

03 LA REVUE DU CEA

NUCLÉAIRE

**Des réacteurs
à la pointe
de la science**

- Page 12

SANTÉ

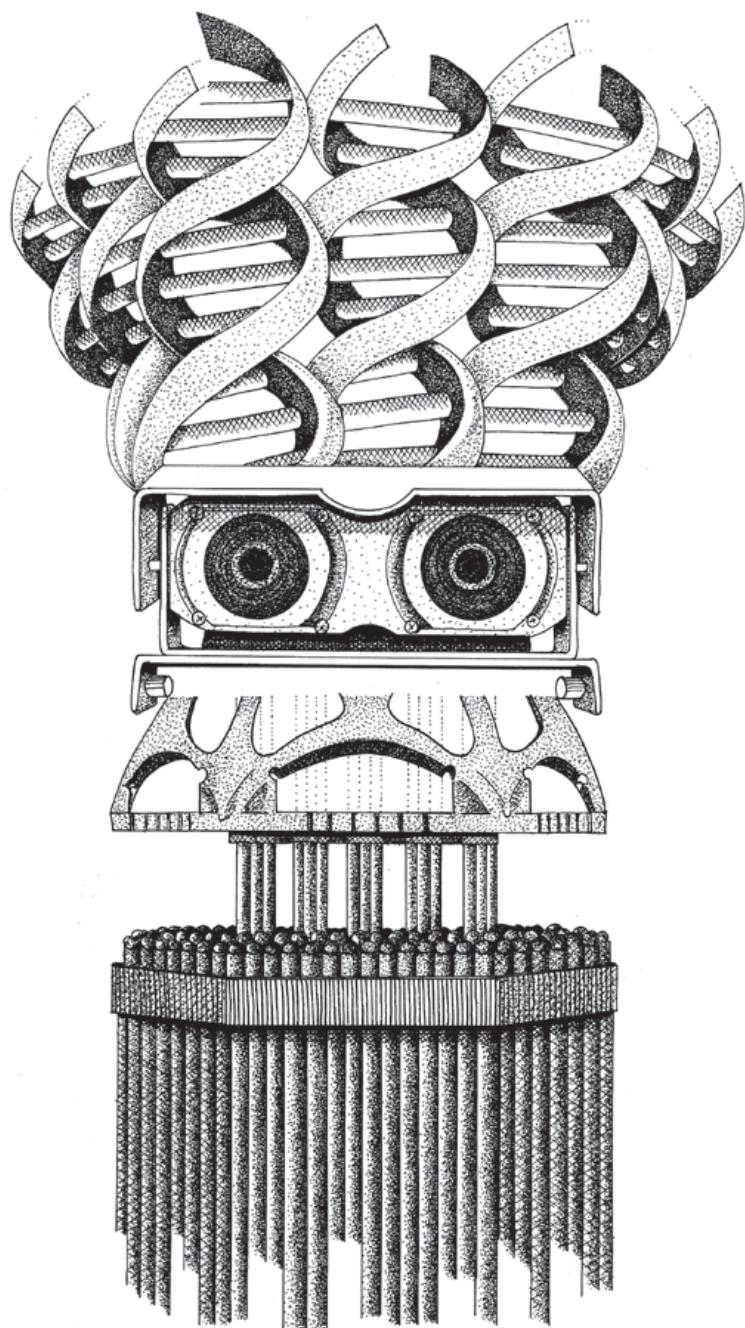
**Demain,
quelle médecine ?**

- Page 28

INNOVATION

**Les nouveaux
paradigmes
de la deeptech**

- Page 44



HIVER 2024

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
et Sylvie Rivière

Iconographie

Christelle Comoy

Comité éditorial

Renaud Blaise, Vincent Coronini, Anne Guérin,
Valérie Vandenbergh.
Avec le concours scientifique de Gilles Bordier,
Philippe Chomaz, Hervé Desvaux, Étienne Klein,
Serge Palacin et Olivier Vacus.

Illustration de couverture

La Hache illustration

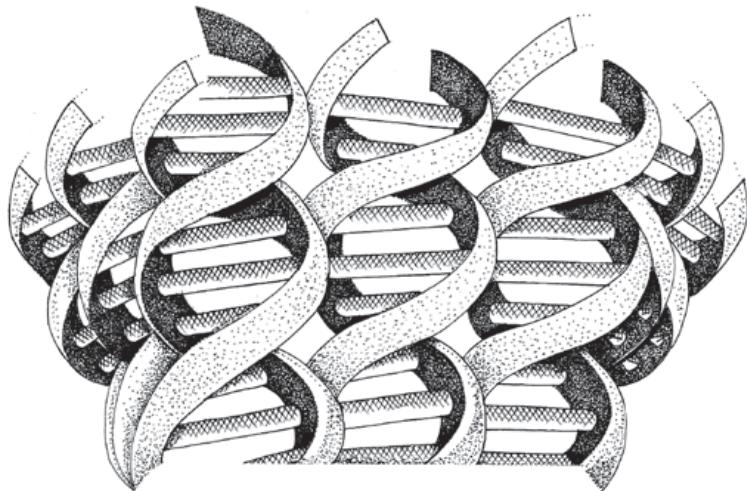
Conception graphique

bearideas

Des remarques, des suggestions ?

Écrivez-nous à revue@cea.fr

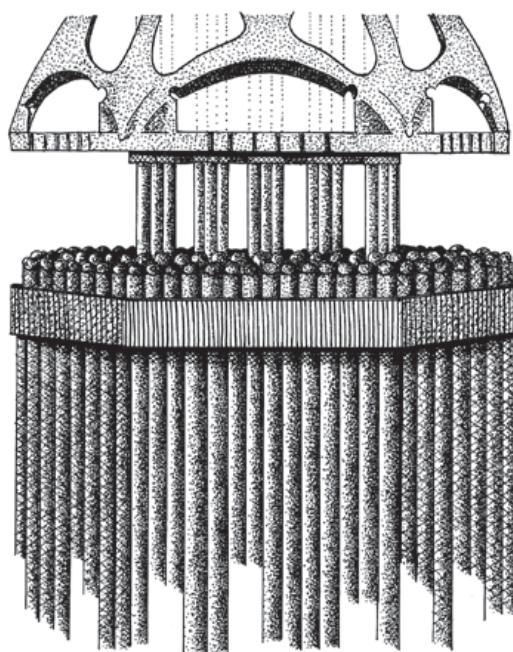
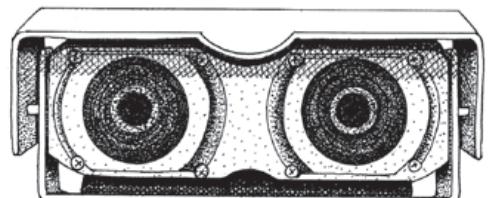
ISSN 3000-3148



La couverture déchiffrée

Appréciez ces doubles hélices d'ADN qui offrent une coiffure virevoltante à notre personnage. Notre dossier vous plonge dans les rouages des technologies du CEA pour favoriser les avancées en matière de santé et progresser dans nos connaissances du vivant.

Droit dans les yeux. Ces lunettes avec caméra intelligente, mises au point avec le CEA, sont embarquées sur des engins de chantier. Grâce à l'IA et à une reconnaissance des mouvements en temps réel, elles savent différencier un humain de tout autre obstacle, révolutionnant ainsi la sécurité des travailleurs en milieu contraint. Innover, voilà le maître-mot du monde disruptif de la deeptech que l'on va parcourir ensemble.



Les barres de combustibles présentes au cœur des réacteurs nucléaires ont la finesse d'un cou. Mais pour tester leur assemblage et l'ensemble de la conception des réacteurs nucléaires, rien de mieux qu'un réacteur de recherche, outil essentiel à la souveraineté énergétique et pour la recherche scientifique.

Les invités de la revue

1. À la tête de la Direction financière et des programmes du CEA depuis 2016,

Marie-Astrid Ravon-Berenguer

a œuvré pour la création de Supernova Invest. Elle se réjouit que cette structure permette de démultiplier les possibilités d'investir dans les projets soutenus par le CEA, en leur apportant tout le soutien dont ils ont besoin.

© L.Godart / CEA

2. David Emond est le directeur du projet RJH, le futur réacteur nucléaire de recherche en construction sur le site CEA de Cadarache. Il revient pour nous sur l'aventure de ce chantier qui implique des centaines de personnes.

© DR

3. Julie Galland est la directrice de la recherche technologique du CEA. Elle soutient sans relâche l'idée que les plus belles ruptures technologiques pour la santé peuvent naître du croisement de disciplines aussi éloignées que la biologie et la microélectronique.

© L.Godart / CEA



7. Vincent Lebon est à la fois médecin et ingénieur. Il dirige depuis sept ans le Service hospitalier Frédéric Joliot au sein de l'hôpital d'Orsay avec un enthousiasme communicatif ! Avec son équipe, il fait avancer les protocoles et les imageurs pour la médecine nucléaire et l'imagerie multimodale, au bénéfice des patients.

© DR

6. Anne-Isabelle Etienvre, après avoir été conseillère « recherche » au cabinet de la ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche,

spécialiste de la physique des particules, est récemment revenue au CEA pour diriger toute la recherche fondamentale. Un univers qui s'étend de l'infiniment grand à l'infiniment petit, de la physique au monde du vivant.

© DR

Editorial

4. Chargé de la prospective, de la veille et de la science ouverte à la Direction scientifique des énergies, **Stéphane Loubière** nous décrypte les différents types de réacteurs de recherche au sein du CEA et au-delà, des infrastructures essentielles pour la science et un avenir bas carbone.

© DR

5. Acteur de la création de Supernova Invest, son directeur général, **Régis Saleur**, en est persuadé : investir c'est (aussi) une histoire de séduction. Il souligne que l'alchimie réussie entre l'expertise du CEA et l'accompagnement de Supernova Invest fait aujourd'hui du second le premier acteur de l'investissement deeptech en France, tous segments confondus.

© L.Godart / CEA

L'actualité nous montre un peu plus chaque jour l'importance d'une reprise en main de notre destin industriel et technologique dans tous les domaines, pour mieux assurer la résilience de notre société face aux bouleversements en cours. Au CEA, nous avons la conviction que seule une collaboration étroite entre les mondes de l'industrie et de la recherche permet de se prémunir des aléas à court, moyen et long terme. L'expérience montre d'ailleurs que c'est en associant l'excellence scientifique des chercheurs aux ambitions des industriels que nous parvenons à faire émerger des technologies de rupture, dites « deeptech ».

En France, c'est souvent dans les laboratoires des organismes de recherche public que naissent ces futures pépites, dans des domaines aussi variés que le quantique, l'hydrogène, la microélectronique, le nucléaire et la santé. Nos scientifiques disposent de compétences pointues qui permettent à la France de rester dans la course – mais pas encore sur le podium – d'une compétition mondiale de plus en plus âpre dans ces domaines clés.

Certains d'entre eux montent leur start-up. Soutenus par un programme d'intrapreneuriat volontariste du CEA, ces chercheurs-entrepreneurs bénéficient d'une vision approfondie du marché et de l'état de l'art scientifique de leur domaine. Leurs start-up s'appellent Genvia, Fluiidd, Theranexus, Heliup et pourraient bientôt devenir des fleurons comme STMicroelectronics, géant essaimé du CEA.

La rédaction

Merci également à

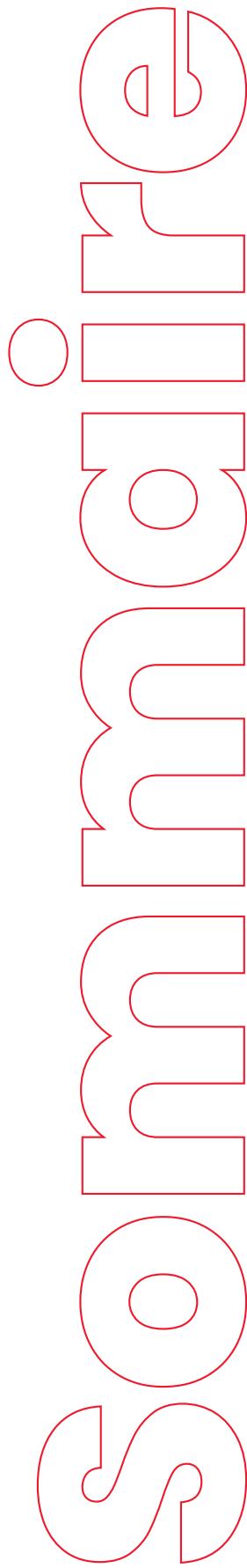
Sophie Avril
Gilles Bordier
Jean Bouchacourt
Gaëlle Calvary
Mathieu Charveriat
Patrick Chaton
Philippe Chomaz
Vincent Coronini

Mathieu Darnajou
Marc Delpech
Alexandra Fuchs
Sylvie Gibert
Xavier Gidrol
Jean-Paul Goossens
Elisabeth de Lavergne
Michel de Lempdes

Matthieu Le Prado
Marie-Hélène Mathon
Sylvie Menezo
Fabrice Navarro
Robert Olaso
Laurence Petit
Franck Pillot
Stéphanie Simon

Renaud Sirdey
Philippe Vernier
Yannick Veschetti

Et tous ceux qui ont aidé à réaliser cette revue !



01

Des réacteurs à la pointe de la science



© G. Lessard / CEA

Tout comprendre aux réacteurs
de recherche **14**

Le RES, vital pour la
souveraineté française **18**

Le RJH, couteau suisse
en construction **20**

Cabri, un réacteur
qui fait des bonds **22**

West, un banc d'essai
pour la fusion **23**

Ils ont rejoint l'aventure **24**

Et aussi...

Dans les coulisses du CEA **8**

Making-of : Euclid dévoile l'Univers **26**

Portfolio : au cœur de la médecine nucléaire **40**

Ancrage : le CEA... au Ripault **58**

Le grand entretien avec Anne L'Huillier **60**

Carte blanche : déconsommation et innovation ?
Un oxymore indispensable **64**

Playlist **65**

À vous de jouer **66**

02

Demain, quelle médecine ?



Le CEA et la santé,
une longue histoire **30**

Porter les innovations
en santé jusqu'au patient **34**

Paroles de chercheurs **38**

*Cette revue
est imprimée
dans le
Limousin.*

03

Les nouveaux paradigmes de la deeptech



Le CEA et la deeptech,
une évidence **46**

Investir, entre risque
et innovation **48**

Trois initiatives qui comptent **51**

Magellan, le grand voyage
des start-up **52**

Des grands projets d'avenir **54**

Les investissements français
dans la deeptech **56**

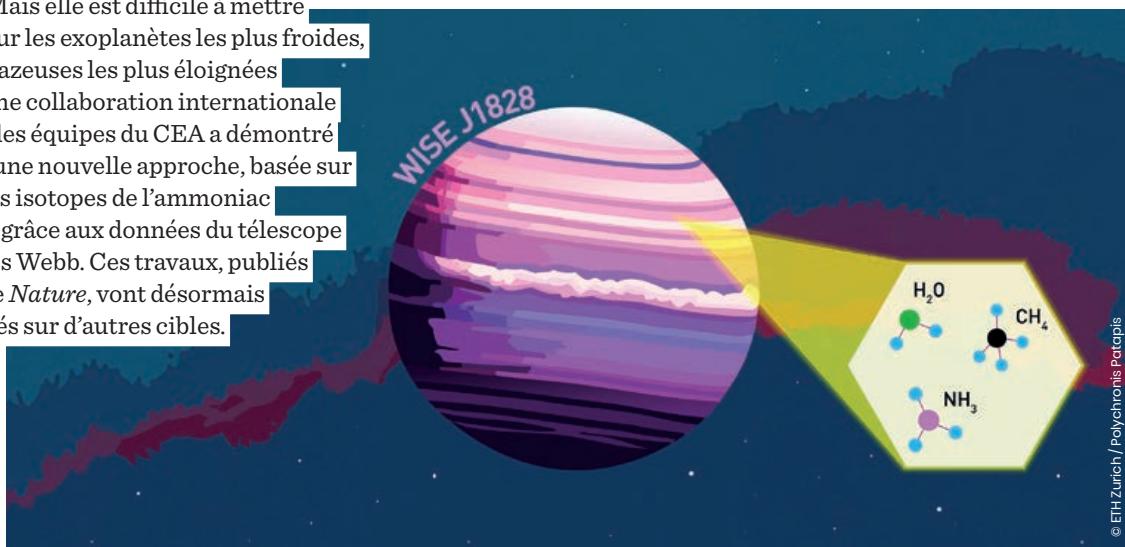
Dans les coulisses du CEA

Le cœur de Louis XIV, du nylon recyclé, un outil pour mesurer l'impact environnemental du solaire...
Passage en revue des dernières actualités qu'il ne fallait pas manquer !

ASTROPHYSIQUE

Percer le secret de la formation des géantes gazeuses

Comment se forment les exoplanètes, ces mondes extérieurs à notre système solaire ? Jusqu'à présent, la méthode la plus répandue pour savoir à quelle distance de l'étoile s'était formée une exoplanète reposait sur l'analyse du rapport entre deux isotopes du carbone (^{12}C et ^{13}C). Mais elle est difficile à mettre en œuvre pour les exoplanètes les plus froides, les géantes gazeuses les plus éloignées de l'étoile. Une collaboration internationale impliquant des équipes du CEA a démontré la validité d'une nouvelle approche, basée sur le rapport des isotopes de l'ammoniac cette fois-ci, grâce aux données du télescope spatial James Webb. Ces travaux, publiés dans la revue *Nature*, vont désormais être dupliqués sur d'autres cibles.



IMAGERIE MÉDICALE

L'IA dope les IRM

Avec l'imagerie par résonance magnétique (IRM) à très haut champ, les clichés médicaux obtenus sont de très haute résolution, mais au prix d'un temps d'acquisition trop long pour envisager une utilisation en clinique. Pour accélérer ces traitements d'images sans altérer leur qualité, les chercheurs du CEA ont développé de nouvelles méthodologies à base d'intelligence artificielle, dont certaines en collaboration avec le constructeur d'IRM Siemens Healthineers.



© CAPA / MATCHA

↑ Le médecin légiste et anthropologue Philippe Charlier s'est penché sur les cœurs des rois avec l'aide des chercheurs du CEA.

PATRIMOINE

Des peintures qui ont du cœur

1793. Dans une France en pleine tourmente, et alors que les églises sont pillées, des révolutionnaires dérobent le reliquaire contenant le cœur de Louis XIV. Selon la légende, des fragments de ce cœur momifié ont ensuite été vendus à des peintres, qui les ont réduits en poudre pour produire un pigment brun-ocre très prisé à l'époque. Une équipe du CEA à Marcoule a ainsi été sollicitée dans le cadre d'un reportage diffusé sur France 5 pour analyser des pigments prélevés dans la marge du tableau *Vue de Caen* d'Alexandre Pau de Saint-Martin. La spectrométrie analytique du CEA a permis de constater que les échantillons contenaient bien des protéines spécifiques au myocarde humain... Mais il n'est pas possible de déterminer s'il s'agit bien de celui de Louis XIV, car les protéines cardiaques présentent toutes les mêmes séquences quel que soit l'humain. Les restes du cœur royal reposent aujourd'hui dans la nécropole des rois à Saint-Denis. Bien d'autres mystères pourraient être résolus par les historiens grâce aux techniques de pointe du CEA.

(Re)voir le documentaire sur la plateforme de France TV jusqu'au 29 mai.



POLLUTION

Une plateforme autonome pour mesurer et prévoir la qualité de l'air

Ce châssis métallique ultraléger, facilement déplaçable et prochainement autonome, vise à améliorer les systèmes actuels de mesure de la pollution de l'air. Développé par le CEA, le dispositif MultiMod'Air mesure non seulement les concentrations en particules fines, en ozone et en dioxyde d'azote, comme les stations classiques, mais également la présence de polluants dit «émergents» comme l'ammoniac, ainsi que la radioactivité ambiante. Le tout à l'échelle locale et en temps réel, pour prévoir d'éventuels épisodes de pollution et émettre des alertes. «Il ne s'agit pas de concurrencer les agences de surveillance, mais de leur proposer des solutions innovantes et compétitives, incluant un outil de prévision», assure Martine Mayne, directrice de recherche et copilote de ce projet avec Sébastien Morilhat. En test sur le site CEA de Cadarache, la plateforme devrait bientôt être expérimentée sur le périphérique parisien et sur un site marseillais.



↑ La plateforme MultiMod'Air surveille la qualité de l'air et prévoit les pics de pollution.



© Bloguz / Fotolia

ENVIRONNEMENT

Le dioxyde de titane insoluble ? Pas si sûr

Depuis 2020 en France et 2022 dans l'Union européenne, aucun aliment ne peut contenir du dioxyde de titane, parce qu'il endommage le matériel génétique des cellules. Réputé robuste, chimiquement stable et surtout insoluble, il est utilisé dans bien d'autres produits – médicaments, cosmétiques, écrans solaires, etc. – pour ses propriétés : colorant blanc, opacifiant, absorbeur de rayons ultraviolets. Des chercheurs du CEA sont venus bousculer ces certitudes, en montrant que ces nanoparticules pouvaient être dissoutes dans un milieu biologique par des « sidérophores » bactériens, petites molécules synthétisées et secrétées par des bactéries pour capter le fer indispensable à leur développement. Une étude qui soulève la question de leur impact possible sur l'environnement et la santé humaine.

Retrouvez toutes nos autres actus sur cea.fr

ÉCONOMIE CIRCULAIRE

La chimie pour recycler les nylons

L'industrie textile en raffole, on le retrouve dans les maillots de bain, la lingerie, les chaussures, les toiles de parachute. C'est... le nylon ! Comment le recycler ? Le nylon fait en effet partie des matières plastiques, et en se dégradant, il pollue l'environnement et intoxique toute la faune, en particulier celle des océans. Au cours de sa thèse au CEA, Marie Kobylarski a mis au point une nouvelle solution de recyclage chimique du nylon. Ce processus le transforme en nouveaux matériaux à haute valeur ajoutée, pouvant être utilisés dans d'autres filières industrielles (traitement des eaux et milieux contaminés, capture du CO₂, retardateurs de flammes, etc.). Elle a été doublement récompensée pour ses travaux par Refashion, l'éco-organisme de la filière textile, dans le cadre de son Challenge innovation, et par l'université Paris-Saclay via leur appel à projets Poc In Labs 2023.



© Marie Kobylarski

↑ Nylon, du granulé à la fibre textile.

SANTÉ

Cancer du sein : viser juste

Comment repérer le plus précocement possible les cancers du sein les plus agressifs ? La « métabolomique » est une piste prometteuse, indique une étude à laquelle a contribué le CEA. Cette science consiste à identifier, dans un échantillon qui pourrait être une biopsie d'un sein, l'ensemble des métabolites (sucres, lipides, etc.) présents à un moment donné. C'est ainsi que les chercheurs ont découvert une « signature métabolomique » des cancers les plus invasifs, c'est-à-dire la présence de plusieurs métabolites spécifiques. De quoi, à terme, envisager une meilleure orientation des patientes selon leur type de cancer.



© Angiolini Harry/Unsplash/CC

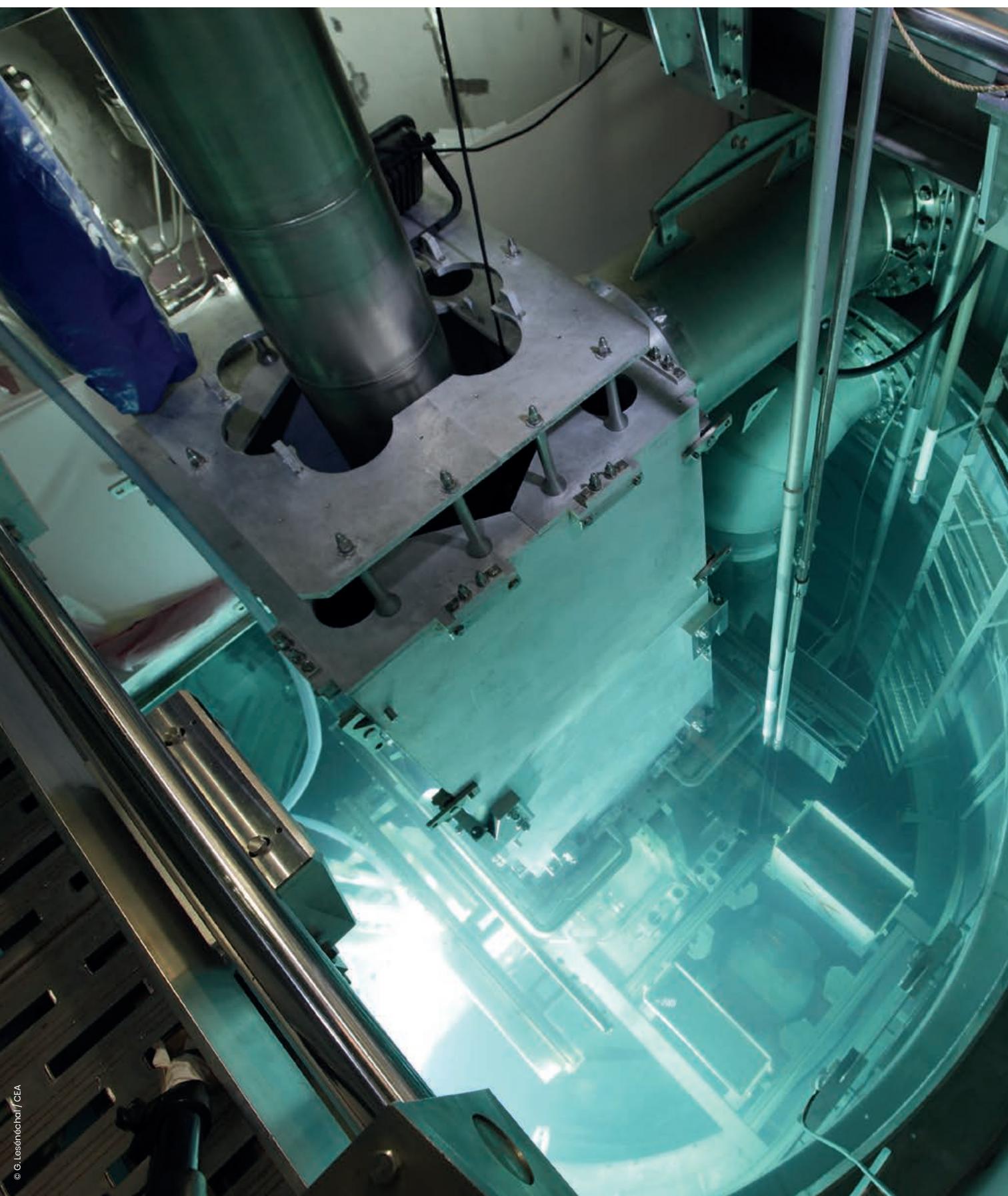
3 start-up issues du CEA

figurent parmi les lauréates de l'appel à projets « réacteurs nucléaires innovants » de France 2030. Ces projets vont être soutenus par l'État, avec l'appui technique du CEA pour un montant de près de 19 millions d'euros.

ÉNERGIE

Un outil pour mesurer l'impact environnemental du solaire

Une centrale photovoltaïque, ce sont non seulement des panneaux, mais aussi leurs supports, les câbles pour les relier, les onduleurs, les transformateurs, et bien d'autres équipements. Mesurer son impact environnemental complet demande donc de prendre en compte tous ces éléments tout au long de leur cycle de vie, de la fabrication au recyclage. Pour cela, le CEA a développé l'outil d'analyse EcoSPV. Celui-ci modélise systématiquement deux centrales en parallèles : la centrale étudiée et celle dite « de référence ». De quoi comparer immédiatement les effets de modifications et les différentes adaptations des systèmes. Pour l'instant réservé à des fins de recherche, l'outil pourrait s'ouvrir aux professionnels du secteur.





DOSSIER
01

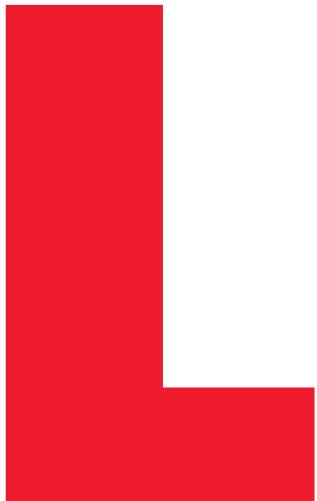
Des réacteurs

Réacteurs d'irradiation, maquettes critiques, sources de neutrons... Les réacteurs de recherche ont beau être de conceptions variées, ils répondent souvent à une même logique : tester différentes options pour la filière nucléaire actuelle et future, ou, dans le cas des sources de neutrons, sonder la matière. Des outils indispensables pour garantir notre souveraineté, non seulement énergétique, mais également scientifique.

à la
pointe
de la
science



La piscine du réacteur Cabri, sur le centre CEA de Cadarache, telle qu'elle était en 2011. Des travaux ont reconvertis le réacteur dans l'étude des situations accidentielles depuis 2015.



es tensions prévues pour cet hiver et les négociations entre les États européens dans le domaine énergétique le rappellent bien : la souveraineté et la lutte contre le changement climatique passent par des énergies fiables et bas carbone, dont le nucléaire. Mais avant de développer des centrales pour produire de l'électricité, encore faut-il s'assurer qu'elles fonctionnent, sont sûres et optimisées. Exactement l'une des missions du CEA ! Depuis décembre 1948 et la première pile atomique française, Zoé, mise en service sur son site de Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine), le CEA est un acteur central dans le domaine de la R&D nucléaire, elle-même redevenue incontournable avec la relance de la filière.

Cette R&D nécessite des infrastructures de recherche, au-delà des moyens permis par la simulation et les calculs. Pour tester les conceptions et la sûreté des futurs réacteurs du parc électronucléaire, mais aussi pour explorer les matériaux et la physique plus fondamentale, près d'une quarantaine de réacteurs de recherche ont été construits

en France. Aujourd'hui, seulement trois sont encore en fonctionnement, et le CEA travaille à la relève avec plusieurs projets en construction ou en réflexion.

« *On peut distinguer trois grands types de réacteurs de recherche : les réacteurs d'irradiation, dits "MTR" pour Materials Testing Reactor (réacteur de test pour matériaux) ; les maquettes critiques ; et enfin les sources de faisceaux de neutrons* », décrit Gilles Bordier, de la Direction scientifique des énergies du CEA. À cela, il faut ajouter deux spécificités françaises, et spécificités du CEA : le réacteur Cabri (voir reportage p. 22) qui sert à expérimenter des situations accidentelles, et le réacteur d'essais pour la propulsion nucléaire de défense, à savoir les sous-marins et porte-avions (voir reportage p. 18).

Les réacteurs d'irradiation

Comme leur nom l'indique, ces réacteurs servent à irradier des matériaux et des combustibles pour étudier leurs évolutions. Des échantillons d'acier de cuve, de gaines combustibles et d'autres matériaux de structure sont ainsi exposés aux différentes contraintes qu'ils rencontreront dans les réacteurs de puissance pour fournir de l'électricité. « *Un MTR peut accueillir à la fois des matériaux neufs pour en faire la caractérisation et la qualification dans différentes configurations d'irradiation, ou des matériaux déjà irradiés en réacteur électrogène, dont on veut tester la résistance* », explique Stéphane Loubière, à la Direction scientifique des énergies.

Le CEA poursuit la construction du futur réacteur d'irradiation Jules Horowitz (RJH), au sein de son centre de Cadarache (voir reportage p. 20). Le projet, sans équivalent en Europe, est soutenu par un consortium international impliquant neuf pays ainsi que la Commission européenne. Le CEA est à la fois membre majoritaire, propriétaire exploitant du réacteur et responsable du projet.

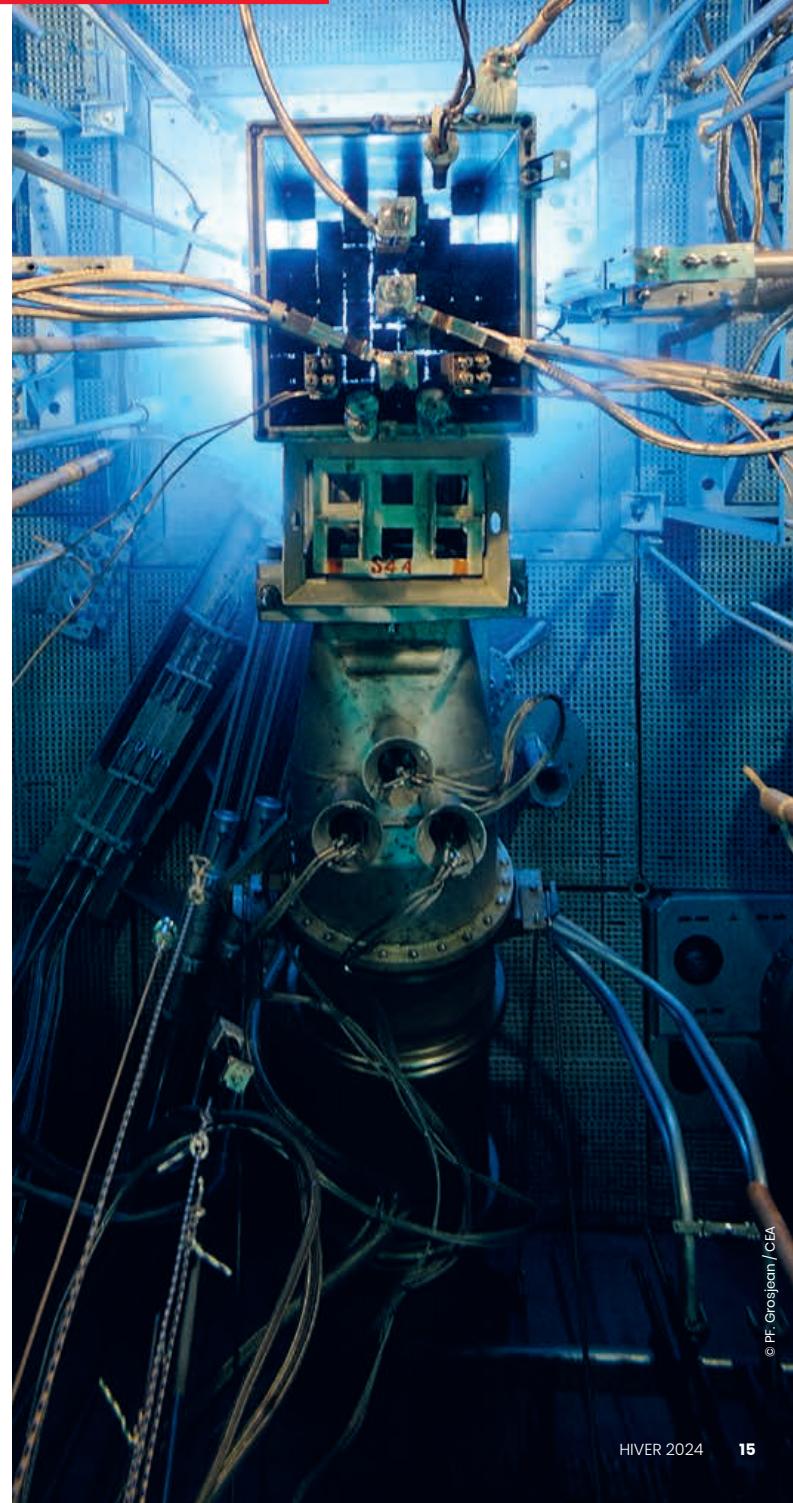
Au-delà de la simulation et des calculs, la R&D nucléaire nécessite de vrais réacteurs de recherche.

DES RÉACTEURS ESSENTIELS POUR LA MÉDECINE

Chaque année, quelque 9 millions d'Européens ont recours à la médecine nucléaire, que ce soit pour un diagnostic (imagerie) ou pour un traitement, contre les cancers par exemple. Ces prises en charge font appel à des radioéléments (ou radio-isotopes), eux-mêmes produits dans des réacteurs nucléaires de recherche, comme le molybdène 99, ou dans des cyclotrons (voir pp. 40-43). Faute de réacteurs de recherche en Europe, la médecine se retrouverait dépendante d'autres pays, comme le Canada, pour diagnostiquer et soigner ses malades.

Véritable couteau suisse et infrastructure de recherche majeure, le RJH devrait répondre à une grande part des besoins des industriels français et européens en irradiations pour la R&D nucléaire, que ce soit pour le parc actuel ou le développement de nouveaux réacteurs. Avec 20 emplacements pour des expériences simultanées, il permettra l'étude, la spécification et la validation de combustibles et de matériaux irradiés dans divers flux de neutrons. Un an de tests dans le réacteur correspondra ainsi à huit à dix ans de fonctionnement « normal » dans une centrale du parc électronucléaire.

Le RJH devrait aussi assurer jusqu'à 50 % des besoins européens en radioéléments pour la médecine européenne, une mission cruciale face aux risques de tension sur leur disponibilité. « *Les radio-isotopes pour la médecine ont une vie courte et doivent donc être produits dans un délai très court avant leur utilisation*, rappelle Stéphane Loubière. *Après la fermeture du réacteur Osiris du CEA en 2015, plusieurs petits réacteurs européens se sont placés sur le marché pour répondre aux besoins grandissants en Europe, mais le moindre arrêt de l'un d'eux, pour maintenance ou à la suite d'un problème, accroît le risque de tension. Le RJH permettra d'assurer une production stable et pérenne, pour la France et l'Europe.* »



Le réacteur Osiris, ici en fonctionnement en 2013, était un réacteur de recherche pour l'étude des matériaux et des combustibles nucléaires au sein du centre CEA de Saclay. Il est aujourd'hui à l'arrêt et en cours de démantèlement.





Les maquettes critiques sont très importantes pour le développement de nouveaux types de réacteurs.»

Gilles Bordier, expert à la Direction des énergies.

Les maquettes critiques

Si les réacteurs d'irradiation sont expérimentaux dans le sens où l'on y fait des expériences, les maquettes critiques constituent elles-mêmes l'expérience. Elles permettent de tester des configurations variées de cœur – d'où la notion de « *maquette* » – jusqu'au déclenchement de la réaction en chaîne mais sans production de puissance, c'est-à-dire la situation « *juste critique* ». Ces outils permettent en particulier d'approfondir la connaissance des propriétés nucléaires des isotopes. Celle-ci est essentielle aux calculs de physique des réacteurs, de radioprotection ou de décroissance radioactive des déchets.

Ces maquettes permettent de savoir comment chaque élément réagit en fonctionnement, et cela à chaque échelle, du noyau de l'atome à l'assemblage de combustibles. « *Ce sont des plateformes très importantes pour le développement de nouveaux types de réacteurs, afin de vérifier la physique dans différentes configurations et environnements, par exemple si l'on souhaite développer des réacteurs rapides à métaux liquides*, explique Gilles Bordier. *Ces maquettes critiques*

servent aussi à démontrer aux autorités de sûreté que les données alimentant les calculs neutroniques sont correctes et précises. » La neutronique, et plus généralement la physique des réacteurs nucléaires, bénéficie de plusieurs décennies d'expériences et de connaissances. Pour autant, les données et les résultats des simulations sont sans cesse revalidés et recalés si nécessaire, tant les domaines d'énergie mis en jeu, la multiplicité des matériaux utilisés et la géométrie des assemblages combustibles rendent les situations complexes.

Les sources de faisceaux de neutrons

Les faisceaux de neutrons remplissent un objectif plus fondamental : sonder la matière. « *Ils sont extraits pour réaliser des expériences de diffusion et de diffraction, à l'instar de ce qui est fait avec des rayons X, et permettent la caractérisation de la matière dans des domaines très variés, allant des matériaux magnétiques ou quantiques aux systèmes biologiques* », explique François Daviaud, directeur de l'Institut rayonnement-matière. De quoi voir les éventuels défauts dans les matériaux des batteries électriques par exemple, ou caractériser des nanoparticules.

LA CRITICITÉ, NOTION... CRITIQUE

Contrairement à ce que l'expression pourrait laisser penser, un réacteur nucléaire en état « critique » est un réacteur qui va bien et fonctionne normalement. La criticité, notion physique, est liée au bilan neutronique dans le réacteur. Un réacteur est dit « critique » quand le nombre de neutrons produits est égal à celui des neutrons absorbés ou perdus (sortants du cœur). La réaction en chaîne se fait alors à un niveau constant. Quand plus de neutrons sont absorbés ou perdus qu'il n'en est produit, le réacteur est « sous-critique » et la réaction en chaîne s'étoffe. À noter, un réacteur peut être mis en situation légèrement « surcritique » sur une courte durée pour augmenter la production d'énergie, avant d'être stabilisé à un niveau de puissance supérieur.

La production de faisceaux de neutrons peut se faire dans un réacteur nucléaire – par exemple le réacteur à haut flux (RHF) de l'Institut Laue-Langevin à Grenoble dont le cœur est en uranium très enrichi, ou via la réaction de « spallation » auprès d'accélérateurs, comme l'European Spallation Source (ESS). « *Une cible de tungstène est bombardée avec des protons de très haute énergie issus d'un accélérateur linéaire. Les réactions nucléaires induites produisent des neutrons, qui sont ensuite ralentis et extraits vers différentes expériences de caractérisation des matériaux* », décrit Franck Sabatié, directeur de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers. L'infrastructure, en construction à Lund en Suède, implique 13 États européens, dont la France avec le CEA et le CNRS, et devrait produire ses premiers neutrons vers 2025-2026.



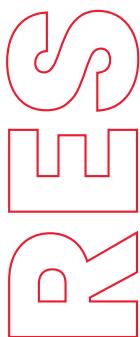
↑ Des opérateurs se préparent à intervenir au-dessus de la piscine du réacteur Cabri, au sein du centre CEA de Cadarache.

« Mais l'ESS comme le RHF sont des installations européennes où l'attribution de temps d'expérience par appels à projets est très concurrentielle. Difficile donc de satisfaire tous les besoins souverains, ainsi que ceux de recherche fondamentale, de R&D et de formation des scientifiques, estime Marie-Hélène Mathon, responsable des infrastructures de recherche en sciences de la matière. La France gagnerait à disposer de sa propre installation. » Depuis l'arrêt du réacteur Orphée en 2019 dans le site CEA de Saclay, il n'existe plus de source nationale de diffusion de neutrons. Pour y

remédier, le CEA développe conjointement avec le CNRS un nouveau type de source de neutrons : Icone. Encore au stade de l'avant-projet, Icone sera une source compacte basée sur un concept innovant de production de neutrons par des protons accélérés à basse énergie.

Alors que le panorama du nucléaire se redessine, avec l'arrivée de nouveaux acteurs et de nouvelles technologies (petits réacteurs modulaires, sels fondus, réacteurs haute température, etc.), le panel d'infrastructures de recherches doit s'adapter pour répondre à ces nouveaux enjeux. Il s'agit de privilégier les solutions les plus prometteuses et les plus utiles pour répondre à nos besoins en énergies bas carbone et garantir notre souveraineté pour les décennies à venir. ●

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

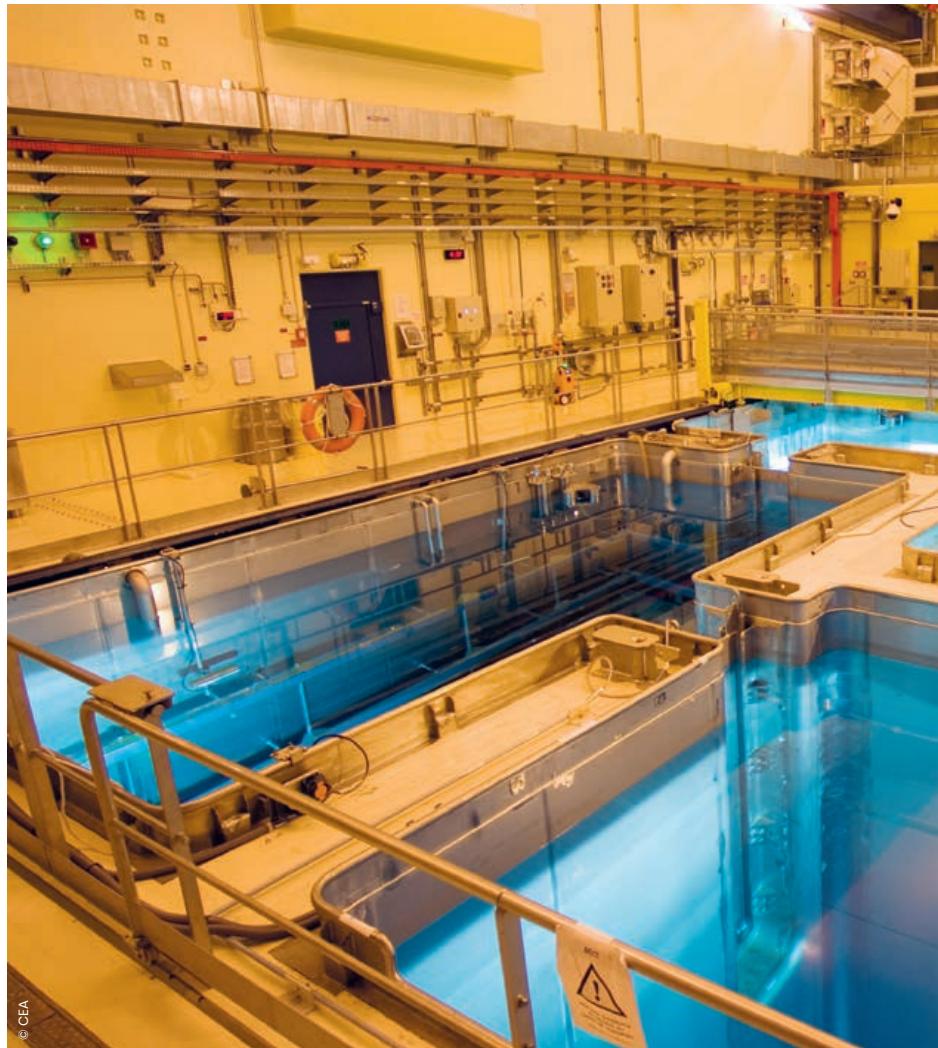


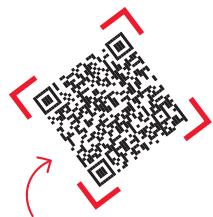
vital pour la souveraineté française

Le CEA, via sa Direction des applications militaires, assure la maîtrise d'ouvrage des chaufferies nucléaires embarquées dans les sous-marins et le porte-avions à propulsion nucléaire de la Marine nationale. Pour améliorer leurs performances, les équipes du CEA et de TechnicAtome implantées à Cadarache mènent des essais sur le RES, réacteur d'essais à terre de conception similaire à celle des réacteurs embarqués.

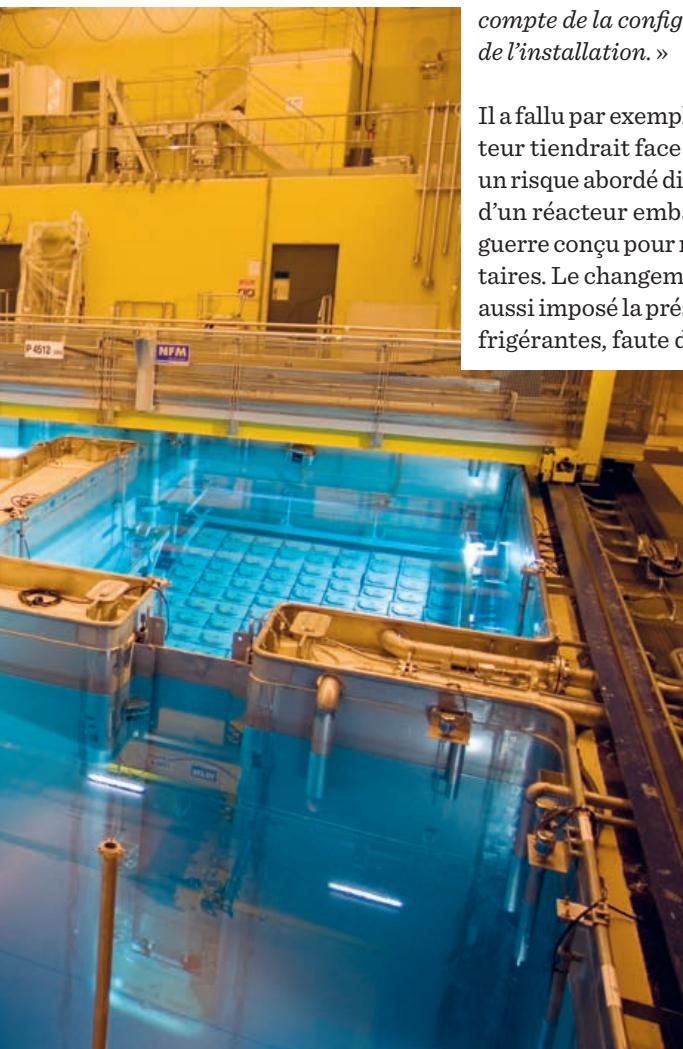
Des petites tours aéroréfrigérantes émergent au détour de la route. Derrière, un long rectangle bleu abrite le RES, réacteur d'essais à terre. « À terre » car les autres réacteurs nucléaires de même conception sont, eux, en mer, à bord des sous-marins et du porte-avions de la Marine nationale, le *Charles-de-Gaulle*. La propulsion nucléaire confère à ces bâtiments une forte valeur militaire, en leur donnant à la fois l'autonomie, la discréetion et la capacité de variation d'allure indispensables à la satisfaction des besoins militaires. Dotés de capacités uniques, ces réacteurs, y compris le RES, participent ainsi directement à la crédibilité de la force de dissuasion française.

Le CEA assure la maîtrise d'ouvrage de la propulsion nucléaire, avec le concours de deux industriels majeurs : TechnicAtome (concepteur et maître d'œuvre des réacteurs) et Naval Group (maître d'œuvre et architecte d'ensemble des bâtiments à propulsion nucléaire). Dès août 1964, le PAT (prototype à terre) diverge sur le site, en utilisant de l'uranium enrichi fourni par les États-Unis. Le PAT préfigure la chaufferie nucléaire du *Redoutable*, premier sous-marin nucléaire lanceur d'engins français qui prend la mer trois ans plus tard. Depuis la première patrouille opérationnelle en 1972 de ce sous-marin, aujourd'hui





Sous-marins et porte-avions nucléaires dévoilent leurs secrets dans l'exposition virtuelle du CEA.



↑ Le RES, avec sa piscine et sa multitude d'instruments, permet des études pour optimiser l'architecture et le fonctionnement des chafferies embarquées à bord des sous-marins et du porte-avions de la Marine nationale.

devenu un musée à Cherbourg, le CEA n'a de cesse, avec les industriels, de continuer à améliorer la conception et les performances de la propulsion nucléaire.

Au creux des collines provençales, le RES participe à la qualification du combustible et des cœurs des chaufferies embarquées actuelles et futures, contribue aux évolutions technologiques et assure la pérennité des compétences. Projet lancé en 1995, le réacteur a divergé en octobre 2018. « *Le RES comporte une chafferie dite K15, la même que celle embarquée sur les navires de la Marine nationale* », explique Jean Bouchacourt, responsable du RES. La comparaison s'arrête net. « *Mais nous n'avons pas simplement pris la chafferie pour la déposer dans un bâtiment. Nous avons dû intégrer le contexte environnemental qui s'appuie sur les exigences applicables aux installations nucléaires à terre, tout en tenant compte de la configuration expérimentale de l'installation.* »

Il a fallu par exemple s'assurer que le réacteur tiendrait face à d'éventuels séismes, un risque abordé différemment dans le cas d'un réacteur embarqué sur un navire de guerre conçu pour résister aux chocs militaires. Le changement d'environnement a aussi imposé la présence des tours aéroréfrigérantes, faute d'océan pour assurer le

refroidissement. « *Nous avions par contre moins de contraintes de place !* », admet le responsable dans un sourire.

Surtout, le RES est « modulable » pour mener à bien les expériences souhaitées, telles que des mesures de flux neutroniques et de températures, des calculs thermo-hydrauliques, ou encore des campagnes de suivi postirradiation. Le tout en lien étroit avec les autres infrastructures installées sur le centre de Cadarache, en simulation ou en traitement de la matière. L'objectif est de répondre aux questions d'architecture et de dimensionnement, pour optimiser le fonctionnement des chaufferies et répondre au juste besoin de performances, tout en garantissant un haut niveau de sûreté.

Des cœurs à ausculter

Résultat : le réacteur est fortement instrumenté, en son cœur et autour. « *Les cœurs nucléaires des navires forment un ensemble unique et indissociable, que l'on embarque et que l'on débarque en intégralité une fois usés* », décrit Jean Bouchacourt. *A contrario, le RES a été conçu pour expérimenter des cœurs spécifiques, que l'on peut ausculter in situ, mais aussi à l'issue de leur décharge-ment en piscine.* Pour cela, direction la salle voisine. La mer a beau être à plus de 60 kilomètres du centre CEA, des eaux bleues miroitent dans le bâtiment du RES : la « piscine », avec ses trois « canaux » de plusieurs mètres de profondeur, permet d'analyser par gammamétrie les assemblages de combustibles irradiés, provenant du réacteur d'essais lui-même ou des chaufferies embarquées.

« *Le RES n'est pas un réacteur expérimental, c'est un réacteur qui sert à faire des expé-riences* », résume Jean Bouchacourt. Et qui joue un rôle vital pour la souveraineté fran-çaise. La livraison, cet été, du sous-marin nucléaire d'attaque *Duguay-Trouin* à la Marine nationale confirme le succès des travaux menés. Les équipes du CEA conçoivent déjà les chaufferies du futur PA-NG, porte-avions de nouvelle généra-tion qui remplacera le *Charles-de-Gaulle*, comme le prévoit la loi de programmation militaire 2024-2030. ●

T
R
H

couteau suisse en construction

Le futur réacteur français d'irradiation, le Jules Horowitz, prend forme au sein du centre CEA de Cadarache. Un chantier important aussi bien par sa taille que pour l'indépendance énergétique du pays.

d
J

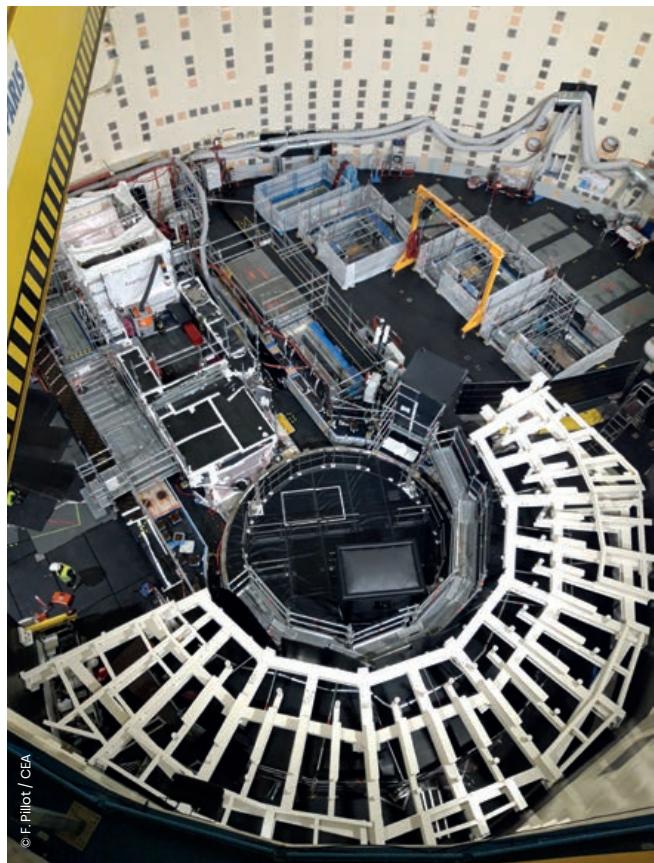
Le chantier est à la mesure du défi : immense. Bien visible derrière les grilles, le futur réacteur Jules Horowitz (RJH) prend forme. En cette journée ensoleillée, plus de 200 ouvriers travaillent sur le site et le bruit est parfois assourdissant. « *Un tel projet s'avère bien sûr technique, mais c'est avant tout une histoire humaine, un collectif engagé dans la réussite d'une aventure*, retrace David Emond, directeur du projet RJH. *Le Conseil de politique nucléaire de juillet 2023, qui a acté l'importance du RJH dans la relance du*

nucléaire, nous a permis d'accélérer. » Les travaux les plus innovants et les plus complexes sont aujourd'hui terminés, mais il reste... tout le reste. Les installations « standards », de la vanne à l'électricité en passant par les écrans de la salle de commande, sont en cours de montage. Au total, plus de 1 500 kilomètres de câbles et 40 kilomètres de tuyauteries doivent être déployés.

« *Trois bâtiments sont déjà terminés* », compte Franck Pillot, chef du service d'exploitation. Le bâtiment réacteur, lui, est toujours rempli de bâches et d'outillages. Démarrée en 2007, la construction, qui implique une quarantaine d'entreprises, prend plus de temps qu'initialement prévu. « *Cette situation s'explique par la complexité du projet lui-même et par les évolutions du contexte réglementaire, notamment après Fukushima*, souligne David Emond. *Nous donnons la priorité à la sécurité, la sûreté et la qualité.* »

Prolonger l'existant, développer le futur

Comme tout réacteur de recherche, le RJH est un modèle unique. Couteau suisse de la R&D nucléaire, l'installation permettra la caractérisation et la qualification de matériaux et de combustibles, pour les réacteurs actuels et futurs. Complémentaires aux modélisations numériques, les expériences réalisées sur le RJH répondront aux enjeux de prolongation des réacteurs en fonctionnement et au développement des nouveaux



© F. Pillot / CEA



Le hall principal du réacteur Jules Horowitz est aujourd'hui quasiment terminé. Il abritera plus d'une dizaine d'expériences dans son cœur.

EPR et SMR, les petits réacteurs modulaires. Pour relever le défi, son important flux de neutrons permettra de reproduire en un an l'équivalent de huit à dix ans de fonctionnement d'une centrale électronucléaire. Le RJH servira également à l'étude de l'instrumentation nucléaire et à la production des radio-isotopes pour la médecine (voir analyse p. 15).

Pour réussir tout cela, l'installation comporte vingt emplacements d'irradiation : dix directement au niveau du cœur et dix dans le réflecteur qui l'entoure. Le développement des dispositifs expérimentaux se poursuit, dans un cadre international pour certains. Car le RJH, outil crucial pour la France et à l'international, embarque une dizaine de pays dans son consortium. Le CEA en est membre majoritaire, et assure la responsabilité du projet et la préparation de son exploitation. « *À terme, 160 personnes du CEA exploiteront l'installation et ses dispositifs expérimentaux* », indique Franck Pillot. Les essais devraient démarrer à compter de 2029, pour une mise en service en 2032.

Des portes de plus de 10 tonnes

Derrière les casemates expérimentales, on pénètre dans l'enceinte principale. Avec sa forme cylindrique et ses platines de fixation orange aux murs, le hall du réacteur évoque un temple grec, la technologie et les casques de chantier en plus. Sous l'immense pont de manutention jaune vif, la piscine du réacteur est pour l'instant recouverte. « *C'est pour la protéger, car elle est finie et devrait être mise en eau vers 2031* », espère Franck Pillot. De cette piscine principale part un canal pour transporter des éléments expérimentaux vers les piscines de stockage dans le bâtiment des auxiliaires. Ici, les dernières soudures sont en cours sur les parois d'acier de 8,5 mètres de profondeur.

Une fois irradiés dans le cœur, les dispositifs expérimentaux transiteront par ces piscines de stockage, avant d'être transférés dans les grandes « cellules chaudes », où les échantillons seront extraits pour être examinés à l'étage. Quelques marches à monter, et on découvre l'espace où les techniciens mani-



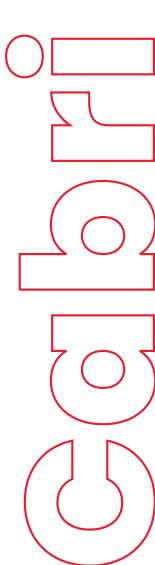
↑ Le réacteur Jules Horowitz (RJH) est en construction au sein du centre CEA de Cadarache. Les essais devraient démarrer à compter de 2029, pour une mise en service en 2032.

puleront et étudieront les éléments irradiés, à l'abri derrière une vitre blindée de plus d'un mètre d'épaisseur. Côté humain, la partie commandes. Côté cellule, des bras et des appareils télécommandés pour réaliser les opérations. « *Les portes, qui forment un double sas, pèsent plus de 10 tonnes chacune*, détaille Franck Pillot. *Elles ont été introduites avant la fermeture du toit.* » De fait, l'ampleur de certains équipements dans le RJH a obligé à le construire comme une boîte, en « refermant le couvercle » en dernier.

Le chantier avait démarré au sous-sol, avec les plots parasismiques. Loin de l'agitation des travaux en cours, une forêt de piliers en béton soutient le radier, véritable plancher de l'installation. « *Au sommet de chaque plot, vous voyez un empilement en élastomère, que l'on peut remplacer en cas de vieillissement* », décrit Franck Pillot. Ces 195 mille-feuilles de caoutchouc noir portent l'ensemble de la structure pour amortir les vibrations en cas de séisme. Précaution supplémentaire : des câbles d'acier traversent toute la structure, du radier au toit, pour précontraindre le béton et maintenir son étanchéité interne en cas de légère surpression. Le RJH est conçu pour fonctionner au moins pendant 50 ans ; une durée d'exploitation en phase avec les autres réacteurs de recherche dans le monde, qui affichent pour certains plus que cet âge. De quoi participer au maintien de l'excellence et de l'indépendance françaises dans la durée, pour construire un avenir bas carbone. ●

JULES HOROWITZ, PIONNIER DES PILES

Né en Pologne en 1921 au sein d'une famille juive, Jules Horowitz arrive en France avec ses parents pour fuir l'antisémitisme et le régime nazi. Brillant mathématicien, il intègre l'École polytechnique, puis entre au CEA comme ingénieur. Il y effectue une partie des calculs neutroniques de la première pile atomique française, Zoé, et devient responsable de la Direction des piles atomiques en 1962. Ses travaux ont été déterminants pour l'essor de la physique nucléaire en France.



un réacteur qui fait des bonds

**Comment tester le comportement au cœur d'un réacteur en cas d'accident, sans provoquer une catastrophe ?
Grâce à un outil unique du CEA : le réacteur Cabri.**



Découvrez la campagne d'essais de sûreté nucléaire en vidéo.

Dans le jargon du nucléaire, on appelle cela des « excursions de puissance ». Dans la salle de contrôle, les ingénieurs parlent plutôt de « sauts », clin d'œil aux ovins desquels le réacteur tire son nom. Installé au sein du centre CEA de Cadarache depuis 1963, le réacteur de recherche Cabri a longtemps servi aux essais pour la filière à neutrons rapides refroidis au sodium. Après une longue phase de modification et de remise à niveau, le réacteur a commencé une nouvelle vie en 2015. Sous le pilotage de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, le programme en cours vise à étudier le comportement des crayons combustibles du parc nucléaire et de leurs gaines lors d'un accident de « réactivité » (quand la réaction nucléaire s'emballe). De quoi améliorer la sûreté des réacteurs, en associant de multiples par-

naires nationaux et internationaux. « *Nous allons jusqu'à générer une crise d'ébullition, avec potentiellement rupture de gaine et fracture des pastilles de combustible* », indique Jean-Paul Goossens, chef de projet au CEA. Pour l'expérience, Cabri possède des barres transitoires remplies d'hélium-3, qui jouent le rôle d'absorbeurs de neutrons. Évacuer l'hélium des barres augmente d'un coup la criticité, simulant l'accident au niveau du crayon d'essai niché dans une cellule expérimentale au cœur du réacteur. « *Pour être au plus proche du réel, nous utilisons du combustible et des gaines déjà vieillis dans les réacteurs EDF* », décrit le responsable.

Plus de 40 capteurs sont installés au niveau du dispositif d'essai pour mesurer le débit, la température, l'ébullition, etc. Surtout, Cabri bénéficie d'un instrument rare : l'holoscopie, qui permet d'observer en direct l'état du crayon et sa dégradation. Associé à la spectrométrie gamma et à l'imagerie X, cela offre une vue du crayon avant, pendant et après l'essai. Pour finir, l'échantillon est soumis à des examens destructifs dans le laboratoire Leca-Star, un peu plus loin dans le centre de Cadarache.

Sur les moniteurs de la salle de contrôle, un pic se dessine. La puissance est montée à 20 gigawatts pendant quelques millisecondes, soit plus de cinq décades au-dessus du niveau normal. Les barres de contrôle viennent immédiatement remettre le réacteur en sécurité. Pas question de courir le moindre risque ! Deux essais ont lieu par an, car si l'opération ne dure qu'une poignée de secondes, la préparation des essais demande plus d'une année et les données acquises nécessitent ensuite plusieurs mois de dépouillement. Grâce à ses « bonds », Cabri fournit des enseignements sans pareil pour la sécurité nucléaire. ●



←
Construit dans les années 1960, le réacteur Cabri abrite aujourd'hui un programme dédié à la sûreté nucléaire et aux situations accidentielles.



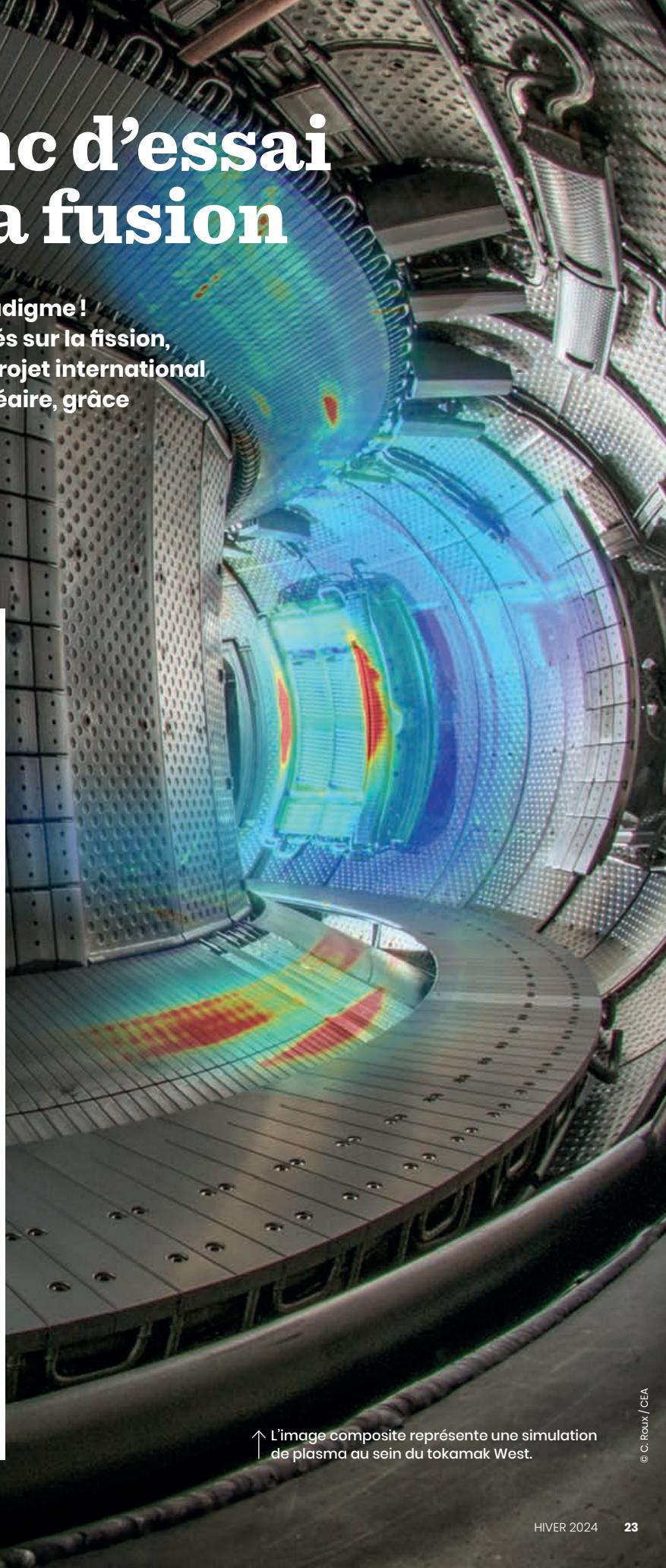
un banc d'essai pour la fusion

Changement de paradigme !
En plus de ses activités sur la fission,
le CEA contribue au projet international
Iter sur la fusion nucléaire, grâce
au tokamak West.

ls ont beau présenter différents concepts et une pléthore d'usages, tous les réacteurs de recherche présentés dans ce dossier fonctionnent selon le principe de la fission nucléaire. Tout comme les centrales qui fournissent de l'électricité à travers le monde. L'organisation internationale Iter⁽¹⁾ travaille sur un autre type de réaction : la fusion nucléaire. Il ne s'agit plus de fissioneer un atome lourd pour produire de l'énergie, mais au contraire de rassembler deux atomes légers dans un plasma extrêmement chaud, confiné dans une « boîte » magnétique.

Au centre de Cadarache, à quelques kilomètres de l'installation Iter, le CEA participe à l'aventure grâce à son tokamak West, anciennement Tore Supra. West est équipé d'un composant clé en tungstène, le divertor, où se focalise la majorité de l'énergie du plasma. Cette technologie est similaire à celle qui sera déployée sur Iter. À travers les campagnes expérimentales initiées début 2023 sur West, des informations importantes sont attendues sur la durée de vie de ces composants en tungstène et la possibilité de réaliser des plasmas de très longue durée grâce à eux. Autant de données capitales pour Iter et pour les futures centrales de fusion électrogènes. ●

(1) Iter réunit plus de 30 pays, dont ceux de l'Union européenne, la Chine, l'Inde, le Japon, la Corée, la Russie et les États-Unis.



↑ L'image composite représente une simulation de plasma au sein du tokamak West.

Ils ont rejoint l'aventure

Dans le nucléaire, les nombreux projets en cours et ceux à venir pour des réacteurs innovants nécessitent de former des talents à ces métiers ultraspécialisés. Un défi relevé par le CEA !



u'il s'agisse de devenir technicien en radio-protection ou ingénieur en génie nucléaire, la filière du nucléaire offre de belles opportunités d'emploi pour les décennies à venir. Et les formations ne manquent pas. Administré par le CEA, l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN) délivre des enseignements et des formations à tous les niveaux de qualification, de l'opérateur à l'ingénieur et au chercheur, dans les domaines de l'énergie nucléaire, des systèmes énergétiques bas carbone et des technologies pour la santé. À la fois établissement d'enseignement supérieur et organisme de formation continue, il est implanté sur cinq sites (Cadarache, Cherbourg-Octeville, Grenoble, Marcoule, Saclay). L'INSTN est aussi *collaborating centre* de l'AIEA (Agence internationale de l'énergie atomique) pour la période 2021-2025.

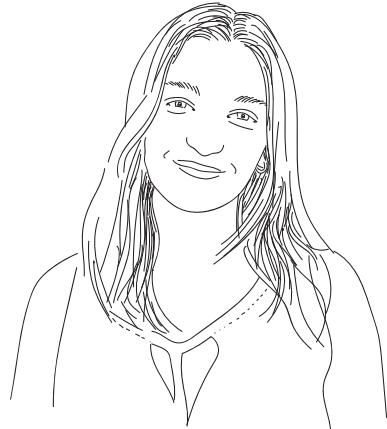
3 000

postes sont à pourvoir au CEA d'ici à 2025.

« Nos étudiants sont quasiment tous embauchés avant même de terminer leurs études ! »

Xavier Perrette,
responsable développement et partenariats à l'INSTN.

Retrouvez l'entretien en scannant ce code.



Lucie Kerleau

En formation d'ingénieur spécialisé en génie atomique à Cadarache.



Dans mes études de physique, les problématiques de la transition énergétique revenaient souvent. Même si certains jugent les sciences fondamentales "déconnectées" du réel, j'ai toujours gardé à l'esprit ce besoin d'agir concrètement et directement pour la société, et le diplôme d'ingénieur en génie atomique répond à ma préoccupation. Nous faisons du calcul abstrait, mais avec une finalité qui me parle : développer les énergies bas carbone. L'encadrement est aussi motivant, car nos professeurs ont conscience qu'ils forment leurs futurs collègues. Ils nous aident à monter en compétences, ce qui est très valorisant. J'aimerais faire ensuite une thèse sur les réacteurs innovants, notamment autour de la possibilité de fermer le cycle du combustible. La question des déchets nucléaires agite la société, et je trouve important d'y répondre. »



Abhishek Mishra

Étudiant en M2 en master international « Nuclear Energy » à Saclay.



J'ai obtenu mon bachelor

en Inde, sur les nanotechnologies.

Mais une conférence sur les accélérateurs de particules m'a fait découvrir la physique nucléaire ; cela m'a immédiatement fasciné ! C'est comme plonger dans un tout nouveau monde, de nouveaux concepts, de nouvelles mathématiques. Aurélien Debelle, qui enseigne à l'INSTN, m'a ensuite conseillé d'intégrer le cursus dans lequel je suis aujourd'hui. J'ai choisi l'option "démantèlement et gestion des déchets" car beaucoup de réacteurs nucléaires dans le monde sont vieillissants et vont devoir être démantelés en respectant l'environnement. J'ai découvert à travers mes études à quel point la France est engagée sur la sûreté nucléaire et agit dans ce domaine, nourrie par des décennies de recherche. Ma formation pourra me servir aussi dans d'autres secteurs, car quelle que soit la source d'énergie que vous utilisez, elles produisent toutes des déchets. Ce sont des études très pratiques, qui me confortent dans mon attention au respect de la nature. »

KK Le nucléaire est un domaine en perpétuelle évolution, avec de bonnes opportunités de carrière. Le niveau d'exigence est élevé, il y a beaucoup de compétences techniques et réglementaires à assimiler, et j'aime ce défi. Dans le contexte de crise énergétique que l'on connaît, je trouve mes études inspirantes pour l'avenir. Je viens d'intégrer la licence en alternance chez Orano et je serais ravi de pouvoir y travailler après mon diplôme. »



Adrien Mathieu

Étudiant en licence professionnelle « Technologies du démantèlement, des déchets et du désamiantage » à Nîmes et Marcoule.

KK J'étais comptable-logisticien au sein de la Marine nationale, mais j'ai toujours été passionné par les sciences. Cette formation représente une opportunité unique de m'ouvrir à un autre univers, pointu et exigeant. D'ailleurs, la rigueur que l'on retrouve dans le nucléaire m'est familière du fait de mon parcours militaire. En plus de m'apporter de nouvelles connaissances, cette reconversion m'offre des débouchés professionnels dans le bassin d'emploi de Cherbourg, d'où je viens. Cette employabilité est très importante ! »



Maximilien Pignot

En reconversion professionnelle pour devenir technicien en radioprotection à Cherbourg.

Euclid dévoile l'Univers

Imaginez une photo de toute la Terre, mais où l'on voit le visage de chaque habitant... Voilà la prouesse du télescope européen Euclid. La qualité de ses clichés démontre l'expertise du CEA, qui a fourni le plan focal de la caméra et de nombreux éléments clés pour les deux imageurs, en lumière visible et en proche infrarouge. Objectif: cartographier le ciel à la recherche des mystérieuses énergie et matière noires, qui composent 95 % de l'Univers, mais sont invisibles.

Sur le cliché, on voit plus de 1 000 galaxies de l'amas de Persée après 5 h de temps de pose. Et en arrière-plan, une « tapisserie » de 100 000 autres, hors de l'amas. Certaines de ces galaxies sont si lointaines que leur faible éclat a mis 10 milliards d'années à parvenir aux yeux électroniques d'Euclid ! Elles vont servir à étudier la légère déformation causée par la matière noire. « *Si la matière noire n'existe pas, les galaxies seraient réparties uniformément à travers l'Univers* », explique Jean-Charles Cuillandre, astronome au CEA et membre du consortium Euclid qui a produit l'image. Le CEA, qui travaille depuis des décennies sur de grands projets spatiaux, assure le traitement des données issues de la mission, prévue pour durer six ans.



Retrouvez toutes les explications de Jean-Charles Cuillandre en vidéo.



DEMAIN, QUELLE MÉDECINE ?





Portée par le recours massif au numérique et par des ruptures scientifiques et technologiques majeures, la médecine du futur se dessine et s'installe peu à peu dans notre système de santé. Elle devient plus performante, précise et préventive, davantage personnalisée, et devra répondre aux grands enjeux de santé.

Le CEA y contribue en apportant sa marque, celle d'un organisme de recherche technologique doté d'une recherche d'excellence en sciences du vivant, capable de mener des projets interdisciplinaires ambitieux alliant science et technologie. Depuis sa création, il irrigue la médecine française et les industriels du secteur de ses innovations, au bénéfice des patients.

Une mission qu'il conduit avec le souci de la souveraineté française, exacerbé depuis la crise de la Covid-19.

↑ Bio-impression en 3D d'une bioencre (mélange d'hydrogel et de cellules) pancréatique, étape de la préparation d'un pancréas sur puce pour l'étude du diabète.

Le CEA et la santé, une longue histoire

Même si la thématique santé au CEA est aujourd'hui encore bien souvent éclipsée par l'énergie ou la dissuasion nucléaire, la filiation au sein de l'organisme est ancienne et tout aussi légitime. Des découvertes scientifiques aux apports technologiques majeurs, retour sur cette longue épopée.

1975

, premier scanner français à rayons X ; 1999 : test de diagnostic rapide du prion, l'agent responsable de la maladie de la vache folle ; 2010 : premier succès d'un essai clinique en thérapie génique pour la bêta-thalassémie ; 2023 : un paraplégique actionne sa marche par la pensée. Quel lien unit ces grandes avancées scientifiques et médicales ? Toutes sont nées dans les laboratoires du CEA ! Car la filière santé est inscrite dans ses gènes, au même titre que le développement de l'énergie nucléaire.

Dès sa création, le CEA étudie les effets des rayonnements ionisants pour protéger les travailleurs, déjà avec l'idée de les utiliser pour la recherche et le soin. Le CEA devient tout à la fois l'expert français en radioprotection et le producteur des premiers radio-isotopes artificiels, ces formes radioactives d'éléments chimiques. Ils seront utilisés, et le sont encore aujourd'hui, par la communauté des chercheurs, comme « traceurs » pour identifier une multitude de processus physiologiques fondamentaux. Autrement dit, pour explorer le fonctionnement du vivant.

À l'origine de la médecine nucléaire

Pour développer les applications médicales de ces mêmes radio-isotopes avec les meilleures chances de succès, un lieu spécifique de recherche sera créé au plus près de l'hôpital et du patient. Le Service hospitalier Frédéric Joliot (SHFJ) ouvre ainsi ses portes en 1958 au sein de l'hôpital d'Orsay. C'est là que naîtra toute la médecine nucléaire française, aujourd'hui largement plébiscitée dans les hôpitaux grâce à d'importants transferts industriels. Elle consiste à utiliser des radiotraceurs – des molécules contenant un isotope radioactif à vie courte que l'on injecte au patient – pour diagnostiquer et traiter diverses maladies, notamment les cancers, en association avec des moyens d'imagerie. La TEP (tomographie par émission de positons) est l'un d'entre eux, aujourd'hui plus connue des patients sous le nom de PET-scan. Le SHFJ fut d'ailleurs le premier centre européen à s'équiper d'une telle machine. Dans le même temps, les équipes de Grenoble, spécialistes en électronique et reconstruction d'images, développent le premier





scanner français en 1975 et brevètent en 1984 le principe d'une caméra TEP « à temps de vol », qui donne des images d'une précision spatiale alors inédite. Ce principe du temps de vol est aujourd'hui utilisé dans tous les appareils commerciaux. Une culture de l'innovation qui n'a depuis cessé de produire des technologies transférées aux industriels, à l'image de ce scanner biénergies générant des clichés de très hautes résolutions spatiale et temporelle, commercialisé par Siemens, ou encore de ce scanner X « grande surface » chez Trixell.

671
Familles actives de brevets CEA
dans le domaine de la santé.

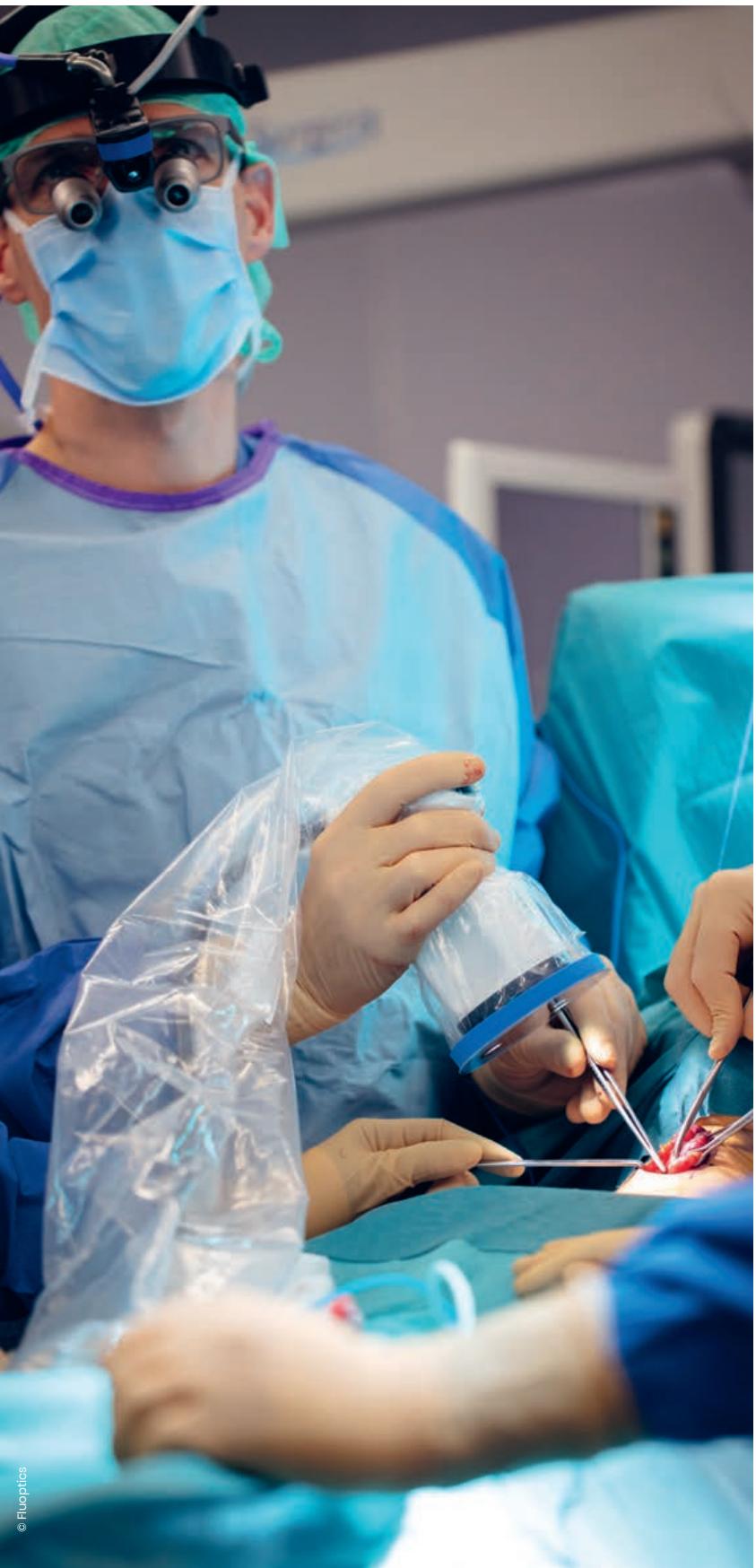
65 ans plus tard, le SHFJ est toujours cet acteur majeur de la R&D française en imagerie pour la médecine nucléaire (voir portfolio pp. 40-43). Clinatec¹, autre lieu de symbiose entre recherche technologique de pointe et hôpital, a suivi la voie de son

↑ Expérience de biologie moléculaire pour étudier le virus Chikungunya et ses différentes souches – 2012.

ainé en 2008, en visant d'autres objectifs : restaurer la mobilité des personnes parapétiques et tétraplégiques et ralentir l'évolution de maladies neurodégénératives, à l'aide de dispositifs biomédicaux implantables.

L'essor de l'IRM

Dans les années 1970 émerge un autre type d'imagerie, l'IRM (imagerie par résonance magnétique), qui révèle les détails anatomiques des tissus mous, domaine dans lequel le CEA imprimera également sa marque : importantes avancées théoriques



et pratiques ; invention et développement de l'IRM de diffusion, une innovation majeure aujourd'hui utilisée dans le monde entier, par exemple pour détecter en urgence les premiers signes d'AVC, évitant aux patients de lourds handicaps, et pour visualiser les tumeurs ; développement de machines d'IRM les plus puissantes au monde dont Iseult est la dernière née (11,7 teslas), pour ne citer que quelques exemples... Autour de l'imagerie, le CEA se concentre sur l'étude du cerveau (mécanismes de la cognition et des troubles cognitifs, maladies neurologiques et neurodégénératives) et des cancers, et dispose pour cela de deux centres d'expertise uniques, NeuroSpin et MIRCen.

Génomique et électronique

À partir des années 1990, l'étude de l'ADN et des génomes, puissant levier pour la compréhension des maladies et de leur transmission, est en plein essor. Le CEA investit ce champ de la recherche et prend part au développement spectaculaire des technologies de séquençage des génomes et de la génomique (qui s'intéresse à la fonction des gènes et à l'application de ces connaissances à la santé). Il est désormais un acteur reconnu dans ce domaine, à la tête d'une infrastructure de premier plan de séquençage d'ADN à haut débit, et impliqué dans les grands programmes de R&D nationaux et européens, comme le Plan France médecine génomique 2025 qui prépare le déploiement de la génomique en médecine.

Il est une autre voie que le CEA a su explorer, celle du croisement entre sa connaissance du vivant et son savoir-faire en microélectronique, capteurs et miniaturisation des systèmes. De cette osmose, essentiellement concentrée au sein de son site de Grenoble, vont émerger des dispositifs médicaux portables, connectés, voire implantés, pour le suivi de pathologies et leur traitement.



Utilisation de l'imageur Fluobeam®LX pour la chirurgie de la thyroïde, développé par la start-up Fluoptics, échappée du CEA en 2009.



↑ Plateforme de marquage isotopique pour la préparation de molécules utilisées dans de nombreux domaines de la santé.

Ils donneront lieu à des collaborations porteuses avec de grands groupes industriels et à des transferts *via* la création de start-up, comme Avalun (analyses de sang délocalisées), Fluoptics (imageur portable pour la chirurgie de la thyroïde), Admir (diagnostic du cancer) ou encore Sublimed (patch de neurostimulation électrique pour soulager les douleurs chroniques). L'implant cérébral développé par les équipes de Clinatec en collaboration avec le CHU de Lausanne, qui a permis en 2023 à un paraplégique de commander sa marche par la pensée, une première mondiale, est emblématique de la puissance de cette symbiose entre biologie, électronique et numérique.

À partir des années 2000, de grandes révolutions viennent bousculer le monde de la recherche, ouvrant la voie à des perspectives de découvertes inédites : l'irruption du *big data* et du traitement massif de la donnée, puis de l'intelligence

artificielle (pour lire des images médicales, créer de nouveaux médicaments ou encore pour des applications de suivi de la santé des patients) dans le champ de la santé, la communication sans fil jusqu'à l'actuelle 5G, l'intégration de technologies de rupture comme les séquenceurs d'ADN et d'ARN à haut débit, l'exploitation des sciences « omiques »², etc. Autant de disciplines dans lesquelles le CEA a bâti sa légitimité et sur lesquelles il construit sa stratégie en matière de recherche en santé. ●

Le CEA et l'imagerie médicale, toute une saga ! C'est ici :



(1) Centre de recherche biomédicale réunissant le CEA, le Fonds Clinatec, le CHU Grenoble-Alpes et l'université Grenoble-Alpes.

(2) Ensemble de disciplines visant la caractérisation et la quantification collective de pools de molécules biologiques. Exemple : la protéomique correspond à l'analyse des protéines.

Porter les innovations en santé jusqu'au patient

Thérapie génique contre la maladie de Parkinson, imageurs médicaux portables, pancréas artificiel connecté...

Ces avancées *made in CEA* anticipent le futur de la médecine. Leur conception exige à la fois une très fine connaissance du vivant et un vaste champ d'expertises technologiques.

L'une des forces du CEA.



Notre stratégie de recherche en biologie-santé vise à proposer des solutions au service de la médecine du futur et en premier lieu pour les besoins des patients », précise d'emblée Anne-Isabelle Etienvre, directrice de la recherche fondamentale. Centrée sur le patient, cette nouvelle approche, rendue possible par l'essor des biotechnologies allié à celui du numérique, promet des systèmes de diagnostic plus rapides et précis, des thérapies et un suivi médical de plus en plus personnalisés, c'est-à-dire adaptés aux données biologiques de chaque individu. « Nous bénéficions pour cela d'une recherche fondamentale excellente sur un certain nombre de sujets ciblés, couplée – et c'est l'ADN du CEA – à des technologies de pointe, parfois issues d'autres champs disciplinaires », poursuit-elle.

À cela s'ajoutent une capacité d'intégration de solutions biologiques et technologiques innovantes, et une organisation en gestion de projet qui facilite l'interdisciplinarité, si bien qu'il est courant de côtoyer des biologistes, électroniciens, opticiens, physiciens, mathématiciens, informaticiens ou encore médecins au sein d'un même projet. « Les plateformes technologiques de rang mondial et les grands

instruments du CEA sont des atouts supplémentaires, ajoute-t-elle. Je pense notamment à ceux dédiés aux développements pour la santé, comme NeuroSpin pour la neurologie et la psychiatrie, ou Idmit pour les maladies infectieuses. » Et Julie Galland, directrice de la recherche technologique, d'enchaîner : « Pour créer des solutions inédites pour la santé, nous faisons aussi appel à des technologies issues d'autres disciplines, en nous appuyant sur nos plateformes dédiées à la microélectronique, à la microfluidique, à l'IA ou à la cybersécurité. »

Des laboratoires de recherche communs avec les industriels

Mais, avertit Patrick Chaton, chef du Département des microtechnologies pour la biologie et la santé, « l'idée n'est pas seulement d'être pourvoyeur de technologies. Si nous ne tenons pas compte des besoins des patients, des praticiens hospitaliers ou des médecins de ville, nous ratons l'objectif ». D'où un dialogue constant avec ces acteurs de la santé pour coconstruire des solutions pertinentes sur tout le parcours de soin : prévention, diagnostic, thérapie et suivi des patients. Des partenariats sont

LES ENJEUX DE LA SANTÉ EN FRANCE

Sociétaux



Vieillissement de la population
et augmentation de pathologies chroniques (maladies cardiovasculaires, diabète, obésité...) et neurodégénératives.



Émergence et réémergence de maladies infectieuses,
aggravées par le changement climatique.



Résistance aux antibiotiques.

Économiques



Relocalisation en France
de la production de molécules chimiques essentielles (antibiotiques), de thérapies innovantes (vaccins, thérapies géniques, etc.) et de solutions à fortes composantes technologique et numérique (imagerie, dispositifs médicaux, méthodes « omiques », etc.).



Développement de
solutions à coût abordable
pour une égalité d'accès aux soins.

Organisationnels



Amélioration du système de soins
développement de soins de proximité, accès facilité aux innovations médicales, optimisation du parcours de soins, etc.



Réactivité de l'écosystème de santé
et préparation aux crises sanitaires.

notamment conclus avec des instituts, des centres hospitalo-universitaires et des hôpitaux (Necker, Henri-Mondor, IGR, etc.). « *Une partie de nos laboratoires de recherche sont en outre organisés en UMR (unité mixte de recherche). Ce sont par nature des lieux propices aux échanges avec les autres organismes et universités* », complète Anne-Isabelle Etienne. « *Notre mission de maturation technologique prend tout son sens lorsqu'il s'agit d'amener l'innovation au plus près du patient*, rappelle Julie Galland. *Au-delà de nos développements technologiques, elle inclue les essais cliniques et la prise en compte des aspects réglementaires pour garantir l'accès au marché.* » Cet engagement se concrétise à travers une trentaine de grands partenariats, notamment dans les domaines de l'imagerie médicale et de la radioprotection (Siemens, Meditest, Espri-med), des dispositifs médicaux (NG Biotech, Bio-Rad, Illumina ou encore Horiba médical), de la thérapie et de la bioproduction (Sanofi,

Ceva, Servier), et par l'ouverture d'une douzaine de laboratoires communs avec les industriels du secteur. « *La stratégie santé du CEA, appliquée aux domaines stratégiques prioritaires définis par l'État¹, permet d'acquérir davantage d'indépendance sanitaire et de répondre aux enjeux sociétaux et économiques de la santé* », résume-t-elle.

« Nous bénéfions d'une recherche fondamentale excellente sur un certain nombre de sujets ciblés, couplée – et c'est l'ADN du CEA – à des technologies de pointe. »

Anne-Isabelle Etienne,
directrice de la recherche fondamentale.

Un acteur de premier plan en imagerie médicale

L'action du CEA a construit sa renommée dans plusieurs grands domaines. Ceux-ci constituent le socle de sa stratégie de recherche en santé, au profit des maladies neurodégénératives et psychiatriques, des maladies infectieuses, cancers, maladies cardiovasculaires et métaboliques, et enfin des maladies rares et génétiques. S'il serait ici illusoire de présenter l'étendue des projets de R&D explorés, traçons-en les grandes lignes.

« L'idée n'est pas seulement d'être pourvoyeur de technologies. Si nous ne tenons pas compte des besoins des patients, des praticiens hospitaliers ou des médecins de ville, nous ratons l'objectif. »

Patrick Chaton, chef du Département des microtechnologies pour la biologie et la santé.

L'organisme entend ainsi apporter une contribution majeure à l'imagerie biomédicale du futur pour gagner en performance – comme l'illustre Iseult, l'IRM la plus puissante au monde, qui offrira une précision spatio-temporelle inégalée dans l'imagerie cérébrale pour proposer de nouveaux modes d'imagerie comme les ultrasons, voire pour les combiner entre eux, et enfin pour disposer d'imageurs ambulatoires, moins lourds et moins coûteux. « *L'allègement de l'architecture des imageurs pour tenter de les rendre plus "nomades", constitue une tendance forte que nous explorons avec des industriels comme Thales et Trixell* », argumente Patrick Chaton.

Autre voie explorée, celle des dispositifs médicaux. Ces objets délivrent des diagnostics (d'infection, d'antibiorésistance, d'allergie alimentaire, etc.), des traitements, ou permettent un suivi thérapeutique. « *Le défi est d'amener les outils d'analyse au plus proche du besoin – urgence médicale, domicile, déserts médicaux, pays émergents – pour une prise en charge rapide, fiable et à bas coût* », explique Julie Galland. Et pour gagner en efficacité, les équipes disposent depuis 2020 d'une plate-forme dédiée qui permet de développer des objets industrialisables en intégrant dès la conception les usages cliniques et les aspects réglementaires.

Une task force pour des vaccins français

La crise de la Covid-19 l'a par ailleurs révélé : la production de vaccins sur le sol français est un enjeu de souveraineté sanitaire ! Un défi auquel contribue le CEA, qui travaille à la mise au point de solutions vaccinales et immunologiques contre les maladies infectieuses, en allant jusqu'à leur bioproduction. Les biomédicaments, dont les vaccins, sont des grosses molécules fabriquées par des organismes vivants (levures, bactéries, cellules, etc.), plus complexes à produire que des composés chimiques comme le paracétamol. « *L'enjeu autour de ces thérapies en fort développement est majeur, commente Anne-Isabelle Etienvre, tant sur les espoirs thérapeutiques qu'elles*

→
Intervention en bloc opératoire de Clinatec.



apportent que sur la maîtrise de leurs processus et coûts de fabrication. » Là aussi, le CEA, mobilisé aux côtés des industriels, ne manque pas d'atouts, œuvrant à la fois sur les systèmes d'expression de ces organismes vivants, sur le passage à l'échelle de la production, sur la maîtrise des chaînes de fabrication, par exemple en embarquant des capteurs de nouvelles générations dans les cuves de culture pour les monitorer avec précision, améliorer les rendements et s'assurer de l'absence de contamination, et enfin en testant l'efficacité de ces nouveaux produits. « *Les compétences pour répondre aux défis d'innovation et de réponse aux éventuelles crises sont bien présentes en France*, assure-t-elle. *Notre objectif est de créer un lien fort entre ces acteurs – chercheurs, grands industriels et les intermédiaires que sont les CDMO² – pour répondre à cet enjeu de souveraineté. Nous portons ainsi avec l'Inserm un projet ambitieux, baptisé Institut Ramon, qui répond à cet objectif. »*

De nouvelles approches thérapeutiques explorées au CEA poussent encore plus loin l'innovation : la thérapie génique pour traiter la maladie de Parkinson et des maladies rares comme la drépanocytose, la thérapie cellulaire, des systèmes d'irradiation dans le proche infrarouge implantés dans le cerveau pour atténuer les symptômes de la maladie de Parkinson, ou encore des interfaces cerveau-machine pour rétablir la mobilité des membres chez les personnes paralysées ou victimes d'AVC.

La révolution numérique

Mais de l'avis de bien des experts, le *game changer* dans le champ de la santé, c'est le recours massif au numérique, avec une IA à même de traiter d'énormes masses de données plus rapidement et plus précisément que l'humain. Des bénéfices gigantesques sont attendus : accélération des connaissances sur le vivant et les pathologies, accélération de la médecine personnalisée, désengorgement des urgences grâce à des outils d'aide à la décision ou de suivi à distance des patients, etc. Le marché est à ce point énorme que les Gafam ont investi le secteur, attirés par la perspective



© Patrick Avavion / CEA

d'atteindre 8 milliards de clients potentiels. « *Nous avons toutes les compétences au CEA pour dérouler le fil allant de la biologie fondamentale jusqu'à l'objet de santé exploitable par un médecin. Cette connexion-là, nous savons l'établir* », témoigne Patrick Chaton. Le CEA est ainsi présent sur toute la chaîne du numérique. Un savoir-faire intégré rare en Europe, qui s'étend de la production et la collecte de grands volumes de données de qualité (biologiques, imagerie, génétiques, etc.) au sein de ses installations, qui sont traitées, hébergées sur des supercalculateurs et sécurisées pour être fiables, interopérables et exploitées à des fins de recherche, jusqu'au développement de dispositifs médicaux à composante numérique. « *Nous coordonnons le nœud français de l'infrastructure européenne EBRAINS, un rôle majeur en lien avec les autres organismes de recherche et les universités, illustre Anne-Isabelle Etievre. Interconnectée avec les centres de calcul haute performance européens,*

CINQ AXES DE RECHERCHE

- › **Imagerie biomédicale du futur.**
- › **Dispositifs médicaux.**
- › **Solutions vaccinales et immunologiques contre les maladies infectieuses.**
- › **Nouvelles approches thérapeutiques.**
- › **Numérique au service de la santé.**

elle a pour mission de faire progresser la recherche dans le domaine des neurosciences computationnelles. »

Avec un tel profil, unique dans le paysage de la R&D française en santé, rien d'étonnant à ce que le CEA se trouve impliqué dans de nombreux programmes nationaux (PIA, ANR, recherche hospitalo-universitaire, France 2030...), européens (Horizon Europe, EIT Health...) et internationaux. L'implication dans trois nouveaux IHU et dans cinq Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) dans le domaine de la santé, dont celui dédié aux biothérapies et à la bioproduction de thérapies innovantes qu'il copilote avec l'Inserm, en sont les derniers exemples. ●

(1) Maladies infectieuses émergentes et menaces NRBC, biothérapies et bioproduction, santé numérique et dispositifs médicaux du futur.

(2) Contract development manufacturing organization.

Philippe Vernier

Directeur de l'Institut des sciences du vivant Frédéric Joliot.

« Les analyses numériques, en particulier les méthodes “d’apprentissage profond”, permettent aujourd’hui d’identifier des biomarqueurs à partir de données massives obtenues à grande échelle (imagerie, génomiques ou biochimiques). Ces biomarqueurs sont en train de révolutionner la connaissance de pathologies complexes comme les maladies psychiatriques ou métaboliques et le suivi des traitements. Les équipes du CEA sont à la pointe dans ce domaine, aussi bien pour générer les données sur des plateformes nationales comme NeuroSpin, le Génoscope ou Métabohub, que pour les analyser par les méthodes d’intelligence artificielle. »

Renaud Sirdey

Directeur de recherche, expert en chiffrement homomorphe.

« Lorsque des algorithmes puisent dans des millions de dossiers médicaux pour analyser les données personnelles et de santé, et établir des corrélations en vue d’aide au diagnostic par exemple, il est essentiel de préserver leur confidentialité, quel que soit leur lieu de stockage (serveurs d’hôpitaux ou autres organismes de santé) et d’utilisation. Pour sécuriser cet écosystème, nous développons plusieurs outils. La technologie Cingulata, par exemple, à base de chiffrement homomorphe, rend possible le calcul sur données cryptées de pair à pair, sans jamais les déchiffrer. »

Paroles de chercheurs

La R&D en santé au CEA, ce sont près de 1000 ingénieurs-chercheurs, de nombreux projets menés en collaboration, des transferts à l’industrie, 35 start-up essaimées...
Sélection !

Stéphanie Simon

Cheffe du Service de pharmacologie et immunoanalyse.

« La pandémie de Covid-19 a montré l’intérêt des tests antigéniques : ils sont rapides, peu coûteux, utilisables à domicile ou sur le terrain. En collaboration avec l’AP-HP et l’industriel NG Biotech, nous mettons en place une filière nationale de diagnostic rapide de maladies infectieuses, comme la peste et le virus de la variole simienne. Nos enjeux pour les prochaines années sont à la fois technologiques et organisationnels : rendre les tests plus sensibles, quantitatifs, multicibles, accessibles aux pays à faibles revenus ne disposant pas de moyens de diagnostic et facilement déployables en cas de pandémie ou d’attaque bioterroriste. »

Matthieu le Prado

Président de MAG4health,
start-up essaïmée du CEA en 2021.

La magnétoencéphalographie

mesure les champs magnétiques générés par les neurones. Cette modalité d'imagerie restitue un film en 3D de l'activité neuronale, une information qu'aucun autre imageur ne peut fournir. Ces appareils fonctionnent à -269°C et restent onéreux et volumineux, si bien qu'il n'en existe que cinq en France. Grâce à une technologie quantique protégée par douze brevets, nous développons un dispositif fonctionnant à température ambiante. Moins encombrant et moins cher, nous visons son application aux diagnostics de la maladie d'Alzheimer et des commotions cérébrales. Nos premiers clients seront livrés dès le premier trimestre 2024. »

Robert Olaso

En charge de l'innovation au CNRGH (Centre national de recherche en génomique humaine).

« Nous exploitons à Evry une plateforme de séquençage

d'ADN et d'ARN de très haut débit, capable de séquencer jusqu'à 100 génomes humains par jour. Les projets de recherche, que nous menons en collaboration avec des cliniciens hospitaliers et des biologistes venant du monde entier, permettent de faire avancer les connaissances sur les maladies rares, les cancers, les maladies neurodégénératives, et sur des pathologies plus fréquentes comme le diabète, qui elles aussi ont des composantes génétiques. Nous sommes notamment le centre qui a mis en évidence le plus grand nombre de gènes impliqués dans la maladie d'Alzheimer. »

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

« Les organoïdes, comme ceux de poumon ou de cœur, sont des assemblages multicellulaires et auto-organisés en 3D, dont la biologie reflète partiellement celle de l'organe d'origine.

Un organoïde de cœur, par exemple, génère ses propres battements. On peut aussi les cultiver sur un support microfluidique, reproduisant les contraintes spatiales et mécaniques auxquelles ils sont exposés au sein de leurs tissus d'origine, et suivre leur devenir grâce à des capteurs miniaturisés intégrés dans ces mêmes supports. On parle alors d'**organoïdes sur puce**. Ces outils ont un énorme potentiel pour la R&D en santé : étude du fonctionnement des organes, support pour le criblage à haut débit de candidats médicaments pour réduire l'usage des modèles animaux, organoïdes personnalisés (avatar biologique) et donc médecine personnalisée, etc. »

Fabrice Navarro

Chef du Service des microsystèmes pour l'interaction avec le vivant.



Pour en savoir plus sur les organoïdes sur puce.

Guillaume Nonglalon

Copilote (avec Pierre Gasnier) du projet Followknee.

« Réintervenir sur une prothèse de genou est un acte délicat et coûteux. C'est pourquoi nous développons le système "Followknee" avec, entre autres, le CHU de Brest*. Il s'agit d'**une prothèse métallique conçue en impression 3D**, instrumentée de capteurs mesurant la déformation, l'angle entre le tibia et le fémur, la température et le pH, de manière à pouvoir suivre *in situ* tout début de descellement ou d'infection, et traiter ces problèmes bien avant qu'ils ne s'aggravent. Ces capteurs serviront autant au chirurgien (aide à la pose) qu'au kinésithérapeute pour la rééducation. Le système est sans batterie, il s'active en posant sur la jambe une interface qui recueille les données et les envoie au médecin pour analyse. La prochaine étape du projet sera la réalisation de l'essai clinique. »

* Projet ANR-17-RHUS-0005

AU CŒUR DE LA MÉDECINE NUCLÉAIRE

Les innovations en imagerie médicale pour la médecine nucléaire,
cela se passe ici ! Visite guidée au Service hospitalier Frédéric Joliot.

Reportage photo : L. Godart / CEA

(sauf mentions contraires)



1

Implanté au cœur de l'hôpital d'Orsay (91), le SHFJ est un écosystème de recherche original. La recherche s'y conçoit au contact quotidien des médecins nucléaires et des radiologues, au plus près des patients. Objectif : créer de nouveaux outils d'imagerie pour améliorer le diagnostic et le traitement de diverses pathologies, notamment des cancers et des maladies neurodégénératives.



2

Ici, on fabrique des radiotraceurs, et surtout on imagine ceux de demain ! Ce sont des molécules auxquelles on greffe un marqueur radioactif. Exemple : du glucose marqué au fluor 18. Injectées au patient, puis suivies par imagerie, elles permettent par exemple de localiser des tumeurs, de les détruire, de suivre un traitement, ou encore d'étudier des pathologies.

© SHFJ

3

Les marqueurs radioactifs utilisés sont des atomes à demi-vie très courte. Ils doivent donc être fabriqués sur place, dans un cyclotron. Cet accélérateur circulaire envoie des particules – ici des protons – sur une cible, réaction qui produit les noyaux radioactifs : fluor 18, carbone 11, oxygène 15, gallium 68, etc.



© P. Stroppa / CEA

4

Les éléments radioactifs doivent ensuite être accrochés à leur vecteur, une molécule biologique, *via* des réactions chimiques. Cette étape a lieu en enceinte blindée pour protéger l'opérateur de tout risque d'irradiation.

Le SHFJ, seul service hospitalier en Île-de-France capable de fabriquer ces molécules marquées, livre aussi d'autres d'hôpitaux franciliens.





5

L'avenir, c'est la production automatisée et miniaturisée, en quelques minutes et au plus près du patient, en allant jusqu'à la mise en seringue. C'est ce que réalise le robot iMiGiNE. À terme, il fournira un large panel de radiotraceurs spécifiques pour chaque type de maladie. **Car tout l'enjeu de la recherche menée au SHFJ, c'est la médecine personnalisée et de précision.**

6

Le SHFJ dispose de tout un parc d'imageurs : TEP (tomographie par émission de positons), IRM, scanner à rayons X, etc. La TEP permet de faire des cartographies très détaillées de pathologies, notamment des cancers. L'IRM révèle les détails anatomiques des tissus mous.





7

La tendance est au couplage de plusieurs types d'imagerie : TEP-scanner X, TEP-IRM, TEP-ultrasons (échographie), IRM-ultrasons. Les ultrasons donnent par exemple des informations sur la microvascularisation des tumeurs ou l'élasticité des tissus. Multiplier les grilles de lecture lors d'un même examen, c'est améliorer les capacités de diagnostic et de pronostic sur la réponse au traitement.



Et en vidéo,
c'est ici!

8

Les images sont ensuite traitées, au moyen de modèles numériques des processus physiopathologiques de chaque pathologie et grâce à l'intelligence artificielle. Un travail qui doit être effectué pour chaque nouveau radiotraceur !

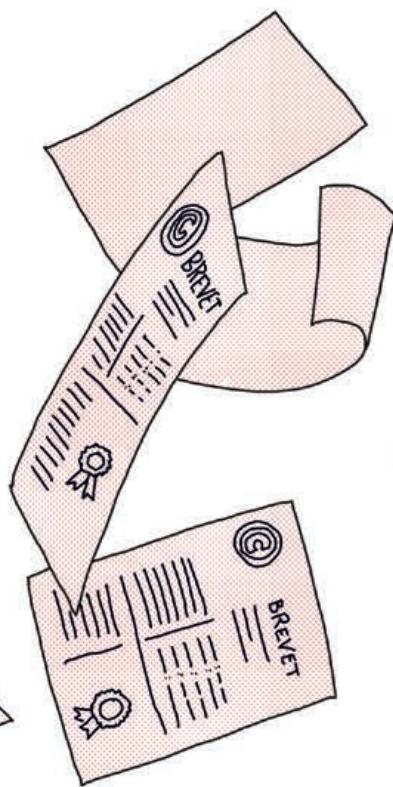


LES NOUVEAUX PARADIGMES



DE LA
DEEPTech

DOSSIER
03



Depuis sa création, le CEA valorise les technologies qu'il développe, en particulier dans les domaines clés des énergies, de la santé et du numérique, afin de soutenir la compétitivité des entreprises, favoriser la création d'emplois et, plus globalement, contribuer à la souveraineté industrielle de la France. Il accompagne ainsi la création de start-up dites « deeptech », qui s'appuient sur des technologies de rupture et visent pratiquement tous les marchés applicatifs. Une stratégie complémentaire au transfert industriel.

La deeptech, c'est quoi ?

Le terme « deeptech » s'applique à une start-up qui développe une technologie – ou une combinaison de technologies – de rupture. Ce type de start-up se caractérise par trois traits dominants : proposer un produit à forte valeur ajoutée sur son marché, exploiter une technologie innovante souvent brevetée, se développer en lien étroit avec des équipes de recherche. Ces start-up requièrent des temps de développement et de pénétration sur le marché plus longs et des investissements plus importants que des start-up plus classiques. Au CEA, la création de start-up deeptech et l'accompagnement de leur développement sont une voie privilégiée pour valoriser les innovations technologiques de l'organisme, mais aussi pour accélérer la réindustrialisation dans des secteurs stratégiques.

LA DEEPTECH AU CEA, C'EST

1^{er} organisme de recherche déposant de brevets en France et en Europe (classements INPI 2022 et OEB 2022)	7 200+ familles actives de brevets	> 1 milliard d'euros levé par les start-up du CEA depuis 15 ans
~ 6 000 emplois dans les start-up du CEA (recensement 2022)	250+ start-up technologiques créées et accompagnées par le CEA depuis 1972, dont 75 % dans les deeptech et 80 % encore en activité après 10 ans	

Le CEA et la deeptech, une évidence

Protéger ses découvertes et valoriser ses innovations sont deux des lignes directrices du CEA.

Cette démarche s'appuie à la fois sur une politique active de dépôts de brevets et sur des transferts technologiques, auprès des industriels ou via la création d'entreprise.

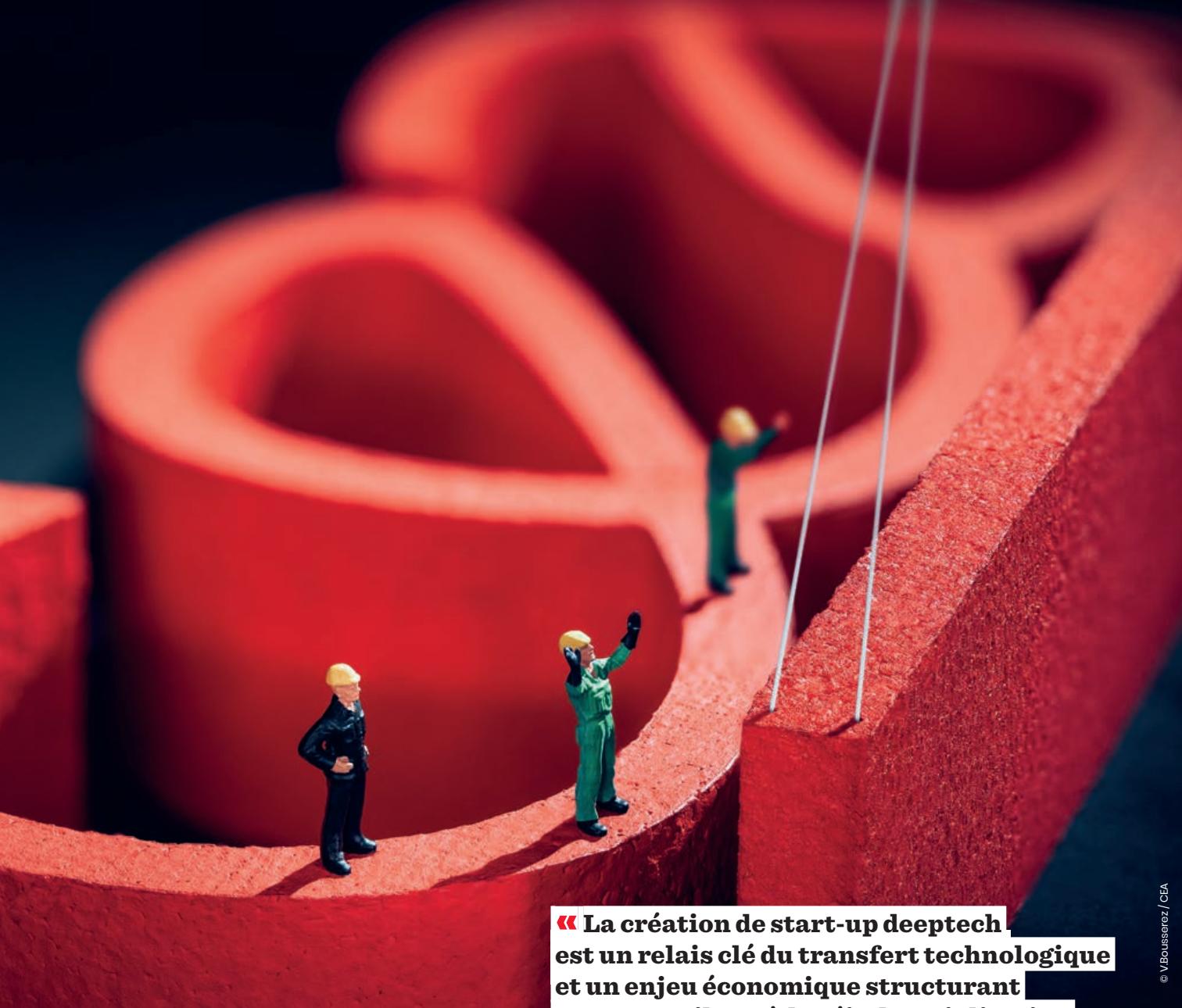
Depuis plus de dix ans, le CEA figure dans le top 100 des entreprises les plus innovantes au monde, publié par Clarivate. Très peu d'organismes de recherche dans le monde sont présents dans ce classement. Le CEA est le seul organisme de recherche européen à maintenir un tel niveau de présence dans ce classement, qui prend en compte tous les centres de recherche et entreprises ayant déposé au moins 100 brevets d'invention durant les cinq dernières années. Les brevets déposés par le CEA relèvent majoritairement de secteurs clés – énergie, santé et numérique – qui sont au cœur de ses missions prioritaires et des grandes transitions en cours.

« *L'innovation au CEA s'appuie sur deux piliers qui font sa force et sa singularité* », rappelle Laurence Petit, directrice déléguée à l'innovation, aux start-up et aux participations du CEA. « *Le premier est une culture de valorisation partagée par l'ensemble de ses collaborateurs et soutenue notamment par une stratégie de propriété intellectuelle volontariste. Le deuxième est une recherche d'excellence, à la fois technologique, en lien étroit avec les marchés*

et l'industrie, mais aussi plus fondamentale, porteuse d'innovations de rupture. Toutes deux sont adossées à des plateformes uniques en France, voire en Europe, permettant au CEA d'amener les innovations jusqu'aux préséries industrielles. Le CEA dispose ainsi d'une capacité assez exceptionnelle à faire émerger des innovations via de très nombreuses collaborations industrielles ou la création de start-up. »

Depuis plus de 50 ans maintenant, le CEA accompagne ainsi la création et le développement de start-up issues de ses laboratoires. « *Le CEA a été précurseur dans ce domaine, en mettant en place dès la fin des années 1980 un dispositif "d'essaimage" pour aider ses collaborateurs à monter leur entreprise, puis en créant en 1999 sa propre filiale d'investissement* », rappelle Laurence Petit. Objectif: valoriser ses résultats de R&D en favorisant l'émergence de technologies fortement innovantes, en rupture par rapport aux activités des industriels ou visant des marchés émergents. « *La création de start-up deeptech est un relais clé du transfert technologique et un enjeu économique structurant pour contribuer à la réindustrialisation et à la souveraineté de la France* », souligne Laurence Petit.





Avec le lancement du programme Magellan en juin 2020 (voir p. 52), le CEA a renouvelé sensiblement son dispositif d'essaimage, avec pour objectif non seulement d'augmenter le nombre de créations mais aussi de renforcer encore la qualité de l'accompagnement, des premières idées jusqu'à la création. Le CEA, *via* sa filiale CEA Investissement, soutient également le développement des start-up, et en particulier leur financement. (voir p. 48). « *Nous sommes très attachés à la qualité et à l'impact économique et sociétal de nos start-up*, note Laurence Petit. *Le CEA a développé un programme d'accompagnement extrêmement complet et sécurisant pour ses collaborateurs, permettant aux start-up d'avoir le temps de se développer en interne avant leur création afin de leur donner les*

« La création de start-up deeptech est un relais clé du transfert technologique et un enjeu économique structurant pour contribuer à la réindustrialisation et à la souveraineté de la France. »

Laurence Petit, directrice déléguée à l'innovation, aux start-up et aux participations du CEA

meilleures chances de succès. » En témoignent la longévité des start-up issues du CEA et le nombre d'emplois induits. En 2023, quatorze start-up valorisant les technologies du CEA ont été créées, soit deux fois plus que les années précédentes, dont Fluiidd SAS, 250^e start-up technologique du CEA, lauréate du prix de l'innovation dans la catégorie « Responsabilité sociétale et durable » à WNE, qui présentera sa technologie révolutionnaire au *Consumer Electronic Show* (CES) de Las Vegas début janvier. Une des nombreuses *success stories* (voir pp. 54-55) qui font la fierté du CEA. ●

80 %

C'est le taux de survie à 10 ans des start-up valorisant des technologies du CEA.



**Marie-Astrid
Ravon-Berenguer**
directrice financière
et des programmes du CEA

Via sa filiale CEA Investissement, conseillée par Supernova Invest, son partenaire de capital-investissement, le CEA est en capacité de soutenir dans la durée les start-up qui valorisent les technologies développées dans ses laboratoires. Un atout de taille pour assurer leur pérennité au bénéfice de la souveraineté industrielle de la France.

Investir, entre risque et innovation

Régis Saleur
directeur général
de Supernova Invest



© L. Godart / CEA

Quelles sont les spécificités de CEA Investissement et Supernova Invest?

Marie-Astrid Ravon-Berenguer —

Rappelons d'abord que le CEA essaime des start-up depuis 1972 ! C'est l'un des trois vecteurs sur lesquels il s'appuie pour valoriser les technologies que ses équipes développent, avec la concession de licences aux industriels et la création de *joint ventures* avec des partenaires industriels comme ça a été le cas par exemple pour la société Genvia en 2021, dans le domaine de l'électrolyse haute température pour la production d'hydrogène décarboné. Cette activité d'essaimage et de soutien à la création de start-up a longtemps été directement financée par le CEA *via* une filiale détenue à 100 %, mais elle était limitée à la phase d'amorçage de ces sociétés, ce qui est au demeurant une spécificité française. Or c'est dans leurs phases de développement et d'industrialisation de leurs produits qu'elles ont besoin de beaucoup de fond car celles-ci sont souvent très longues. Pour éviter que nos start-up soient contraintes d'aller chercher des acquéreurs ou des investisseurs à l'étranger et rester en capacité de les soutenir dans la durée, il nous est apparu nécessaire de créer une société de gestion reconnue par l'Autorité des marchés financiers, afin de faire appel à d'autres investisseurs français, publics ou privés. D'où Supernova Invest, née en 2017 du rapprochement entre le CEA et la société Amundi (groupe Crédit Agricole) autour de l'équipe de CEA Investissement et qu'on pourrait qualifier de spin-off. C'est un modèle assez unique qui allie les compétences du CEA en matière de développement technologique et celles d'Amundi dans le domaine de l'investissement et de la gestion d'actifs.



Ce travail en bonne intelligence permet à Supernova Invest d'être aujourd'hui le premier acteur de l'investissement deeptech en France, tous segments confondus. »

Régis Saleur

Régis Saleur — CEA Investissement reste une filiale du CEA, mais elle est désormais conseillée par Supernova Invest. Nous apportons ainsi notre expertise au CEA notamment pour l'analyse de ses dossiers d'essaimage. Celui-ci conserve sa capacité à décider de ses choix d'investissement, *via* CEA Investissement, notamment sur des dossiers stratégiques comme Genvia.

De même que nous réalisons nos propres investissements. Ce travail en bonne intelligence permet à Supernova Invest d'être aujourd'hui le premier acteur de l'investissement deeptech en France, tous segments confondus.

Que représente aujourd'hui CEA Investissement?

Marie-Astrid Ravon-Berenguer —

CEA Investissement, c'est un portefeuille de près de 70 lignes actuellement suivies dans la durée, composé de participations prises pour le compte du CEA dans les sociétés qu'il a créées ou avec lesquelles il collabore. Nous venons de recapitaliser ce fonds à hauteur de 13 millions d'euros pour poursuivre nos investissements dans des secteurs stratégiques, adossés aux missions du CEA (défense, énergies, numérique, santé). Le secteur de la deeptech étant très capitaliste avec des durées de maturation longues, les besoins de financement sont significatifs.

Comment choisissez-vous d'investir? Quels sont vos critères, s'il y en a?

Régis Saleur — J'aime à dire que l'investissement est une histoire d'amour... car il faut être séduit par un projet ! De façon générale, ce qui compte c'est l'innovation « fracassante », celle qui est suffisamment extraordinaire pour que les financeurs fassent le pari d'y investir. C'est un premier élément qu'on pourrait appeler « la mesure de la disruption ». Le timing en est un deuxième tout aussi déterminant : la deeptech est un marché mondial où il peut être dangereux d'être trop en avance, car personne ne sera intéressé par votre technologie, si révolutionnaire soit-elle, mais où il s'agit de grimper dans le bon train au bon moment et dans le bon wagon.



Il faut savoir parfois dire non et investir seulement quand on est intimement convaincu de la dimension stratégique de la technologie à valoriser. »

Marie-Astrid Ravon-Berenguer

Marie-Astrid Ravon-Berenguer — C'est le principe du capital-risque : on n'est jamais sûrs de faire les bons choix ! Mais avec un taux de survie de nos start-up de 80 % après dix ans, je dirais que notre expérience nous permet de prendre de bonnes décisions. Et cela nécessite de la sélectivité : il faut savoir parfois dire non et investir seulement quand on est intimement convaincu de la dimension stratégique de la technologie à valoriser. Et avec le conseil apporté par Supernova Invest, c'est un gage de réussite !

Avant l'investissement, il y a également une phase cruciale, celle de la maturation. Comment votre action s'articule-t-elle avec les dispositifs d'accompagnement existants ?

Marie-Astrid Ravon-Berenguer — Effectivement, au départ, il faut des idées qui émergent des labos, puis des actions destinées à encourager les chercheurs et les accompagner à « sauter le pas », qu'il s'agisse de collaborateurs du CEA ou de porteurs extérieurs. C'est, depuis deux ans, l'objectif du programme Magellan – explorer l'industrialisation d'une idée – et

cela a permis de relancer notre dynamique de création de start-up (voir p. 54). Tout comme le projet de « start-up studio » en cours de préparation qui, à l'inverse de Magellan qui va d'une idée d'innovation portée par un chercheur à la start-up, s'attache à structurer des équipes autour de technologies qu'il nous semble nécessaire de valoriser.

Régis Saleur — Supernova Invest est présent dès cette phase « antécréation », par exemple dans le comité de sélection du programme Magellan, pour y apporter son regard « capital-risque » le plus en amont possible. Plus on s'immerge tôt dans un projet, mieux on le comprend et plus on a envie d'y investir ! Car le financement est comme un escalier à gravir : il faut lever des fonds à chaque étape, de la preuve de concept au prototype, du produit au premier client et jusqu'à la production à l'échelle industrielle. Le tout sans oublier d'anticiper l'après.

Quelques mots pour conclure ?

Marie-Astrid Ravon-Berenguer et Régis Saleur — Supernova Invest démultiplie les capacités d'investissement dans les projets issus du CEA et promis à un bel avenir. C'est le résultat d'une alchimie réussie entre la proposition de valeur de Supernova Invest et l'expertise du CEA. ●



1

France deeptech

« Parce que les start-up deeptech ne se sentaient pas bien représentées dans les dispositifs existants du fait de leurs spécificités (investissements lourds, partage de propriété intellectuelle...), nous avons eu l'idée de fonder l'association France deeptech », explique Michel de Lempdes, son président et responsable du capital. Risque chez Omnes Capital. Inaugurée le 29 novembre dernier et forte de 110 membres, dont le CEA, qui fait partie de ses cofondateurs, l'association a pour vocation de fédérer l'ensemble des acteurs de la deeptech (entrepreneurs, investisseurs, acteurs du monde de la recherche et de l'industrie, fournisseurs de services) pour réfléchir à des solutions concrètes en réponse aux questions et obstacles que peuvent rencontrer les start-up du domaine.

3 initiatives qui comptent

Pour soutenir son implication dans l'écosystème de la deeptech, le CEA participe à différentes initiatives nationales.

Focus sur trois d'entre elles.

2

Les pôles universitaires d'innovation

Inscrits dans la loi de programmation de la recherche, les PUI ont pour vocation de fédérer les acteurs d'écosystèmes territoriaux d'innovation, au bénéfice de la compétitivité et de la création d'entreprises. À Grenoble, FITInnovE rassemble des acteurs de rang mondial couvrant un large spectre industriel et scientifique, dont le CEA, qui en est un des fondateurs. L'ambition de ce PUI : accroître le nombre de contrats de recherche partenariaux (+30 %), de contrats d'exploitation de propriété intellectuelle (+50 %) et de créations de start-up (+100 %) d'ici 2027. « C'est une occasion unique pour notre territoire de s'installer comme l'un des écosystèmes au monde les plus intenses en innovation. Avec ce projet, l'université Grenoble-Alpes et ses partenaires entendent favoriser la création d'emplois, la fidélisation et le développement de filières industrielles pour préparer le futur », souligne Yassine Lakhnech, président de l'UGA.

3

La French Tech

Rattachée à la Direction générale des entreprises, la mission French Tech soutient depuis 10 ans le développement de start-up technologiques innovantes. Sa force : un maillage national et international (52 pays) pour fédérer l'écosystème start-up autour de cet enjeu clé pour l'économie française. Le CEA participe pleinement à cette mission grâce aux accords de partenariats qu'il a signés avec trois des 16 « capitales French Tech » en lien étroit avec les écosystèmes d'innovation proches de ses centres : French Tech Paris-Saclay, French Tech Alpes Grenoble et French Tech Aix-Marseille. À la clé, des actions communes entre le CEA et la French Tech, comme en février dernier dans le cadre de la visite du ministre délégué à l'Industrie Roland Lescure, ou le soutien actif du CEA à la « Start-up Week » organisée mi-novembre à Grenoble.

Magellan, le grand voyage des start-up

Magellan est le programme d'aide à la création d'entreprise mis en place par le CEA en 2020 dans l'objectif de renforcer et d'accélérer sa dynamique entrepreneuriale. Ouvert à l'ensemble de ses collaborateurs ainsi qu'à des copporteurs externes, il les accompagne à chaque étape de leurs projets de création d'entreprise. Un pari réussi avec des créations qui ont doublé en 2023.

14

Le nombre de start-up issues du CEA, créées en 2023.



réer une entreprise, c'est d'abord une aventure qui démarre avec un porteur ayant l'envie d'entreprendre. Pour faire émerger des start-up valorisant ses technologies de rupture, le CEA avait mis en place de longue date un dispositif pour accompagner ses collaborateurs dans la création d'entreprise. Depuis trois ans, cette dynamique s'est nettement accélérée. Elle est désormais portée par Magellan, un programme très complet de soutien dans les phases clés de la maturation (passer de l'idée au projet) et de l'incubation (passer du projet à la création). La force de ce nouveau dispositif *made in CEA* réside notamment dans sa capacité à soutenir tout le développement business et l'accompagnement des porteurs *via* des équipes internes dédiées (start-up

program managers, équipes marketing, designers, spécialistes du prototypage et de l'éco-innovation, ingénieurs brevet, experts du financement des start-up, experts en intelligence économique...), mais également à soutenir financièrement la maturation des technologies, ce qui est assez rare parmi les organismes de recherche, en assurant un lien étroit avec les laboratoires sur le terrain.

Autre force du dispositif: sa forte dimension humaine, permettant de sécuriser le parcours des collaborateurs du CEA qui se lancent dans l'aventure entrepreneuriale, et de leur faire profiter de conditions privilégiées pour créer leur entreprise. Outre des formations spécifiques (formation à l'entrepreneuriat, coaching, etc.), ils bénéficient d'un temps dédié pour leur projet (jusqu'à 100 % de leur temps de travail pendant l'incubation, tout en restant salariés du CEA), d'un soutien financier pour les aider à investir au capital de leur entreprise (prêt d'honneur), ou encore de la possibilité de réintégrer le CEA jusqu'à quatre années après leur départ. Le CEA leur offre enfin un accès privilégié à son réseau, en particulier avec le monde industriel: écosystème de ses 700 partenaires industriels, partenariats avec les acteurs clés de la deeptech (Bpifrance, French Tech, incubateurs...), soutien à la communication, par exemple

JEUNES ET CRÉATIFS

«La valeur n'attend point le nombre des années», disait Rodrigue dans *Le Cid* de Corneille. Pour inciter ses doctorants et postdoctorants à se lancer sans attendre dans «l'aventure start-up», le CEA a mis en place, début 2023, un contrat de travail dédié à l'essaimage, leur permettant d'être recrutés pour intégrer le programme Magellan. Ils seront bientôt cinq à en bénéficier.

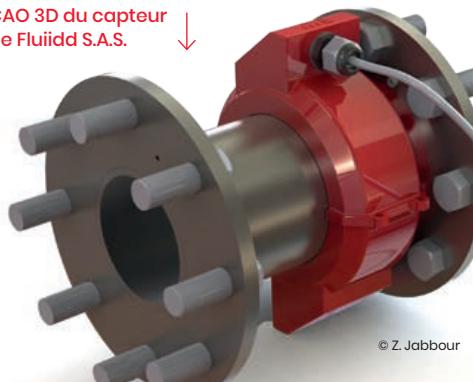
AFTERWORKS, ENTRE PAIRS

Plusieurs fois par an, le CEA organise, sur ses différents sites, des rencontres avec les start-up issues de ses laboratoires. Baptisées « Afterwork Alumni start-up CEA », elles ont un double objectif : entretenir un écosystème entrepreneurial autour du CEA et donner l'occasion aux porteurs de projets intégrés au programme Magellan d'échanger avec leurs « aînés ».

via une présence dans les grands événements nationaux et internationaux (CES, Global Summit, WNE, etc.). Trois ans après son lancement, Magellan a permis de relancer la création de start-up au CEA, avec 14 nouvelles start-up en 2023, dont 10 essaimages de salariés.

Tous les ans, Magellan lance deux appels à idées pour sélectionner de nouveaux projets portés par des collaborateurs du CEA et, sous certaines conditions, par des porteurs de projets externes. Toutes les start-up valorisant des technologies du CEA, qu'elles soient issues ou non de ce programme, bénéficient plus globalement de l'accompagnement CEA dans leur développement : réseau, appui au financement, communication, soutien RH et business... ●

CAO 3D du capteur de Fluiidd S.A.S.



© Z. Jabbour

Trois questions à... Mathieu Darnajou

fondateur et président
de Fluiidd S.A.S.



© L.Godart / CEA

Comment devient-on porteur d'un projet de start-up ?

— Au printemps 2020, alors que je suis en train de rédiger ma thèse, je me rends compte que je ne suis pas convaincu par les offres d'emploi qui me sont proposées. Ce n'est pas suffisamment concret pour moi et, surtout, je vais perdre la main sur ce que j'ai développé pendant trois ans. Sur les conseils de mon chef de labo, je réponds alors à l'appel à projets « Jeunes docteurs innovants » de la région Sud (ex-Paca) et j'en deviens l'un des lauréats. Bien que totalement ignorant du monde des start-up, je décide de me lancer dans l'aventure et, avec le soutien du CEA, j'intègre son programme Magellan, en motivant d'ailleurs le CEA à créer un nouveau contrat de travail dédié à l'essaimage des jeunes docteurs.

Pouvez-vous décrire votre projet ?

— Mon sujet de thèse portait sur le développement d'un scanner destiné à la surveillance des fluides dans le circuit primaire d'un réacteur nucléaire. Or, des fluides, il y en a partout dans les installations et les procédés industriels ! Fruit de dix années de développement technologique au CEA, le scanner que Fluiidd S.A.S. commercialisera dès cette année permet d'anticiper les défauts dans les canalisations industrielles, qui génèrent des arrêts de production très coûteux et sont également source d'une surconsommation énergétique, souvent colossale, des usines. Le scanner est fabriqué en France, à Marseille.

Quel regard portez-vous sur l'accompagnement dont vous avez bénéficié ?

— Cela a été un avantage énorme ! J'ai bénéficié de différentes formations pour me familiariser à l'univers de l'entrepreneuriat, en particulier celui des start-up. Ces formations m'ont fait prendre conscience que l'on peut réellement « peser sur le monde ». J'ai également mis à profit mes trois années dans le programme Magellan pour peaufiner une *roadmap* détaillée. Il fallait bien tout ce temps-là pour appréhender mon futur marché ! Aujourd'hui, avec mon associé Philippe Guenebaud et après la création juridique de mon entreprise dont CEA

Investissement est cofondateur, je suis plutôt confiant et je fais mienne cette phrase d'Oscar Wilde : « *Il faut toujours viser la lune, car même en cas d'échec, on atterrit dans les étoiles.* »



Des grands projets d'avenir

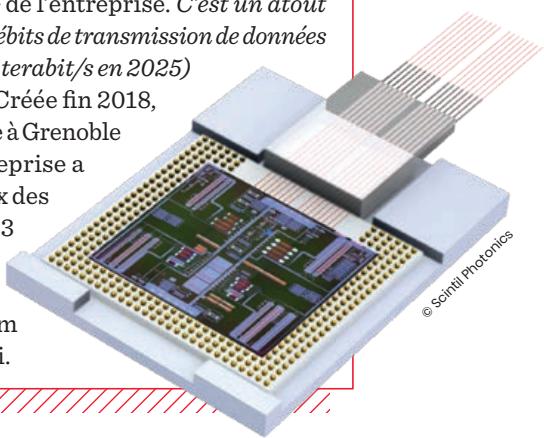
(1) Maladie de Batten. Maladie infantile neurodégénérative et héréditaire, caractérisée par une perte de vision progressive et des troubles des fonctions motrices et cognitives conduisant à une évolution fatale prématûrée.



Difficile de faire un choix quand il y a tant de belles histoires à raconter ! En voici quatre qui mettent en lumière des start-up et des technologies issues du CEA ayant récemment fait parler d'elles.

Scintil Photonics trace la route...

Des interconnexions optiques ultrarapides et compactes, ce sont les produits que Scintil Photonics développe pour des acteurs majeurs de l'IA et du cloud. « *Nos circuits intégrés s'appuient sur une technologie de collage moléculaire développée au CEA permettant l'intégration de lasers sur silicium, explique Sylvie Menezo, PDG de l'entreprise. C'est un atout essentiel pour démultiplier les débits de transmission de données entre composants de calcul (1,6 terabit/s en 2025) et en garantir la croissance.* » Créeé fin 2018, Scintil Photonics est implantée à Grenoble et Toronto au Canada. L'entreprise a reçu, en octobre dernier, le prix des technologies numériques 2023 dans le domaine de la microélectronique, décerné chaque année depuis 1998 par Telecom Paris et Telecom Paris Alumni.



*Découvrez ici
d'autres start-up
du CEA.*



Theranexus marque des points

« *Plus de 5 000 maladies neurologiques rares touchent près de 350 millions de personnes dans le monde. 70 % d'entre elles se manifestent pendant l'enfance, et la majorité ne dispose d'aucun traitement. Il s'agit d'un enjeu sociétal lourd qui concerne un marché en forte attente d'innovation thérapeutique* », soulignent Franck Mouthon et Mathieu Charveriat, anciens chercheurs au CEA et cofondateurs de Theranexus. La société biopharmaceutique travaille

à développer des candidats-médicaments innovants pour le traitement de ces maladies, en s'adossant à une plateforme développée en collaboration avec le CEA et le Collège de France. Elle vient de présenter des résultats encourageants dans la lutte contre la maladie de Batten⁽¹⁾ : après 12 mois de traitement, son candidat-médicament semble en ralentir la progression.



Pleins feux sur Heliup

5 kg au mètre carré, soit trois fois moins que les modèles classiques et leur structure de pose : voilà le poids des panneaux photovoltaïques ultralégers conçus par Heliup. « *Initié début 2021, notre projet a bénéficié de 24 mois d'accompagnement dans le cadre du programme Magellan du CEA, au terme desquels la technologie a été brevetée et la start-up créée dans la foulée* », rappelle Yannick Veschetti, un des quatre cofondateurs de la start-up, et ancien collaborateur du CEA. Parce que ses panneaux sont suffisamment légers pour équiper les toitures des grands bâtiments industriels, commerciaux et logistiques, Heliup a attiré l'attention de plusieurs fonds d'investissement et réalisé fin 2023 une levée de 10 millions d'euros qui servira à développer une ligne industrielle de production d'une capacité initiale de 500 000 m² de panneaux solaires par an.

La mobilité selon Symbio

Fondés sur un contrat de licence et de coopération R&D passé avec le CEA il y a plus de vingt ans, les systèmes hydrogène développés par Symbio offrent au monde des transports la mobilité zéro émission dont il a besoin. Et cela sur route ou hors route, des poids-lourds aux camionnettes et aux bus. « *Parce qu'une étroite collaboration entre recherche et industrie est un facteur clé de succès, nous avons renforcé depuis quelques années notre partenariat avec le CEA, celui-là même qui nous a permis de franchir ensemble une première étape pour devenir l'équipementier que nous sommes aujourd'hui* », expose Philippe Rosier, PDG de Symbio. En ligne de mire : la mise au point de nouveaux systèmes encore moins coûteux, plus performants et plus faciles à intégrer. Le CEA assure les développements amonts liés aux composants jusqu'à la preuve de concept avant que Symbio ne réalise les tests de qualification puis l'industrialisation. L'entreprise a inauguré fin 2023 sa *gigafactory* de piles à hydrogène, la plus grande d'Europe, près de Lyon. Elle vise une production de 50 000 systèmes d'ici 2026.



Les investissements français dans la deeptech

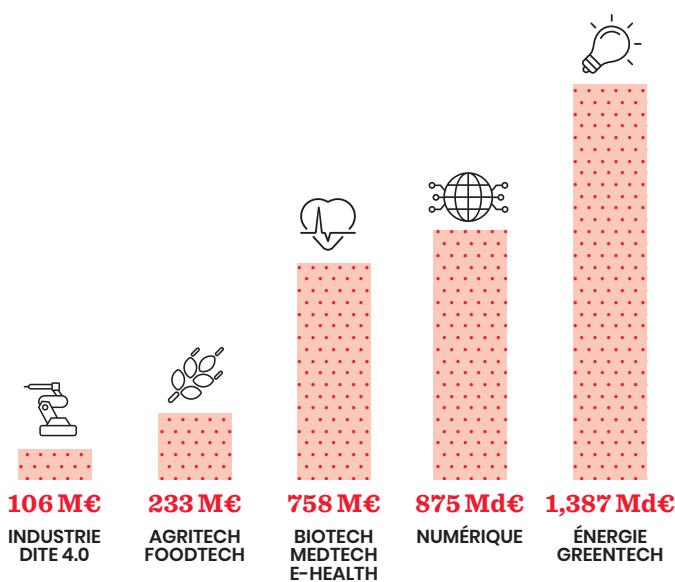
Si on devait résumer, la deeptech en France, ce sont plus de 2 000 start-up actives, employant au total 41 000 personnes et soutenues par plus de 300 investisseurs, publics comme privés. Décryptage avec Pascale Ribon, directrice deeptech à Bpifrance.

Si les États-Unis et la Chine font la course en tête en matière d'investissements dans la deeptech, la France se classe, cette année, au 5^e rang mondial (ex aequo avec l'Allemagne) selon l'observatoire dealroom.co¹. Une place qu'elle doit au soutien très important des pouvoirs publics en faveur du développement et de la structuration d'un écosystème français de la deeptech, indispensable à la compétitivité nationale.

Combinés aux fonds privés de type capital-risque, des fonds publics conséquents sont mobilisés pour soutenir l'innovation et favoriser l'émergence de nouvelles entreprises. Ainsi, au 3^e trimestre 2023, ce sont 700 M€ qui ont été investis dans 700 start-up ; ce qui représente, entre janvier et fin novembre 2023, un investissement total de près de 3,4 Md€, en augmentation de 22 % sur la même période en 2022.

Même si on note un certain ralentissement des financements du fait d'une conjoncture incertaine rendant les investisseurs plus prudents en termes de prise de risque, les levées de fonds des start-up vues comme les plus prometteuses se sont maintenues, voire ont augmenté. C'est le cas de la start-up éssaimée du CEA Aledia et ses microleds révolutionnaires (120 M€) ou encore d'Accentra et ses solutions pour décarboner le chauffage et la climatisation de l'habitat (108 M€).

Si la santé (biotech, medtech et e-health) reste toujours très attractive pour les investisseurs (758 M€ en 2023) en raison de son impact sociétal, les domaines de l'énergie, de la greentech (1,387 Md€) et du numérique (875 Md€) ont toujours le vent en poupe. Sans oublier l'agriculture et l'agroalimentaire (agritech et foodtech) avec 233 M€ et l'industrie 4.0 (robotique et Internet des objets) avec 106 M€... Dans chacun de ces domaines, on observe une grande diversité de projets pour lesquels les investisseurs, confortés par le soutien sans faille de l'État, ont la conviction que leurs fonds feront la différence.



Les territoires de la deeptech

2023

3,4 Md€

d'investissements

(+ 22 % par rapport à 2022)

227

tours de table

(- 7 % par rapport à 2022)

Auvergne-Rhône-Alpes

336 start-up
6 800 salariés

Île-de-France

715 start-up
20 000 salariés

Sud de la France²

373 start-up
+ 6 800 salariés

Toutes les régions françaises sans exception accueillent des start-up deeptech sur leurs territoires, mais deux d'entre elles retiennent l'attention : l'Île-de-France avec 715 start-up (représentant 20 000 salariés) ainsi que la région Auvergne-Rhône-Alpes, ses 336 start-up employant près de 6 800 salariés. Les autres ne sont évidemment pas en reste : la moitié sud de la France compte 373 start-up pour un peu plus de 6 800 salariés. ●

(1) Données au 26/10/2023.

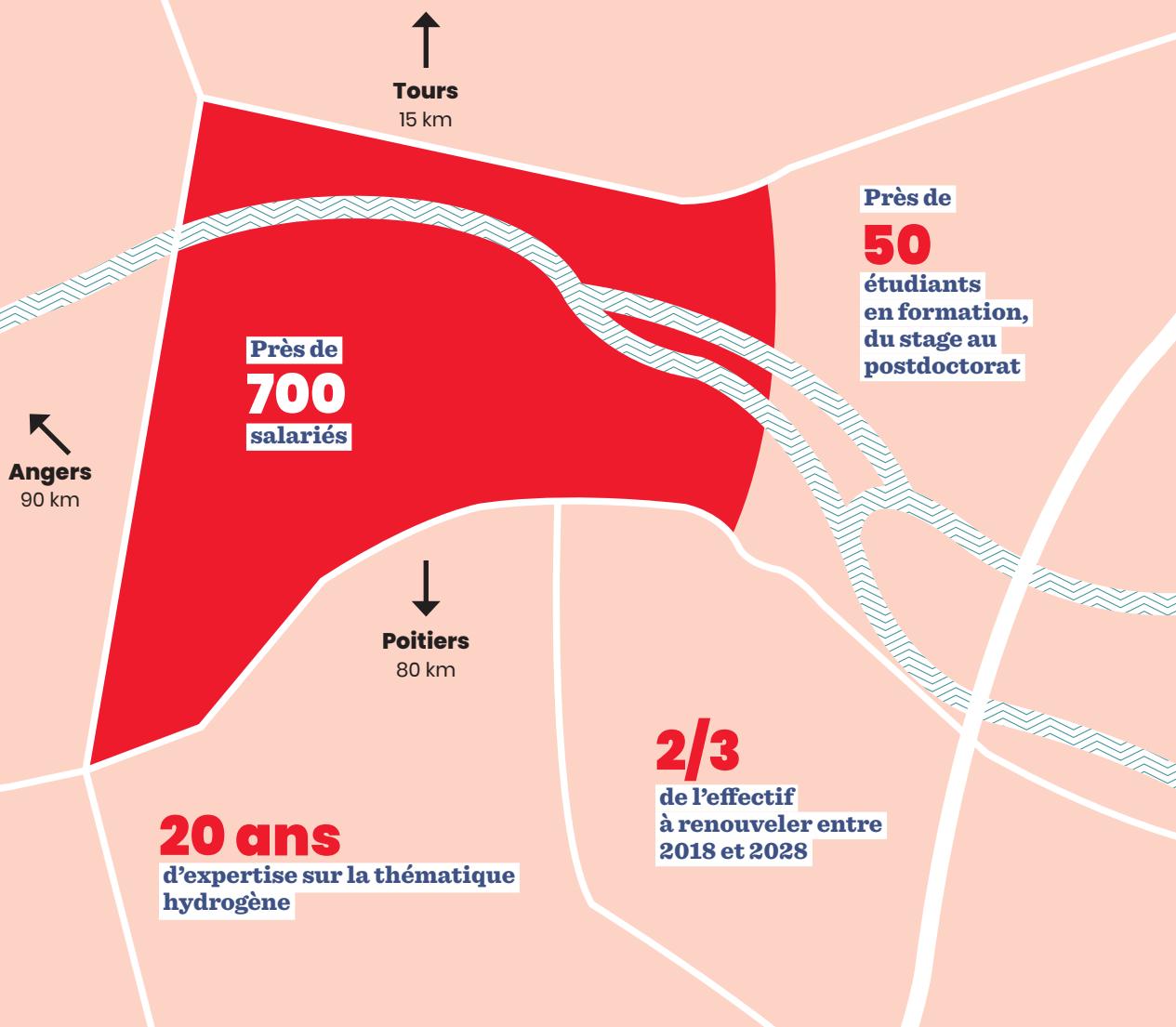
(2) Le sud de la France regroupe la région Sud (ex-Paca), l'Occitanie et la Nouvelle-Aquitaine.



Tout l'écosystème deeptech français accessible ici et en temps réel !

Le CEA... au Ripault

Le CEA compte neuf centres répartis dans toute la France, de l'Aquitaine à la Bourgogne. Ces ancrages territoriaux en font un moteur pour l'innovation et l'économie au plus proche des acteurs locaux. Troisième étape au Ripault, un centre à la pointe pour l'étude et la conception de matériaux et de procédés innovants, et engagé pour la filière hydrogène.



ACTIVITÉS DU CENTRE

Garantir la dissuasion nucléaire

- Conception, fabrication, maintien en condition et démantèlement de sous-ensembles des têtes nucléaires des composantes aéroportée et océanique de la dissuasion.
- Développement de matériaux et composants pour les grands instruments du programme «simulation» et pour les besoins des programmes liés aux applications militaires.



Lutter contre la prolifération nucléaire et le terrorisme

- Évaluation de la menace et mise au point de systèmes de détection d'explosifs.

Participer à la transition énergétique

- Mise au point de matériaux et de composants pour la filière hydrogène, pour améliorer les performances des cellules de production d'hydrogène.

PRINCIPAUX PARTENAIRES

Académiques

Le centre collabore avec plusieurs établissements d'enseignement supérieur, tels que le Collège de France, ParisTech, l'Ensta Bretagne, l'Insa Centre-Val de Loire ou encore l'ENS Lyon, ainsi que de multiples universités: Tours-Orléans (dont PolyTech), Poitiers, Le Mans, Limoges, Sorbonne Université, Paris-Saclay, Bordeaux, Grenoble, Montpellier et Lille.

Le CEA Le Ripault a engagé depuis plusieurs années des partenariats stratégiques à travers une unité mixte de recherche (LCTS/Bordeaux) et des laboratoires de recherche correspondants: l'Ircer à Limoges, l'Icoa et Prisme à Orléans, le Lamé à l'Insa Centre-Val de Loire.

Des liens étroits existent aussi avec des instituts comme l'Institut Fresnel à Marseille, l'Institut Néel à Grenoble, Pprime à Poitiers, l'Institut franco-allemand Saint-Louis (ISL) ou encore l'Iprem à Pau. À l'international, le centre entretient des collaborations aux États-Unis avec les grands laboratoires américains: Lawrence Livermore, Los Alamos, Sandia.

Institutionnels et de recherche

Le CEA Le Ripault est reconnu comme un acteur national majeur dans le domaine de la pyrotechnie. À ce titre, il est membre cofondateur du récent Campus pyrotechnie du futur qui vise à rassembler des spécialistes hautement qualifiés en pyrotechnie, grâce à des actions de formation et de maintien de compétences. Le CEA Le Ripault siège à la présidence du Groupe de travail de pyrotechnie (GTPS) depuis plusieurs années. Le CEA Le Ripault est également membre cofondateur du Centre d'études et de recherches technologiques en microélectronique (Certem/Tours), membre actif du pôle de compétitivité Sciences et systèmes de l'énergie électrique (S2E2), membre du conseil d'administration de l'Insa Centre-Val de Loire et de la plateforme Canoe (Centre technologique Nouvelle-Aquitaine composites & matériaux avancés).

Économiques

Le CEA Le Ripault valorise ses compétences «matériaux avancés» auprès de nombreux acteurs industriels, locaux, nationaux ou internationaux. Parmi eux, on retrouve STMicroelectronics, SRT microcéramique, RAIGI, Vermon, Verescence, des entreprises cofondées ou essaimées par le CEA, comme Genvia (cocréée avec SLB)...

«

La recherche est une vraie chance »

Le 3 octobre dernier, deux anciens chercheurs du CEA, Anne L'Huillier et Pierre Agostini, ont reçu le prix Nobel de physique, avec le Hongrois Ferenc Krausz. Une reconnaissance exceptionnelle pour leurs travaux menés à Saclay, au sein de ce qui est aujourd'hui le Laboratoire interactions, dynamiques et lasers, le Lidyl. Si elle enseigne désormais à Lund, en Suède, Anne L'Huillier ne cache pas son plaisir à revenir auprès de ses anciens collègues et amis. Rencontre.

Vous avez reçu un prix Nobel, sans doute la distinction la plus prestigieuse pour une carrière scientifique. Comment avez-vous vécu cette annonce ?

Anne L'Huillier — Le comité Nobel m'a appelée pendant la pause, alors que je donnais un cours à l'université de Lund. Ma première pensée a été pour mon mari, un Suédois pour lequel je suis partie m'installer dans ce pays.

Au début des années 1990, la Suède avait acquis un nouveau laser titane-saphir, un équipement unique en Europe, sur lequel mes confrères suédois m'invitaient à mener des expériences. Je m'y suis donc rendue, un étudiant dans ma R5 et le spectromètre que nous avions mis au point au CEA dans un camion. Après une campagne réussie et une parenthèse américaine, j'ai enchaîné les allers-retours Saclay-Lund, avant de m'établir avec mon (futur) mari rencontré sur place. Nous étions alors en 1994 et j'étais sans doute la

BIO EXPRESS Physicienne, spécialiste de physique atomique ultrarapide. **1986** | Premier poste permanent au CEA après une thèse d'État dans l'un de ses laboratoires. **1987** | Génération d'harmoniques d'ordre élevé, découverte qui ouvre un nouveau domaine de recherche. **1995** | Départ pour l'université de Lund, en Suède. **2001** | Confirmation par Pierre Agostini et Ferenc Krausz de la nature attoseconde des impulsions produites. **2023** | Prix Nobel de physique, partagé avec Pierre Agostini et Ferenc Krausz.

L'ATTOSECONDE, PLUS VITE QU'UN FLASH

Une attoseconde correspond à 10^{-18} seconde, une durée tellement brève que même un flash d'appareil photo ultraperfectionné ne parvient pas à la saisir. Ce sont pourtant ces échelles qu'il faut atteindre pour observer le mouvement des électrons dans la matière.



© L. Godart / CEA

↑ Anne L'Huillier (au centre) en visite dans son ancien laboratoire au CEA.

première chercheuse à expérimenter le télétravail... Le CEA m'a permis de travailler à distance et je lui en suis très reconnaissante ! En 1995, j'ai finalement obtenu un poste de maître de conférence à l'université de Lund, et je suis passée d'une carrière de chercheuse à celle d'enseignante-rechercheuse. Mais je reviens très régulièrement en France et au CEA, où j'ai gardé des liens étroits avec mes anciens étudiants et le laboratoire.

Quel regard portez-vous sur ce laboratoire, le Lidyl, et la poursuite des travaux au CEA ?

Anne L'Huillier — Je suis jalouse de la plateforme ATTOLab ! Cet équipement d'excellence (voir page suivante), que coordonne le Lidyl, est à la pointe des infrastructures laser pour les études femto- et attoseconde, avec plusieurs lignes de lumière. Honnêtement, au moment des premières découvertes, nous ne nous doutions pas de l'importance de ces travaux. Je n'aurais jamais pu imaginer qu'il en découlerait des recherches si vastes et des plateformes techniques comme celles que possède aujourd'hui le CEA. Les impulsions attosecondes ont des applications en recherche fondamentale pour étudier la dynamique des électrons dans les atomes, mais aussi du côté de l'industrie, en chimie et en biologie, en matière condensée ou encore

dans l'électronique pour assurer la métrologie de circuits imprimés toujours plus miniaturisés.

Vos collègues n'hésitent pas à vous décrire comme «une expérimentatrice remarquable et une fine théoricienne». À quel point est-ce important d'agir sur ces deux versants de la recherche à la fois ?

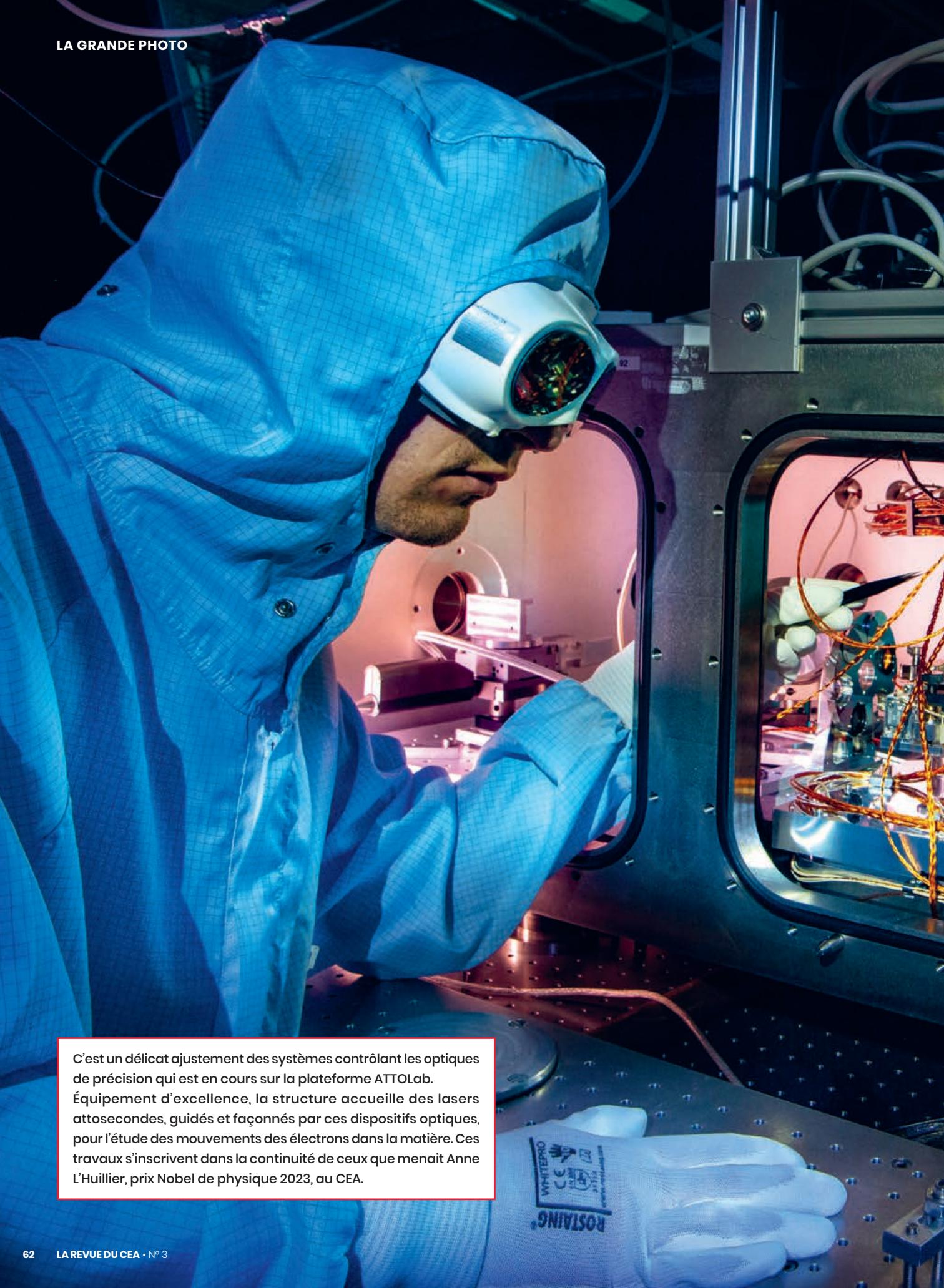
Anne L'Huillier — Pour moi, il n'y a pas la théorie d'un côté et les expériences de l'autre ; il n'y a qu'une seule chose : la physique. Cumuler expérience et théorie est indispensable lorsqu'on se plonge dans un domaine encore balbutiant, même si cela ne doit pas empêcher d'échanger avec des confrères plus spécialisés dans l'un ou l'autre volet. Quand j'ai commencé mes travaux de thèse, l'aspect optique avec la propagation des harmoniques

dans un milieu non linéaire était un nouveau sujet, et c'est là-dessus que j'ai cherché à contribuer avec mes étudiants et mes collègues au CEA. En parallèle de cette approche théorique, pour avancer, nous avions besoin d'instruments. Et comme ils n'existaient pas, il a bien fallu les concevoir ! C'était donc une nécessité qui, je crois, a enrichi les travaux au lieu de les contraindre.

Vous êtes seulement la deuxième Française à obtenir le prix Nobel de physique, avec Marie Curie, et la cinquième femme dans le monde. Quel message aimeriez-vous passer aux jeunes femmes qui se lancent dans une carrière scientifique ?

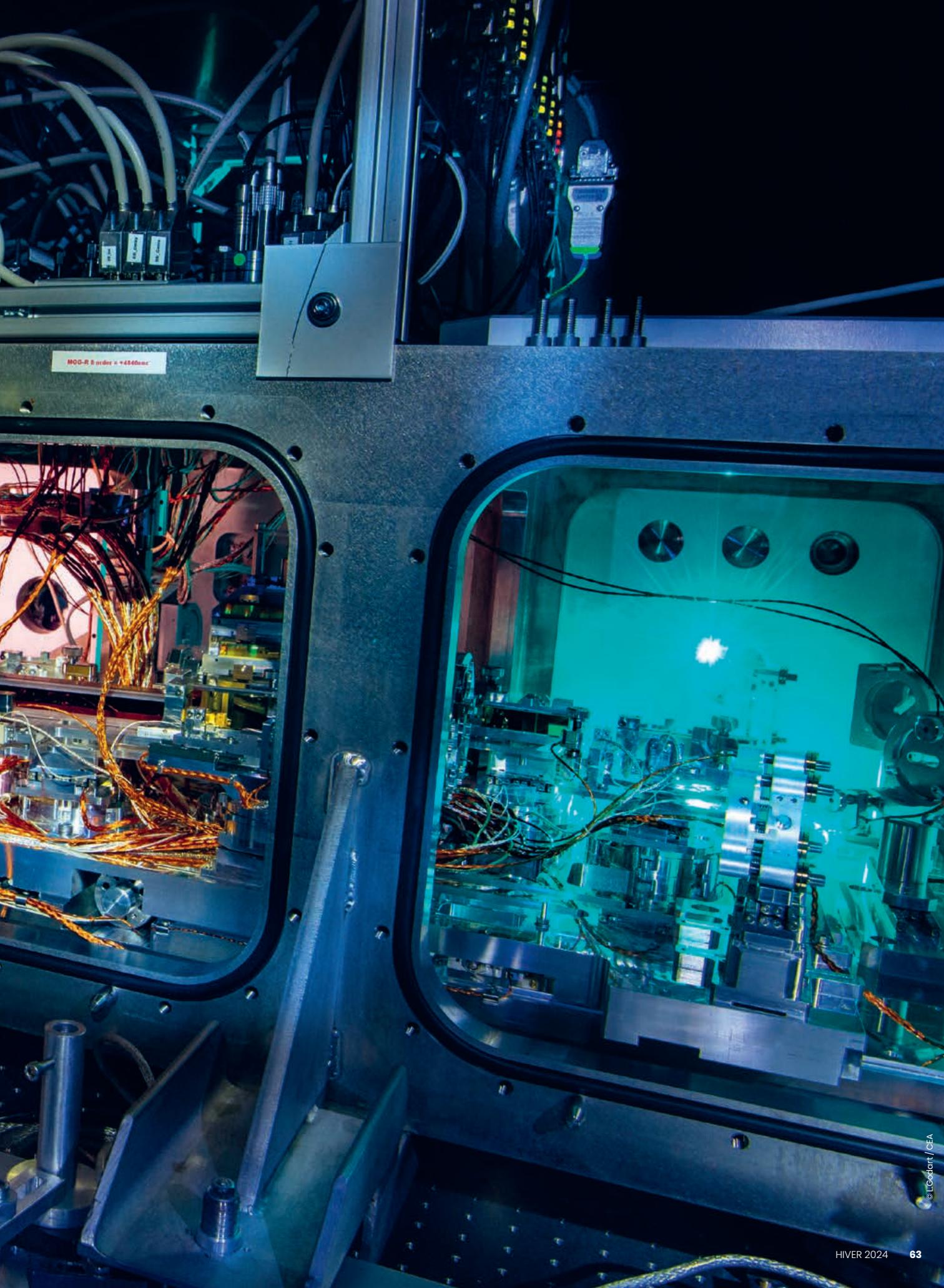
Anne L'Huillier — Persévérez ! Il existe des moments de doute et des obstacles, comme dans toute carrière. Cela ne doit pas empêcher de se fier à ses intuitions et de poursuivre ses passions, car la recherche est une vraie chance. C'est une carrière qui offre à la fois une forme de liberté – ne serait-ce que dans les horaires – et la possibilité de faire avancer la science et la société tout entière. Je note que depuis une dizaine d'années, les lignes bougent, et aujourd'hui mon groupe de recherche est constitué d'environ 40 % de femmes. Je ne dis pas que c'est facile, mais ce n'est pas impossible à condition d'abandonner les *a priori*. Il ne faut pas partir vaincue d'avance. ●

«
Je note que depuis une dizaine d'années, les lignes bougent, et aujourd'hui mon groupe de recherche est constitué d'environ 40 % de femmes.
»



C'est un délicat ajustement des systèmes contrôlant les optiques de précision qui est en cours sur la plateforme ATTOLab. Équipement d'excellence, la structure accueille des lasers attosecondes, guidés et façonnés par ces dispositifs optiques, pour l'étude des mouvements des électrons dans la matière. Ces travaux s'inscrivent dans la continuité de ceux que menait Anne L'Huillier, prix Nobel de physique 2023, au CEA.

WHITEFROG
CEA
ROSSTAINING





Déconsommation et innovation ?

Un oxymore indispensable

Par Stéphane Sarrade

directeur des programmes énergies au CEA.

« *Celui qui croit qu'une croissance infinie peut continuer indéfiniment dans un monde fini est soit un fou, soit un économiste.* » Cette pensée de Kenneth Boulding (1910-1993) résonne (raisonne ?) d'autant plus dans notre monde occidental qu'en tant qu'économiste, il savait que pour qu'il y ait croissance, le consommateur doit pouvoir consommer sans trop se poser de questions. Face à l'urgence climatique, compte tenu de notre addiction aux matières premières et de notre appétit énergétique, une transformation immédiate de nos modes de consommation s'impose. Il ne s'agit pas ici d'inciter à la décroissance – qui ressemblerait alors à un renoncement global – mais plutôt de promouvoir la déconsommation. Ce concept émergent intègre l'argument de la science, de la technologie et de l'innovation pour repousser les frontières du monde inéluctablement fini qu'avait entrevu Paul Valéry en 1931 quand il indiquait que le « *temps du monde fini commence* ».

Comment définir la déconsommation ? C'est nous encourager à reconstruire notre rapport aux biens matériels, et à l'impact environnemental de nos choix de vie, personnels et professionnels.

Une réflexion personnelle sur nos habitudes permet de repenser la manière dont nous consommons et d'évaluer les conséquences de nos choix sur notre bien-être, sur la société et sur l'environnement. De quoi avons-nous réellement besoin et qu'est-ce qui a de la valeur ? C'est le premier axe de réflexion.

Le second repose sur la prise de conscience de nos moyens d'actions. Assez naturellement, il s'agit de privilégier les produits durables, robustes, de seconde

main, réparables, recyclables, afin de lutter contre l'obsolescence et de réduire effectivement notre empreinte environnementale, sans renoncer pour autant à ce qui est important pour notre qualité de vie.

Quant au troisième axe, il est moins intuitif car plus technique et lié à l'innovation. Un téléphone facilement réparable par son propriétaire et capable de fonctionner au minimum sept ans tout en intégrant de nouveaux systèmes d'exploitation est ainsi un produit deeptech qui intègre science et technologie. Le numérique frugal,



La déconsommation, c'est nous encourager à reconstruire notre rapport aux biens matériels et à l'impact environnemental de nos choix de vie.



les matériaux biosourcés de nos futurs textiles, les systèmes énergétiques bas carbone sont autant de domaines qui vont nourrir les développements nécessaires à une approche raisonnée de la consommation, voire à une déconsommation massive.

Finalement, consommer en diminuant notre empreinte carbone sans significativement réduire notre niveau de vie n'est pas une utopie : consommer moins et mieux des objets à haute valeur ajoutée intellectuelle, tout en « économisant » les matières premières et en rejetant un minimum de

déchets de toute sorte est possible dès maintenant, à condition que la société et les acteurs industriels se saisissent du sujet. Les efforts de recherche et d'innovation doivent donc porter sur des objets et des services un peu moins orientés vers le simple profit ou la performance, mais intégrant davantage de facteurs de déconsommation.

Les chercheurs aiment répondre à des questions et les ingénieurs résoudre des problèmes. Ils contribueront sans nul doute à construire ensemble l'édifice immense de la déconsommation. ●

Notre sélection



autour de notre présence à la *World Nuclear Exhibition* qui s'est tenue du 28 au 30 novembre 2023 à Villepinte.



Le talk show vidéo

Retrouvez le replay de notre LinkedIn live « Des petits réacteurs nucléaires : pour quoi faire ? », diffusé le 29 novembre. Une occasion unique de faire le point sur ces dispositifs d'avenir.



Les SMR en 3 minutes

Au fait, quand on parle de petits réacteurs nucléaires, sait-on toujours ce qu'ils sont ? Découvrir les SMR et les AMR, c'est ce que l'on vous propose en moins de trois minutes chrono.



La newsletter

Une fois tous les deux mois sur LinkedIn, la newsletter du CEA, c'est un dossier d'actualité au cœur de nos métiers. Après le cycle du carbone, c'est au tour du nucléaire d'y être scruté. Lisez-la, partagez-la, et abonnez-vous (aussi) !



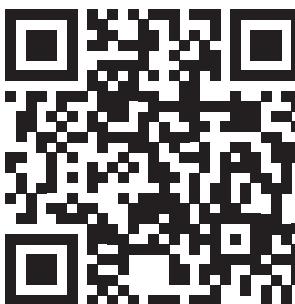
La bande dessinée

La collection *Ma recherche au CEA* s'enrichit d'un deuxième tome consacré au mix énergétique, soit l'indispensable mobilisation de toutes les énergies (bas carbone, nucléaire et renouvelables), pour répondre aux enjeux climatiques. État des lieux à travers le travail de neuf doctorants de plusieurs centres du CEA.



Dans les labos

Nouvelle immersion dans un labo du CEA, où l'on caractérise les éléments qui se sont formés dans les pastilles de combustible irradiées au cœur des réacteurs nucléaires. C'est le dernier épisode en date de notre série *Tu me fais visiter ?*



Le baromètre

Selon le dernier baromètre de l'Autorité de sûreté nucléaire, le rapport des Français au nucléaire évolue positivement. Ils sont désormais 46 % (contre 43 % en 2021) à se déclarer favorables au nucléaire : c'est un niveau record jamais atteint. L'analyse complète est disponible sur son site.

MÈLÈS

M
È
L
È
S

Si vous avez lu les trois dossiers de ce numéro,
vous retrouverez quelques mots-clés cachés
dans cette grille. Rayez-les horizontalement
ou verticalement et reconstituez une célèbre formule
d'après Saint-Sylvestre !

C	A	B	R	I	E	S	S	A	I
R	T	R	E	N	N	I	A	N	O
A	R	E	A	N	E	T	N	N	N
N	E	V	C	O	R	E	T	E	I
E	S	E	T	V	G	S	E	S	S
P	E	T	E	A	I	A	R	E	E
I	A	B	U	N	E	N	J	E	U
R	E	S	R	T	E	C	H	N	O
S	T	A	R	T	U	P	O	N	N
E	D	I	S	R	U	P	T	I	F

BREVET
CABRI
CRANE
DISRUPTIF
ENERGIE
ENJEU
ESS
ESSAI
IA
INNOVANT
IONISE
TECHNO
REACTEUR
RJH
RES
SANTE
SITES
STARTUP
TEP

E	D	I	S	R	U	P	T	I	F
S	T	A	R	T	U	P	O	N	N
R	E	S	R	T	E	C	H	N	O
I	A	B	U	N	E	N	J	E	U
P	E	T	E	A	I	R	E	E	
E	S	E	T	V	G	S	E	S	S
N	E	V	C	O	R	E	T	E	I
A	R	E	N	N	I	A	N	O	
R	T	R	E	N	N	I	A	N	
C	A	B	R	I	E	S	S	A	I

TRÈS BONNE ANNÉE



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
et sur nos réseaux sociaux



Une dernière info
pour la route ?
L'encre de cette
revue représente
seulement
61 kg de CO₂ émis
soit **0,05%**
de l'empreinte
carbone totale
de la revue.



*Rendez-vous ici
pour découvrir la revue !*