

14 LA REVUE DU CEA

RECHERCHE FONDAMENTALE

**Source de
connaissances
et d'innovations**

- Page 15

CYBERSÉCURITÉ

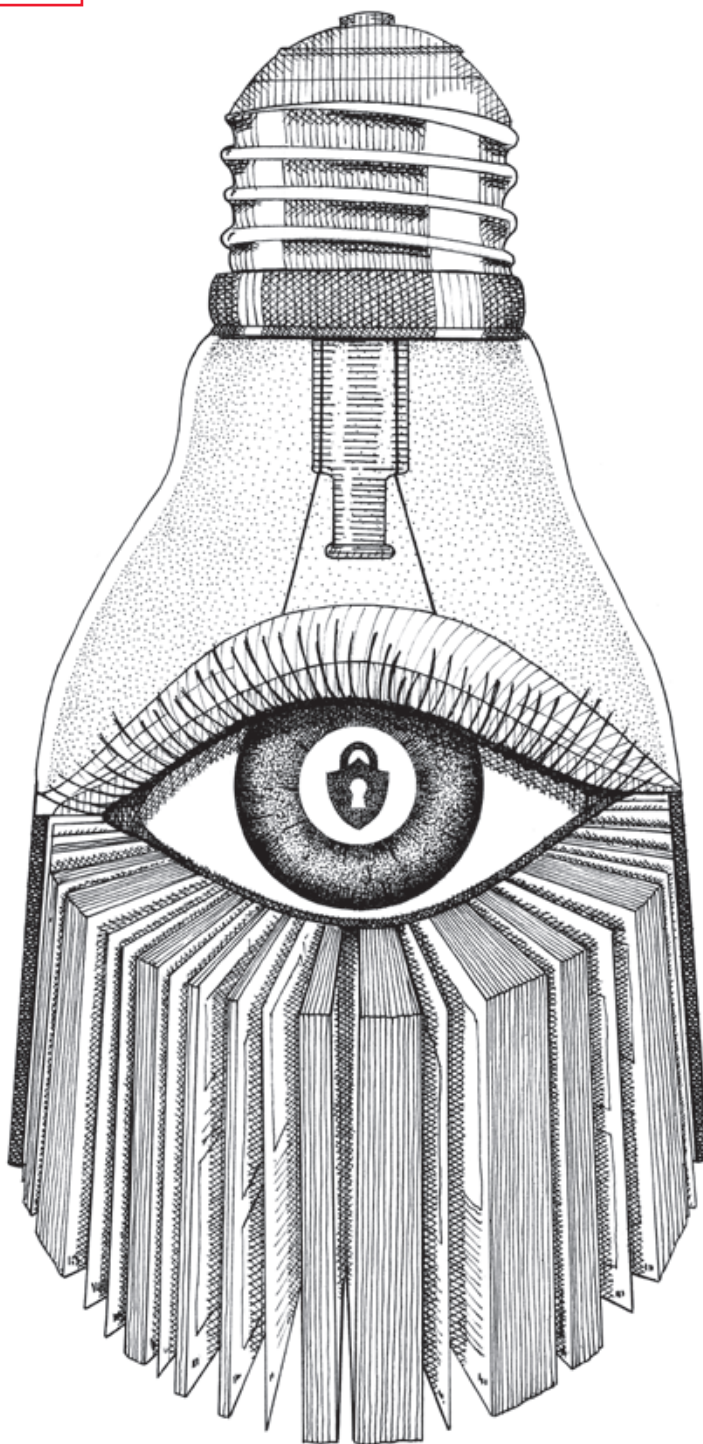
Le défi du siècle

- Page 32

FORMATION

**Garantir
et maintenir
les compétences**

- Page 48



AUTOMNE 2026

Revue éditée par le CEA

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

Directeur de la publication

Anne-Isabelle Etiennevre

Rédaction en chef

Laetitia Baudin

Rédaction

Laetitia Baudin, Audrey Dufour, Sylvie Rivière

Iconographie

Christelle Comoy

Comité éditorial

Renaud Blaise, Étienne Bouyer, Henri-Pierre Charles,
Vincent Coronini, Katrin Dumoulin, Stéphane Loubière,
Laurent Nalpas, Séverine Paillard, Virginie Silvert
et Olivier Vacus.

Illustration de couverture

La Hache illustration

Conception graphique

bearideas

Des remarques, des suggestions ?

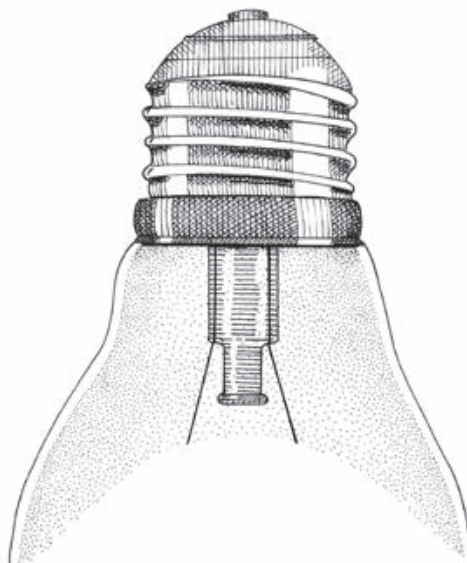
Écrivez-nous à revue@cea.fr

ISSN 2999-926X

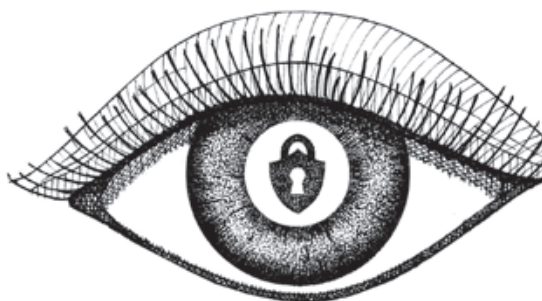
Éclairer l'inconnu

Repousser sans cesse les frontières de la connaissance et dessiner une nouvelle compréhension du monde, c'est l'objectif de la recherche fondamentale.

Au CEA, cette quête traverse la matière, l'Univers, le vivant, le climat ou encore la physique quantique, faisant grandir le socle des connaissances pour imaginer les technologies de demain et contribuer à relever les grands défis de notre époque.



La couverture déchiffrée



Garder l'œil ouvert

Dans notre monde toujours plus numérique, tout ne se voit pas. Une faille peut rester cachée jusqu'au moment où elle est découverte et exploitée... avec les risques que l'on connaît ! Les chercheurs du CEA développent des technologies de sécurisation pour renforcer la résilience des systèmes, du composant électronique jusqu'aux infrastructures numériques.

Partager les savoirs

Il y a les connaissances que l'on apprend, les gestes que l'on acquiert et l'expérience que l'on transmet. Au CEA, la formation rapproche les générations et les univers : étudiants, chercheurs, ingénieurs et techniciens y construisent leurs compétences au contact les uns des autres. Un passage de relais indispensable pour que les savoir-faire d'aujourd'hui continuent de nourrir ceux de demain.



1. François Daviaud est le directeur de la recherche fondamentale du CEA. Un univers qu'il connaît bien, en tant que spécialiste de la physique des systèmes complexes et hors équilibre. Il s'attache aujourd'hui à préserver un tout autre équilibre : celui d'une recherche fondamentale au service des missions du CEA, qui laisse aux chercheurs leur part de liberté créatrice et ouvre les possibles.

© C. Comoy/CEA

2. Pascal Yvon est directeur de l'INSTN, l'école de formation du CEA dans les domaines de l'énergie nucléaire, des systèmes énergétiques bas carbone et des technologies pour la santé. Avec plusieurs milliers de postes à pourvoir dans la filière nucléaire, le planning est chargé !

© L.Godart INSTN/CEA



7. Responsable du programme Cybersécurité à la Direction de la recherche technologique du CEA, **Vincent Cachard** est un spécialiste de la sécurité du monde numérique. Depuis très longtemps impliqué dans le transfert de technologie entre la recherche et l'industrie, il coanime et coordonne les travaux de R&D en cybersécurité du CEA au sein du programme transverse cybersécurité.

© P. Jayet/CEA

3. Catalin Miron, physicien spécialiste des interactions lumière-matière, est le directeur des infrastructures de recherche, de l'Europe et de l'international à la Direction de la recherche fondamentale du CEA.

Son parcours l'a convaincu que les grandes avancées scientifiques se construisent rarement seuls : elles naissent aussi d'instruments d'exception, d'équipes pluridisciplinaires qui se rencontrent et de collaborations qui dépassent les frontières.

© J. Bernède/CEA

4. Directeur des ressources humaines à la Direction de la recherche technologique du CEA, **Arnaud Gaultier** revient pour nous sur les besoins en compétences dans un univers numérique où tout va très vite.

© CEA

5. Philippe Mazabraud a effectué l'essentiel de sa carrière à la Direction des applications militaires du CEA où il occupe aujourd'hui la fonction de directeur du programme transversal sécurité globale. À ce titre, il participe à faire du CEA un acteur de confiance en France et en Europe dans le domaine de la cybersécurité et s'implique dans la construction et la réussite des écosystèmes.

© G. Martel/CADAM

6. Vice-présidente « Cybersécurité produit » chez Schneider Electric, **Nathalie Feyt** a d'abord travaillé pour Gemalto puis Thales. Experte en systèmes embarqués critiques et en gouvernance de la cybersécurité, elle revient dans ce numéro sur la nécessité, pour les industriels, d'anticiper les cyberattaques, et souligne tout l'intérêt du laboratoire commun qu'elle copilote avec le CEA.

© Schneider Electric

Éditorial

À l'heure de la fête de la Science, ce nouveau numéro de *La Revue du CEA* vient nous rappeler à quel point elle est essentielle dans tous les aspects de notre vie quotidienne et de citoyen. Qu'il s'agisse de protéger données, outils et systèmes dans un monde toujours plus numérique ou d'explorer différents champs scientifiques pour nourrir connaissances et innovations.

De science, il est ainsi question lorsqu'on évoque la cybersécurité. Invisibles mais puissantes, les cyberattaques font planer une menace majeure et omniprésente sur les États, les entreprises et les citoyens. Le CEA a intégré très tôt ses enjeux pour la protection de ses activités sensibles, notamment au service de la Défense nationale, et développe des solutions innovantes au service de tous (p. 32). Sa collaboration de longue date avec Schneider Electric en est une parfaite illustration.

La science est évidemment omniprésente dans tous nos travaux en recherche fondamentale. Intégrés au CEA dès sa création, ils irriguent ses grandes missions autour des énergies bas carbone, de la santé, du numérique, de la défense et de la sécurité (p. 14). En repoussant les frontières de la connaissance scientifique, ils ouvrent la voie aux innovations de demain.

Mais que serait la science sans scientifiques ? Le CEA participe activement à leur formation en accueillant doctorants et postdoctorants dans ses labos, en misant sur le compagnonnage et des cursus internes pour des profils très spécialisés. Dans le nucléaire, l'organisme accompagne l'ensemble des acteurs de la filière, à travers l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (p. 57). Un rôle crucial pour garantir un vivier de talents et le maintien de l'expertise française.

Bonne lecture !

Merci également à

Marion Andriant
Nathalie Besson
François-Marie Bréon
Cécile Breyton
Fanny Caputo
Julien Cartier
Philippe Chomaz
Cyrille de Saint-Jean

Guilhem Dif-Pradalier
Xavier Garbet
Leïla Gicquel
Olivier Heron
Frédéric Laurent
Pascal Malterre
Arthur Margarit
Hughes Metras

Hervé Moutarde
Myriam Pannetier-Lecœur
David Pignol
Stanislas Pommeret
Cyril Poupon
Ioan-Lucian Prejbeanu
Amélie Roué
Samuel Saada

Stéphanie Simon
Nadia Treppe
Romain Wacquez
François Willaime
Abdelrahman Zakaria
Hajar Zgour
Et tous ceux qui ont aidé
à réaliser cette revue !

01

La recherche fondamentale au CEA **14**



Entretien avec François Daviaud, Directeur de la recherche fondamentale du CEA **16**

Des questions et des réponses **20**

La collaboration, clé de la recherche **23**

Programmes croisés **24**

Des instruments d'exception **26**

Et aussi...

Dans les coulisses du CEA 8

Portfolio : CTAO, un observatoire de l'univers extrême 28

Carte blanche : relier les acteurs de la souveraineté numérique 44

Autour du monde 46

La belle image 62

Playlist 64

À vous de jouer 65

Save the date 66

02

Cybersécurité, le défi du siècle 32



Le cyberspace, une nouvelle frontière 34

Des projets pour sécuriser l'invisible 38

Du labo à la start-up 41

Renforcer la résilience collective 42

Relier les acteurs de la souveraineté
numérique 44

03

Acquérir et maintenir des compétences, un enjeu d'avenir 48



La formation par la recherche :
entre tremplin et continuité 50

Défense : répondre à des besoins très
spécifiques 52

Numérique : rester à la pointe 55

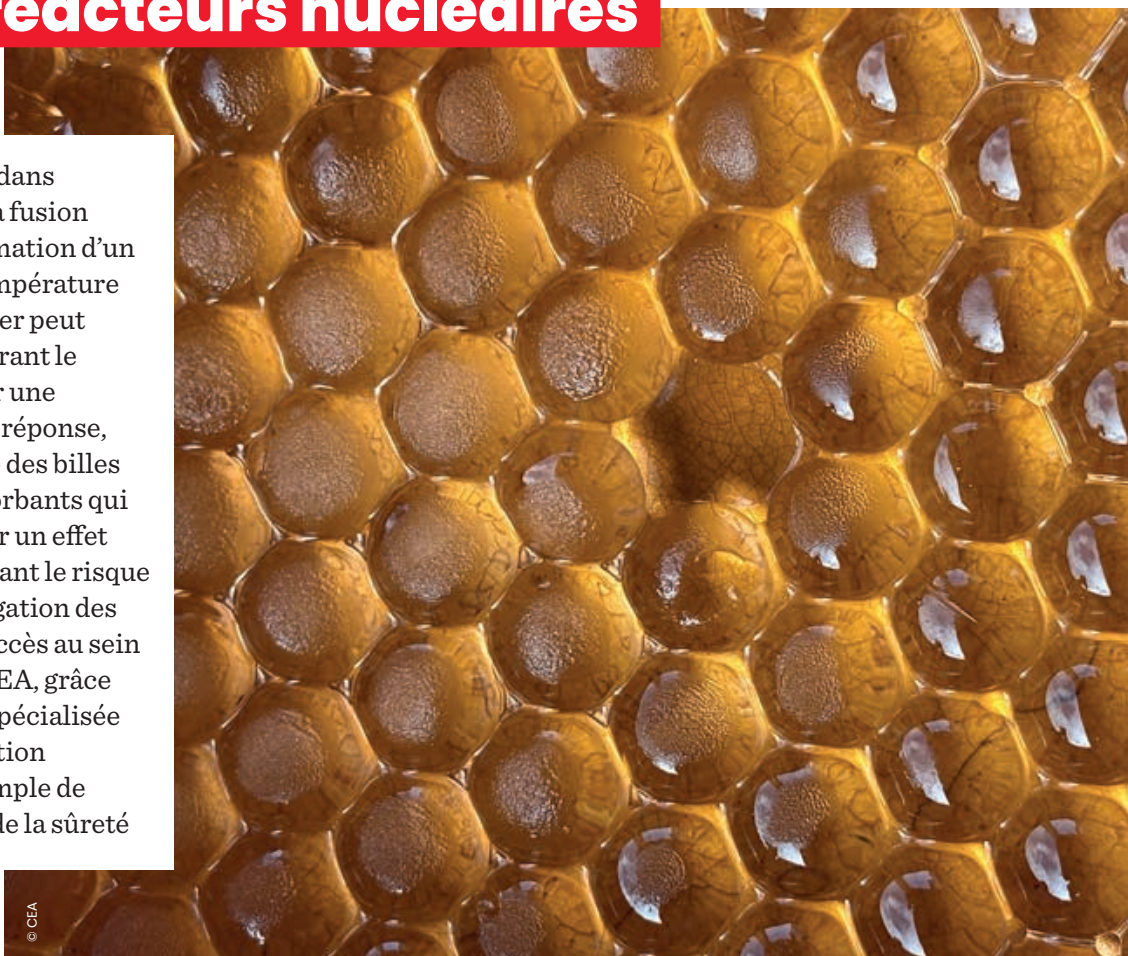
Nucléaire : consolider une filière d'avenir 57

Dans les coulisses du CEA

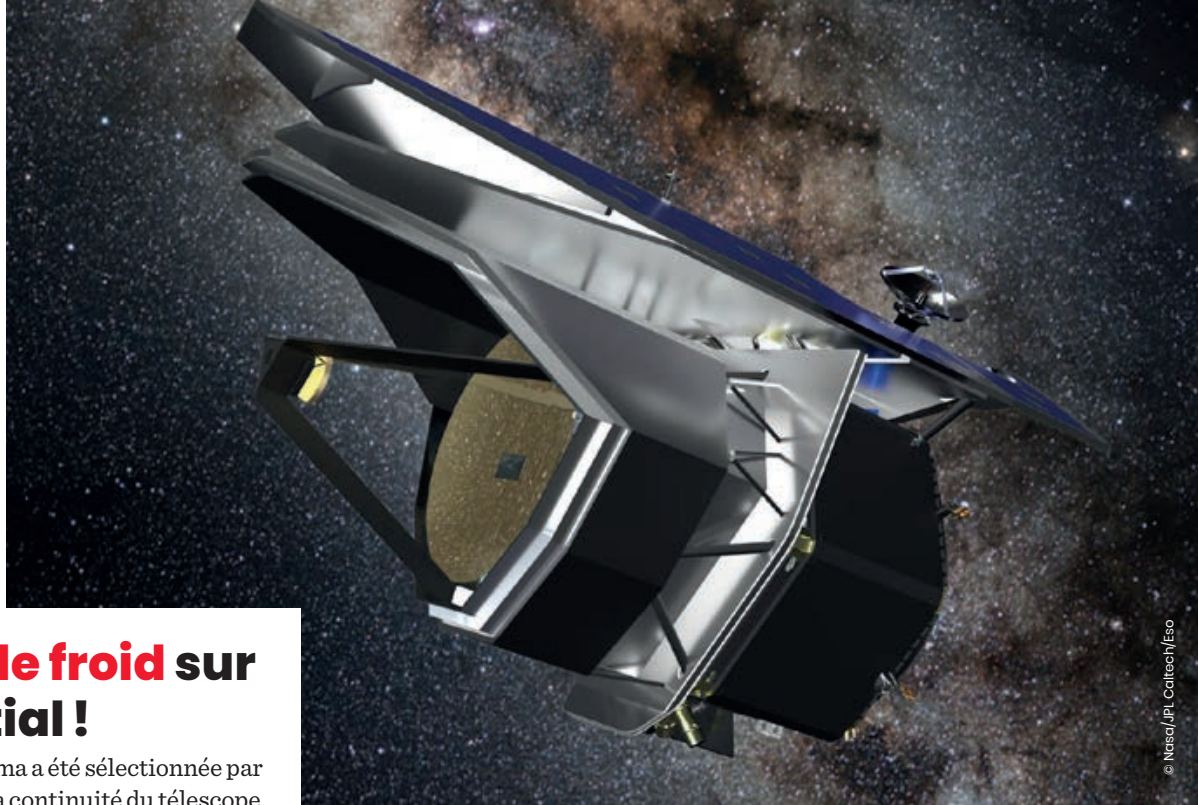
Des galeries de Fourvière à la fréquence optimale des bus en passant par une nouvelle moisson de prix pour les équipes du CEA, tour d'horizon de l'actualité qu'il ne fallait pas manquer !

Des billes pour les réacteurs nucléaires

En cas d'accident grave dans un réacteur nucléaire, la fusion du cœur entraîne la formation d'un mélange à très haute température appelé corium. Ce dernier peut interagir avec l'eau assurant le refroidissement et créer une explosion de vapeur. En réponse, Framatome a développé des billes de polymères superabsorbants qui permettent de conserver un effet réfrigérant tout en limitant le risque éventuel. L'effet de mitigation des billes a été testé avec succès au sein de l'institut Iresne du CEA, grâce à l'installation Krotos, spécialisée dans l'étude de l'interaction corium-eau. Un bel exemple de coopération au service de la sûreté des réacteurs !



© CEA



Coup de froid sur le spatial !

La mission Prima a été sélectionnée par la Nasa. Dans la continuité du télescope Herschel, elle observera l'Univers dans l'infrarouge lointain, afin de mieux comprendre la coévolution des galaxies et de leurs trous noirs supermassifs ou encore la formation des planètes et de leurs atmosphères. Prima embarque deux instruments, dont l'imageur PRIMAgger, auquel contribue le CEA sur son volet cryogénique. La cryogénie est vitale pour des mesures de qualité dans l'infrarouge, et le CEA possède une expertise reconnue sur le sujet (*voir La Revue n°13*). Il avait déjà contribué au télescope Herschel avec un système de réfrigération à 300 millikelvins (mK), soit -272,85 °C. À moins d'un degré du zéro absolu ! Pour Prima, les efforts vont encore plus loin, avec un lien thermique à seulement 100 mK.



Pour en savoir plus sur la mission Prima, c'est ici !

La fréquence optimale des bus

En étudiant 3 000 lignes de bus dans 19 métropoles mondiales, une équipe internationale impliquant le CEA a mis en lumière une loi d'échelle robuste qui guide la fréquence des bus, en fonction de la demande et quelle que soit la ville. Dévoilée par une analyse statistique des données réelles, cette étude peut permettre aux opérateurs de transports d'estimer l'évolution du temps d'attente en fonction des moyens mis en œuvre (hausse du nombre de bus et/ou de chauffeurs). Publiée dans la revue scientifique *PNAS*, elle démontre ainsi qu'une hausse de budget n'a pas les mêmes effets selon le niveau de saturation du réseau. Au-delà des bus, ces travaux peuvent porter des enseignements sur l'optimisation dans les réseaux de flux, par exemple le transport de nutriments dans les végétaux ou de sang dans les systèmes vasculaires.



© Maëva Bardy -
Fondation
Tara Ocean

À travers le Genoscope, unité mixte de recherche (CEA /CNRS/université d'Évry), le CEA participe à la première mission scientifique de Tara Polar Station et Éric Pelletier a embarqué pour plusieurs mois d'hivernage. Le laboratoire flottant a entamé en septembre une dérive volontaire dans l'océan Arctique central, afin d'étudier le changement climatique et ses effets sur la biodiversité de cette région hors norme.

« L'océan Arctique est l'une des régions les moins étudiées de la planète, alors qu'il est au cœur des enjeux liés au changement climatique. »

Éric Pelletier, directeur de recherche au Genoscope.

**À consommer
sans modération**



En voiture, en train, à pied ou chez vous, branchez-vous sur cette série de podcasts proposée par Radio France !

La science en perspective : regards croisés du CEA vous emmène au cœur des grandes questions scientifiques. En compagnie de la journaliste Marie Treibert, deux experts du CEA croisent leurs regards pour éclairer chaque sujet, des trous noirs à la physique quantique en passant par le cerveau.



Une rentrée très récompensée !

Le CEA et ses équipes ont remporté de nombreux prix et distinctions ces derniers mois. Impossible d'être exhaustif ! Ces récompenses soulignent la qualité des travaux menés, et cela dans tous les domaines.

PRIX L'ORÉAL POUR LES FEMMES

ET LA SCIENCE : trois doctorantes au sein du CEA sont distinguées, Camille Moisset et Marie-Anne Carpine en astrophysique, et Justine Duval dans les énergies décarbonées.

BOURSE ERC STARTING GRANT :

quatre chercheurs travaillant au sein de laboratoires et plateformes du CEA ont reçu une telle bourse, pour des recherches sur les réseaux de neurones, les interactions

moléculaires ou encore les ondes gravitationnelles.

Côté nucléaire, le **GRAND PRIX SFEN** a consacré les 70 ans de l'INSTN et « l'excellence pédagogique du CEA ». Ce centre de formation « *unique dans le paysage français et qui irrigue depuis 1956 toute la filière nucléaire* » est à découvrir page 57.

Le prix Jacques Gaussens, qui récompense un chercheur de moins de 35 ans, a été décerné à Laura Matteo, du CEA Cadarache, pour

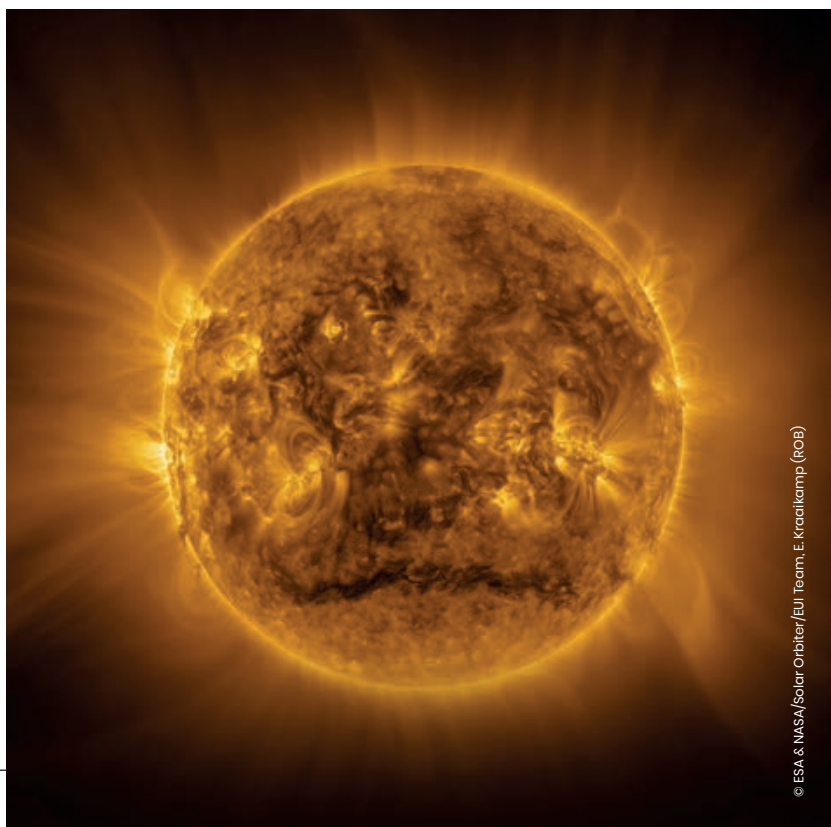
ses travaux en thermohydraulique. Dans le domaine de la transmission des sciences, le prix Sfen-Bertrand Barré a été attribué à deux chercheurs du CEA, Andrea Zoia et Davide Mancusi, ainsi qu'à Albin Gagnepain, pour leur cycle de conférences historiques sur les piles de Chicago.

CONCOURS I-LAB ET I-PHD :

six projets deeptech du CEA ont été lauréats de ces concours d'innovation de l'État.

À la fin des temps

Que se passera-t-il sur Terre lorsque le Soleil arrivera en fin de vie, dans environ cinq milliards d'années ? Si on sait qu'il se transformera en une étoile géante, des centaines de fois plus grande qu'aujourd'hui, les astronomes débattent, depuis des décennies, de ce que cela implique pour la Terre. Notre planète sera-t-elle engloutie par le Soleil en expansion, ou parviendra-t-elle à s'échapper vers une orbite plus éloignée ? Une étude menée par l'université catholique de Louvain et le CEA-Irfu montre que la réponse reste incertaine et, surtout, qu'elle réside dans la compréhension des mécanismes physiques complexes liés au vieillissement des étoiles ; un problème que les astronomes commencent tout juste à élucider.



Un microlabo pour étudier le diabète

Des chercheurs du CEA ont conçu un minilaboratoire sur puce, pas plus grand qu'une carte de crédit, pour étudier le diabète de type 1 au plus près des conditions réelles. Entièrement automatisé, l'outil mime le fonctionnement du pancréas : il inclut des îlots de Langerhans individuels qui produisent l'insuline, une micropompe qui fournit le glucose, récupère et mesure la quantité d'insuline sécrétée. La plateforme permet surtout de mettre en évidence les différences de fonctionnement entre les îlots d'un même donneur, une variabilité jusqu'ici difficile à observer. Cette avancée ouvre de nouvelles perspectives dans l'élaboration de traitements personnalisés.

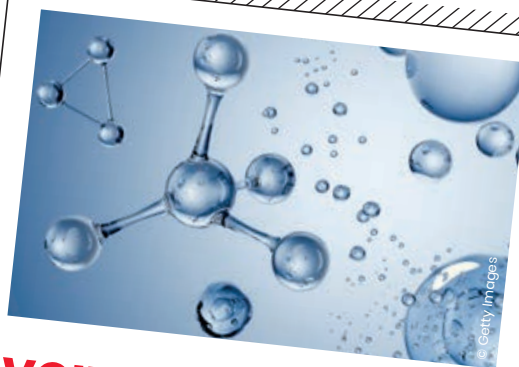


→
Fabrication d'une carte microfluidique.



Cancer du sein : une piste

Pourquoi certaines chimiothérapies cessent-elles d'agir ? Parce que certains médicaments induisent une modification importante de l'activité de nombreux gènes dans les cellules tumorales. Comment ? En agissant sur l'ajout ou le retrait de petites étiquettes biochimiques – les groupements méthyle – sur l'ADN. Ces mécanismes, dits épigénétiques, modulent l'expression des gènes. Une avancée qui pourrait aider à mieux prédire l'efficacité d'une chimiothérapie et contribuer à surmonter certaines résistances aux traitements contre le cancer.



VOIR L'EAU VIBRER

Des chercheurs du CEA ont réussi à visualiser les mouvements d'une molécule d'eau, plus précisément les oscillations de sa liaison O-H, à l'échelle de la femtoseconde (soit un millionième de milliardième de seconde) ! Un exploit réalisé grâce à une combinaison d'impulsions laser infrarouge et de sondes ultraviolettes ultrabrèves. Au-delà de la compréhension fondamentale de l'eau, cette première ouvre la voie au suivi en temps réel et à la compréhension des échanges d'énergie au sein de tous les systèmes moléculaires en solution. Vaste programme !

Matheux dès le plus jeune âge

Le cerveau des enfants serait déjà « préprogrammé » avant même l'apprentissage formel des mathématiques à l'école. C'est ce que montre une étude d'imagerie cérébrale menée à NeuroSpin sur une cinquantaine d'enfants de la fin de la maternelle jusqu'au CE1. Dès 5-6 ans, ils activent les mêmes régions cérébrales que les adultes face à des énoncés mathématiques, et l'activité diffère selon qu'il s'agit de phrases d'arithmétique ou de géométrie.

« Plusieurs mécanismes sont à l'œuvre : durant les premières années d'école, ce réseau s'amplifie là où c'est nécessaire, s'automatise quand c'est possible, et s'enrichit à mesure que l'enfant apprend et comprend de nouveaux concepts », résume Théo Morfoisse, premier auteur de cette étude.



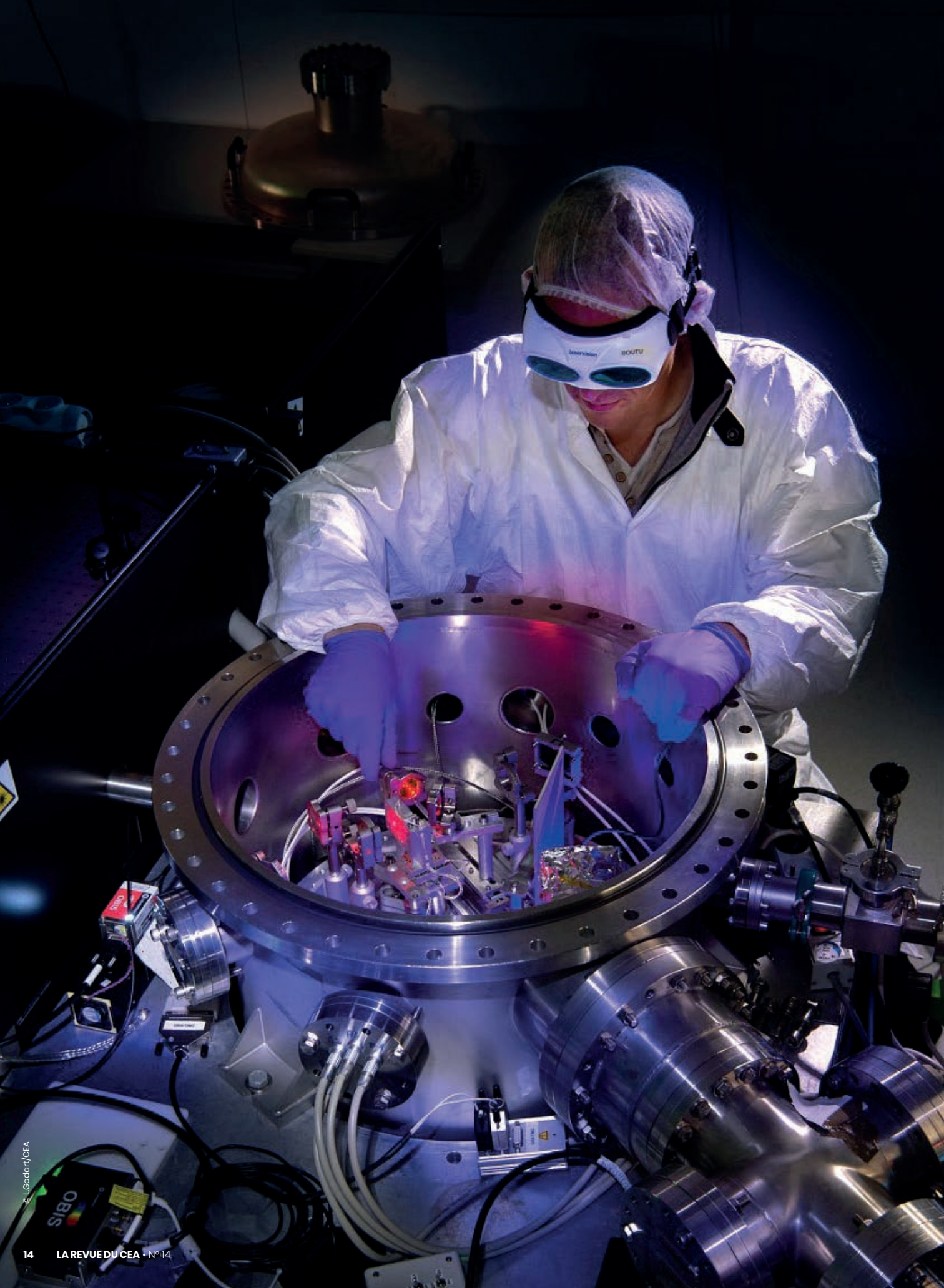
Une histoire d'eau

Les galeries creusées sous la colline de Fourvière pour approvisionner Lyon en eau livrent peu à peu leurs secrets. En datant des dépôts retrouvés dans deux d'entre elles, une équipe pluridisciplinaire impliquant le LSCE (CEA-CNRS-UVSQ), le Service archéologique de la Ville de Lyon et l'École de l'aménagement durable des territoires a montré que ce système d'adduction d'eau* a été mis en place à l'époque romaine et a fonctionné pendant près de sept siècles. Les travaux se poursuivent pour reconstituer la qualité des eaux qui circulaient dans ces galeries.

* Ensemble des techniques, infrastructures et canalisations permettant de transporter l'eau depuis sa source naturelle (rivière, nappe phréatique) jusqu'aux lieux de traitement ou de consommation.



→
La colline de Fourvière



stratégique
LA RECHERCHE
audacieuse
FONDAMENTALE
collaborative
AU CEA
engagée

Lois fondamentales de l'Univers, quantique, matériaux, fusion, climat et environnement, technologies pour la santé, neurosciences, IA... La recherche fondamentale au CEA explore tout un panel de champs scientifiques sans jamais lâcher son fil rouge, celui des grandes missions confiées à l'organisme dans les énergies bas carbone, le numérique, la médecine du futur, la défense et la sécurité, qu'elle vient nourrir de son corpus de nouvelles connaissances et d'innovations instrumentales.



La plateforme Nanolight du CEA met en oeuvre quatre lignes de faisceaux lasers femtosecondes, disponibles pour un large éventail d'applications en métrologie, physique, imagerie nanométrique femtoseconde, etc.

Ouvrir des possibles, au service de l'organisme

François Daviaud, physicien expert des systèmes complexes, dirige la recherche fondamentale du CEA. Il partage ici sa vision d'une recherche au service des missions de l'organisme, à la fois créative et cultivant un esprit d'excellence.



Pourquoi le CEA dispose-t-il de ses propres équipes de recherche fondamentale ?

François Daviaud — La recherche fondamentale a été présente dès la création du CEA. Elle est intimement liée à la construction du nucléaire civil et de la dissuasion nucléaire. Les grands noms de la physique et de la chimie de l'époque y ont contribué. La biologie et la santé ont naturellement suivi. Aujourd'hui, elle est toujours aussi essentielle, car elle irrigue les grandes missions opérationnelles du CEA autour des énergies bas carbone, de la santé, du numérique, de la défense et de la sécurité, en lien direct avec la souveraineté scientifique, technologique et industrielle du pays. Mais nous devons aussi rester à la frontière des connaissances, à l'écoute des signaux faibles, en laissant libre cours à la créativité de nos chercheurs. Sur le quantique par exemple,

si nous sommes aujourd'hui dans la course, c'est parce que dans les années 1980, des chercheurs ont eu la liberté d'explorer un domaine inconnu. Des travaux depuis récompensés par un prix Nobel, celui de Michel Devoret, qui préfigurent l'ordinateur quantique. Il en est de même pour Anne L'Huillier et Pierre Agostini sur les lasers ultrarapides. Nous devons maintenir ce subtil équilibre entre les missions du CEA et une certaine liberté associée à une prise de risque. Du point de vue organisationnel, la recherche fondamentale est concentrée dans la direction que je pilote, mais on la retrouve aussi, davantage ciblée, dans les autres directions opérationnelles.

En quoi la recherche fondamentale du CEA se distingue-t-elle ?

F. D. — Le statut d'ingénieur-chercheur de nos personnels, unique dans la recherche française, est un point important. Il permet de faire valoir non seulement les publications scientifiques ou invitations à des congrès, mais aussi l'aptitude à mener un projet, fédérer une équipe ou valoriser un résultat de recherche. La « culture projet », adossée aux compétences remarquables de nos équipes en instrumentation, concep-



Nous devons aussi rester à la frontière des connaissances, en laissant libre cours à la créativité de nos chercheurs. »

tion d'équipements de pointe et d'infrastructures de recherche, est d'ailleurs une composante forte au CEA. L'IRM Iseult, la plus puissante au monde, est en cela emblématique : sa conception a associé à la fois des ingénieurs, des spécialistes des aimants venant de la physique nucléaire et des particules et des chercheurs en neurosciences. C'est précisément ce continuum du chercheur à l'ingénieur, transverse au sein de tout le CEA, qui permet d'aboutir à une recherche d'une telle qualité.

Nous avons également la capacité de répondre à des demandes sociétales ou venant de l'État. Nous l'avons fait lors de la crise de la Covid-19 avec la mise en place rapide de projets de recherche autour des stratégies vaccinales, du diagnostic de l'infection, de la physiopathologie de la maladie et de la thérapeutique associée. Le « *changement d'échelle* » sur le quantique et le numérique annoncé par le président de la République, la stratégie dans le domaine de la fusion ou la relance du nucléaire sont d'autres exemples plus récents, qui vont aussi mobiliser nos forces en soutien à nos collègues des autres directions opérationnelles.

La plupart des travaux que nous conduisons sont très importants pour la souveraineté, la réindustrialisation, voire pour la sécurité nationale. Je pense notamment à notre contribution à la lutte contre les menaces NRBC, lorsque nous développons des tests de détection ultrarapide d'agents infectieux. Les industriels viennent aussi nous soumettre des questions de R&D en apparence appliquée, mais qui soulèvent des problématiques très fondamentales. Je pourrais citer de nombreux exemples, comme celui de la réalisation d'un mélange homogène d'une pâte de verre, très visqueuse, qui impose de revenir à la mécanique des fluides et à des mathématiques très fondamentales. C'est donc tout ceci, mis ensemble, qui fait notre singularité.

Le collectif est-il une valeur importante ?

F. D. — Il est essentiel. C'est ce qui fait la force du CEA, l'organisme assurant une stabilité salubre à la recherche fondamentale

La recherche fondamentale

EN BREF

Un objectif

Repousser les frontières de la connaissance scientifique. La recherche fondamentale ne vise pas une application immédiate, mais elle rend possible les innovations futures.

Deux moteurs

La curiosité : comprendre les phénomènes et leurs mécanismes ; les restituer sous la forme de lois mathématiques ou empiriques.

L'audace : viser une rupture pour relever un défi scientifique, sociétal (santé, changement climatique, énergie, etc.) ou technologique.

Une démarche scientifique

La formulation et la mise à l'épreuve d'hypothèses, de modèles ou de théories à partir d'observations, d'expériences, de démonstrations ou de simulations conduites selon des méthodes explicites, rigoureuses, vérifiables et reproductibles.

Des outils révolutionnaires

La recherche fondamentale nécessite souvent l'invention, le développement et l'utilisation de concepts théoriques, d'outils numériques, d'instruments et d'infrastructures d'exception permettant d'explorer des phénomènes, des échelles ou des domaines jusqu'alors inaccessibles : ultrarapides, infiniment petits, grands, complexes, éloignés dans le temps ou l'espace...

dans le contexte actuel de polycrises, qualifié de VICA (volatile, incertain, complexe et ambigu). Nous travaillons en lien étroit avec le monde académique – organismes de recherche comme le CNRS ou l’Inserm, universités, en particulier Paris-Saclay et Grenoble – en opérant ensemble de nombreuses infrastructures. Et bon nombre de nos laboratoires – plus d’une trentaine – sont des unités mixtes de recherche (UMR). J’aime à dire que nous œuvrons en « coopération », c’est-à-dire en collaboration tout en gardant une certaine émulation entre laboratoires.

Le financement actuel de la recherche étant par ailleurs beaucoup fondé sur le chercheur individuel, il est impératif de maintenir cet esprit collectif, des chercheurs aux personnels de support. Les exemples de projets réussis le démontrent.

Qu’en est-il de l’excellence de nos travaux ?

F. D. — Le CEA est l’un des seuls RTO¹ en Europe, si ce n’est le seul, doté d’une recherche fondamentale de ce niveau. J’ai déjà évoqué nos trois récents prix Nobel. L’excellence se mesure aussi à travers les nombreux autres prix décernés à nos chercheurs et chercheuses, tout comme au nombre de bourses ERC qui leur sont attribuées. Nous en sommes aujourd’hui à plus de 150, ce qui nous place loin devant les autres RTO européens.

En recherche fondamentale, nous sommes aujourd’hui connus, et reconnus, dans de nombreux domaines : le numérique au sens large (quantique, calcul haute performance, IA, traitement de données, spintronique...), les lasers, la physique des particules, l’astrophysique, les systèmes complexes, la fusion, les nouveaux matériaux, les sciences du climat et de l’environnement, les technologies pour la santé, les neurosciences, les maladies infectieuses, les systèmes biologiques, etc.

Signe de la reconnaissance de la qualité de nos travaux et de nos équipes, nous sommes impliqués dans la plupart des grands programmes structurants de la recherche fondamentale, nationaux et au-delà (ANR,



Nous avons la capacité de répondre à des demandes sociétales ou venant de l’État. »

PEPR², France 2030, ERC, EIC³, etc.), et dans un grand nombre d’infrastructures de recherche.

La créativité est, elle aussi, encouragée avec le programme « Audace ! »...

F. D. — Le programme « Audace ! »⁴ représente une opportunité incroyable. Parce qu’on redonne une capacité, au CEA et à ses partenaires (plus de 100), de refaire de la recherche non planifiée. Autrement dit, d’explorer des pistes plus disruptives qui pourraient générer des innovations stratégiques pour la France (voir La Revue n°8). « Audace ! », financé par France 2030, est lancé depuis 2024, et c’est un grand succès : 35 projets dits structurants⁵ ont été proposés (10 ont été sélectionnés) et nous avons reçu 157 lettres d’intention de projets d’amorçage⁶, puis retenu 46 !

Quels messages adresseriez-vous à des étudiants et jeunes chercheurs ?

F. D. — Je leur dirais : venez ! Nous avons des équipes formidables, au meilleur niveau, avec des instruments de pointe et une capacité à travailler ensemble. Le tout sur des missions, qui, je le constate, parlent aux jeunes : l’énergie, le climat, l’environnement, la santé, le numérique, les grandes questions de l’Univers, la frontière entre l’inerte et le vivant, et même la défense et les activités duales. Certains ont très envie de découvrir des vaccins ou des traitements pour contrer d’éventuelles actions malveillantes. Le CEA, avec sa recherche fondamentale, est l’endroit pour cela ! ●

(1) Organisme de recherche technologique.

(2) Programmes et équipements prioritaires de recherche.

(3) Conseil européen de l’innovation.

(4) « Audace ! » répond à une demande de l’État, faite à ses cinq principaux organismes de recherche, de mener des programmes de « recherche à risque », en y associant les autres acteurs de la recherche.

(5) Les projets « structurants » sont financés sur quatre ans.

(6) Les actions « d’amorçage », d’une durée plus réduite, encouragent l’émergence d’idées nouvelles et le test de concepts originaux.

500

DOCTORANTS
en recherche fondamentale

160

bourses ERC

Les bourses du Conseil européen de la recherche sont attribuées à des chercheurs sur le seul critère de l'excellence scientifique.

Environ
2 500

publications/an
en recherche fondamentale

33

UMR
(Unités mixtes
de recherche)

1 100

HDR
(Habilitation à diriger des
recherches)

49

IR

que le CEA pilote, copilote
ou auxquelles il contribue
(sur les 107 IR de la feuille
de route française).

*Les IR sont des infrastructures de
recherche incluses dans la stratégie
nationale du ministère de la Recherche.*

Dont **14 IR***
(sur les 23 IR* existantes)

*L'ajout de l'astérisque signifie
qu'il s'agit d'une infrastructure
d'importance nationale majeure ou
de niveau international.*

Les IR font l'objet d'un fléchage
budgétaire spécifique.*

22

**PEPR de stratégies
d'accélération**
que le CEA copilote
ou auxquels il participe
(sur les 28 existants).

*Les Programmes
et équipements prioritaires
de recherche sont les volets
« recherche amont »
des grandes stratégies
nationales d'accélération.*

15

PEPR exploratoires
que le CEA copilote
ou auxquels il participe
(sur les 22 existants).

*Ces programmes sont conçus
pour explorer des sujets très
amont et prometteurs en matière
d'applications potentielles.*

3

prix Nobel

- **Anne L'Huillier** et **Pierre Agostini**,
colauréats du Nobel de physique 2023 pour
leurs travaux sur la physique de l'attoseconde.
- **Michel Devoret**, colauréat du Nobel de
physique 2025 pour des travaux fondateurs
du calcul quantique moderne.

Questions & réponses

À quoi sert la recherche fondamentale ? Qu'ont découvert les chercheurs du CEA ? Comment ont-ils contribué à accroître le socle des connaissances universelles ? Mieux que de longs discours, *La Revue* vous propose une courte sélection de belles avancées, piochées dans les quelque 2 500 publications annuelles des chercheurs.



© Cyril Fresillon BIAM CNRS Images

Préparation d'enrichissement du sol par une sélection de bactéries.

Comment les plantes réagissent-elles au stress ?

Manque d'eau, canicule, pollution... Les plantes sont soumises à des conditions de plus en plus extrêmes. Comprendre comment elles s'acclimatent est essentiel pour développer des cultures et des forêts plus résilientes face au changement climatique.

👉 Des chercheurs du CEA, dans une collaboration franco-germano-brésilienne, ont montré qu'il est possible d'améliorer la résistance des arbres en agissant sur les micro-organismes associés à leurs racines. Ils ont enrichi le sol avec des bactéries sélectionnées dans des sols soumis à la sécheresse afin de renforcer la tolérance de jeunes plants avant leur transplantation en forêt. Après un stress hydrique contrôlé, les plants inoculés ont présenté jusqu'à 71% de symptômes en moins que les témoins. Un résultat transposable à l'échelle mondiale.

Le tour du sujet avec Nathalie.



La phagothérapie, espoir santé face à l'antibiorésistance ?

Les phages sont des virus tueurs de bactéries très répandus dans l'environnement. Ils sont une alternative historique aux antibiotiques et sont extrêmement prometteurs face aux ravages de l'antibiorésistance. Les chercheurs décryptent leurs structures, notamment par la microscopie électronique, et leurs modes d'action. Objectif : multiplier leurs applications médicales.

👉 Ils ont découvert comment la famille majoritaire de phages s'y prend pour entrer dans la bactérie avant d'en prendre le contrôle, puis la détruire après s'y être multipliée : l'arrimage du phage à une des protéines de la paroi bactérienne modifie subtilement, en cascade, la forme des protéines du virus, libérant une énergie suffisante pour perforer la paroi, tels des ressorts qu'on relâche. Un résultat majeur selon la communauté des virologues.

Quelle électronique pour demain ?

La spintronique et son extension, l'orbitronique, sont de nouvelles voies explorées pour une électronique du futur plus rapide, plus performante et sobre en énergie, qui pourra notamment répondre aux besoins des IA. Elles exploitent respectivement le spin de l'électron (une propriété quantique associée à son moment magnétique) et son déplacement sur des orbitales électroniques. Mais avant d'envisager de futures solutions commerciales, il faut encore mieux comprendre cette nouvelle physique.

👉 Le PEPR exploratoire Spin, copiloté par le CEA, a initié une nouvelle dynamique autour de la spintronique. Les chercheurs commencent par exemple à réaliser de nouveaux capteurs magnétiques ultrasensibles fonctionnant à base de skyrmions (minuscules tourbillons magnétiques de spins, stables et mobiles, qui peuvent servir à mesurer, transporter ou stocker une information).

La spintronique, avec Isabelle, c'est facile !



Comment étudier le fonctionnement du cerveau ?

En partie grâce à Iseult. Avec ses 11,7 teslas, c'est l'IRM la plus puissante au monde. Et elle a été conçue par le CEA ! Mobilisant des expertises en champ magnétique, radiofréquence, cryogénie et traitement du signal, Iseult offre une résolution inédite de quelques centaines de micromètres pour l'étude du cerveau humain.

👉 Cet instrument de rupture constitue un levier majeur pour les neurosciences. Il permettra de mieux comprendre les mécanismes des maladies neurodégénératives, des troubles psychiatriques et, à terme, des pathologies neurodéveloppementales. Il ouvre aussi de nouvelles perspectives pour l'étude des réseaux fonctionnels cérébraux et le développement d'approches innovantes en neuroéducation. La cartographie fine du cervelet, connu pour être impliqué dans de nombreuses pathologies notamment psychiatriques, est désormais possible. Les chercheurs ont déjà développé des protocoles d'imagerie pour l'observer !

De quoi l'infiniment petit est-il fait ?

Pour décrire notre monde à la plus petite échelle connue, ses constituants et leurs interactions, les physiciens ont élaboré une théorie quantique fondée sur un petit nombre de champs de matière et de force, dont les quanta sont les particules élémentaires, et sur le champ de Higgs, qui imprègne le vide et donne une masse aux particules qui interagissent avec lui : c'est le modèle standard de la physique des particules. Mais tout est encore loin d'être bien compris. Les experts du CEA, au sein de collaborations internationales, participent donc à la réalisation d'expériences sur de grands instruments, comme le LHC (*Large Hadron Collider*) du Cern. Ils contribuent aussi à la conception des installations et de leurs gigantesques détecteurs de particules.

👉 En 2012, la contribution du CEA à la découverte du boson de Higgs a été décisive. En 2026, les chercheurs ont même mesuré sa masse à un niveau de précision record, grâce à de nouvelles techniques développées pour calibrer l'énergie des photons.

↓ Tunnel de l'accélérateur du LHC, au Cern (Genève), dont les équipes du CEA ont conçu une partie des équipements.



Suivez Kiara, à l'Institut de physique théorique.

Que nous apprennent les climats du passé sur notre avenir ?

Les climats du passé nous offrent des clés précieuses pour comprendre les changements climatiques actuels et futurs. Les scientifiques, dont ceux du CEA, les traquent dans des archives naturelles, comme les carottes de glace ou les sédiments marins. Les connaissances qui en découlent viennent enrichir les modèles utilisés par le Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) pour anticiper l'évolution du climat. Ces études sur le passé ont par exemple confirmé les couplages étroits entre les variations de température à la surface de la Terre, le niveau des mers et la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Les équipes du programme européen Epica ont foré en 2025 une nouvelle carotte de glace de 2 750 m de long, sous la calotte antarctique. Elle offrira un aperçu unique de l'histoire du climat et de la composition de l'atmosphère sur au moins 1,2 million d'années – dépassant le précédent record de 800 000 ans établi en 2023 – permettant notamment de comprendre les mécanismes des grands cycles glaciaires du dernier million d'années.



Projet Epica – Récupération d'une carotte de glace.

Fusion nucléaire : peut-on contrôler les phénomènes de turbulence ?

Produire de l'électricité grâce à la fusion nucléaire est une voie prometteuse. De nombreux défis restent à relever, comme le contrôle de la turbulence. Ces tourbillons imprévisibles, qui agitent le plasma, peuvent à la fois perturber son confinement, faisant chuter sa température, ou au contraire nettement l'améliorer. Mieux comprendre ce phénomène est crucial.

Les chercheurs ont pour la première fois modélisé l'interaction de la turbulence du plasma avec le limiteur, cette pièce essentielle qui empêche le plasma de toucher, et donc de détériorer, la paroi du tokamak (la machine qui permet d'étudier la fusion). Ce contact crée un puits de chaleur localisé qui déstabilise le bord du plasma, puis une turbulence qui se propage vers l'intérieur, organisant des écoulements qui déclenchent la transition vers un régime de confinement amélioré. Ces mécanismes, mis en équation dans le code Gysela, ont été partagés avec la communauté scientifique.

Laissez-vous guider par Julien auprès du tokamak West.



Comment expliquer l'expansion de l'Univers ?

L'Univers est en expansion, et celle-ci s'accélère, grâce à une possible énergie dite « noire » qui représenterait près de 70 % de l'énergie du cosmos. Comprendre cette grande énigme, c'est aussi potentiellement découvrir une nouvelle loi de la physique ou une nouvelle composante fondamentale de l'Univers.

Grâce à un grand télescope équipé d'une instrumentation inédite, la collaboration Desi a cartographié la distribution spatiale de galaxies et de quasars jusqu'à des distances de plusieurs milliards d'années-lumière, c'est-à-dire des temps très reculés (jusqu'à environ 11 milliards d'années). Surprise : l'accélération de l'expansion de l'Univers aurait diminué. Les propriétés de l'énergie noire auraient donc varié au fil du temps. De quoi remettre en question le modèle standard de la cosmologie, qui considère cette énergie comme constante ! La recherche continue, sur Desi mais aussi via le projet Euclid (qui cartographie l'Univers depuis l'espace) ou encore avec l'observatoire américain Vera-Rubin. Et toujours avec les astrophysiciens du CEA, qui construisent une partie des instruments et analysent les données !

En savoir plus sur Desi avec Étienne.



La collaboration, clé de la recherche

La recherche fondamentale, par la complexité des questions qu'elle aborde et par les moyens techniques et humains qu'elle exige, est presque toujours collaborative. Une nécessité que nous rappelle Philippe Chomaz, directeur scientifique et des programmes de la Direction de la recherche fondamentale.



« La connaissance est une grande bibliothèque que l'humanité construit génération après génération. La recherche fondamentale la bâtit page après page en écrivant de nouvelles ou en corrigeant des plus anciennes.

La connaissance a la propriété singulière de se partager sans se diviser. Un professeur qui transmet son savoir à un élève ne le perd pas. Les remarques de l'élève, puis ses travaux, le font même progresser. Un jour, l'élève dépasse le maître et forme à son tour la génération suivante. C'est le principe du compagnonnage scientifique de la formation par la recherche (voir Dossier 03 p. 48).

La même logique vaut entre équipes. Partager les connaissances ne retire rien à chacune, mais renforce au contraire les partenaires. La collaboration réunit les compétences, croise les approches et permet de traiter des problèmes qu'aucun partenaire ne pourrait résoudre seul. C'est la raison d'être des unités mixtes de recherche et des collaborations internationales.

Certaines recherches exigent des moyens humains et financiers dépassant les capacités d'un seul pays. Cette *big science* ne recherche pas la taille pour elle-même, mais est nécessaire par la complexité des questions, le coût des instruments, la durée et la taille des programmes qui permettent d'y répondre. Le

Cern, le télescope James Webb, Euclid ou le premier séquençage du génome humain en sont des illustrations.

Les équipes du CEA jouent souvent un rôle clé dans ces grandes collaborations par leurs recherches et leurs capacités technologiques à développer des outils de pointe, des imageurs spatiaux aux supercalculateurs. Cette

combinaison de science et de technologie, particulièrement forte au CEA, est précieuse, car il faut bien connaître un outil pour le pousser jusqu'à ses limites.

La collaboration et le partage ne peuvent toutefois pas être sans limite quand cela risque d'affecter la propriété intellectuelle, la souveraineté économique

ou les intérêts de défense. Les recherches duales comme le quantique l'illustrent : une même avancée peut avoir des impacts scientifiques, industriels ou militaires. Il faut alors définir ce qui peut être partagé, avec qui, et selon quelles règles.

Toutefois, les ruptures naissent de la rencontre et la collaboration conditionne la capacité à découvrir. L'enjeu est donc de trouver le juste équilibre entre collaboration et protection afin de continuer à construire notre avenir scientifique et technologique en préservant nos actifs et notre souveraineté. ●

La collaboration réunit les compétences, croise les approches et permet de traiter des problèmes qu'aucun partenaire ne pourrait résoudre seul.



Programmes croisés

En croisant les compétences, les outils et les points de vue, les équipes avancent plus vite et les nouvelles idées émergent, notamment pour lever des verrous scientifiques. Au sein du CEA, la collaboration est aussi de mise. Illustration à travers deux programmes de recherche impliquant des équipes aux univers bien différents.

Impuls'Fission

accompagne la relance du nucléaire

Les équipes

Des physiciens, chimistes, numériciens, etc. issus de tout le CEA, rassemblés autour de ceux de la Direction des énergies et de la recherche fondamentale.

L'enjeu

Accompagner la relance du nucléaire en France – qui se traduit notamment par la construction de nouveaux réacteurs nucléaires de type EPR2, le développement de petits réacteurs modulaires (SMR), l'extension de la durée de fonctionnement des réacteurs actuels et la fermeture du cycle du combustible – par une nouvelle impulsion donnée au développement des connaissances et concepts susceptibles de contribuer aux évolutions futures du nucléaire.

La méthode

Un programme incitatif de recherche fondamentale et amont sur l'énergie nucléaire de fission, lancé en mars 2026. Objectif ? Améliorer la compréhension des phénomènes d'intérêt pour le nucléaire en explorant

une large palette de disciplines clés – matériaux, chimie, physique du noyau et neutronique, mécanique des structures, thermohydraulique, biologie-santé, numérique, couplages systèmes, instrumentation, socio-technico-économie et environnement – pour développer de nouvelles approches, en rupture avec l'existant, et sonder des concepts émergents.

Les projets

Quatre premiers projets ciblés ont été retenus en juillet 2026. Parmi les questions explorées : comment séparer des actinides mineurs, ces déchets radioactifs produits par les réacteurs nucléaires, grâce à l'ingénierie des protéines, pour en optimiser la gestion ? Peut-on adapter une technologie de détecteur de muons, conçue pour la physique des particules, en détecteur de neutrons, au service de la sûreté nucléaire ?

Laboratoire dédié à la R&D sur la chimie
des actinides. ↓



Cophynu

explore la physique liée aux noyaux des atomes

Les équipes

Les physiciens nucléaires de la Direction des applications militaires et ceux de la recherche fondamentale.

L'enjeu

Mieux comprendre la physique du noyau des atomes (structure, réactions nucléaires, etc.) et fournir des données nucléaires.

Au-delà de l'accroissement du savoir, ces nouvelles connaissances sont utiles pour améliorer la précision et la fiabilité des codes de calcul qui simulent un réacteur nucléaire (conception, étude du vieillissement, de sûreté, etc.) ou une arme nucléaire dans le cadre du programme Simulation (voir La Revue du CEA n° 12). Elles permettent aussi de mieux préparer les expériences de physique nucléaire et d'analyser les données expérimentales collectées.

La méthode

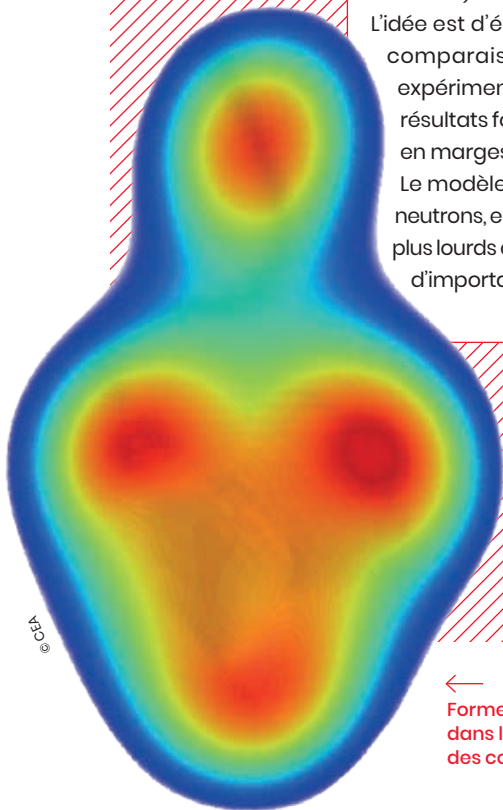
Proposer de nouveaux développements théoriques et s'appuyer sur des expériences de physique conduites sur des grandes infrastructures nationales ou internationales comme les accélérateurs d'ions du Ganil (Caen).

Les avancées

Depuis 20 ans, la collaboration Cophynu a produit une centaine de publications. Parmi les résultats les plus significatifs : le développement d'un modèle de structure nucléaire permettant de prédire les propriétés d'un vaste ensemble de noyaux atomiques, en lieu et place d'une multitude de modèles différents. Ce modèle global est basé sur une approche *ab initio*, qui s'appuie sur les propriétés élémentaires des noyaux et des interactions entre ses constituants (protons et neutrons).

L'idée est d'évaluer au mieux les incertitudes théoriques afin de permettre les comparaisons les plus pertinentes des prédictions du modèle aux données expérimentales. Ces incertitudes induisent aussi des barres d'erreur dans les résultats fournis par la simulation, qui se traduisent sur les objets du monde réel en marges de dimensionnement, et donc en coût et en performances.

Le modèle, capable de traiter des noyaux comprenant jusqu'à 150 protons et neutrons, est toujours en cours d'amélioration pour prendre en charge des noyaux plus lourds et à terme calculer des réactions nucléaires. Une entreprise qui mobilise d'importantes ressources de calcul.



Forme 3D du noyau de néon 20, calculée avec le modèle développé dans le cadre de Cophynu. Elle permet de mieux comprendre les résultats des collisions d'ions lourds impliquant le néon 20, conduites sur le LHC.

Des instruments d'exception

Explorer les grandes questions de la recherche fondamentale exige bien souvent l'utilisation de très grands instruments : accélérateurs de particules, télescopes géants ou encore supercalculateurs. Concevoir, construire, puis utiliser ces installations requiert une très haute technicité. L'une des spécialités du CEA.

© N. Moura, Synchrotron SOLEIL



« Au CEA, dans les unités opérationnelles, nous sommes tous des ingénieurs-chercheurs », débute Catalin Miron, le directeur des infrastructures de recherche, de l'Europe et de l'international à la Direction de la recherche fondamentale. Une culture qui imprègne chaque projet de recherche, lorsque la science la plus fondamentale se mêle à l'ingénierie. « Je me souviens de ma thèse au CEA. J'étais alors un jeune chercheur plutôt formé sur les aspects théoriques, et très vite, j'ai été amené à faire de l'électronique, de la mécanique, de l'optique, bref de l'ingénierie. » En 2026, l'état d'esprit dans l'organisme est le même. « Nous partons toujours de questions scientifiques, puis nous imaginons l'outil qui permettrait d'y répondre au mieux », poursuit-il. En sollicitant s'il le faut toutes les compétences de la maison, comme celles des ingénieurs du nucléaire et des experts en microélectronique et en neutronique, lorsqu'il s'agit de concevoir des détecteurs pour l'ESS, la source pulsée de neutrons la plus puissante

au monde, située en Suède et dont le CEA est partenaire (voir La Revue du n° 11). « C'est aussi cela la richesse du CEA : cette multidisciplinarité et cette facilité de dialogue entre les équipes. »

Savoir gérer les grands projets

C'est ainsi que l'organisme s'est forgé une solide réputation dans la conception et l'utilisation des grands instruments de recherche, avec quelques domaines de prédilection. En premier lieu, celui des accélérateurs de particules, qui repose sur un large champ de compétences : technologies de radiofréquence, cavités accélératrices, cryogénie (voir La Revue n° 13), alignement du faisceau, cibles, etc. Mais aussi celui des impulsions lasers ultrarapides – objet des prix Nobel de physique 2023 d'Anne L'Huillier et Pierre Agostini – des supercalculateurs, aujourd'hui capables d'atteindre l'exaflop/s¹, de la



Le synchrotron Soleil est une IR* pilotée par le CNRS et le CEA. Cet accélérateur fournit une lumière extrêmement brillante dans une large gamme de longueurs d'onde, des infrarouges aux rayons X durs, qui permet d'explorer la structure et la dynamique de la matière inerte ou biologique jusqu'à l'échelle atomique.

neuroimagerie avec l'IRM le plus puissant au monde, des tokamaks et même de l'exploration de l'espace, en contribuant à la conception d'instruments de mesure et d'imagerie pour les télescopes et les satellites. Le CEA coordonne et participe également à plusieurs infrastructures nationales de recherche en biologie et santé (INBS), comme en génomique, infectiologie, imagerie biomédicale et neurosciences.

Mener à bon port de tels projets ne s'improvise pas. Aux compétences scientifiques et à la maîtrise des technologies s'ajoute l'art de savoir piloter, diriger, harmoniser et valider les contributions de nombreuses équipes ultraspecialisées ou interdisciplinaires, souvent réparties dans différents pays d'Europe, voire hors Europe, le tout en tenant un calendrier et des budgets conséquents. Un héritage sans doute lié au rôle central du CEA tenu dans la construction de la filière électronucléaire française ou encore dans celle de la dissuasion nucléaire.

Du Japon aux États-Unis

Ces qualités de concepteur, de bâtisseur et d'opérateur de grandes infrastructures de recherche sont reconnues tant au niveau européen qu'à l'international. Comme l'explique Catalin Miron, « *nous sommes régulièrement sollicités pour être membre d'IR* (voir p. 19) internationales, évidemment en tant qu'utilisateurs, pour y produire de la belle science au service de nos programmes, mais aussi pour contribuer à leur conception, sur les plans scientifique et technique, puis à leurs fonctionnement et évolutions futures* ». Les exemples ne manquent pas : l'accélérateur de deutons LIPAc au Japon dans le cadre de l'Approche élargie², le laser à électrons libres EuXFEL en Allemagne, ou encore l'accélérateur de protons PIP-II à Fermilab aux États-Unis. ●

À SAVOIR

La feuille de route nationale des infrastructures de recherche auxquelles la France participe est régulièrement mise à jour. La prochaine édition, à laquelle contribue le CEA aux côtés des autres opérateurs de recherche, est attendue pour 2027.

(1) Un exaflop/s correspond à un milliard de milliards (10^{18}) d'opérations par seconde.

(2) L'Approche élargie est un accord de coopération entre l'Union européenne et le Japon, conclu en 2007, pour accélérer le développement des technologies nécessaires à la fusion nucléaire au-delà d'Iter.

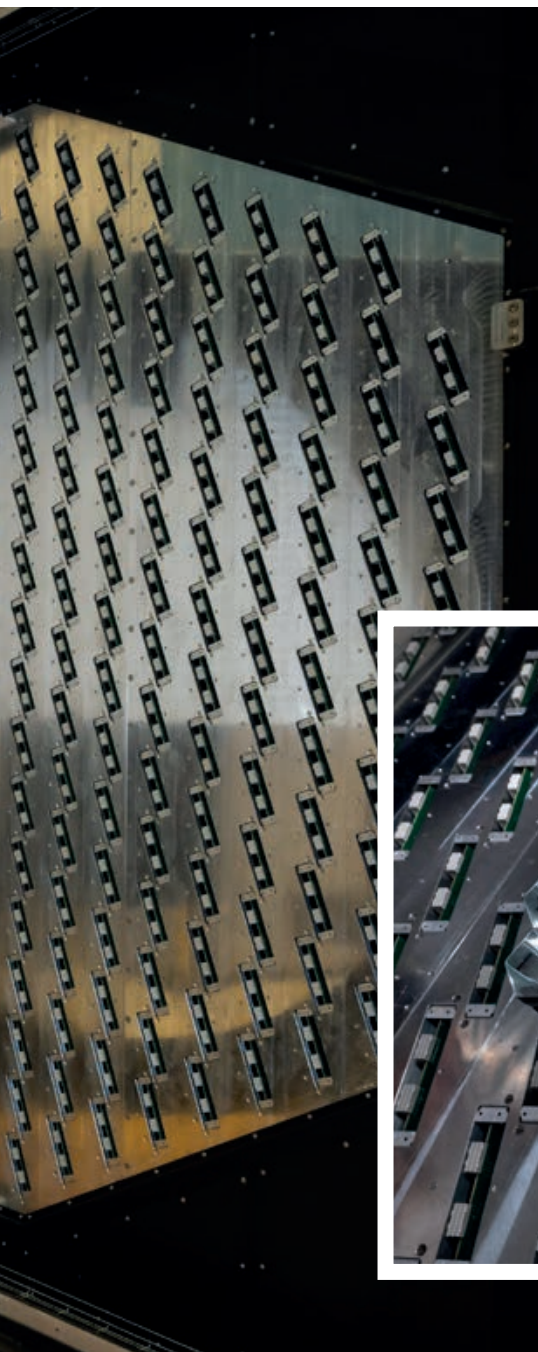
CTAO, UN OBSERVATOIRE DE L'UNIVERS EXTRÊME



1

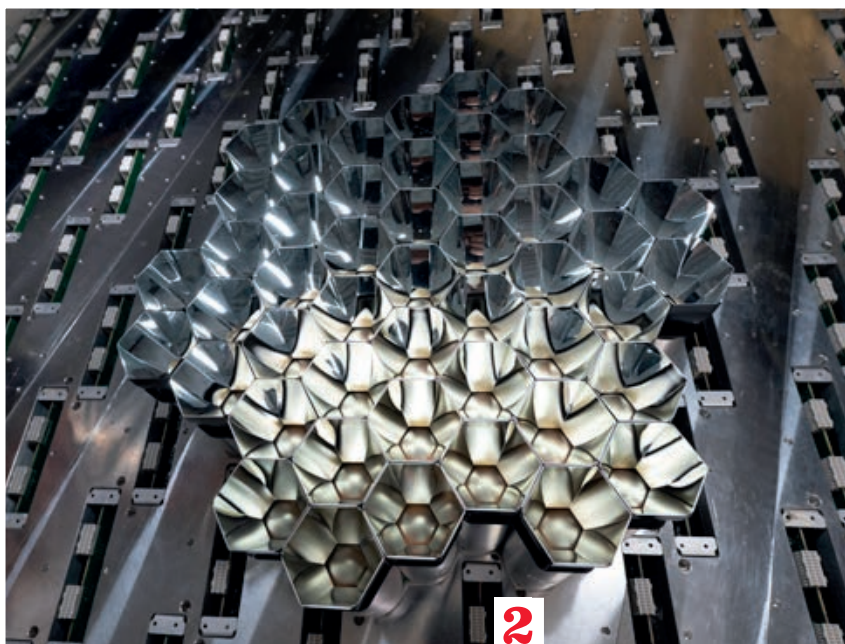
Trois mètres d'envergure et 2,5 tonnes au compteur ! Le CEA a la responsabilité des caméras NectarCam qui équiperont certains télescopes du réseau CTAO.

Chacune comprend 1 855 photodétecteurs, protégés par un hublot.



Le CEA contribue au Cherenkov Telescope Array Observatory (CTAO), un réseau international d'une soixantaine de télescopes répartis au Chili et aux îles Canaries. Cet observatoire est dédié à l'étude des rayons gamma de très haute énergie, 10 milliards de fois plus énergétiques que la lumière visible. Ils sont porteurs d'informations sur les phénomènes les plus violents de l'Univers, comme les explosions d'étoiles massives, les trous noirs ou encore les galaxies actives.

Reportage L. Godart/CEA



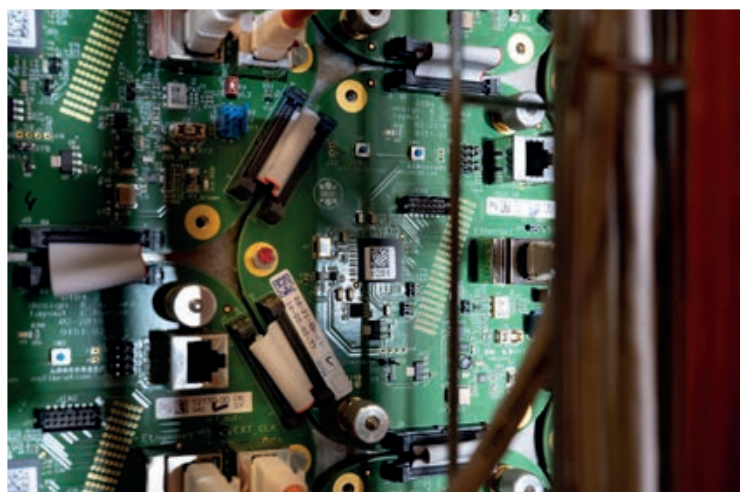
2

Les photodétecteurs viennent capter la lumière Tcherenkov. **Très ténue, cette dernière renseigne les physiciens sur les phénomènes astrophysiques de haute énergie.**



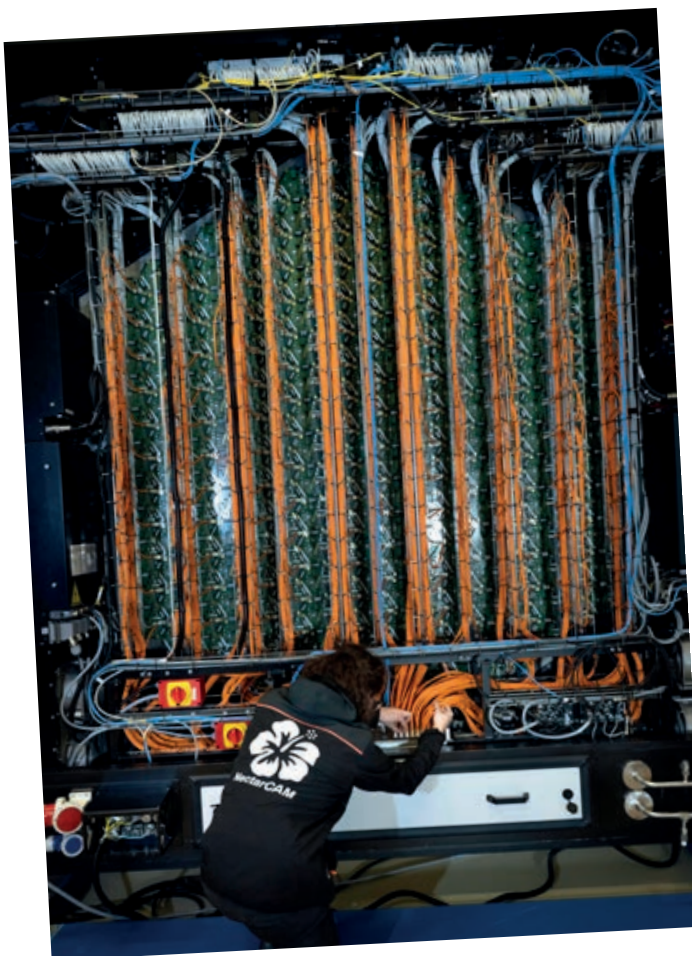
3

Chaque caméra comprend 265 cartes électroniques qui enregistrent et traitent les données récoltées en quelques milliardièmes de secondes seulement. Les caméras sont capables de recueillir et d'analyser une dizaine de milliers d'événements par seconde.



4

L'articulation entre détection (en face avant de la caméra) et analyse (en face arrière) demande une chorégraphie sans faille. Sur la face arrière, chaque couleur de câble correspond à une fonction : orange pour l'alimentation et le déclenchement des acquisitions, gris pour le transport des données, et bleu pour le réseau et le contrôle caméra.





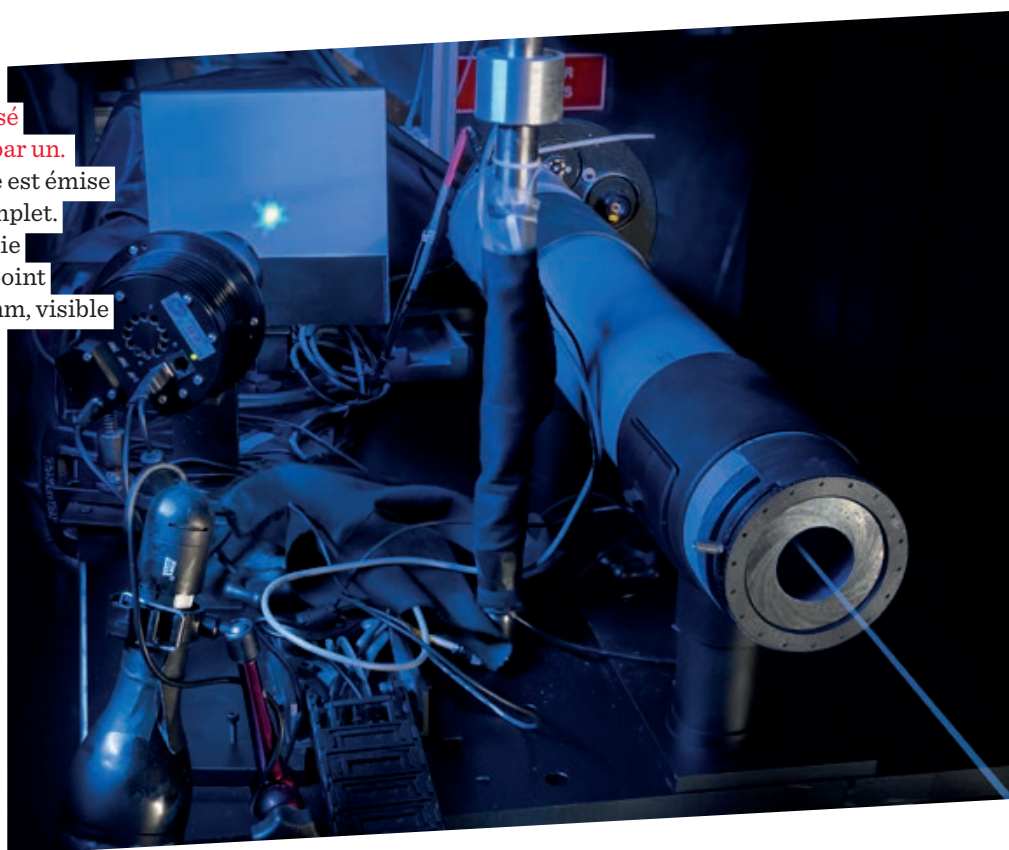
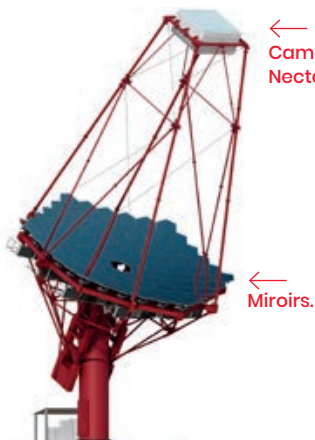
5

Outre les caméras NectarCam, le CEA assure la qualification et la caractérisation des 700 miroirs hexagonaux qui équiperont 7 télescopes. Conçus en partenariat avec l'industriel français Kerdry, ces miroirs comportent une surface réfléchissante formée par un dépôt d'aluminium ultrapur. **Légèrement concaves, ils concentrent la lumière et en renvoient un maximum vers les caméras.**



6

Chaque miroir est caractérisé par les équipes du CEA, un par un. Pour cela, une lumière bleue est émise à 32 mètres, dans le noir complet. En retour, la lumière réfléchie doit se concentrer dans un point de diamètre inférieur à 28 mm, visible sur l'écran blanc.



Cybersécurité, le défi du siècle

DOSSIER
02



Vols de données, intrusions malveillantes, ingérence informationnelle, tentatives de sabotage...

Les cyberattaques font régulièrement, et de plus en plus, la une de l'actualité. Invisibles mais puissantes, elles font planer une menace majeure sur la souveraineté des États, à l'heure où le numérique imprègne chaque pan de nos vies, qu'il s'agisse de finance, de santé, d'éducation ou de sécurité. Maintenir ce cyberspace en sécurité est donc un des défis majeurs de notre époque. Le CEA a intégré très tôt les enjeux de la cybersécurité, à la fois pour la protection de ses activités sensibles, notamment au service de la Défense nationale, et pour celle des citoyens, des entreprises et des institutions. Fort d'une stratégie duale, d'une démarche transverse et de moyens de recherche à la pointe qui en font un acteur de confiance en France et en Europe, le CEA travaille sans relâche à développer des solutions innovantes pour une cybersécurité résiliente, au service d'un monde numérique sûr et de confiance.

Le cyberspace, une nouvelle frontière

Alors que les attaques n'épargnent désormais aucun aspect de notre vie quotidienne, la cybersécurité est devenue un impératif pour la souveraineté des États et la résilience de la Nation. Conscient de l'enjeu, le CEA s'appuie sur une stratégie développée de longue date et des moyens de recherche conséquents, pour soutenir une transformation numérique sans risque au service de ses propres activités, mais aussi des citoyens, des entreprises et des institutions.

Piratage de l'Éducation nationale et des finances publiques après celui de l'Agence nationale des titres sécurisés, fuite de données de France Travail, cyberattaques d'hôpitaux et d'universités... Depuis plusieurs mois, les attaques spectaculaires se multiplient et le débat s'enflamme. Plus que jamais, la cybersécurité est au cœur des enjeux de souveraineté et de résilience des États, avec une dimension économique, stratégique et politique qui va bien au-delà de la seule sécurité de l'ensemble de leurs systèmes d'information. « Comme nos vies, qu'elles soient professionnelles, privées et même citoyennes, sont de plus en plus numériques, il s'agit avant tout d'être en cybersécurité au quotidien, souligne Vincent Cachard, responsable du programme Cybersécurité à la Direction de la recherche technologique du CEA. Plus qu'un domaine d'activité, la cybersécurité est donc avant tout un état à maintenir. »

Car si la nature des menaces (*voir schéma*) reste la même qu'hier, c'est la fréquence et la complexité des attaques qui les rendent aujourd'hui plus prégnantes et préoccupantes. « *Le château fort n'existe pas*, résume Philippe Mazabraud, directeur du programme transversal Sécurité globale à la Direction des applications militaires du CEA. *La question n'est pas tant de savoir si nous serons attaqués, mais quand cela se produira, comment s'y préparer et y répondre de façon à être le plus résilient possible, dans un scénario central où nous ferions face à une augmentation massive, d'ici 2030, des attaques dites hybrides.* » Cette accélération est par ailleurs nourrie par les progrès constants du numérique, notamment dans les domaines de l'IA et du quantique, et portée d'une part par des réseaux cybercriminels de plus en plus professionnels, d'autre part par les tensions géopolitiques mondiales actuelles qui déplacent les zones de conflit, y compris dans le cyberspace.

1999

Le CEA crée ses **deux premières équipes dédiées à la R&D en cybersécurité**, l'une en support à ses activités civiles et l'autre pour certaines de ses activités stratégiques au profit de la défense.

2000

Le CEA reçoit l'agrément des services de l'État pour héberger un **Centre d'évaluation de la sécurité des technologies de l'information (Cesti)** au sein de son institut Leti.

2004

Lancement des premiers travaux sur la plateforme Framac-C, un ensemble d'outils d'analyse de code source (C) par méthodes formelles, essentiel pour éliminer les vulnérabilités par conception.

2009

Création de l'Anssi – Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information.

Les grands objectifs des cyberattaques



L'impératif de la cybersécurité

Dès lors, comment s'organiser pour y faire face ? « Pour renforcer le potentiel de défense, nous jouons principalement sur deux tableaux, rappelle Vincent Cachard. D'une part, le CEA développe des outils pour mieux identifier les vulnérabilités des infrastructures critiques, de leurs composants et de leurs systèmes ; d'autre part, il met au point les technologies permettant de les rendre plus robustes et résilients face aux nouveaux risques et aux nouvelles menaces. » C'est précisément le champ d'action du CEA qui a fait de la cybersécurité un impératif, à la fois pour protéger ses activités dans des secteurs sensibles comme les énergies, la santé et la défense, et pour accompagner les industriels face aux risques et menaces. « Nous disposons d'une expertise en cyber-

défense développée depuis plus de 25 ans pour nos missions au service de la Défense nationale, souligne Philippe Mazabraud. Et de plateformes technologiques à l'état de l'art en cybersécurité permettant de développer et de tester des réponses innovantes aux défis de sécurisation du matériel, des logiciels et des données. L'ensemble fait du CEA un acteur de confiance reconnu tant en France qu'en Europe et capable de construire des écosystèmes réunissant les acteurs majeurs de la cyber. »

Pour renforcer sa « force de frappe », le CEA a regroupé dès 2019 ses activités de recherche et développement en cybersécurité dans un grand programme transversal, qui mobilise aujourd'hui près de 200 ingénieurs-chercheurs répartis dans une quinzaine d'équipes. Celles-ci travaillent

2013

La Loi de **Programmation Militaire 2014-2019** renforce le dispositif de protection des Opérateurs d'Importance Vitale (OIV) contre les cybermenaces.

2019

Le CEA regroupe ses activités de recherche en cybersécurité dans un **grand programme transversal**. L'Union européenne adopte le *Cybersecurity Act* qui définit un cadre de certification pour harmoniser à l'échelle européenne les méthodes d'évaluation et les différents niveaux d'assurance de la certification.

2021

L'État met en œuvre sa **stratégie nationale pour la cybersécurité** d'un montant total d'un milliard d'euros, pour créer un « écosystème de la cybersécurité » en renforçant les liens entre recherche publique et privée.

en lien étroit avec les services de l'État, notamment la Direction générale de l'armement et l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (Anssi), mais également en collaboration avec les acteurs académiques du domaine (CNRS, Inria, Mines-Telecom, universités...), ainsi qu'avec de nombreux industriels : opérateurs (IN Groupe, EDF), fournisseurs de composants logiciels ou électroniques (STMicroelectronics, Soitec, Sopra Steria) ; équipementiers (comme Schneider Electric, voir p. 42) ou encore systémiers (Thales, Naval Group, Airbus).

Une expertise au service de la confiance numérique

Comment ce programme se décline-t-il concrètement ? Il s'appuie sur les diverses expertises du CEA appliquées à la sécurité, notamment autour de l'évaluation de composants, d'équipements et de systèmes dans le cadre du Cesti qu'héberge le CEA depuis plus de 25 ans sous l'égide de l'Anssi (voir encadré), du développement d'outils à base de méthodes dites formelles pour garantir l'absence de défauts logiciels susceptibles de générer une erreur lors de l'exécution d'un programme informatique, ou permettre des actions malveillantes (voir p. 39) comme Framasoft pour le code source, Binsec pour le code binaire ou PyRAT pour l'IA ; de la sécurisation des composants électroniques ou des systèmes dès leur conception (*Secure by technology*, voir p. 40) ou enfin grâce à des approches innovantes en réponse aux défis des technologies quantiques (voir p. 38), de la confiance décentralisée avec le simulateur MAX ou encore de la supervision/

détection/réaction intelligente des réseaux avec SIGMO-IDS ou Adviz. « *La confiance numérique est un pilier central, conclut Philippe Mazabraud. Dans le domaine civil bien sûr, mais plus encore dans celui de la défense, où la maîtrise des systèmes d'information est au cœur de ce qu'on appelle la guerre hybride.* »

L'ensemble des recherches du CEA se nourrit et s'inscrit dans le cadre de la réglementation européenne et de ses déclinaisons nationales, pour limiter les vulnérabilités des systèmes numériques : après le *Cybersecurity Act* en 2019, la directive NIS2 sur la sécurité des réseaux et des systèmes d'information en 2022, le *Cyber Resilience Act* (CRA), qui entre en vigueur au début de l'année prochaine, vise à aller encore plus loin dans la sécurisation du marché numérique européen. « *La réglementation est une nécessité pour se protéger des acteurs malveillants* », note Vincent Cachard. *Le CRA introduit ainsi des exigences de sécurité obligatoires pour les fabricants, importateurs et distributeurs de produits matériels et logiciels, avec des impératifs de surveillance, de transparence et de mise à jour tout au long du cycle de vie des produits que nous devons intégrer dans nos travaux.* »

Structurer et animer la filière cyber

Des travaux et des compétences qui permettent au CEA de jouer un rôle de premier plan dans la structuration et l'animation des filières cybersécurité en France et en Europe, qu'il irrigue par ses transferts de technologie et la création de plusieurs start-up (voir p. 41). Au niveau national, dans le cadre du programme France 2030,

2022

Doté d'un budget de 65 millions d'euros sur 6 ans, le **PEPR Cybersécurité** est lancé sous le copilotage du CNRS, d'Inria et du CEA. La même année, **un accord général de collaboration entre le CEA et l'Anssi** est signé pour améliorer la sécurité des systèmes numériques et le **campus Cyber**, dont le CEA est un des membres fondateurs, est inauguré.

2024

Le CEA se voit confier par l'État le pilotage de l'**Agence de programme du composant aux systèmes et infrastructures numériques (Asic)**.

ÉVALUER DES DISPOSITIFS À HAUT NIVEAU DE SÉCURITÉ

Le Centre d'évaluation de la sécurité des technologies de l'information (Cesti) du CEA-Leti est un laboratoire d'évaluation sécuritaire agréé par l'Agence nationale de la sécurité des systèmes d'information (Anssi) depuis 2000 et accrédité par le Cofrac. Dans ce cadre, il conduit des évaluations de composants sécurisés, d'équipements matériels avec boîtier sécurisé et de systèmes, selon les Critères Communs¹, jusqu'au niveau EAL7. Il est également habilité à réaliser des évaluations en vue de certifications CSPN².

Premier Cesti à recevoir l'agrément de l'Anssi pour évaluer des composants ou systèmes utilisant la cryptographie post-quantique, celui du CEA dispose de compétences

spécialisées dans les domaines des semi-conducteurs, de l'électronique, de la cryptographie et des technologies de l'information. Il conçoit et développe également ses propres moyens de test et d'attaque, matériels et logiciels. Il bénéficie aussi des expertises des plateformes technologiques du CEA-Leti, ainsi que d'une compétence unique du CEA-List en outils logiciels d'analyse de la sécurité à base de méthodes formelles, tel Framac-C (voir p. 39).

La combinaison de ces moyens expérimentaux et de ces compétences spécialisées contribue au maintien de son haut niveau d'expertise au service des secteurs de la défense, de la banque, de l'identité numérique, de l'automobile et de l'énergie.

(1) Les Critères Communs (*Common Criteria*) constituent un standard international d'évaluation de la sécurité des produits et systèmes des technologies de l'information.

(2) La Certification de sécurité de premier niveau (CSPN) est délivrée par l'Anssi pour différents types de produits, notamment logiciels et matériels. Alternative aux évaluations Critères Communs, elle vise à établir un premier niveau de robustesse du produit.

le CEA s'est ainsi vu confier la responsabilité du copilotage du programme de recherche de la stratégie nationale pour la cybersécurité et le copilotage de tous les PEPR sur les technologies numériques. Membre fondateur du campus Cyber à Paris et membre de l'Alliance pour la confiance numérique, il a récemment intégré le Pôle d'excellence cyber (PEC) créé sous l'égide du ministère des Armées et de la Région Bretagne. Depuis 2024, il copilote le projet structurant « Innovation et technologies clés » du Comité stratégique de la filière des industries de sécurité, qui vise à élaborer une feuille de route en vue d'assurer la maîtrise des technologies clés d'avenir et des technologies critiques. Enfin, avec l'agence de programme Asic (voir p. 44), le CEA travaille à lancer un programme natio-

nal sur l'évaluation sécuritaire regroupant l'ensemble de la filière. Et en Europe, où il est partie prenante de différents projets d'ampleur, le CEA a activement participé à la création de l'*European Cyber Security Organisation* (ECSO), qui fédère aujourd'hui plus de 300 acteurs à travers 28 pays dans l'objectif de renforcer les communautés et capacités en matière de recherche, de technologie et de politique industrielle en cybersécurité au niveau de l'Union européenne.

Et demain ? « *Il nous faut continuer à amplifier la dynamique mise en place pour assurer un continuum de sécurité sur l'ensemble de la chaîne numérique* », expliquent Philippe Mazabraud et Vincent Cachard. Un véritable défi à l'heure de l'IA et du quantique. ●

2025

Le Cesti du CEA renforce son expertise en cybersécurité en obtenant de **nouveaux agréments majeurs**. Il est notamment le premier centre français habilité à évaluer la **cryptographie post-quantique**. Dans le même temps, le CEA intègre le **Pôle d'excellence cyber**.

2026

Le CEA porte les **chaires Souveraineté numérique cyber à l'IHEDN** et **Cyberdéfense des systèmes navals à l'Ecole navale** en lien avec Thales et Naval Group, notamment.

2027

Le **Cyber Resilience Act**, adopté en 2024, entre en vigueur dans toute l'Union européenne.

Des projets pour SÉCURISER L'INVISIBLE

QUANTIQUE

Des approches prometteuses

La cryptographie post-quantique et les communications quantiques sécurisées sont deux voies actuellement explorées au CEA pour renforcer la confidentialité et l'intégrité des communications.

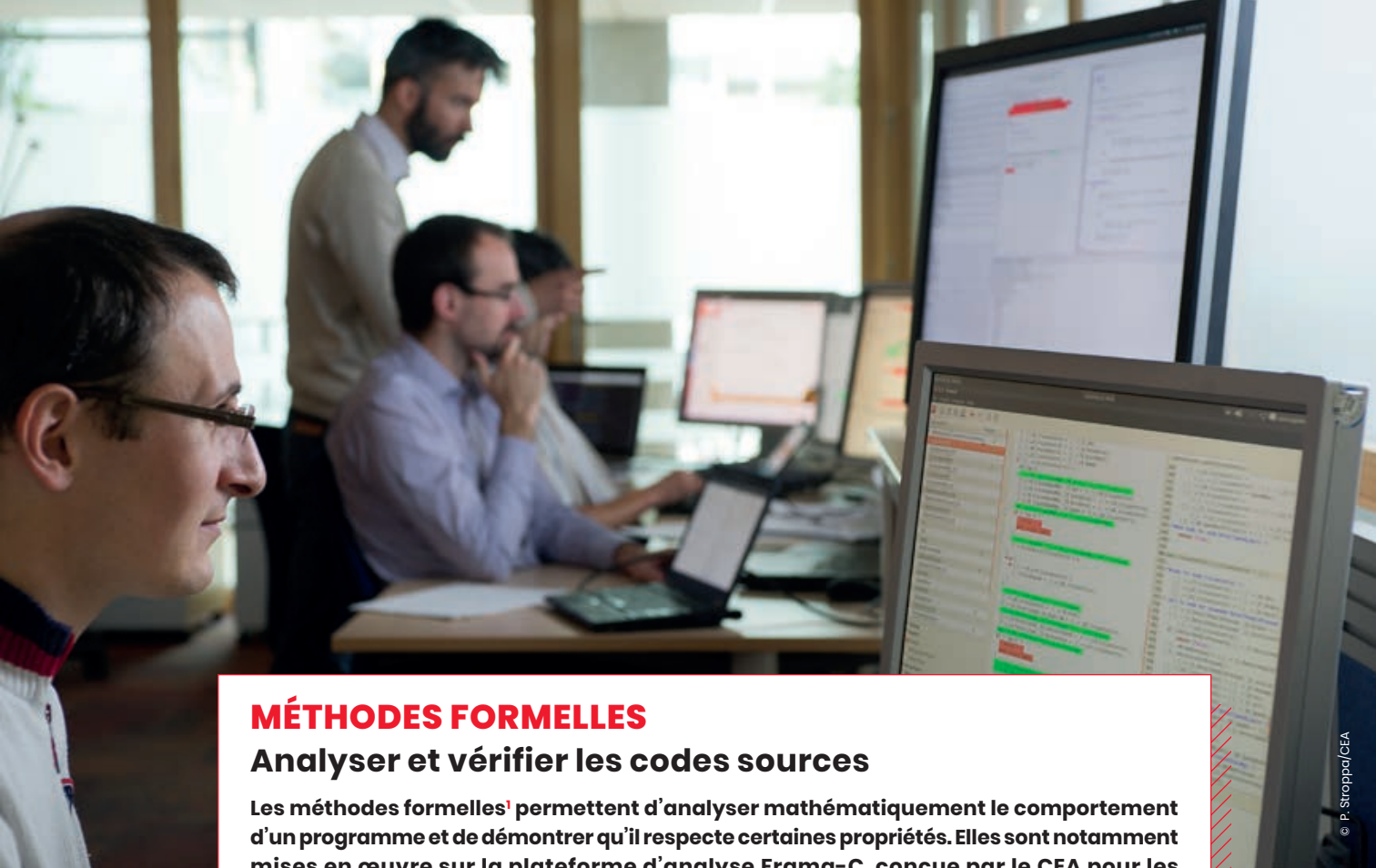
Chiffrer et/ou signer des données sont des moyens couramment utilisés pour les sécuriser. Mais avec le développement anticipé des capacités de calcul des ordinateurs quantiques, certains mécanismes de chiffrement actuels pourront être cassés. Il faut donc aller plus loin. C'est l'objectif de la cryptographie post-quantique : développer de nouveaux algorithmes cryptographiques, capables de résister aux attaques quantiques, notamment à celles exploitant les algorithmes de Shor (*voir encadré*) ou de Grover afin de continuer à protéger durablement nos données et nos communications. Le CEA collabore avec des acteurs académiques et industriels à l'implémentation sécurisée et optimisée de ces nouveaux algorithmes cryptographiques dans les systèmes numériques. Par l'intermédiaire de son Cesti (*voir p. 37*), le CEA est aussi un acteur reconnu sur le plan de l'évaluation sécuritaire de ces implémentations. Il a, par exemple, récemment démontré, dans le cadre d'une coopération inédite en France de développement et d'évaluation croisés avec Thales, la robustesse d'algorithmes post-quantiques à diverses attaques physiques dans des scénarios d'intégration réels. Une contribution majeure à la migration en cours de l'écosystème numérique vers des solutions résistantes aux ordinateurs quantiques.

L'autre piste est celle des communications quantiques sécurisées. Il s'agit ici de concevoir des protocoles de distribution quantique de clés indépendants des dispositifs (*Device-Independent QKD*), pour assurer la confidentialité des échanges, y compris lorsque les équipements utilisés présentent des imperfections ou ne sont pas parfaitement caractérisés. Un verrou majeur reste néanmoins à lever : les preuves de sécurité ne sont aujourd'hui

valables que pour des systèmes présentant des pertes très faibles, difficilement compatibles avec des communications sur de longues distances. Les équipes du CEA travaillent donc à développer de nouvelles preuves théoriques de sécurité pour rendre la *Device-Independent QKD* compatible avec des réseaux quantiques opérationnels, en tolérant davantage de pertes et de bruit.

La menace Shor

L'algorithme de Shor, du nom du mathématicien américain Peter Shor, est un algorithme quantique probabiliste proposé en 1994. Il ouvre la voie à la factorisation de très grands nombres en un temps record, s'il est mis en œuvre par un ordinateur quantique. Or, la plupart des protocoles de cryptographie classique reposent sur des méthodes numériques optimisées pour la factorisation des nombres premiers, mais qui s'adaptent mal à l'augmentation de la taille de clé. Selon certaines prévisions, un ordinateur quantique utilisant l'algorithme de Shor pourrait casser dans un horizon de moins de 10 ans une clé publique de 2048 bits en quelques heures, contre des milliers d'années aujourd'hui.



MÉTHODES FORMELLES

Analyser et vérifier les codes sources

Les méthodes formelles¹ permettent d'analyser mathématiquement le comportement d'un programme et de démontrer qu'il respecte certaines propriétés. Elles sont notamment mises en œuvre sur la plateforme d'analyse Frama-C, conçue par le CEA pour les programmes en langage C.

Frama-C aide à détecter de façon exhaustive et à prévenir des erreurs susceptibles de provoquer des dysfonctionnements lors de l'exécution d'un programme, comme des accès mémoire invalides ou certains comportements indéfinis, mais aussi de potentielles vulnérabilités exploitables par un acteur malveillant. Cette plateforme permet également de vérifier des propriétés définies par l'utilisateur, par exemple fonctionnelles, de sûreté ou de sécurité. Sa particularité et sa force sont de faire coopérer plusieurs techniques formelles d'analyse, comme l'interprétation abstraite et la vérification déductive, au sein d'un même environnement.

Pour répondre aux besoins croissants des logiciels critiques, les équipes du CEA-List font régulièrement évoluer la plateforme : amélioration de l'automatisation et de la visualisation des résultats, prise en charge de nouvelles problématiques, ouverture progressive à d'autres langages et environnements de programmation, mais aussi travail pour

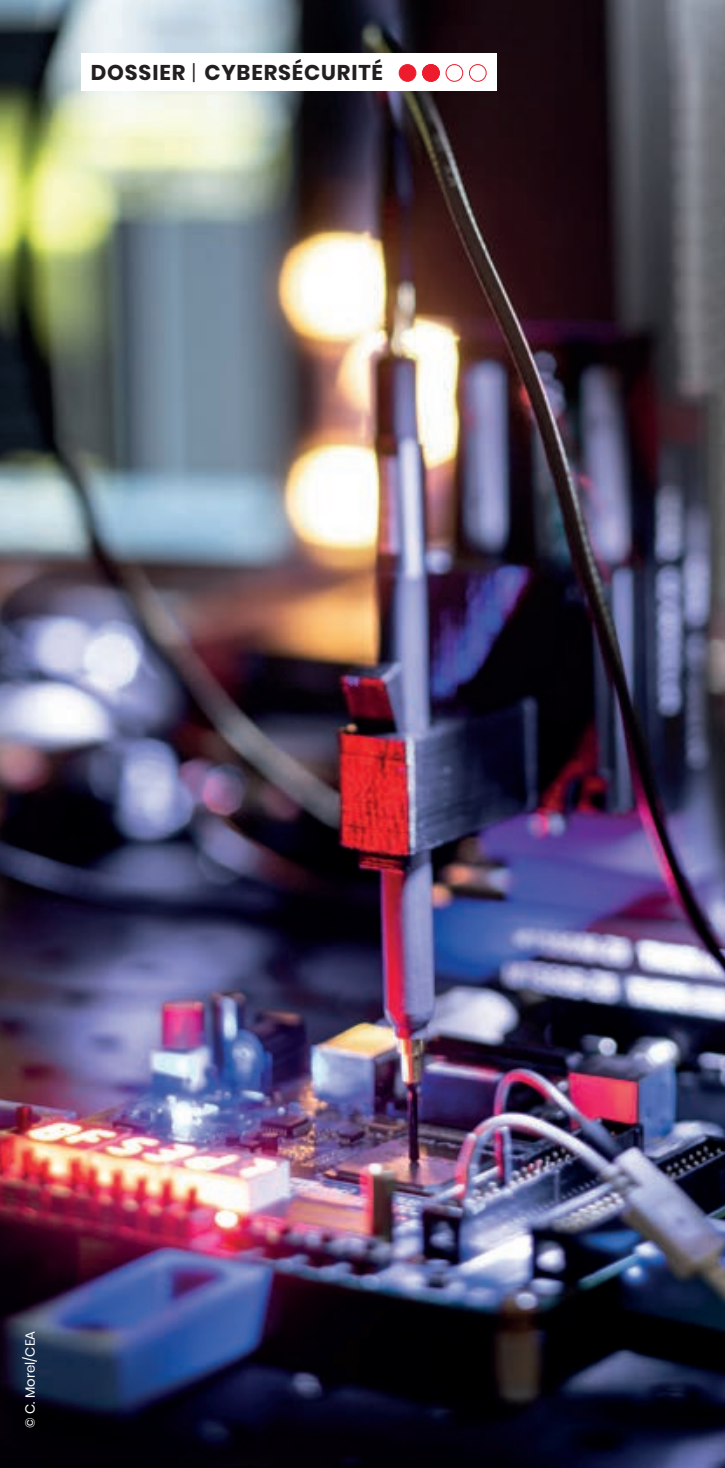
le passage à l'échelle des analyses. L'objectif est notamment de pouvoir analyser des logiciels toujours plus complexes, tout en facilitant l'exploitation des résultats par les développeurs et les experts de la vérification ou évaluateurs de sécurité.

Utilisée dans des domaines où un haut niveau de confiance est nécessaire (aéronautique, nucléaire, ferroviaire, défense, cybersécurité ou encore systèmes embarqués), Frama-C est également reconnue en cybersécurité dans le schéma français des Critères Communs². Elle est aujourd'hui le troisième outil fondé sur les méthodes formelles reconnu pour les deux plus hauts niveaux d'assurance de sécurité EAL6 et EAL7. Frama-C se distingue notamment par sa capacité à réaliser ces vérifications directement sur le code source C.

Ces capacités et garanties fournies par l'outil sont à l'origine de multiples collaborations avec des institutionnels et industriels phares du domaine (DGA, Anssi, Thales...).

⁽¹⁾ Les méthodes formelles regroupent des techniques mathématiques permettant de spécifier, analyser et démontrer certaines propriétés d'un logiciel.

⁽²⁾ Les Critères Communs (Common Criteria) constituent un standard international d'évaluation de la sécurité des produits et systèmes des technologies de l'information.



© C. Morel/CEA

↑ Banc d'attaque physique par canaux auxiliaires.

SECURE BY TECHNOLOGY Au cœur du hardware

Et si la sécurisation des produits de la micro-électronique passait par celle des substrats sur lesquels ils sont greffés ? C'est l'approche originale que développe le CEA en partenariat avec Soitec.

Il est primordial pour les industriels de mettre en œuvre différentes approches pour intégrer la sécurité dès les premières phases de conception afin de réduire les vulnérabilités et de garantir la résistance de leurs produits aux cyberattaques les plus avancées. Par exemple, des composants microélectroniques sont spécifiquement conçus pour protéger les données et les opérations sensibles, comme dans le domaine de la banque, de l'identité numérique ou encore le secteur des transports.

Mais sécuriser un produit nécessite de prendre en compte tous les niveaux de sa réalisation, depuis les couches technologiques jusqu'au niveau applicatif. Cela se fait le plus souvent par l'implémentation de fonctions de sécurité et de contre-mesures au niveau de la conception du circuit et de son logiciel. Et ces solutions ont un coût non négligeable. « Or, une des sources de vulnérabilité des composants est justement la technologie silicium elle-même, sur laquelle le circuit est fabriqué et qui s'avère sensible aux attaques physiques comme l'illumination laser ou l'émission électromagnétique », explique Romain Wacquez, ingénieur au CEA-Leti. « Dès lors, complète Marion Andriolat, en charge des partenariats en cybersécurité de l'institut, pourquoi ne pas rendre leur couche la plus basse, le substrat sur lequel ils sont intégrés, intrinsèquement sûr ? C'est le défi que nous nous sommes lancé avec Soitec autour la technologie FD-SOI. » Une technologie que le CEA a mise au point dans ses labos et que l'entreprise iséroise commercialise notamment dans les domaines de la téléphonie, de l'automobile et des objets intelligents (voir La Revue n° 7).

Ce projet au long cours comporte deux volets : d'une part, démontrer les propriétés intrinsèques de sécurité du FD-SOI, d'autre part fonctionnaliser le substrat en lui adjoignant des propriétés de sécurité qui agissent comme des barrières. Une première étape a déjà été franchie avec la démonstration que le FD-SOI est 150 fois plus résistant que d'autres technologies aux attaques physiques par laser. Bénéficiant de la R&D menée sur la ligne pilote Fames pilotée par le CEA-Leti, ces travaux visent à développer une solution qui permette de réduire le coût de la sécurité en réduisant l'empreinte des contremesures, et en augmentant le niveau de sécurité intrinsèque de la technologie silicium, donc des composants qui y sont déposés.

Du labo à la start-up

Grâce aux technologies de cybersécurité qu'il développe dans ses laboratoires avant de les essayer, le CEA contribue au dynamisme du tissu industriel français. Pleins feux sur trois entreprises emblématiques de cette démarche.

Snowpack

De la neige dans le cyberspace

L'idée

Invisibiliser serveurs, services web et autres capteurs IoT sensibles exposés sur Internet, pour les préserver de toute attaque malveillante.

La technologie

Le *Virtual and Invisible Private Network* (VIPN) issu de travaux menés sur la sécurité des réseaux et des protocoles à l'institut List du CEA.

La solution

Fragmenter les paquets contenant les informations sur la source et la destination des données en « flocons », des bruits invisibles qui circulent sur Internet via des chemins garantissant leur anonymat.

Le mot de la fin

« Si les hackers ne vous voient pas, ils ne vous attaquent pas ! »

ClicknCrypt

Comme une cape d'invisibilité

L'idée

Traiter et échanger des données confidentielles chiffrées sans jamais les exposer à des tiers.

La technologie

Une plateforme de chiffrement entièrement homomorphe issue du développement de technologies de pointe dans ce domaine à l'institut List du CEA.

La solution

Permettre le calcul direct sur des données chiffrées en préservant leur illisibilité à chaque étape de leur traitement, sauf par les utilisateurs autorisés.

Le mot de la fin

« Et si vous sécurisiez vos informations en quelques clics seulement ? »

Daisugi

Naviguer sans entraves

L'idée

Apporter un haut niveau de sécurité au navigateur web des postes de travail pour les protéger du vol de données, des virus et autres menaces.

La technologie

Sanzu, issu de travaux menés initialement pour protéger les activités sensibles de la Direction des applications militaires du CEA.

La solution

La navigation web s'exécute en dehors du poste de travail, sur un serveur sécurisé qui retransmet un flux vidéo interactif, de façon transparente pour l'utilisateur.

Le mot de la fin

« Élevons le niveau de cybersécurité, dès le premier clic ! »



« Renforcer la résilience collective »

Depuis sept ans, le CEA et Schneider Electric collaborent à travers un laboratoire commun pour anticiper les cybermenaces et explorer des solutions innovantes. Les explications de **Nathalie Feyt, vice-présidente Cybersécurité Produit de Schneider Electric**.



Pourquoi Schneider Electric a-t-il choisi d'investir dans un laboratoire commun avec le CEA ?

Nathalie Feyt — La cybersécurité est un domaine où réagir n'est pas suffisant. Il nous faut anticiper plutôt que subir. Lorsque des infrastructures de distribution d'énergie et d'eau, des bâtiments intelligents ou des centres de données sont concernés, les conséquences d'une attaque sont à la fois opérationnelles et sociétales. Chez Schneider Electric, nous avons donc fait le choix d'anticiper les menaces futures en travaillant avec le CEA sur des sujets émergents comme l'intelligence artificielle appliquée à la cybersécurité, la cryptographie post-quantique ou encore l'automatisation des tests de sécurité. Notre laboratoire commun nous permet d'explorer aujourd'hui les technologies qui sécuriseront, demain, nos produits pour les infrastructures critiques.

Pourquoi précisément le CEA ?

N. F. — Pour renforcer notre capacité à anticiper les cybermenaces, nous souhaitons nous appuyer sur un partenaire dont c'est le cœur de métier. Et un partenaire de confiance pour partager nos besoins et

développer des solutions en toute confidentialité. C'est donc logiquement que nous nous sommes tournés vers le CEA, avec lequel nous avons aujourd'hui une collaboration étroite et une relation de proximité, du fait de nos implantations respectives à Grenoble.

Concrètement, comment fonctionne ce laboratoire ?

N. F. — Sa particularité est de faire le lien entre recherche et déploiement industriel pour accélérer le transfert technologique. Ainsi, sur la base de grandes thématiques comme la sécurisation de composants, nous définissons chaque année un plan de travail à partir des problématiques que nous rencontrons au quotidien sur nos produits, nos systèmes, et en fonction des réponses que le CEA peut nous apporter. Nous travaillons ensuite ensemble à faire mûrir ces technologies jusqu'à leur intégration dans nos processus industriels. C'est le cas, par exemple, des travaux sur l'intelligence artificielle embarquée pour la détection de cyberattaques dans les équipements industriels, ou encore des outils d'automatisation des tests de cybersécurité pour répondre plus efficacement aux nouvelles exigences réglementaires

européennes. L'objectif n'est pas de faire de la recherche pour la recherche, mais de créer de la valeur concrète pour nos clients et leurs infrastructures.

Fin 2025, vous avez renouvelé votre collaboration avec le CEA pour trois ans. Quelles en sont les priorités ?

N. F. — Sans hésiter, la gestion des vulnérabilités. Avec la puissance de l'intelligence artificielle, elles sont de plus en plus nombreuses. On en détecte, par exemple, trois par jour dans les systèmes open source ! Dans ce contexte, la manière dont nous les traitons doit être repensée. Notre ligne de correction systématique pour toutes les vulnérabilités théoriques critiques doit évoluer afin de prendre en compte la réalité des attaques dans les contextes d'usage de nos produits. Il nous faut donc redéfinir nos critères de pilotage du risque pour intervenir au bon niveau et trouver la barrière la plus efficace dans une « approche système » qui associe l'ensemble des acteurs de la *supply chain*. Et ce d'autant plus que la cybersécurité est devenue une condition de confiance dans les infrastructures essentielles qui soutiennent notre économie numérique. La capacité à maîtriser certaines technologies critiques, à disposer d'expertises européennes de premier plan et à transférer rapidement les innovations vers l'industrie constitue un véritable enjeu de résilience. Notre laboratoire commun associe les expertises respectives du CEA et de Schneider Electric pour renforcer cette résilience collective.

La cybersécurité devient donc un facteur de compétitivité ?

N. F. — Absolument. Pendant longtemps, la cybersécurité a été perçue comme une contrainte. Aujourd'hui, elle devient un critère de choix pour les clients, un prérequis réglementaire, un facteur de différenciation sur le marché et un vecteur d'innovation et de création de valeur. Nos travaux avec le CEA nous permettent de développer des solutions sécurisées et d'apporter à nos clients des preuves tangibles de confiance.

Un dernier qualificatif sur cette collaboration ?

N. F. — Je dirais la capacité à réunir deux cultures complémentaires. D'un côté, l'excellence scientifique et la vision à long terme du CEA. De l'autre, l'expérience industrielle et la proximité terrain de Schneider Electric. Ensemble, nous créons un environnement où l'innovation est rapidement transformée en solutions concrètes au service de la résilience des infrastructures essentielles. C'est précisément ce type de partenariat qui permettra de relever les défis cyber des prochaines décennies. ●

↓ **Démonstrateur eArgos pour la détection de comportements anormaux des systèmes embarqués critiques.**



Relier les acteurs de la souveraineté numérique

Par **Hughes Metras**,
directeur de l'agence
de programme Asic



Créée en 2024 dans le sillage de France 2030, l'agence de programme Asic, dont le périmètre s'étend du composant aux systèmes et infrastructures numériques, est entrée depuis un an dans une phase opérationnelle, après la définition de plusieurs feuilles de route et de trois nouveaux programmes de recherche. Éclairage sur sa raison d'être et sur le principe qui doit guider chacune des actions de l'agence : fédérer l'écosystème de recherche français au service des grands enjeux de la filière électronique, sur l'ensemble de sa chaîne de valeur.

Un ingénieur qui travaille sur un nouveau matériau pour puce, une équipe qui conçoit l'architecture d'un supercalculateur, un laboratoire qui teste la résilience d'un réseau de communication critique : ces trois acteurs appartiennent au même monde, celui du numérique matériel, et pourtant ils se croisent rarement. Ils ne lisent pas les mêmes revues, ne vont pas aux mêmes colloques, ne répondent pas aux mêmes appels à projets.

C'est cette dispersion, plus que le manque de talents ou de financements, qui a justifié la création de notre agence en 2024. Il ne

manquait pas de bonnes idées dans le paysage français de la recherche sur les semi-conducteurs et les systèmes et infrastructures numériques. Il manquait un endroit où ces idées pouvaient converger et acquérir plus de force.

Ni laboratoire ni guichet de financement, l'Asic vise à coordonner l'émergence et le suivi des programmes de recherche sur les composants, les systèmes et infrastructures numériques en associant le plus tôt possible les acteurs de la recherche et de l'industrie concernés.

« Notre ambition est double : renforcer l'impact des équipes de recherche françaises sur le tissu industriel et anticiper les innovations de rupture aux forts enjeux industriels, sociétaux et de souveraineté. »

À moyen terme, notre mission est de démontrer que la fédération des communautés de recherche sur de grands programmes structurés génère de réelles opportunités de création de valeur dans les filières industrielles que nous servons. À plus long terme, l'enjeu sera d'orienter les travaux de la communauté académique sur les grands défis auxquels ses compétences et moyens sont capables de répondre. Il nous faut être en mesure de construire des visions et des feuilles de route en rassemblant les meilleurs experts du monde de la recherche, mais aussi en associant à la démarche les équipes scientifiques des industriels et les représentants de l'État afin de les convaincre de la pertinence de nos propositions.

Le principe directeur de l'Asic repose ainsi sur notre capacité à écouter l'ensemble des acteurs de l'écosystème et à tirer des informations recueillies des pistes concrètes d'action : investir dans les infrastructures de recherche qui le nécessitent ; lancer des programmes qui complètent l'existant, mais sans redondance ; favoriser l'excellence des équipes et la construction d'une masse critique de compétences et d'expertise ; encourager la connexion entre acteurs académiques et acteurs industriels. Cela inclut également de veiller à la prise en compte, de plus en plus essentielle, du couplage logiciel/matériel, en coordination avec l'agence de programme dans le numérique portée par Inria.

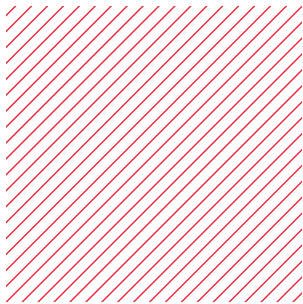
Ce travail de cartographie est aussi un atout pour identifier des domaines dans lesquels nous n'investissons pas assez au niveau national et européen, ou des sujets sur lesquels une position est encore difficile à finaliser. Je pense, par exemple, au sujet de l'open source hardware qui peine à se structurer en France et en Europe alors qu'il offre des opportunités majeures pour l'innovation et la productivité dans le domaine de la conception de circuits. À condition que sa mise en œuvre soit pensée en tenant compte notamment des problématiques de sécurité.

Les trois programmes que nous avons lancés cette année avec le soutien de l'État ont été construits sur ces bases :

- fédération des écosystèmes logiciels et matériels autour d'un objectif commun de composants pour l'IA au sein du programme Camelia ;
- construction d'un consortium rassemblant une très grande partie des équipes de conception de circuits dans le programme Phoenix qui vise à renforcer les outils et méthodes pour les circuits intégrés du futur ;
- enfin, renforcement des infrastructures de recherche et de l'expertise scientifique associée dans le domaine du packaging avec le programme Initiative Packaging.

Cette logique de construction collective permet finalement de mobiliser les énergies malgré des attentes, parfois contradictoires, de nos différentes parties prenantes. Les deux questions que nous nous posons systématiquement sont les suivantes : (i) Ce que nous pilotons relie-t-il des efforts qui, sans nous, resteraient dispersés et, *in fine*, moins utiles à tous ? (ii) Au vu de la nature plutôt amont des travaux que nous menons avec les communautés scientifiques, prenons-nous suffisamment de risques pour apporter à nos résultats une réelle capacité de différenciation à l'horizon de 5 à 10 ans ? Ce questionnement est essentiel pour guider nos réflexions dans un domaine qui nécessite des actions sur des temps longs, dans un environnement économique et géopolitique qui évolue très vite.

C'est donc la proposition d'une nouvelle manière de travailler ensemble. Nous ne réussirons qu'en nous appuyant sur les compétences des communautés académiques, en construisant un lien systémique avec les parties prenantes qui ont vocation à bénéficier des travaux de recherche et en convainquant les pouvoirs publics à l'échelle nationale ou européenne, mais également les acteurs de l'innovation (investisseurs, industriels), de soutenir les programmes que nous construirons. ●





Autour du MONDE

Recherche fondamentale, grands instruments, innovations de rupture : le CEA s'engage aux côtés de partenaires européens et internationaux pour façonner le futur de la recherche.

 VIETNAM

COOPÉRATION SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE

À l'occasion de sa visite officielle en France, le président de la République socialiste du Vietnam s'est rendu sur le site CEA de Saclay. L'occasion pour le CEA et l'université des sciences et technologies de Hanoï de renforcer leur coopération en matière de formation ainsi que de recherche et de transfert de technologies, notamment dans les domaines du nucléaire, des nouvelles énergies et de l'hydrogène, des semi-conducteurs, des matériaux et de la santé.

 UE

PROJET

Resilience, des contre-mesures médicales pour l'armée

Face aux maladies émergentes et aux risques de conflit, le CEA coordonne le programme européen Resilience.

Concilier expertises en défense, nucléaire et biologie, et la gestion de projets complexes, confidentiels et de haute sécurité ? Un rôle tout tracé pour le CEA ! L'organisme pilote Resilience, un programme européen financé à hauteur de 100 millions d'euros par le fonds européen de la défense et les ministères concernés, pour mettre au point des contre-mesures médicales pour les armées. « Nous agissons sur trois axes : les thérapies, les vaccins et prophylaxies, et enfin les tests diagnostic et la dosi-

métrie, explique Fanny Caputo, cheffe de projet au CEA. Le programme couvre une multitude de menaces comme les agents biologiques et chimiques, les neurotoxines, les risques radiologiques, etc. »

Ces contre-mesures tiennent compte des contraintes propres aux zones de conflits, comme le besoin d'une conservation à température

ambiante, un transport facilité ou encore des auto-injecteurs. « Nous réfléchissons en briques technologiques, détaille-t-elle. Par exemple, un dispositif injecteur développé dans le cadre de Resilience peut intéresser un industriel pour le marché civil, avec une autre molécule. » Lancé en 2024, le programme se poursuit jusqu'en 2030 et s'étend de la recherche jusqu'aux études cliniques de phase 1 et la production de premiers lots.

La feuille de route a été établie conjointement par 12 ministères européens de la Défense, avec une révision annuelle pour s'assurer que les développements correspondent toujours aux priorités. « Cet engagement collectif permet d'apporter une réponse unifiée sans nier les besoins spécifiques des États, estime Fanny Caputo. Il permet aussi de mutualiser les moyens. » Plus d'une centaine de partenaires dans 20 pays de l'UE et en Norvège sont impliqués : industriels de la défense et de la pharmaceutique, centres de recherche publics et militaires, hôpitaux, etc. ●



Développement de vaccin ARNm.





AUTRICHE

LE RENDEZ-VOUS DE L'AIEA

Du 14 au 18 septembre dernier, Vienne a accueilli la conférence générale de l'Agence internationale de l'énergie atomique, un rendez-vous majeur du nucléaire international. Anne-Isabelle Etienvre, administratrice générale du CEA, y a conduit la délégation française et porté les messages clés de la France : soutien indéfectible à l'Ukraine, non-prolifération, sûreté et sécurité nucléaires, place du nucléaire auprès des énergies renouvelables.

© J.-C. Bonté



TAÏWAN

PORTRAIT

Au cœur de l'écosystème taiwanais

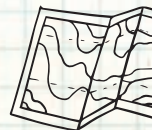
Travailler au CEA, c'est aussi parfois voyager, au fil des très nombreuses collaborations internationales contractées avec nos partenaires étrangers. Ces aventures humaines permettent de tisser des liens forts et consolident la place du CEA à l'international. Rencontre avec **Jean-Christophe Bonté**, représentant de la DRT à Taïwan.

Il est l'un des visages du CEA à Taïwan, l'une des plus puissantes places fortes des semi-conducteurs, qui concentre près de 60 % de la capacité mondiale de fonderie. À l'heure où se préparent les futures générations de composants toujours plus puissants et moins énergivores, Jean-Christophe Bonté a pour mission de nouer des partenariats avec les grands acteurs locaux, industriels comme institutionnels. « L'enjeu est aussi de renforcer la souveraineté technologique européenne dans les semi-conducteurs et les technologies associées », rappelle celui qui a pris, fin 2024, les rênes du tout nouveau bureau taiwanais de la Direction de la recherche technologique du CEA. Un changement de décor complet par rapport à Saclay ou Vienne, ses derniers ports d'attache. À son arrivée, tout était à construire pour structurer la présence du CEA dans ce territoire. « La force de cette île, outre ses capacités industrielles, c'est son écosystème intégré : industriels, universités, organismes de recherche et pouvoirs publics travaillent de manière coordonnée autour de priorités technologiques communes. Les prises de décision sont très rapides et les projets avancent avec une grande efficacité », note-t-il.

Son quotidien, c'est la rencontre sur le terrain, « parfois plus de 20 fois chez le même industriel »,

avoue-t-il. Car il faut avant tout convaincre les Taïwanais de la force du modèle d'innovation du CEA et de la valeur qu'elle peut leur apporter, en expliquant sa capacité à accompagner une technologie de la recherche jusqu'au transfert industriel. « Pour les Taïwanais, apprendre à se connaître et comprendre la manière de travailler de chacun est un préalable indispensable avant de construire une relation partenariale et de confiance dans la durée. Ils prennent le temps d'écouter, ne se coupent pas la parole et s'expriment de manière très respectueuse. » Un travail de longue haleine nourri par des événements de haut niveau organisés sur place, auxquels participent des décideurs et experts venus de Grenoble et de Paris : Leti Innovation Days, Assises de la recherche scientifique franco-taiwanaise, participation au Semicon Taiwan, etc.

En avril 2026, deux premiers contrats majeurs ont été signés entre les instituts Leti et List du CEA et PSMC, troisième fondeur taiwanais, sur la photonique sur silicium et les architectures de calcul, deux domaines directement liés aux défis de l'IA. Signe que « le CEA est aujourd'hui clairement identifié au sein de l'écosystème taiwanais, ce qui représentait un véritable défi à notre arrivée », conclut-il avec satisfaction. ●





Acquérir et *maintenir* des compétences, un **ENJEU** d'**AVENIR**

Qu'il s'agisse de répondre aux besoins industriels, de contribuer à la souveraineté française ou d'enrichir les connaissances scientifiques, le CEA participe à la transmission de compétences.

Organisme public de recherche, il entretient des liens étroits avec ses partenaires universitaires et académiques et accueille des étudiants et des postdoctorants au sein de ses laboratoires. Ces parcours riches et variés, soutenus par un encadrement expert et des plateformes de pointe, offrent aux futures générations de chercheurs un cadre de formation optimal [page 50](#).

Côté défense, le CEA mise sur le compagnonnage et des cursus internes pour former les profils très spécialisés dont il a besoin et transmettre des compétences rares [page 52](#). Compétences rares dans le nucléaire aussi, où le CEA dispense des formations pour tous les acteurs de la filière, à travers l'Institut national des sciences et techniques nucléaires (INSTN). Depuis 70 ans, cet organisme transmet les savoir-faire en matière de nucléaire aux étudiants et accompagne les industriels, *via* des formations continues [page 57](#).

Un rôle crucial pour garantir un vivier de talents et le maintien de l'expertise française. La formation comme réponse à une concurrence accrue, c'est aussi l'une des pistes pour le secteur microélectronique et numérique, où IA et cyber bouleversent les acquis [page 55](#).

FORMATION PAR LA RECHERCHE

Entre tremplin et continuité

La formation par la recherche – qui forme les doctorants et les postdoctorants – plonge les étudiants au cœur des laboratoires et des équipes de recherche, où ils deviennent des acteurs à part entière de la production scientifique. Ils y acquièrent des compétences techniques et maîtrisent la démarche scientifique. Formuler une hypothèse, concevoir une expérience, mener un projet, travailler en équipe, ou encore publier des résultats : les enseignements dépassent la science.

Ce cursus offre un tremplin professionnel au contact d'experts et sur des plateformes de pointe, souvent uniques en France. Au CEA plus qu'ailleurs, l'ingénierie côtoie la recherche et l'instrumentation y a toute sa place. Pour celles et ceux qui l'assurent, cette formation est à la fois un engagement et l'essence même de leur activité de chercheur, car la connaissance se construit par la transmission. Tels des bâtisseurs de cathédrale, charge à eux de former les compagnons de demain.

AU CEA EN 2025

1138

alternants

1860

doctorants, dont
1552 sous la tutelle
du CEA

318

postdoctorants

4 889

publications
scientifiques par an,
dont la moitié
en recherche
fondamentale

« Une thèse,
c'est une **aventure**
professionnelle
et **humaine** »

Hajar Zgour, doctorante au CEA-Irfu

Après une école d'ingénieur en mécanique des fluides, je visais plutôt un métier axé conseil ou bureau d'études. Mais j'ai eu la chance de réaliser une césure, avec 6 mois en entreprise et 6 mois au CEA, où j'ai découvert que la recherche me plaisait. J'aime approfondir des connaissances, disposer à la fois d'une certaine liberté et de la rigueur scientifique pour mener des explorations. J'aime ce quotidien, sans

uniques. Ailleurs, les délais d'accès aux instruments auraient été plus longs et je n'aurais peut-être pas eu les ressources nécessaires. J'apprécie aussi les équipes très polyvalentes et intergénérationnelles, avec des experts seniors et des jeunes chercheurs qui étaient à ma place il n'y a pas si longtemps. Cette dualité m'est très précieuse pour avancer.

Une thèse, ce n'est pas juste acquérir plus de connaissances. C'est une aventure professionnelle et humaine. J'apprends beaucoup, en sciences, mais aussi sur la gestion de projet, le travail en équipe... Pour la suite, je souhaite continuer dans un poste similaire, combinant à la fois conception et terrain.



Programme de recherche exploratoire piloté par le CEA et le CNRS dans le cadre de France 2030, qui porte sur les supraconducteurs à haute température pour la fusion nucléaire.

journée type, avec l'impression de plusieurs métiers en un !

Depuis 2024, je suis en thèse au sein du PEPR Suprafusion*, où j'ai participé à plusieurs expérimentations. Le CEA possède d'importantes infrastructures, avec des plateformes

« **Accompagner un parcours scientifique apporte de l'humilité** »

Stéphanie Simon, directrice de recherche au CEA-Joliot



J'ai passé mon habilitation à diriger des recherches (HDR) en 2013, 14 ans après ma thèse. C'est l'aboutissement d'une carrière universitaire et son diplôme le plus élevé. C'est aussi un moment important pour prendre de la hauteur, faire le point sur son parcours scientifique et réfléchir à la suite. Surtout, cela me permet de diriger officiellement des thèses.

J'adore transmettre mes connaissances et la démarche scientifique, avec ses valeurs fondamentales de rigueur, d'objectivité et d'éthique. Je suis heureuse de partager mon travail et de voir les gens repartir avec de nouvelles connaissances, une meilleure compréhension de la science, et, je l'espère, l'envie de continuer.

En encadrant des doctorants, je transmets aussi des compétences humaines et relationnelles, qui leur serviront peu importe le domaine. La thèse est un projet personnel, mais elle s'effectue en équipe ! Mon rôle est de leur apprendre à contribuer au collectif et, si nécessaire, de leur ouvrir les portes d'autres laboratoires ou de partenaires pour leur projet de thèse ou l'après-thèse.

À leur arrivée, les doctorants sortent d'un mode de fonctionnement scolaire. Avec la thèse, ils entrent réellement dans la vie professionnelle, où ils ont le droit et le devoir de faire preuve de créativité, de développer leur autonomie et leur sens critique. Ils apprennent à se, et nous, remettre en question. Ils nous bousculent gentiment, nous incitent à regarder les choses sous un autre angle, et c'est très enrichissant.

En trois ans, ils réalisent un parcours incroyable, une véritable mue. C'est à la fois un plaisir et un honneur de contribuer à cette évolution ! Et c'est au cœur même de ma raison d'être de scientifique. Attention, je reconnais que ce n'est pas une affaire facile. Il faut s'adapter à la personnalité des étudiants et il faut un certain *leadership*. La direction de thèse s'apparente finalement davantage à une forme de *coaching* : donner un cadre tout en laissant au doctorant l'espace nécessaire pour construire ses propres idées et son propre cheminement.



« *Ce postdoctorat m'offre l'opportunité d'une triple expertise* »

Abdelrahman Zakaria,
chercheur postdoctorant au CEA-Irig

Mes travaux portent sur le développement de méthodes d'imagerie par rayons X afin de mieux comprendre l'évolution de nanoparticules catalytiques lors de réactions chimiques d'intérêt industriel. Pour cela, je réalise mes expériences à l'ESRF, le synchrotron européen situé à Grenoble.

Au quotidien, je développe mes compétences aussi bien expérimentales, grâce aux campagnes menées à l'ESRF, qu'en analyse des données et

simulation, au travers de collaborations nationales et internationales. La participation à des conférences et à des congrès me permet également d'échanger avec la communauté scientifique et d'enrichir mes travaux. Ce postdoctorat m'offre ainsi l'opportunité de développer une expertise à l'interface entre instrumentation synchrotron, imagerie avancée et science des matériaux, dans un environnement stimulant.

DÉFENSE

Répondre à des besoins spécifiques

Au sein du CEA, la Direction des applications militaires (DAM) concentre des compétences et des expertises très spécifiques pour mener à bien les missions régaliennes qui lui sont confiées. Le maintien de ces savoir-faire passe par des accompagnements internes et une politique de formation volontariste et adaptée.

Pour la propulsion nucléaire, les garanties d'un compagnonnage

Éléments à forte valeur ajoutée, les chaufferies nucléaires des bâtiments de la Marine nationale exigent des compétences rares dans des domaines techniques complexes (voir La Revue du CEA n° 8). Au CEA, elles sont transmises aux nouvelles recrues via un système éprouvé de compagnonnage.

Témoignages de Marine et Nicolas, la première ayant accompagné le second au sein du STXN¹.

(1) Service technique mixte des chaufferies nucléaires de propulsion navale, lequel regroupe des personnels de la Marine, de la DGA, du Service d'infrastructure de la défense et du CEA.

←
Le CEA participe à la conception des chaufferies nucléaires embarquées à bord des sous-marins français, comme ici, le *Suffren*.

Nicolas — Comme Marine auparavant, je suis chargé d'affaires en contrôle-commande pour les chaufferies nucléaires embarquées. Concrètement, mon périmètre couvre la conception et le développement de tous les systèmes de pilotage et de surveillance. Cela va des capteurs jusqu'aux interfaces homme-machine pour les opérateurs, et comprendre les lignes électriques et de transmission de signal, l'électronique pour le traitement des données ou encore les automatismes permettant d'assurer la sûreté nucléaire. Au quotidien, je peux piloter de la R&D sur de nouveaux détecteurs de pression comme des solutions en cybersécurité.

Marine — À mon arrivée au STXN, j'avais bénéficié d'un compagnonnage pendant un an. Les six premiers mois, j'étais l'ombre de mon mentor au quotidien. Puis j'ai progressivement pris en main les sujets, avant de former Nicolas à mon tour. La gamme de connaissances à maîtriser est large : électronique, électrique, cybersécurité, code, sûreté nucléaire, etc. Difficile de trouver un expert déjà pleinement compétent sur des aspects aussi variés ! Sans compter qu'il faut aussi connaître le contexte de la Marine, très spécifique. Certes, il existe une importante base documentaire, mais si vous n'êtes pas guidé par une personne déjà en poste, appréhender l'ensemble prend énormément de temps.

Nicolas — Oui. Nous sommes scientifiques ; chercher l'information fait partie de nos activités et nous le faisons très bien, mais le compagnonnage reste essentiel pour acquérir rapidement et efficacement l'ensemble des compétences métiers, la terminologie spécifique et appréhender les particularités des navires. Il faut surtout apprendre qui solliciter, à quel moment, pour quel sujet et de quelle façon. Ce tuilage permet de se faire identifier auprès des interlocuteurs et de s'insérer dans le réseau. Nous assistons par exemple aux commissions d'homologation, où il faut savoir poser les bonnes questions, de la bonne façon et au bon moment ! Idem pour les recettes d'équipements industriels : que regarder et savoir jusqu'où pousser nos demandes, cela s'apprend.

Marine — Le compagnonnage facilite la compréhension des modes de fonctionnement des différentes parties prenantes en interface avec le STXN, pour que tout soit fluide. Et ces parties prenantes sont nombreuses : industriels, Marine, DGA, autorité de sûreté, chefs de projet...

Nicolas — Avec le renouvellement des sous-marins d'attaque à travers le programme Barracuda, puis les futurs sous-marins de classe *L'Invincible* et le futur porte-avion, le planning est dense, les sollicitations et les enjeux importants. Être formé en interne, au plus près des équipes concernées, est une garantie de crédibilité. Cela facilite aussi la transmission des retours d'expérience, afin d'apporter des améliorations chaque fois que cela est possible. ●



Le knowledge management des essais nucléaires

Après l'arrêt des essais nucléaires, le CEA a mis en place un programme pour maintenir ces connaissances dans la durée.

C'est un enjeu crucial qui se résume en trois lettres : CEC, pour « capitalisation et exploitation des connaissances ». Ce programme a recueilli toutes les données liées aux essais nucléaires français passés. *« Elles sont aujourd'hui exploitées à des fins de formation pour les concepteurs d'armes et servent de point de repère », explique Olivier, responsable de ce programme. C'est un patrimoine unique de connaissances que l'on transmet aux générations suivantes, pour un usage très concret. »*

Le processus relève du *knowledge management*, ou gestion des connaissances en français. *« On retrouve cela dans tous les métiers : comment expliciter et formaliser les connaissances et les compétences que l'on a pour les transmettre efficacement », poursuit-il. Il faut s'assurer que l'on préserve les informations pertinentes :*

ne pas taire un geste qui semble évident, mais sans enregistrer des heures que personne ne regardera jamais. « Nous devons répondre au strict besoin », indique Alexis, responsable de la cellule qui recueille les connaissances. Comme une valise : vous ne prenez que les affaires utiles, en essayant de ne rien oublier. »

Ces « valises » sont ensuite mises à disposition selon les besoins des équipes. Celui qui part à la mer ne prend pas le sac à dos spécial montagne ! Le programme garantit une bonne exploitation, laissant l'accès aux connaissances strictement nécessaires, ni plus ni moins. L'aspect pédagogique a été travaillé avec l'INSTN, pour construire des formations en ligne (voir p. 57). Au final, 30 ans après l'arrêt des essais nucléaires, la transmission de ces connaissances se poursuit activement. ●

L'ISENDÉ

Un centre de formation unique

Le nucléaire de défense nécessite des compétences rares, auxquelles sont formées une poignée de personnes.

Au sein du CEA, l'Institut supérieur des études nucléaires de défense (ISENDÉ) dispense des formations sur le nucléaire de défense et la sécurité globale. *« Nous proposons à la fois des parcours très techniques, par exemple sur la simulation pour les futurs concepteurs d'armes, et d'autres plus axés sur le contexte et la géopolitique en matière de dissuasion nucléaire et de non-prolifération », décrit Brice, responsable de l'ISENDÉ.*

Au total, ce sont plus de 35 formations à temps plein ou partiel, allant de quelques semaines à presque deux ans. *« Le catalogue est entièrement conçu en fonction des besoins, ajoute-t-il. Nous menons un important travail d'analyse des métiers et des compétences,*

au sein de la Direction des applications militaire (DAM) du CEA et avec nos partenaires des armées. Nous structurons ensuite les besoins en formations adaptées. »

Le public visé ? Des personnes déjà en poste, à la DAM, aux armées, dans l'administration ou chez quelques industriels concernés, et qui ont besoin de ces compétences très spécifiques. La sélection des candidats est drastique et certains parcours n'accueillent qu'une dizaine d'auditeurs. Le responsable salue *« le très fort investissement des conférenciers »,* issus de la DAM, des armées et de la Direction générale de l'armement, ce qui *« permet d'assurer des formations à l'état de l'art, avec des éclairages sur les mutations en cours et à venir ».* ●

NUMÉRIQUE

Rester à la pointe

Dans un environnement où tout va très vite, comment garantir que les compétences ne deviennent pas obsolètes aussi vite que les technologies ? En misant sur des socles de fondamentaux évidemment, mais aussi grâce à des profils agiles, capables d'assurer la liaison entre un univers de recherche et un écosystème industriel, et de s'adapter aux défis émergents. Sans compter le choix de projets innovants et un environnement de travail à la pointe des capacités technologiques.



Arnaud Gaultier,
directeur des ressources humaines de la Direction de
la recherche technologique (DRT) du CEA.

Quels sont les besoins en compétences du CEA dans le numérique ? Quelles conséquences sur les profils et les besoins en formation ?

Arnaud Gaultier — Le CEA couvre toute la chaîne du numérique, des matériaux aux systèmes, avec des compétences en IA, en logiciels, mais aussi en procédés de fabrication, en chimie ou encore en quantique... Nos collaborateurs doivent appréhender cette globalité et cultiver un fort esprit de coopération, essentiel pour faire le lien avec nos partenaires industriels, amont comme aval. Nous recherchons avant tout des profils hybrides, avec une solide expertise technique, une réelle agilité et une connaissance du mode projet. Cette double culture, qui allie excellence de la recherche et impératifs du monde industriel, est une marque de fabrique du CEA.

Des profils plutôt seniors, donc ?

A. G. — Pas forcément ! Cela peut être des experts passés par l'industrie, qui connaissent les process de développe-

ment. Mais nous recrutons aussi des juniors, que l'on forme en interne. Grâce à nos liens étroits avec les écoles d'ingénieurs et les universités, nous accueillons chaque année près de 400 alternants, doctorants et postdoctorants.

Vous évoquez des formations en interne...

A. G. — Oui. Nos formations techniques et scientifiques représentent plus de 1,1 million d'euros en 2025, en augmentation de 6 % depuis 2 ans. À l'institut List, par exemple, les salariés se voient régulièrement proposer des formations sur le développement de codes et calculs, le génie logiciel ou l'IA.

Par ailleurs, nous possédons des salles blanches à l'état de l'art, et les faire fonctionner ne s'improvise pas ! La formation à ces équipements repose sur un apprentissage progressif, du compagnonnage et une qualification en lien avec les équipementiers. Deux nouvelles formations internes ont été mises en place en 2025 dans ce cadre afin de compléter le parcours



Les métiers du numérique évoluent très rapidement. Comment le CEA garantit-il que ses salariés restent au meilleur niveau ?

↑ Plateforme photonique du CEA à Grenoble.

des nouveaux arrivants et d'assurer le maintien des compétences de salariés déjà en poste. L'enjeu est majeur : les salles blanches de l'institut Leti font aujourd'hui 14 000 m², avec plus de 700 équipements, dont 80 de pointe.

Enfin, nous menons des projets en collaboration directe avec des industriels, depuis les grands groupes, comme STMicroelectronics, Soitec, SNCF ou Thales, jusqu'aux PME et start-up. Les possibilités de mobilité, détachements et mises à disposition viennent compléter cette fertilité croisée, à la fois pour le CEA et les industriels.

Des liens étroits avec les écoles et universités

Le CEA entretient des liens avec de nombreuses universités et écoles d'ingénieurs en France, et a conclu deux accords-cadres renforcés avec l'université Paris-Saclay et l'université Grenoble-Alpes. Cette coopération avec les acteurs académiques permet d'enrichir les cursus – les salariés CEA qui y interviennent apportant leur expertise – et de garantir une adéquation entre formation et compétences recherchées. À Grenoble, pour répondre aux besoins de profils multidisciplinaires, GEM (Grenoble École de management) a par exemple mis en place un MBA « Tech Executive » spécialisé en microélectronique, en collaboration avec le CEA.

A. G. — Notre premier levier de formation, c'est la recherche de pointe elle-même. Nous menons des travaux sur les grands changements en cours et à venir, ce qui oblige à garder un coup d'avance. Certains travaux de recherche eux-mêmes portent une offre de formation, comme l'école d'été de la *Chips Academy*, un programme en microélectronique financé par Erasmus+.

Nos collaborateurs participent à de nombreuses conférences internationales et échangent quotidiennement avec les industriels. Nous bénéficions des avancées et des idées des autres directions du CEA, et de son écosystème de veille très poussé pour repérer les émergences.

Notre organisation facilite également cette adaptation aux nouveautés avec une mutualisation de moyens (salles blanches, plateforme de caractérisation, plateforme de conception) et des équipes plus thématiques, ce qui facilite la prise en compte de nouvelles demandes.

Enfin, la mobilité interne est un puissant moteur de montée en compétences et de transversalité. En évoluant vers de nouveaux postes ou projets, nos collaborateurs croisent les expertises, enrichissent leur savoir-faire et insufflent un regard neuf sur nos activités. En 2025, plus de 2/3 de nos postes ont été pourvus par la mobilité interne. ●

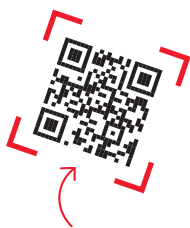
NUCLÉAIRE

Consolider une filière d'avenir

La filière nucléaire connaît d'importants besoins de recrutement, dans les opérations amont, l'exploitation ou encore le démantèlement. Fort de ses expertises historiques et de son rôle majeur dans ce secteur, le CEA contribue à la formation et à la transmission des compétences pour l'ensemble des acteurs et ses propres salariés.

L'INSTN, la formation au service du nucléaire

L'INSTN, institut de formation du CEA, fête ses 70 ans cette année. Hier comme aujourd'hui, il garantit et diffuse les connaissances nécessaires au développement de la filière nucléaire.



Retrouvez toutes les formations sur le site de l'INSTN.

Six nouveaux EPR à faire sortir de terre, avec une option pour huit supplémentaires ; la fermeture du cycle du combustible, avec la mise au point d'un réacteur à neutrons rapides, de son combustible et tout un aval du cycle à repenser ; 4 sous-marins lanceurs d'engins et un porte-avion à construire ; des start-up qui émergent et des nouveaux designs de réacteurs à concevoir ; des chantiers de démantèlement à mener à travers toute la France... sans même parler de la médecine nucléaire, avec les radiothérapies innovantes contre les cancers. C'est dire si le nucléaire a besoin de talents ! « *L'INSTN, Institut national des sciences et techniques nucléaires, contribue à cet effort en accompagnant des étudiants dans les différentes spécialités du nucléaire et en garantissant une formation continue de qualité pour les salariés déjà en poste ou ceux qui souhaitent se reconverter* », se félicite Pascal Yvon,

directeur de cet institut de formation rattaché au CEA, et qui administre également l'ensemble des doctorants du CEA.

Depuis sa création en juin 1956, l'INSTN accompagne la filière nucléaire française, avec des formations largement reconnues. Ce rôle de premier plan a d'ailleurs été distingué par le Grand Prix Sfen cet été. Avec la relance du nucléaire et son positionnement comme composante stratégique de la transformation énergétique, les effectifs connaissent une croissance importante, et les locaux doivent s'agrandir. Trois nouvelles salles de cours ont été construites sur le site de Cherbourg. À Marcoule, l'INSTN transforme le Visiatome, ancien centre de vulgarisation, pour y installer un chantier-école, tandis qu'à Saclay, c'est l'ancien réacteur Ulysse qui pourrait abriter un amphithéâtre et des salles informatiques supplémentaires.



Une visite guidée
d'Evoc, cela vous tente ?

La formation mixant distanciel et présentiel s'est également fortement développée depuis 2018. L'INSTN a conçu et administre sa propre plateforme de formation en ligne, ainsi que celle du CEA. Au total, plus de 25 000 utilisateurs sur plus de 1 000 formations. L'institut a intégré l'IA générative dans la réalisation de ressources pédagogiques et mène une réflexion sur l'impact de l'IA à la fois sur l'apprentissage et sur l'évolution des compétences professionnelles, notamment avec le concept de jumeau numérique des connaissances.

Du niveau d'opérateur à celui d'ingénieur

L'INSTN est impliqué dans plus de 40 diplômes, du niveau d'opérateur à celui d'ingénieur spécialisé, et en délivre 5 en propre, dont celui d'ingénieur spécialisé en génie atomique et de technicien supérieur en radioprotection. Les formations sont conçues selon une approche par compétences, en s'appuyant sur les besoins exprimés par les industriels. De quoi garantir une formation ancrée dans le terrain et des débouchés professionnels immédiats !

Ces dernières années, les outils pédagogiques ont été revus, notamment grâce au soutien de la fondation *Talents for Nuclear* et des partenaires industriels. Les chantiers-école se multiplient pour mettre les étudiants en conditions réelles. À Cherbourg, c'est ainsi la tranche dédiée à la propulsion nucléaire dans les sous-marins qui a été reconstruite.

Pour les formations des professionnels de santé, le simulateur Vert permet d'appréhender la mise en œuvre d'un traitement de radiothérapie ainsi que le fonctionnement d'un accélérateur de radiothérapie, afin de s'entraîner aux gestes techniques en dehors du contexte clinique et sans exposition aux rayonnements ionisants.

Evoc, reproduction fidèle et sans risque d'un réacteur

Véritable univers de réalité augmentée, la plateforme Evoc sur le site de Saclay permet quant à elle de simuler le fonctionnement d'un réacteur nucléaire. Une installation de type réacteur piscine y est entièrement reconstituée, avec une salle de commande,



Parole de partenaire

Arthur Margarit,
directeur Business Unit Ingénierie
Réacteurs – Assystem

« L'INSTN propose des cursus et des formations à très haute valeur ajoutée technique, ce qui constitue une vraie chance pour l'industrie nucléaire. Nous sommes particulièrement heureux d'entretenir, depuis sept années, une collaboration forte qui porte à la fois sur l'intégration des talents formés par l'INSTN, ainsi que sur le codéveloppement de formations pour les collaborateurs d'Assystem. Les équipes de l'INSTN sont à l'écoute de nos besoins et savent faire évoluer leurs formations en conséquence. Ce dialogue permet de construire ensemble des parcours toujours plus pertinents pour la filière. »



L'INSTN en dates

une zone de contrôle radiologique et enfin un hall réacteur où les apprenants peuvent s'entraîner à diverses opérations, comme charger et décharger des éléments combustibles et installer des dispositifs de mesure pour la recherche. Le tout à l'aide de lunettes de réalité virtuelle et de gants à retour haptique qui viennent superposer l'environnement de travail en temps réel.

L'ensemble Evoc permet ainsi aux étudiants et aux opérateurs en formation d'apprendre à piloter un réacteur au plus proche du réel et en toute sécurité, depuis l'arrêt jusqu'à la pleine puissance. Le simulateur et la surcouche de réalité augmentée reproduisent fidèlement le comportement d'un réacteur face aux différentes actions des apprenants, situations accidentelles comprises... ●

↓ La plateforme Evoc de l'INSTN permet aux étudiants de découvrir un réacteur nucléaire de type piscine grâce à la réalité augmentée.



© Y. Audic / CEA

Début des années 1950

Après la divergence de la pile Zoé, des cours sont dispensés par des grandes figures scientifiques du CEA au sein du Cnam, pour spécialiser les ingénieurs au nucléaire.

1954

Le premier cours de génie atomique destiné aux ingénieurs est créé. La promotion comprend 26 personnes, et l'année suivante, une formation semblable ouvre au CEA de Grenoble.

1956

L'INSTN est créé par décret et assure à la fois une formation académique en génie atomique et des formations plus courtes pour un public professionnel, dont des radiopharmaciens.

1974

Avec le plan Messmer, qui accélère le développement nucléaire de la France, les effectifs de l'INSTN augmentent. Quatre sites sont opérationnels : Saclay, Grenoble, Cherbourg et Cadarache. Marcoule suivra quelques années plus tard.

2016

L'INSTN devient centre collaborateur de l'AIEA pour l'éducation et la formation dans le nucléaire et la sûreté-sécurité, au bénéfice de pays émergents qui développent leurs compétences dans ces domaines.

2020

Ouverture de la plateforme de formation en ligne *Instart Learning* aux salariés CEA et aux utilisateurs INSTN. Elle embarque 25 000 apprenants sur plus de 1000 formations.

2024

La plateforme immersive Evoc est mise à niveau. Elle permet de simuler un réacteur nucléaire et d'interagir avec ses différents composants à travers la réalité augmentée.

Qu'apporte une formation à l'INSTN ?

Ce sont les diplômés qui en parlent le mieux !

« C'est une formation complète, assurée par des personnes du terrain, qui nous font bénéficier de leurs retours d'expériences. C'est aussi un accompagnement rassurant pour quelqu'un qui n'a pas du tout d'expérience préalable dans le nucléaire, comme c'était mon cas. »

Axelle

Ancienne auxiliaire vétérinaire devenue opératrice en radioprotection depuis 2025

« J'étais en alternance au CEA de Cadarache lors de ma dernière année aux Arts et Métiers, donc je connaissais déjà l'INSTN que j'ai intégré par la suite, sur le site de Cherbourg. La formation en génie atomique est pluridisciplinaire mais pas liminaire : on entre dans le détail, avec des compétences techniques extrêmement variées, ce qui offre un large choix de débouchés, voire de reconversion. Mon alternance portait par exemple sur la thermodynamique pour le nucléaire civil et aujourd'hui, je travaille dans la sûreté nucléaire pour la défense. »

Thibaut

Diplômé en génie atomique en 2024

« J'ai suivi une formation en génie nucléaire à l'ENCI Caen, puis un stage chez EDF. J'ai donc hésité à enchaîner avec un diplôme en génie atomique alors que j'étais déjà diplômé en génie nucléaire. Un échange avec un alumni m'a finalement convaincu. Et de fait, le diplôme de l'INSTN est une carte pour faire décoller un début de carrière ! Surtout qu'à l'époque, nous étions dans l'après-Fukushima et les perspectives n'étaient pas les mêmes. »

Alix

Diplômé en génie atomique en 2024

« La licence professionnelle m'a permis de découvrir le métier rapidement, avec un chantier-école et des cours délivrés par des experts en poste dans les entreprises, et ainsi d'acquérir des compétences techniques solides. »

Aurore

Diplômée de la licence professionnelle Assainissement, gestion de déchets et démantèlement en 2013

1150

étudiants formés
en 2025-2026,
dont **32%** d'étudiants
internationaux

745

sessions de formation
continue organisées
en 2025, pour plus de **6 200**
personnes accompagnées

« L'INSTN m'a permis de confirmer mon intérêt pour le nucléaire. J'ai fait mon stage de fin d'études en génie atomique sur le réacteur Osiris, où je suis resté en thèse. Puis le CEA m'a embauché et j'y suis toujours. La formation à l'INSTN apporte des connaissances pluridisciplinaires et surtout une démarche, des outils intellectuels pour savoir trouver une information pertinente et vérifiée. Dans notre monde en constante mutation, cette adaptabilité est une force. »

Fadhel

Diplômé en génie atomique en 1998



Découvrez l'École
du sodium en vidéo ici.



Des cursus très spécialisés pour l'avenir du nucléaire

Au sein de son centre de Cadarache, le CEA dirige l'École du sodium et des caloporteurs avancés (ESCA). Ces formations connaissent une hausse des demandes pour préparer le nucléaire de quatrième génération.

50 ans après, elle est toujours d'actualité ! Créée à l'origine pour l'exploitation de Phénix, prototype de réacteur à neutrons rapides refroidis au sodium, et pilotée au sein de l'institut Iresne, l'ESCA attire chaque année de plus en plus de professionnels du nucléaire pour des cursus sur les caloporteurs à métaux liquides, et notamment le sodium.

des auditeurs étrangers pour les formations à l'exploitation des boucles sodium. Les industriels français, eux, venaient se former dans l'optique du démantèlement des anciens réacteurs. Aujourd'hui, on constate un retour des acteurs français dans les cursus en lien avec l'exploitation. »

Distinguée par le Grand Prix Sfen en 2025, l'ESCA accueille ingénieurs et techniciens de toute la filière nucléaire (grands groupes, sous-traitants, start-up, etc.). D'une durée maximale d'une dizaine de jours, les parcours sont à la fois théoriques et pratiques, s'appuyant sur la plateforme Papirus de l'institut Iresne. « Nous assurons notamment des formations en sûreté-sécurité, essentielles pour les caloporteurs sodium, avec près d'une dizaine de sessions par an », chiffre Leïla Gicquel.

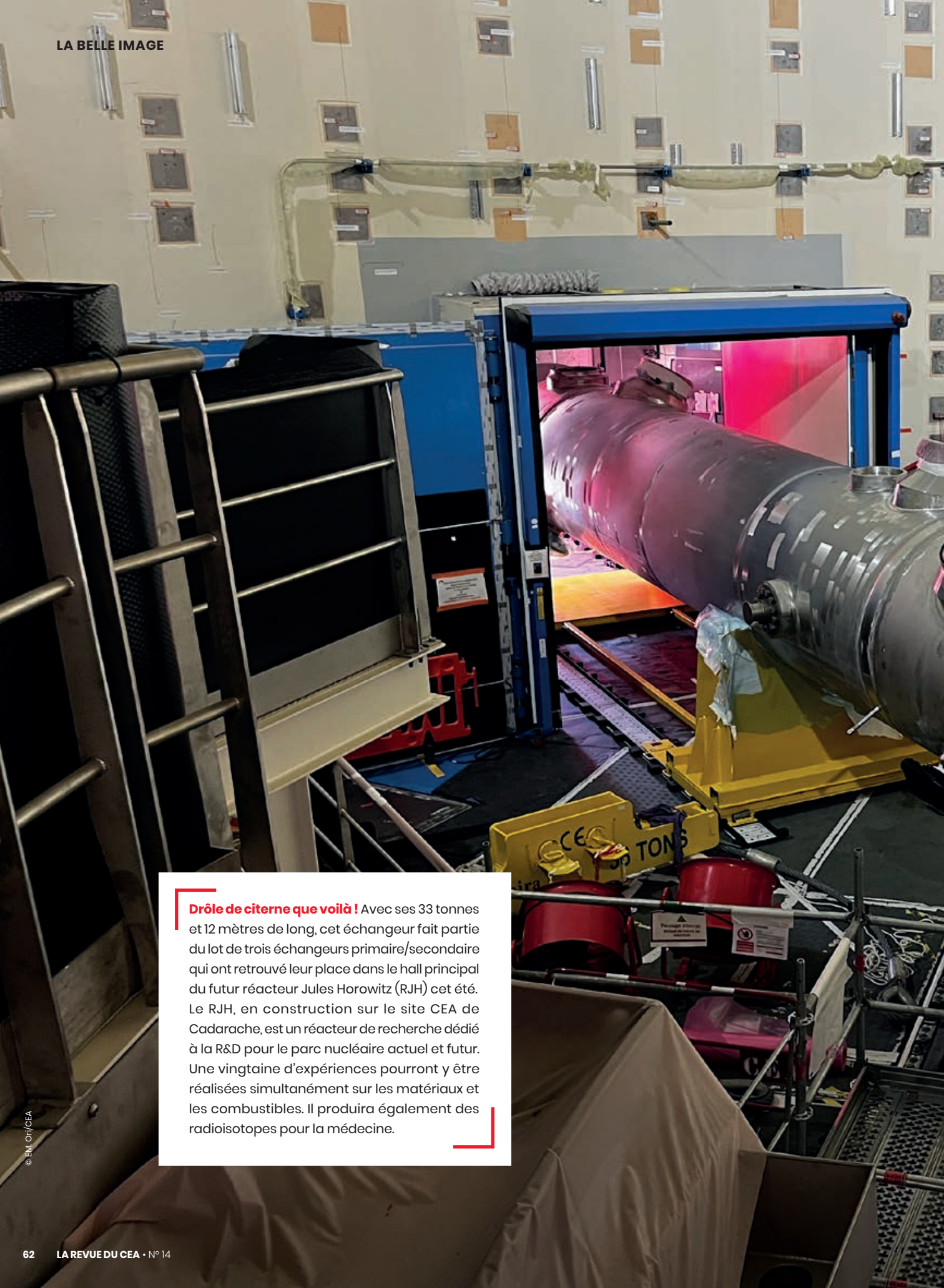
Les cours sont dispensés par les experts du CEA. Pour la suite, et face au regain d'intérêt, la responsable attire l'attention : « Nous allons avoir plusieurs départs en retraite prochainement et nous devons faire attention à ce que les compétences soient maintenues. » Outre le catalogue existant, les entreprises peuvent demander des cursus sur mesure sur des aspects spécifiques. Et à compter de 2027, si l'intérêt industriel est toujours au rendez-vous, l'ESCA proposera également une formation sur les sels fondus. ●



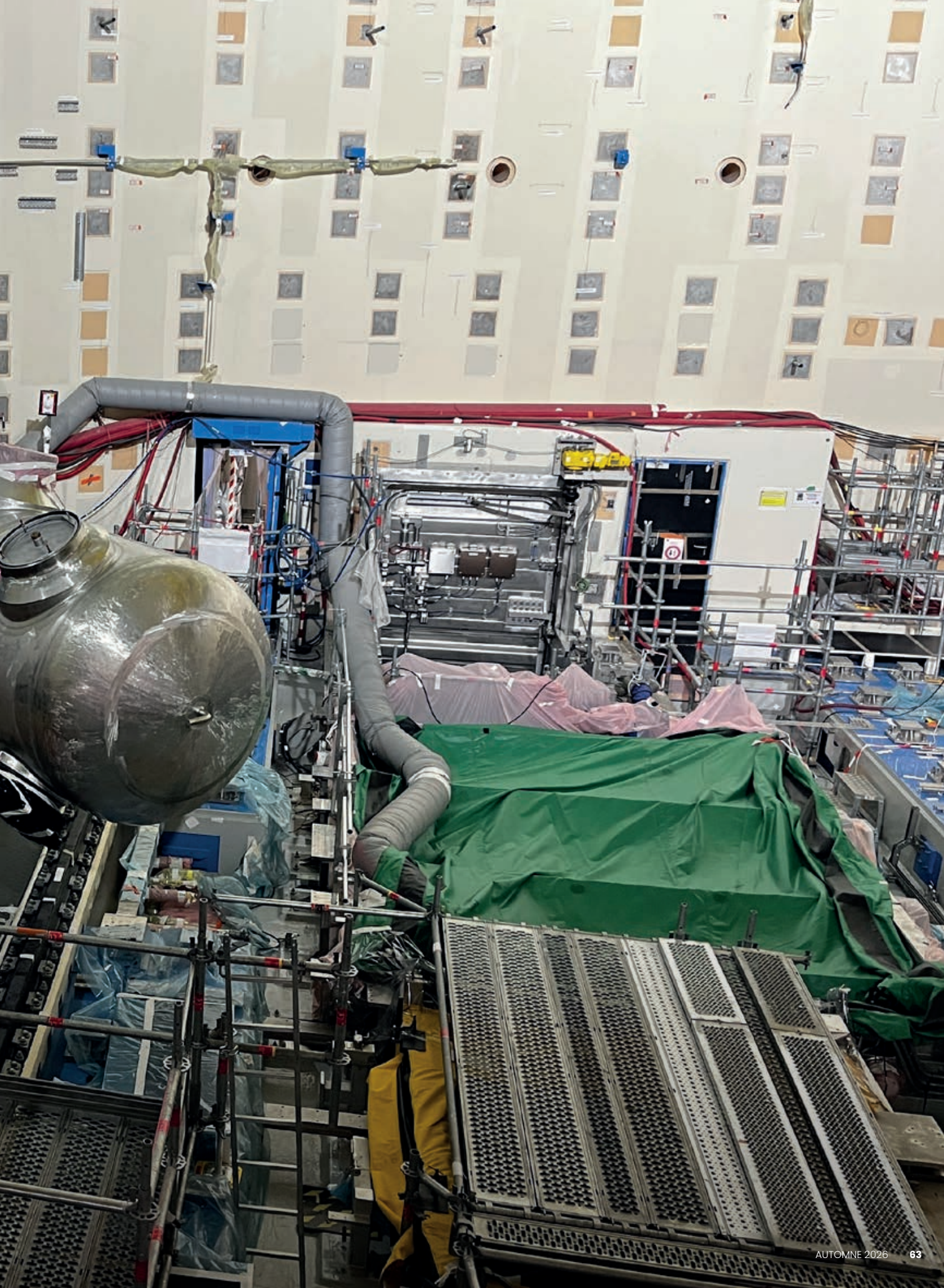
Ces designs de réacteurs présentent des enjeux particuliers de sécurité et d'opérabilité, en raison de leur réactivité avec l'eau et l'air. Le CEA est le seul organisme en Europe avec une telle école, et seules deux autres existent dans le monde, au Japon et en Inde. Avec les objectifs de fermeture du cycle et l'essor des réacteurs de quatrième génération, la formation à ces enjeux est très demandée.

En 2026, plus de 200 participants seront passés par cette école. « La ten-

dance est très nette, avec une importante hausse des inscriptions, confirme Leïla Gicquel, sa directrice. Du milieu des années 2010 jusqu'à 2023, nous n'avions plus que



Drôle de citerne que voilà ! Avec ses 33 tonnes et 12 mètres de long, cet échangeur fait partie du lot de trois échangeurs primaire/secondaire qui ont retrouvé leur place dans le hall principal du futur réacteur Jules Horowitz (RJH) cet été. Le RJH, en construction sur le site CEA de Cadarache, est un réacteur de recherche dédié à la R&D pour le parc nucléaire actuel et futur. Une vingtaine d'expériences pourront y être réalisées simultanément sur les matériaux et les combustibles. Il produira également des radioisotopes pour la médecine.



Notre sélection

100 %
MACHINES

Le CEA abrite des installations et des plateformes uniques en leur genre. Aperçu non exhaustif, à travers des visites inédites !



Des milliers de **micro-ondes** pour la fusion

Partez à la découverte des « micro-ondes » du tokamak West. Un peu sur le même principe que l'appareil qui réchauffe les plats dans une cuisine, ces dispositifs envoient des millions de watts par le biais d'antennes très spéciales pour chauffer le plasma au sein du réacteur de fusion nucléaire. On vous explique.



La machine **la plus complexe au monde**

Le CEA a ouvert les portes de ses salles blanches grenobloises à Yan Casta, pour une plongée dans l'univers des puces. À l'intérieur, une succession d'étapes et de machines de haute technologie. Des prouesses d'ingénierie que le CEA exploite pour mettre au point les composants microélectroniques du futur.



Iseult, une vue du cerveau très HD

La différence entre une IRM d'hôpital et Iseult, l'IRM à 11,7 teslas du CEA ? Elle est évidente, quand on regarde les images du cerveau en ultra-haute définition fournies par Iseult pour la recherche clinique. Le CEA a accueilli plusieurs vulgarisateurs scientifiques et santé dans ses installations ; à vous de suivre la visite !

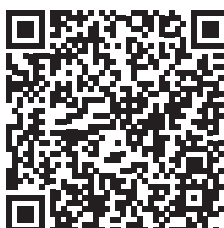
Un **réacteur nucléaire** tout en pixels

Les grandes installations, ce n'est pas que dans la vraie vie... Dans ce deuxième épisode de notre série *Gamolab*, où un chercheur et un joueur confrontent un jeu vidéo avec la réalité, c'est *Minecraft* qui abrite un réacteur nucléaire. Laissez-vous guider par Stéphane Sarrade, responsable des programmes énergie au CEA et par le créateur de contenus Aypierre.



Découper de longs **crayons**

Comment voir à l'intérieur d'un crayon de combustible nucléaire ? C'est le savoir-faire unique des deux laboratoires de l'installation Leca-Star au CEA de Cadarache. Une expertise essentielle pour la sûreté et les performances des réacteurs d'aujourd'hui et de demain !

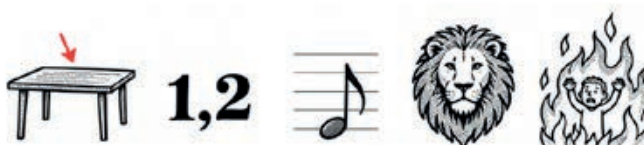


RÉBUS

Avez-vous tout lu dans cette *Revue* ?
Si oui, ce rébus coulera de source ! Si non, il n'est pas trop
tard pour remonter les pages et trouver la solution dans le
dossier sur la recherche fondamentale...

Les équipes du programme européen Epica
ont foré en 2025 une très longue carotte de glace
sous la calotte antarctique.

Que permettra-t-elle d'étudier ?



L'histoire du climat et la composition de l'atmosphère sur 1,2 million d'années.
(Lys - Toit - Reeeeuuh - Duc - Lime - Mât - Halc - Lac - On - Pot - Six - Ions - Deux - Latte - Mousse - Sphère - Sur - 1,2 - Ml - Lion - Dammé)

RÉPONSES



La science en perspective

Pour l'automne, direction Nantes et Les Utopiales ! Du 29 octobre au 1^{er} novembre, le festival revient sous le thème des « perspectives ». L'occasion de mettre un peu de science dans la science-fiction, qu'il s'agisse d'explorer les géométries ou de se méfier des biais cognitifs. Retrouvez nos chercheurs pour découvrir comment sont menées les observations de l'Univers, dialoguer autour des perspectives énergétiques, ou encore plonger au cœur des liens entre physique fondamentale et mondes imaginaires...

Plus d'informations : utopiales.org



Qui sommes-nous ?

Le CEA agit au service de la souveraineté scientifique, technologique et industrielle de la France et de l'Europe dans quatre domaines clés : les énergies bas carbone, le numérique, la médecine du futur, la défense et la sécurité, en s'appuyant sur une recherche fondamentale d'excellence.

Retrouvez toute l'actualité du CEA sur www.cea.fr
et sur nos réseaux sociaux



Un max de science,
un mini-impact
environnemental.



*Rendez-vous ici
pour découvrir La Revue!*

Cette revue est
fabriquée à partir
d'une pâte à papier
100 % recyclée.