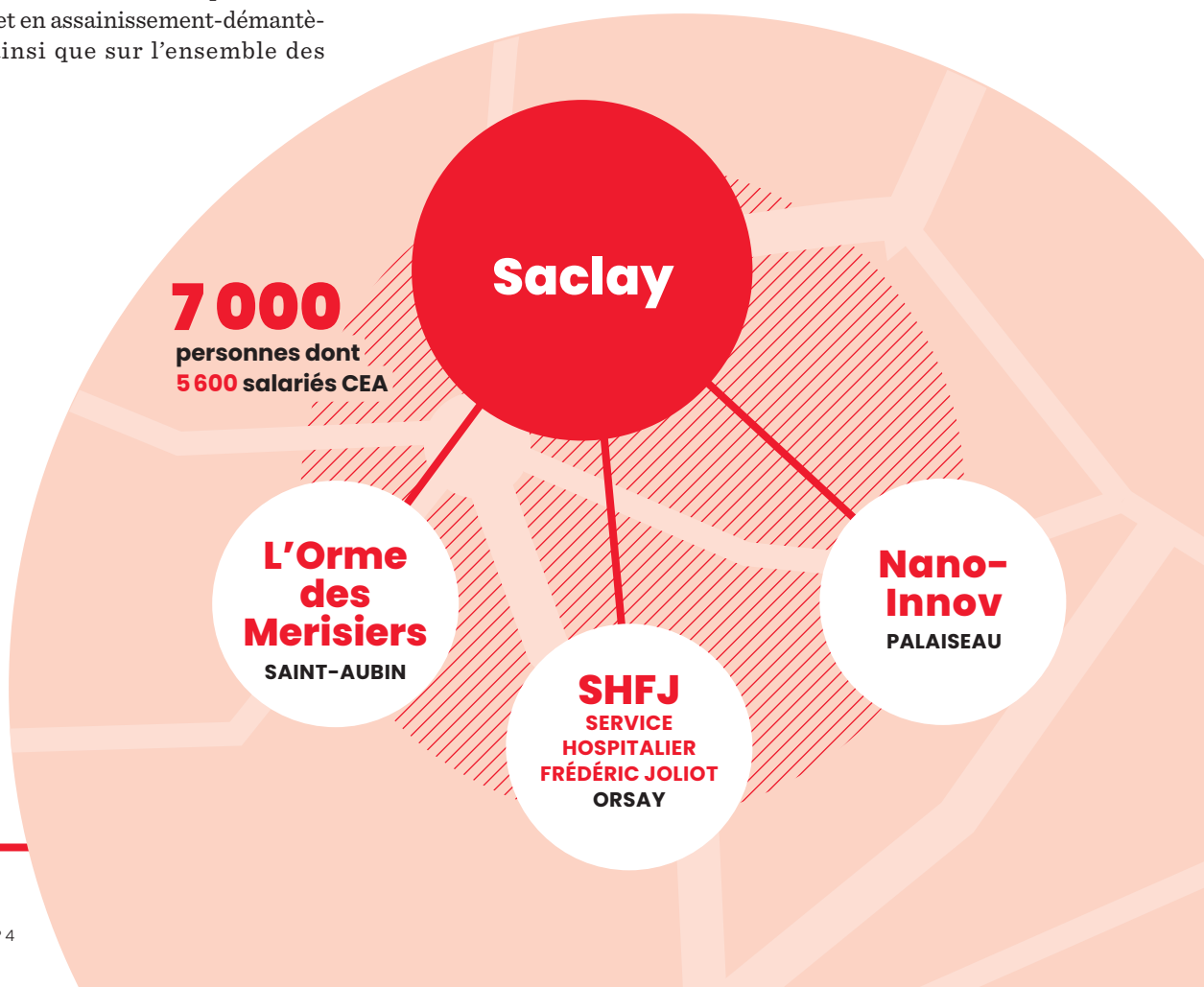


**Créé en 2017, le centre CEA Paris-Saclay est issu de la fusion des deux sites historiques de Saclay et Fontenay-aux-Roses. Acteur majeur de l'innovation à l'échelle européenne, il est partenaire de l'université Paris-Saclay, et comporte une dizaine d'implantations dans le sud francilien et à Paris.**

## UN CENTRE PLURIDISCIPLINAIRE, DE LA RECHERCHE FONDAMENTALE AUX ÉNERGIES

Qu'il s'agisse d'explorer l'Univers, les nanosciences, la physique ou la biologie, le centre CEA de Paris-Saclay réunit 10 instituts de recherche et d'enseignement, dotés de technologies et d'instruments à la pointe de l'innovation. Fort de son histoire, le centre bénéficie d'une expertise en nucléaire et en assainissement-démantèlement, ainsi que sur l'ensemble des

énergies bas carbone. Impliqué dans les transitions énergétique et numérique, il agit également en soutien à la compétitivité des entreprises, avec des plateformes numériques et des outils au service de l'industrie.





**10**  
instituts de recherche  
et d'enseignement



**2**  
prix Nobel  
de physique

**900**  
personnes dont  
**710** salariés CEA

**SRHI**  
HÔPITAL  
SAINT-LOUIS  
PARIS

**Fontenay-  
aux-Roses**

**Genoscope  
et CNRGH**  
ÉVRY





**+ de 600**  
doctorants

**01**

## Un centre névralgique pour l'innovation

Recherche fondamentale, laboratoires dits « chauds » pour le nucléaire, accélérateurs de particules, lasers de pointe, imagerie nucléaire, robots innovants et bien d'autres ! Le site de Saclay couvre le riche panel des activités du CEA à travers plusieurs implantations : le site principal, où se situe également le siège de l'organisme, les sites de l'Orme des Merisiers, consacré à la recherche fondamentale, et de Nano-Innov, plutôt orienté vers le numérique, et enfin un service hospitalier situé à Orsay.

Chaque implantation dispose de nombreuses plateformes et équipements d'excellence et travaille avec d'autres acteurs de la recherche situés à proximité, sur le plateau de Saclay. Lieu de connaissances, Saclay est aussi un lieu d'enseignements, avec de nombreux étudiants de bac +2 à bac +7, ainsi que le centre INSTN qui assure une formation initiale et continue. Le site compte sept installations nucléaires, dont certaines sont actuellement en cours de démantèlement, et plusieurs entreprises et partenaires tels qu'Orano, l'Andra et l'IRSN.

Pour les amateurs du petit et du grand écran, le site de Saclay est également un lieu de tournage ! La série *Rictus*, avec Fred Testot, est l'une des dernières productions à avoir bénéficié de son cadre exceptionnel, mêlant les bâtiments historiques de l'architecte Auguste Perret et les structures impressionnantes de ses anciennes piles nucléaires.

**Saclay** Nucléaire • Biologie • Neurologie • INSTN (formation) • Physique des particules • Accélérateurs • Capteurs • Démantèlement • Métrologie en radiothérapie **L'Orme des Merisiers** Climat et environnement • Astrophysique • Physique nucléaire • Lasers • Quantique, spintronique **Nano-Innov** Robotique • Numérique • Intelligence artificielle • Cybersécurité **SHFJ** Imagerie • Médecine



**+ de 50**  
start-up essaimées

### LES PRINCIPAUX PARTENAIRES

#### Économiques

Areva, Orano, EDF, Safran, Renault, etc.

→ Plus de **200 partenaires** industriels au total.

#### Académiques

Université Paris-Saclay,  
Université Paris-Est Créteil  
Val-de-Marne, Université d'Évry,  
Université Paris Diderot, Institut  
polytechnique de Paris.

#### Institutionnels et de recherche

ASN et IRSN, AHP, Institut Pasteur, Inserm  
et ANRS, CNRS, Cern, Inria, ESA et CNES,  
Communauté Paris-Saclay, Établissement  
public d'aménagement de Paris-Saclay,  
département de l'Essonne, Région  
Île-de-France, réseaux des Instituts Carnot.

**400**



**personnes dédiées  
à la sécurité,  
la protection  
et la santé**



**Représente 25 %  
de l'effectif enseignants-  
chercheurs de l'université  
Paris-Saclay**

**03**

### **Un siège parisien**

Siège social du CEA, l'immeuble du Ponant dans le 15<sup>e</sup> arrondissement accueille les équipes des directions fonctionnelles qui travaillent en lien avec les ministères de tutelle et les institutions nationales. Aucune activité de recherche n'y est menée.

**02**

### **Une implantation historique tournée vers la médecine du futur**

Premier centre du CEA créé en 1946, le site de Fontenay-aux-Roses est lié à l'aventure nucléaire française. C'est là que Zoé, la première pile atomique française, a divergé en 1948 et qu'ont été mis au point les procédés de retraitement du combustible nucléaire, actuellement utilisés à La Hague. S'il accueille aujourd'hui encore des activités de sûreté et sécurité nucléaires, le site s'est progressivement spécialisé dans les domaines de la biologie et de la santé. Outre ses laboratoires de recherche, il héberge ainsi des start-up pour la médecine de demain et travaille en étroite collaboration avec plusieurs industriels.

Deux implantations spécialisées en génomique et génétique complètent ce panorama : le Genoscope, pour l'environnement et la chimie, et le CNRGH (Centre national de recherche en génomique humaine). Le site de Fontenay-aux-Roses gère également du personnel en poste à l'hôpital Saint-Louis à Paris, notamment en hématologie et immunologie. À noter : ce site abrite également les archives et l'inspection générale nucléaire du CEA.

**Fontenay-aux-Roses** Sécurité et sûreté nucléaires • Archives •  
Assainissement-démantèlement • Biologie **SRH** recherche  
en hématologie et immunologie • **Genoscope** :  
génomique environnementale • **CNRGH**  
génomique humaine

**700**

**étudiants de bac + 2  
à bac + 7 formés  
chaque année**



Par **Alexandre Bounouh**,  
directeur de l'Institut List du CEA et président  
de l'association des Instituts Carnot

# Entre les entreprises et la recherche publique, une collaboration qui doit s'intensifier



**Les défis scientifiques et technologiques qui sont devant nous sont d'une telle intensité que toutes nos ressources de recherche et développement doivent être mobilisées ; celles des entreprises comme celles de la recherche publique française. Il y va de la souveraineté technologique de notre pays. C'est tout l'esprit du réseau des instituts Carnot.**

**E**n France, 60 % de la R&D des entreprises confiée à la recherche publique, l'est par l'intermédiaire du réseau des instituts Carnot. C'est un chiffre à méditer dans un pays où subsistent encore des doutes sur l'efficacité de la collaboration entre le public et le privé et où l'on est parfois prompt à souligner davantage les succès étrangers que nationaux dans le domaine de la recherche.

Depuis son lancement en 2006, le réseau des instituts Carnot est la première force de recherche publique mobilisée pour l'innovation des entreprises. Chaque année, plus de 11 000 contrats de recherche partenariale sont conclus entre les 39 instituts qui composent le réseau et des entreprises de toutes tailles et de tous secteurs d'activité. De la lutte contre le cancer jusqu'aux nouvelles technologies agricoles en passant par l'intelligence artificielle, les « Carnot »



couvrent l'ensemble des domaines clés de la recherche sur lesquels les entreprises françaises doivent se concentrer pour assurer leur développement et participer ainsi à la souveraineté scientifique et technologique de la France. C'est un modèle gagnant-gagnant : les entreprises ont accès au meilleur de la recherche publique et les instituts disposent de ressources financières pour investir dans la recherche fondamentale dont viendront les innovations de demain.

Pourtant, nous devons faire mieux encore. La part des entreprises dans la dépense intérieure de R&D est plus faible en France (66 %) qu'en moyenne des pays de l'OCDE (72 %). Il existe donc encore une marge de progression pour renforcer le lien entre les mondes académique et économique. La recherche partenariale ne peut se développer sans l'implication et le soutien de l'ensemble des parties prenantes : l'État, les entreprises et les laboratoires académiques. L'État doit ainsi maintenir et renforcer le dispositif du label Carnot, qui garantit la qualité et le professionnalisme des instituts de recherche partenariale. Dans ce contexte, nous avons accueilli avec beaucoup de satisfaction les annonces de la ministre de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation sur le budget 2024 avec une hausse du budget de l'abondement Carnot à 123 M€, en cohérence avec la trajectoire inscrite dans la Loi de programmation de la recherche. Cet effort devra se poursuivre pour atteindre les 181 M€ prévus en 2027.

Quant aux entreprises, elles doivent mieux identifier leurs besoins en R&D, se rapprocher le plus souvent possible des instituts Carnot et s'engager dans une démarche de coconstruction de leurs feuilles de route technologiques avec les laboratoires. Enfin, il est indispensable de développer dans les laboratoires académiques une culture de l'innovation et du partenariat avec le privé.

Le réseau Carnot tire son nom du physicien et ingénieur Sadi Carnot (1796-1832), à ne pas confondre avec son neveu, le président de la République qui fut assassiné en 1894 (et dont bien des rues portent le nom). Dans un livre qui décrit les bases scientifiques du fonctionnement des machines à vapeur, l'ingénieur Sadi Carnot pose dès 1824 les fondements d'une « nouvelle » science, la thermodynamique. Celle qui régit encore aujourd'hui le fonctionnement de nombreux appareils du quotidien : moteur thermique des voitures, réfrigérateur, pompe à chaleur...

Les instituts Carnot sont des structures de recherche publique, labellisées par le ministère en charge de la Recherche à l'issue d'appels à candidatures très sélectifs. Ils s'engagent à mener et développer une activité de recherche partenariale au bénéfice de l'innovation dans les entreprises - de la PME au grand groupe. Ces instituts offrent un large spectre de compétences permettant de répondre aux besoins de R&I des acteurs dans toutes les filières industrielles. Pour tirer parti de ces compétences et faire jouer leurs complémentarités, ils sont organisés en réseau opérationnel, animé par l'association des instituts Carnot. Deux instituts du CEA sont labellisés Carnot, le Leti (microélectronique) à Grenoble, et le List (systèmes numériques intelligents) à Saclay.

[www.lereseaudecarnot.fr/fr](http://www.lereseaudecarnot.fr/fr)

*Pour les férus de science,  
un rappel en images  
du principe de Carnot.*



Cela devra passer par de la formation aux enjeux et aux pratiques de la recherche partenariale, une organisation qui facilite l'accès aux compétences et aux équipements, une capacité de valoriser les travaux menés avec les entreprises et la reconnaissance des chercheurs.

Les modèles économiques se transforment à toute allure, avec une focalisation croissante sur la valeur ajoutée par la connaissance. Dans cette économie du savoir, la capacité à innover devient un atout stratégique pour les entreprises. Pour innover et renforcer notre souveraineté technologique, encourageons la recherche partenariale ! ●

# Notre sélection



autour de nos productions ou coproductions les plus récentes...

Interviews, documentaires, conférences, portraits, vous avez le choix !



## Le premier matin du monde

Comment s'est formé l'Univers ? De quoi est-il fait ? David Elbaz, directeur scientifique du Département d'astrophysique du CEA, retrace la quête des origines de l'Univers dans cette conférence enregistrée lors d'une matinée spéciale « De l'infiniment grand à l'infiniment petit » dans le cadre de la série « Scientifique, toi aussi ! Construisons ensemble le monde de demain. »



## Le bien-être, une affaire de molécules ?

L'épigénétique pourrait être la clef de notre bien-être. Suivez ici les échanges entre Jorg Tost, directeur du Laboratoire d'épigénétique et d'environnement au CEA, et Bernard Ennuyer, sociologue spécialiste de la vieillesse. Une rencontre issue du cycle « Science toi-même ! » organisé par le CEA et le CENTQUATRE-Paris, en partenariat avec Usbek & Rica.



## 100 000 addicts

Si la fabrication additive est aujourd'hui un des piliers de l'économie circulaire par sa capacité à réduire significativement la consommation de matériaux, elle réserve parfois des surprises originales. En témoigne cette plaque réalisée par fusion laser sur lit de poudre pour fêter les 100 000 abonnés de notre chaîne YouTube !



## Le grand saut des puces

Si vous l'avez manqué sur l'Esprit sorcier TV, voici une seconde chance de regarder ce documentaire qui retrace 50 années de recherche au CEA sur l'électronique, des premières puces à l'ordinateur quantique en passant par la spintronique. Voici le dernier épisode en date de la série *Fondamental ! À la recherche du futur* coproduite par l'Esprit sorcier et le CEA, avec le soutien de l'ANR.



## À votre santé !

Et si le développement d'une nouvelle génération d'organes et d'organoïdes sur puces (OOC) permettait d'identifier des traitements mieux adaptés à chaque patient ? C'est tout l'enjeu du programme national exploratoire de recherche MED-OOC, nous rappelle ici Xavier Gidrol, copilote CEA de ce PEPR.



## Au cœur de la radioprotection

Mayeul Potignon, technicien en radioprotection au CEA, nous dévoile les coulisses de son métier sur l'installation Osiris à Saclay. Un portrait diffusé à l'occasion de la deuxième édition de la Semaine des métiers du nucléaire, coorganisée par l'Université des métiers du nucléaire et France Travail, dans le cadre de la série *Les passionnés de l'énergie*.



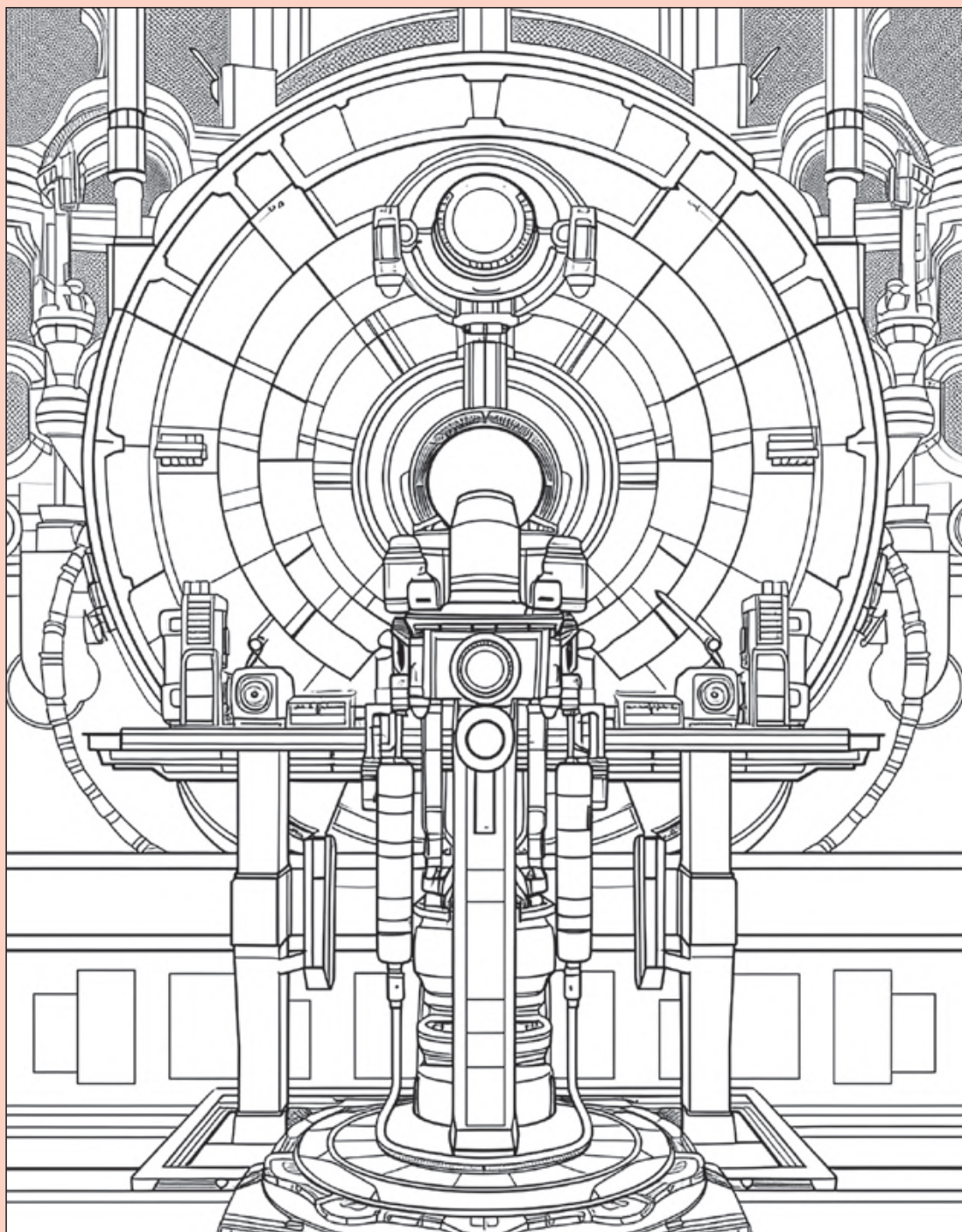
© N. Krief / CEA

**Des neutrons au bout du tunnel?** Au centre CEA de Saclay, les derniers cryomodules pour l'ESS (*European Spallation Source*) sont en fabrication. Chacun comprend 4 cavités supraconductrices refroidies à  $-271^{\circ}\text{C}$ , qui vont accélérer un faisceau de protons. L'ESS est un accélérateur de particules linéaire conçu pour sonder la matière. Le CEA participe depuis 2013 à sa construction. La production des cryomodules a mobilisé les compétences du CEA en physique des accélérateurs, mais aussi en gestion de projets, prouvant ses capacités à mener des réalisations pour la recherche de pointe en tant que maître d'œuvre avec un industriel. L'ESS entrera en phase de test à la fin de l'année 2024, et sera pleinement opérationnel à l'horizon 2026.



# Color!Age

**Besoin d'un moment de calme ? Un stylo 4 couleurs suffit pour colorier ce mandala de haute technologie, libre interprétation par le logiciel Midjourney d'une IRM très robotisée. Aiguillée par notre graphiste, l'IA a généré 584 images et nous vous avons sélectionné la meilleure !**





## Qui sommes-nous ?

Fort d'un modèle unique, le CEA est un organisme public de recherche dont la mission est d'éclairer la décision publique et de donner les moyens aux forces vives (État, entreprises, collectivités, monde académique) de relever les défis majeurs de notre temps : changement climatique, transition énergétique, pandémies, défense et sécurité, numérique, économie circulaire...

Retrouvez toute l'actualité du CEA sur [www.cea.fr](http://www.cea.fr)  
et sur nos réseaux sociaux



Saviez-vous  
que votre revue  
est fabriquée à partir  
d'une pâte à papier  
**100 % recyclée ?**



*Rendez-vous ici  
pour découvrir la revue !*

Info 100 %  
vérifiée.