

# 11 LA REVUE DU CEA

GRANDS INSTRUMENTS

## Indispensables sources de neutrons

- Page 12

NUMÉRIQUE

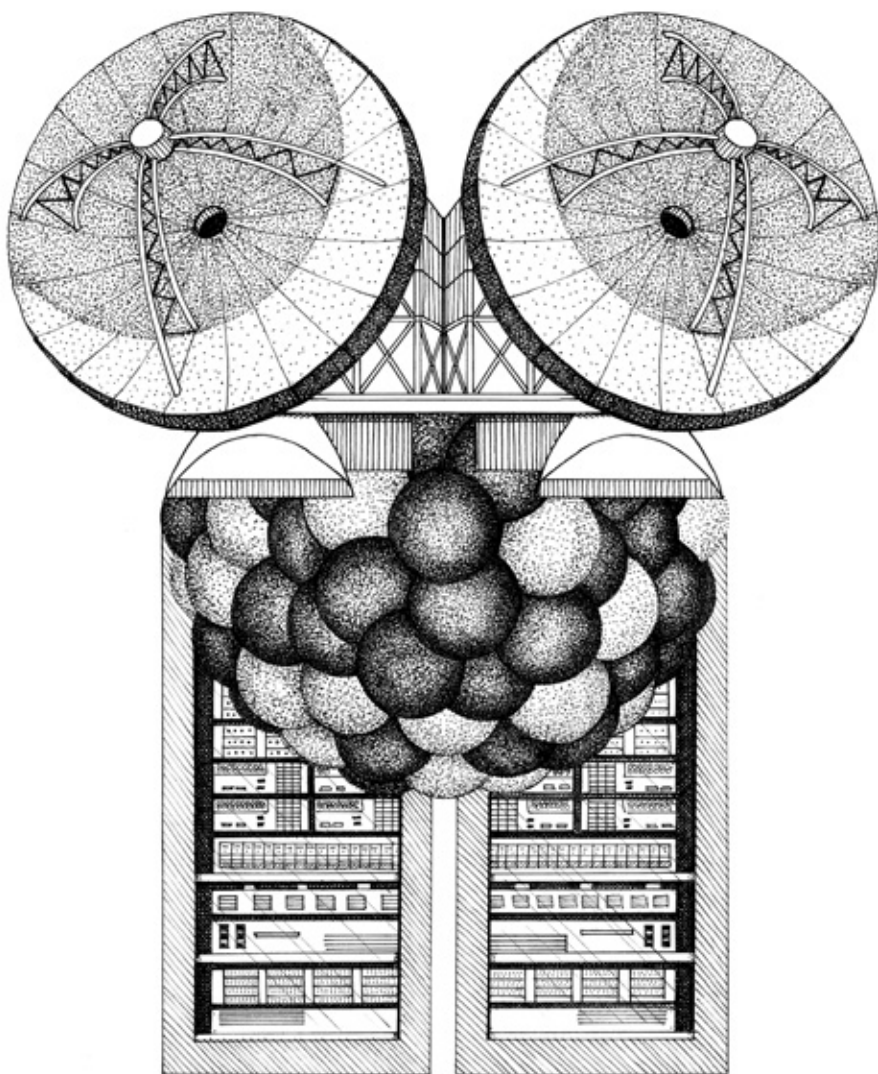
## L'avenir des data centers

- Page 30

ASTROPHYSIQUE

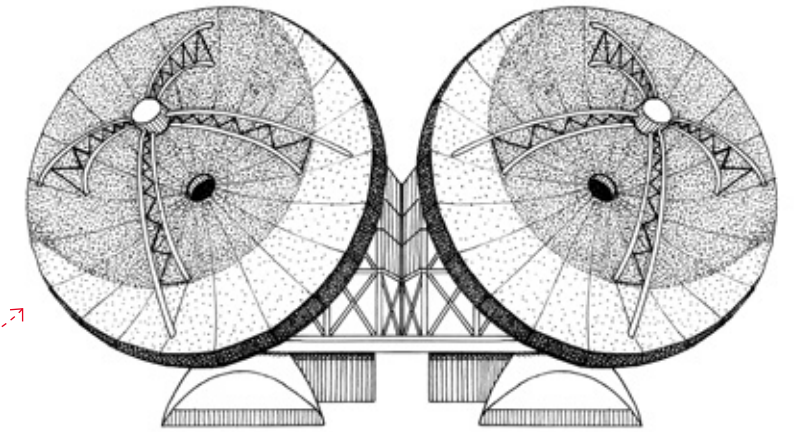
## L'espace, l'ultime frontière

- Page 46

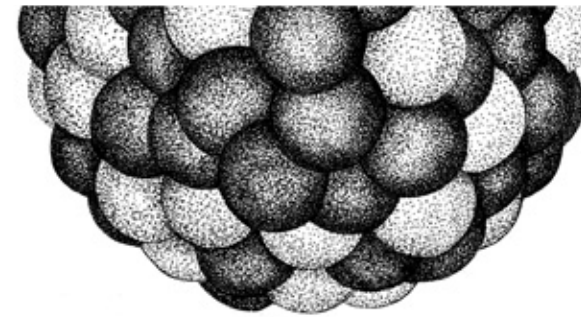


### *Les antennes du cosmos*

*Tendus vers l'infini, des yeux immenses scrutent et fouillent les galaxies lointaines. Au CEA, notre regard est fait d'instruments de haute technologie, d'analyses scientifiques et de modélisations numériques pour révéler, peu à peu, les mystères de l'Univers.*



## La couverture déchiffrée



### *Le noyau du savoir*

*Au cœur, un amas de protons et de neutrons. Neutrons que les physiciens du CEA utilisent pour sonder les secrets les plus profonds de la matière et donner vie à des innovations concrètes dans l'énergie, la santé ou encore les technologies de demain.*

#### **Revue éditée par le CEA**

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

#### **Directeur de la publication**

Anne-Isabelle Etienvre

#### **Rédaction en chef**

Laetitia Baudin

#### **Rédaction**

Laetitia Baudin, Audrey Dufour, Sylvie Rivière

#### **Iconographie**

Christelle Comoy

#### **Comité éditorial**

Renaud Blaise, Henri-Pierre Charles, Vincent Coronini, Séverine Paillard, Virginie Silvert.  
Avec le concours scientifique de Philippe Chomaz, Hervé Desvaux, Étienne Klein, Stéphane Loubière et Olivier Vacus.

#### **Illustration de couverture**

La Hache illustration

#### **Conception graphique**

bearideas

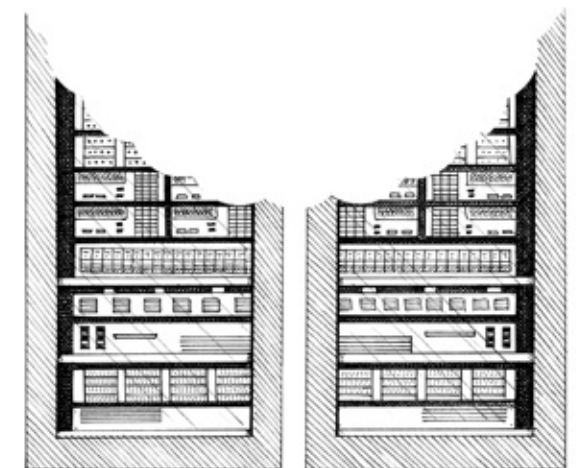
#### **Des remarques, des suggestions ?**

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

ISSN 2999-926X

### *Nouvelles fondations*

*Les data centers sont-ils les nouveaux temples de nos sociétés numériques ? Enjeux environnementaux, économiques et géopolitiques s'y concentrent. Le CEA déploie son savoir-faire en matière d'énergies bas carbone et ses solutions technologiques, pour que ces infrastructures stratégiques conjuguent sûreté et durabilité.*



**1. Jacques-Charles Lafoucrière** pilote le programme dédié au numérique haute performance du CEA. Il nous a ouvert les portes des centres informatiques pour la Défense et la recherche scientifique de pointe. Rendez-vous p. 30 pour une immersion dans ces lieux réservés aux initiés.

© CEA



# Les invités de la revue

**2.** Après une carrière d'ingénieur dans l'industrie qui l'a menée jusqu'à Shanghai, **Éleonore Hardy** est responsable des partenariats « photonique sur silicium » au CEA. Plus rapide et moins gourmande en énergie, cette technologie s'impose rapidement dans l'écosystème numérique. Et grâce à cette experte, on comprend pourquoi!

© CEA Leti

**3.** Ancien dirigeant de HP France, **Arnaud Lépinois** est aujourd'hui le PDG d'Eclairion. Cette société, au croisement du génie civil et de l'informatique, offre des solutions d'hébergement pour les calculateurs haute densité. Son plus gros client ? Mistral IA. Ancien sportif de haut niveau, il revient pour nous sur les challenges que représente l'IA pour l'avenir des centres de données et de calcul.

© Eclairion

**4. Arnaud Desmedt**, directeur de recherche au CNRS, est l'une des voix françaises de la diffusion neutronique. Il dirige le Laboratoire Léon Brillouin depuis 2023, porté par une conviction: les sources de neutrons, et l'innovation dans ce domaine, sont essentielles pour comprendre, concevoir et optimiser les matériaux et procédés de demain, au service de la recherche fondamentale et de défis sociétaux majeurs tels que l'énergie, la santé ou encore le numérique.

© Pascal Rousse

**5.** «Illustrateur nomade» comme il se définit lui-même, **Lapin** est carnetiste et peintre de l'Air et de l'Espace. Il a mis en dessins et en couleurs les sites et grandes installations du CEA dans une composition originale qui reflète l'histoire de l'organisme et la diversité de ses domaines de recherche.

© Tim Langlotz

**7. Marie-Hélène Mathon** est la représentante CEA au conseil de l'ESS, la future source européenne de neutrons située en Suède. Une mission évidente liée à ses expertises qui conjuguent science des matériaux, diffusion neutronique et pilotage d'infrastructures de recherche (IR). Elle coordonne aujourd'hui celles de la Direction de la recherche fondamentale du CEA, dont 13 IR (précédemment appelées « très grandes infrastructures de recherche »), et contribue aux stratégies nationales en matière de diffusion neutronique et d'IR.

© CEA

**6.** Patron du Département d'astrophysique, **Stéphane Mathis** est un expert de la théorie et de la modélisation numérique de la dynamique des fluides dans les étoiles et les planètes. Il considère l'Univers comme un laboratoire de physique extraordinaire, à même d'apporter des réponses à des questions fondamentales, comme l'origine et l'évolution de la vie sur Terre, l'avenir de notre planète, ou encore si nous sommes seuls dans l'Univers.

© E. Lemaître/CEA

## Éditorial

De l'infiniment grand à l'infiniment petit, c'est le voyage auquel vous convie ce nouveau numéro de *La Revue du CEA* !

Au-dessus de nos têtes et tout autour de la Terre, l'espace révèle peu à peu ses secrets grâce à une succession de missions spatiales et d'observatoires au sol, pour lesquels le CEA développe des instruments de haute technologie tout en menant des travaux d'analyse des données et de modélisation au meilleur niveau international (p. 46). Cette approche intégrée permet à ses équipes d'être présentes sur l'ensemble des grands projets européens et internationaux destinés à mieux comprendre l'Univers.

Une approche intégrée que le CEA déploie également pour les centres de données et de calcul, depuis les composants haute performance jusqu'à l'optimisation de leur consommation énergétique (p. 30). Il apporte des solutions et des innovations pour ses infrastructures et tout l'écosystème numérique, afin de garantir une approche souveraine, sûre et respectueuse de l'environnement.

Bien en deçà de l'échelle d'une puce de silicium, le CEA plonge aussi dans l'infiniment petit avec les sources de neutrons, capables de pénétrer au plus profond de la matière pour en dévoiler les moindres détails. Son savoir-faire s'illustre notamment en Suède sur l'*European Spallation Source*, qui sera d'ici quelques mois, dès sa mise en route, la plus puissante source de neutrons au monde. Le CEA en est l'un des contributeurs majeurs, à la fois sur l'accélérateur et sur les instruments (p. 12).

De l'infiniment grand à l'infiniment petit, c'était aussi l'esprit de la visite immersive que le CEA a présentée dans le pavillon France à l'Exposition universelle d'Osaka, l'été dernier. Un rendez-vous parmi tous ceux qui ont jalonné une année 2025 placée sous le signe de nos 80 ans et dont nous vous proposons une rétrospective, fresque et album souvenirs à l'appui (p. 58).

Bonne lecture !

### Merci également à

Philippe Amphoux  
Sylvain Bacquet  
Jean-Luc Béchade  
Francis Bernardeau  
Marc Berson  
Arnaud Claret  
Jean-Marc Ducos

Denis Dutoit  
David Elbaz  
Sophie Kerhoas  
Estelle Lemaître  
Loïc Le Noir de Carlan  
Stéphane Longeville  
Catherine Madec

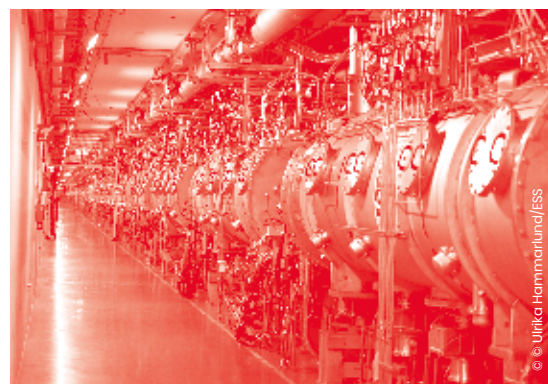
Jean-Baptiste Melin  
Alexandre Paléologue  
Hélène Perrin  
Nicolas Pichoff  
Alain Ruby  
Fabien Schussler  
Helmut Schober

Flore Sonier  
Antoine Strugarek

Et tous ceux qui ont aidé à réaliser cette revue !

## 01

### Indispensables sources de neutrons 12



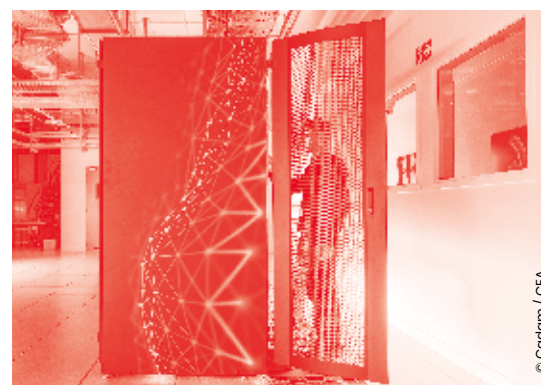
- Les neutrons en bref 14
- La France, championne de la neutronique 16
- L'ESSentiel 18
- Immersion au cœur de l'accélérateur 20
- Des instruments pour une science de pointe 22
- Icone, la petite française 24

#### Et aussi...

- Dans les coulisses du CEA 8
- La preuve par l'image 26
- Carte blanche : Former les salariés du nucléaire, en étroite coopération avec les industriels 28
- Portfolio : des aimants recyclés 42
- Le CEA sous le crayon de Lapin 58
- Souvenirs, souvenirs ! 62
- À vous de jouer 64
- Save the date 66

## 02

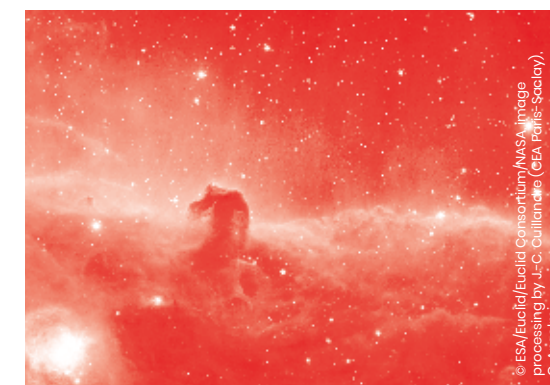
### Performant, souverain, frugal, fiable... le data center du futur se dessine 30



- Des infrastructures vitales 32
- Reportage à Bruyères-le-Châtel 34
- Entretien avec Arnaud Lépinos, PDG d'Eclairion 38
- Défis & innovations *made in CEA* 40

## 03

### L'espace, l'ultime frontière 46



- Entretien avec Stéphane Mathis, chef du Département d'astrophysique 48
- Le CEA et l'espace, en dates 52
- Quatre domaines de recherche à la loupe 54

# Dans les coulisses du CEA

**Au cœur de nos organismes, dans les canalisations, sous les mers, au musée, et même dans la prestigieuse enceinte des prix Nobel, les travaux du CEA illustrent une recherche riche et utile. Tour d'horizon de l'actualité qu'il ne fallait pas manquer.**



Plus de 36 000 personnes sont venues à l'édition 2025 du WNE, salon mondial du nucléaire, et le stand CEA n'a pas désempli pendant trois jours. Outre la mise en avant de plusieurs projets innovants pour la filière (torche à plasma, réalité virtuelle, drone et bien d'autres), le CEA a profité de l'occasion pour lancer Mantra, son hub participatif sur la fabrication additive métallique, avec Nikon SLM Solutions, spécialiste du secteur. Un consortium autour d'un espace numérique souverain d'échanges de données a aussi été créé, rassemblant le CEA, EDF, Dawex, le Gifem, l'Institut Mines-Télécom et Sopra Steria. Merci à tous ceux d'entre vous qui sont passés nous voir et à 2027 pour la prochaine édition !

## 2,2 millions

C'est le nombre de décès qui, chaque année, seraient liés à la dégradation de la qualité de l'air due aux incendies et aux feux de forêts d'ici la fin du siècle. Les mauvaises trajectoires climatiques actuelles favorisent les incendies, qui ne concerneront plus uniquement les pays tropicaux. Les risques de mortalité seront doublés en Europe et aux États-Unis, selon une étude internationale à laquelle a participé le CEA et publiée dans *Nature*. Les auteurs appellent à prendre en compte ce risque sanitaire dans les politiques publiques, qui se concentrent pour l'instant sur la pollution industrielle et celle liée aux transports.

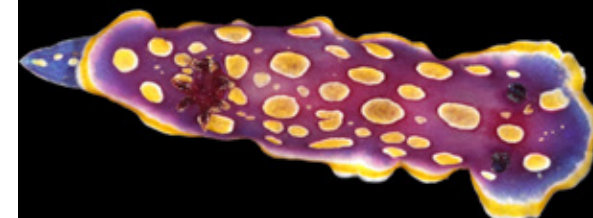
**Et pour mieux comprendre les liens entre santé et changement climatique, retrouvez notre conférence exceptionnelle avec Valérie Masson-Delmotte et Roger Legrand.**



## Les nanoplastiques nuisent à notre santé

Voilà une preuve supplémentaire de la nocivité des nanoplastiques sur notre organisme. Nos macrophages, cellules clés du système immunitaire, sont fortement perturbés en leur présence : stress oxydant ou encore altération marquée de leur capacité de phagocytose (processus qui leur permet d'ingérer des particules étrangères en vue de leur élimination). Selon les plastiques, leur contribution à la réaction inflammatoire dirigée contre l'agent agresseur est également affectée, suractivée ou au contraire sous-activée. Ces conclusions sont issues d'une étude impliquant des équipes du CEA, portant sur les impacts sur nos cellules immunitaires de deux polymères courants, le PET présent dans les bouteilles et le PCL utilisé dans certains emballages biodégradables.

# 100



C'est le nombre de génomes d'espèces marines déjà séquencés via le programme de recherche Atlasea, codirigé par le Genoscope (CEA). Lancé en 2023, Atlasea a pour ambition de cartographier le patrimoine génétique de 4 500 espèces marines présentes dans les eaux françaises : mollusques, crustacés, algues, éponges, poissons, etc. 2 000 espèces ont d'ores et déjà été collectées. Cette mine d'informations servira à étudier l'incroyable biodiversité marine, très mal connue et pourtant cruciale pour les équilibres naturels, à l'heure où celle-ci subit des pressions croissantes liées aux activités humaines et au changement climatique. Ces informations génétiques pourraient aussi servir à identifier de nouvelles molécules pour la médecine, l'alimentation ou encore les biotechnologies environnementales.



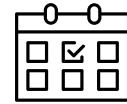
## On fait chauffer le moteur !

La chaufferie nucléaire du sous-marin d'attaque (SNA) *De Grasse*, quatrième bâtiment de la classe Suffren du programme Barracuda, a été mise en route ! Cette étape est incontournable avant la poursuite des essais et la livraison du bâtiment. Le programme de renouvellement des bâtiments de la flotte se poursuit également avec les quatre sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE) de troisième génération et le porte-avions nouvelle génération. Le CEA est maître d'ouvrage et autorité de conception des chaufferies nucléaires embarquées aux côtés de la DGA (maître d'ouvrage et autorité de conception du navire armé) et des industriels TechnicAtome (maître d'œuvre des chaufferies et des cœurs nucléaires) et Naval Group (maître d'œuvre du navire armé).



## Agile, autonome et innovant

Il s'appelle Tubocontact SD et c'est le fruit de quatre années de collaboration entre Sade Ingénierie et le CEA-List. Sa mission ? Réhabiliter des conduites de distribution d'eau potable de petit diamètre (de 100 à 150 mm), sans avoir besoin de remplacer le tuyau défaillant ni de creuser des tranchées. Basée sur l'expertise métier de Sade, cette solution robotique autonome agrège plusieurs innovations issues du CEA : de la miniaturisation mécatronique avec des outils de perçage, de réalésage et de pose intégrés dans un gabarit réduit, des capteurs avancés pour repérer les défauts, et une chaîne opératoire complète permettant l'inspection, le repérage, le nettoyage et l'étanchéité des conduites d'eau.



## Rendez-vous au musée

Le week-end des 24 et 25 janvier, direction le musée d'Orsay. En collaboration avec le CEA, le musée parisien dévoile un spectacle immersif dédié aux architectures vivantes, à la croisée de la biologie et du bâti. Sous la grande nef devenue ciel intérieur, les visiteurs profiteront d'un voyage guidé en musique et en images. Ces dernières sont issues des expériences des chercheuses et chercheurs du laboratoire mixte CytoMorpho (CEA/CNRS). Cellules, filaments et membranes prennent vie au gré des pulsations, révélant toute la fragilité du vivant et ses incroyables capacités d'adaptation.

**Spectacle à 19 h 30 et 21 h.**  
**Entrée payante, tarif réduit.**  
**Inscription obligatoire.**



Pour réserver sa place, c'est ici!

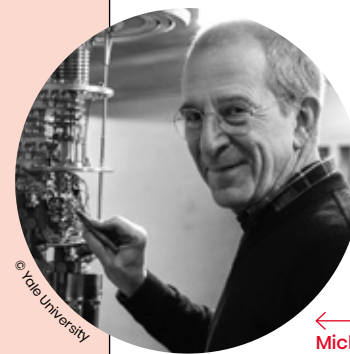
## Kézako? Un gyrotron

Le site CEA de Cadarache a reçu un drôle d'objet : un gyrotron. Destiné au tokamak West, cet élément génère des ondes à très haute fréquence qui viennent exciter les électrons du plasma de fusion à l'intérieur du tokamak, pour le chauffer. Il s'agit d'un composant essentiel, avec une puissance équivalente à 1 000 micro-ondes, et qui permet d'améliorer les performances du plasma. Construit par Thales, ce gyrotron est actuellement en phase d'essais et devrait être pleinement opérationnel début 2026.

# LA RECHERCHE PRIMÉE

Durant l'automne 2025, plusieurs prix ont couronné les travaux de chercheurs en poste au CEA ou qui y ont effectué une partie de leur carrière.

**Michel Devoret** a reçu, aux côtés des Américains John Clarke et John Martinis, le prix **Nobel de physique 2025** pour des recherches menées dans le cadre de son postdoctorat et qui sont à la base du calcul quantique moderne. Avec le groupe Qnantronique du CEA qu'il a cofondé à son retour en France, Michel Devoret a travaillé sur les circuits quantiques supraconducteurs, une exploration pionnière qui se concrétise par la mise au point du premier bit quantique supraconducteur fonctionnel. Professeur à Yale depuis le début des années 2000, Michel Devoret a contribué à établir un pont entre l'électronique des circuits intégrés et la mécanique quantique. Son parcours est à découvrir dans le prochain numéro de *La Revue du CEA*.



Pour plus d'infos, c'est par ici!

← Michel Devoret

Deux projets, l'un porté par **Henri Vincenti** (CEA-Iramis) et l'autre par **Kirone Mallick** (IPHT, CEA/CNRS) ainsi qu'un 3<sup>e</sup> impliquant **Philippe Ciaï** du LSCE (CEA/CNRS/UVSQ) ont été retenus par le Conseil européen de la recherche dans le cadre des **ERC Synergy Grants 2025**. Leurs ambitions respectives : dépasser les limites de l'électrodynamique quantique, décrire le comportement des systèmes de particules en interaction lorsqu'ils sont hors d'équilibre, et mieux comprendre l'impact du changement climatique sur les tourbières nordiques.

En France, l'Académie des sciences a décerné la médaille de Chimie à **Thomas Zemb**, directeur de l'Institut de chimie séparative de Marcoule, le prix Clément Codron à **Bernard Diény** (CEA-Irig) pour ses recherches en magnétisme, le prix « Astrophysique et sciences spatiales » à **Pierre-Olivier Lagage** (CEA-Irfu) et le prix Ampère de l'électricité de France à **Hubert Saleur** (IPHT).

Bravo, enfin, à nos deux lauréates des prix Fem'Energi 2025 : **Aurélié Weibel**, 2<sup>e</sup> prix « Étudiante Bac+2/+3 » pour son alternance au centre CEA de Valduc en tant que technicienne en radioprotection, et **Marina Faure**, docteure en radiochimie et chimie analytique (CEA-Isas), 3<sup>e</sup> prix « Étudiante Bac+5 et plus ».



Pour peu qu'ils soient de faible énergie, les neutrons sont au physicien ce que le microscope est au biologiste : un outil indispensable ! Organisés en faisceaux, ils pénètrent au plus profond de la matière et en révèlent les moindres détails. De ces connaissances scientifiques émergent de très nombreuses applications, par exemple dans les secteurs de l'énergie, des transports, des technologies de l'information ou encore de la santé. Le CEA, expert dans ce domaine, maîtrise à la fois la production et l'utilisation de ces particules. Il est un contributeur majeur de l'*European Spallation Source*, la plus puissante source de neutrons au monde dont la mise en route en Suède est imminente, et développe avec le CNRS le projet d'une nouvelle source nationale de neutrons, Icone.

# Indispensables sources de neutrons

→  
Chaîne des 29 cryomodules  
conçus par le CEA, sur  
l'accélérateur ESS.



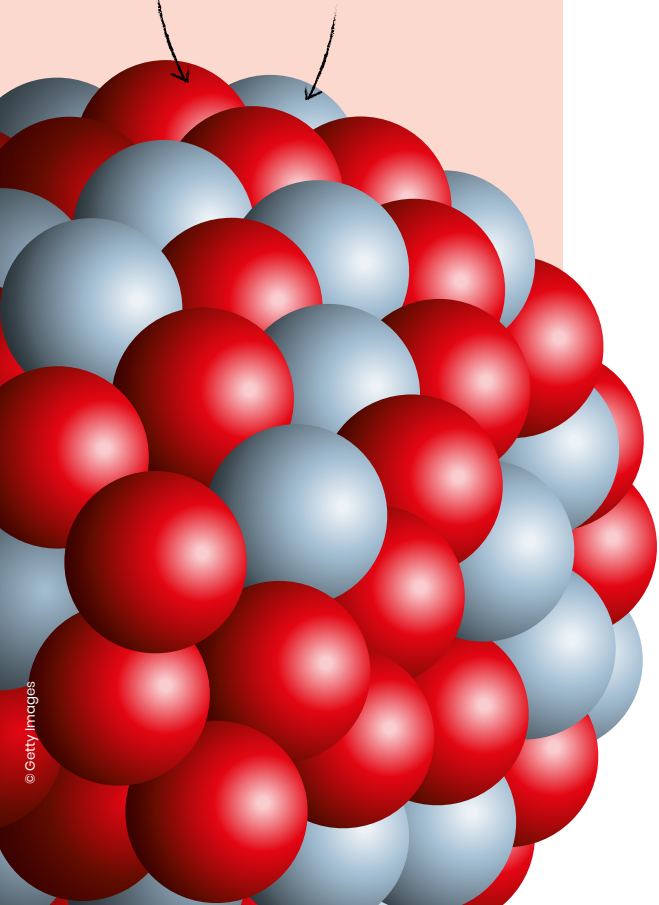
# Les neutrons

## EN BREF

## Que sont-ils ?

Les neutrons sont un des constituants de la matière : avec les protons, ils forment le noyau des atomes. Ils ne portent aucune charge électrique.

Neutrons Protons



## À quoi servent-ils dans la recherche ?

À **très forte énergie**, les neutrons abîment la matière. Ceux-là sont utilisés par les chercheurs pour comprendre les processus d'endommagement et de vieillissement des matériaux, en particulier dans les études de sûreté liées aux réacteurs nucléaires (voir les *Revue du CEA* 3 et 10).

À **basse énergie**, ils pénètrent à l'intérieur de la matière sans la dégrader. Les physiciens les utilisent à la fois pour l'imagerie et comme une « sonde » de très haute précision de la structure interne de la matière, notamment pour :

- ✓ **déterminer** la disposition des atomes ;
- ✓ **explorer** les propriétés physiques comme le magnétisme, la supraconductivité, etc. ;
- ✓ **détecter** les plus petits atomes, jusqu'à l'hydrogène, et distinguer les différents isotopes ;
- ✓ **observer** les mouvements internes – molécules qui se lient ou se séparent, vibrations infimes – sur des échelles de temps allant de la picoseconde (un millionième de millionième de seconde) à la microseconde (un millionième de seconde).

## Pour quelles applications ?

Tous les domaines de la science et de la technique bénéficient de la neutronique. La matière molle<sup>1</sup>, la matière complexe<sup>2</sup> et les matériaux en tirent probablement les plus grands avantages.

### QUELQUES EXEMPLES



**Énergie** : étudier la dégradation des batteries au lithium, le comportement des matériaux des panneaux solaires, le stockage de l'hydrogène, la distribution de l'eau dans une pile à combustible ou encore les évolutions microstructurales dans des alliages constitutifs des réacteurs nucléaires.



**Biologie** : visualiser l'interaction de petites molécules avec des membranes biologiques, mieux comprendre le fonctionnement des protéines.



**Santé** : améliorer la connaissance des virus, développer de nouveaux médicaments et vecteurs.



**Technologies quantiques** : explorer les mécanismes de stockage de l'information quantique et les matériaux susceptibles de l'héberger.



**Climat et environnement** : comprendre les cycles de l'eau et du carbone, en suivant l'humidité dans les sols ou le CO<sub>2</sub> dans les roches.



**Archéologie** : sonder la composition interne d'objets anciens ou retracer l'origine de fossiles, sans les altérer.

**(1)** Vaste famille de matériaux non cristallins, très déformables, qui va des matières plastiques aux bulles de savon, en passant par les gels, les élastomères, les cristaux liquides, les crèmes cosmétiques, etc.

**(2)** Très grande variété de matériaux allant de l'échelle moléculaire à macroscopique : composites, fonctionnels multiéchelles (supraconducteurs, magnétiques, multiferroïques, alliages à mémoire de forme, superalliages...), nanoparticules fonctionnalisées, roches, etc.

## Comment les produit-on ?

Pour libérer des neutrons, il faut « bousculer » le noyau des atomes. Comment ?

Par **fission nucléaire**, lorsqu'un noyau d'uranium 235 se divise au sein d'un réacteur nucléaire, générant un flux continu de neutrons. Cette méthode, qui date des années 1950, a par exemple été exploitée dans le réacteur Orphée sur le centre CEA de Saclay jusqu'en 2019, et l'est encore aujourd'hui dans le réacteur européen à haut flux de l'Institut Laue-Langevin à Grenoble.

Par **spallation**, quand des protons de haute énergie issus d'un accélérateur impactent des atomes lourds, comme ce sera le cas dans l'*European Spallation Source* (ESS), en Suède. Cette technique, née dans les années 1970, offre de bien meilleurs rendements qu'en réacteur, ne demande pas d'uranium enrichi et permet de produire les neutrons par impulsions, c'est-à-dire sous forme de jets discontinus dans le temps.

## Quelle différence avec les rayons X ?

Les **rayons X** interagissent avec les électrons qui gravitent autour des noyaux atomiques. Ils sont surtout sensibles aux atomes lourds, riches en électrons.

Les **neutrons**, sans charge électrique, ignorent les électrons. En interagissant directement avec les noyaux des atomes, ils pénètrent plus profondément dans la matière, ce qui permet d'étudier des volumes plus importants que par rayons X. Autre atout, grâce à leur spin, ils se comportent comme de minuscules aiguilles de boussoles capables de révéler ou de collecter des informations sur les propriétés magnétiques.

# La France, championne de la neutronique

Depuis des décennies, la France jouit d'une expertise reconnue à l'échelle internationale en science des neutrons, bâtie sur une solide communauté de chercheurs, des infrastructures nationales et une participation active aux installations européennes. Maintenir un accès suffisant à des sources de neutrons est incontournable pour la communauté.

**Quelle est la place de la France dans la communauté de la science des neutrons ?**

**Marie-Hélène Mathon** — La France a longtemps occupé le premier rang européen, à égalité avec l'Allemagne, et ses équipes comptent parmi les meilleures au monde. Ceci grâce à un double accès à une source nationale, le réacteur de recherche Orphée<sup>1</sup>, et à une source internationale de très haute puissance, le réacteur à haut flux de l'Institut Laue-Langevin à Grenoble<sup>2</sup>. Les pays dotés de leurs propres sources de neutrons disposent en général de communautés fortes, qui savent à la fois concevoir et

**Marie-Hélène Mathon**  
Coordinatrice des infrastructures de recherche au CEA et conseillère française au conseil de l'ESS

**Disposer d'une source nationale, plus modeste et accessible, est crucial pour répondre à l'ensemble de nos besoins. »**

construire les installations, développer les instruments et les exploiter au mieux, et enfin analyser finement les données recueillies.

**Arnaud Desmedt** — Un point important est que l'instrument n'est pas construit pour « lui-même », mais pour répondre à un besoin scientifique. Nos ingénieurs et chercheurs savent traduire en installations les besoins exprimés par les scientifiques, qui sont eux-mêmes force de proposition pour optimiser les instruments ou en proposer de nouveaux. Ce lien est très vivant au sein de la communauté française.

**Les sources de neutrons sont-elles indispensables aux chercheurs ?**

**A. D.** — Oui ! La diffusion neutronique contribue massivement aux sciences des matériaux, de la matière molle et complexe, du magnétisme, de la biophysique ou encore aux sciences et technologies quantiques. Elle a été indispensable pour valider des découvertes majeures – allant des superfluides aux quasi-cristaux, des polymères aux matériaux topologiques, et des multicouches magnétiques à la biologie structurale. La diffusion neutronique a ainsi joué un rôle central dans un large nombre de découvertes récompensées par les prix Nobel de physique et de chimie. Elle s'impose comme une technique déterminante et polyvalente pour comprendre la structure et la dynamique de la matière.

**M.-H. M.** — La plupart des pays reconnaissent aujourd'hui le caractère irremplaçable des sources de neutrons. Le Canada, qui avait fermé sa dernière source nationale en 2018, achète aujourd'hui du temps de faisceau à l'étranger tout en préparant de

nouveaux projets. Les pays d'Asie et d'Amérique du Sud investissent également dans ce domaine.

**A. D.** — Ces sources sont aussi appréciées des industriels. Énergie, défense, transports, fabricants de pneus, industrie de la métrologie, de la communication ou encore de la cosmétique, l'éventail est très large. Ils nous sollicitent dans le cadre de collaborations de R&D ou pour des prestations. Cette utilisation industrielle, qu'elle soit directe ou indirecte, représente 5 à 20 % du temps de faisceaux, selon diverses enquêtes nationales et européennes.

**L'offre est-elle actuellement suffisante pour la communauté française ?**

**A. D.** — Depuis l'arrêt du réacteur Orphée en 2019, nous ne disposons plus de source nationale, ce qui nous place dans une situation délicate, alors que les pays européens autour de nous – le Royaume-Uni, l'Allemagne, la Suisse ou encore l'Espagne – optimisent leurs sources existantes ou en développent de nouvelles. Ils rejoignent en cela les recommandations des feuilles de route de l'ESFRI, le Forum stratégique européen sur les infrastructures de recherche, qui propose d'adopter à la puissante source européenne – aujourd'hui le réacteur de l'ILL et demain l'*European Spallation Source* (ESS) en Suède – un réseau de sources nationales de proximité. Côté français, nous portons le projet Icone, une source de neutrons compacte et innovante.

**M.-H. M.** — L'accès à l'ESS, qui deviendra l'installation la plus puissante au monde, sera très concurrentiel. C'est déjà le cas à l'ILL, où les projets sont sélectionnés sur la base de l'excellence scientifique. Disposer d'une source nationale, plus modeste et accessible, est crucial pour répondre à l'ensemble de nos besoins, notamment pour les expériences standard ne nécessitant pas des flux extraordinaires. Une telle source est aussi essentielle pour mûrir nos projets en amont de l'ESS, afin d'en exploiter pleinement les capacités et d'optimiser nos chances de sélection. Elle permettra de réaliser les tests et expériences de validations préalables.



**Arnaud Desmedt**  
Directeur de recherche au CNRS et directeur du Laboratoire Léon Brillouin<sup>3</sup>



**La diffusion neutronique contribue massivement aux sciences des matériaux, de la matière molle et complexe, du magnétisme, de la biophysique ou encore aux sciences et technologies quantiques. »**

**A. D.** — J'ajoute que sans source nationale, notre communauté risque de perdre en expertise à échéance de 5-10 ans. Nous voyons déjà l'impact de la fermeture d'Orphée en 2019 à travers la baisse des publications françaises. Or, nous devons continuer à former nos scientifiques et maintenir nos compétences en neutronique.

**M.-H. M.** — La communauté française des neutroniciens est déjà passée de plus de 2 000 chercheurs il y a quelques années à environ 1 500 ! Dont un tiers au CEA. Certains d'entre eux, faute de pouvoir disposer d'une source de neutrons accessible, se sont réorientés vers d'autres solutions, même imparfaites, ou pire, se sont autocensurés.

**A. D.** — Cette situation nous pénalise dans l'avancement de nos connaissances et sur des sujets importants et stratégiques comme l'énergie ou la Défense. Il y va de notre souveraineté. Ne serait-ce que pour des questions de secret industriel, disposer d'un accès national relève de l'indispensable. ●

(1) Le réacteur Orphée, opéré par le CEA et exploité par le LLB, a été mis en route en 1980.

(2) L'installation et ses quelque 40 instruments, mise en route en 1971, est financée et gérée par la France, l'Allemagne et le Royaume-Uni, en partenariat avec 10 autres pays.

(3) Le Laboratoire Léon Brillouin (LLB) est une UMR CEA-CNRS, centre de recherche français spécialisé en neutronique hébergé au CEA, sur son centre de Paris-Saclay.

# L'ESSENTIEL

**Actuellement en fin de construction à Lund en Suède, l'ESS, la source européenne à spallation, devrait démarrer ses premiers essais au printemps 2026. Elle rejoindra un réseau d'installations déjà opérationnelles aux États-Unis, au Royaume-Uni et au Japon. La France, représentée par le CEA et le CNRS, illustre son savoir-faire dans la conception et la construction d'une partie de l'accélérateur et des instruments.**

## L'INSTALLATION

Un accélérateur long de 600 m et d'une puissance de 5 mégawatts (MW) accélère des protons quasiment jusqu'à la vitesse de la lumière, pour atteindre une énergie de 2 gigaélectronvolts (GeV). L'interaction avec une cible en tungstène génère les neutrons par des réactions nucléaires de spallation. Les neutrons sont alors ralentis d'un facteur 100 millions pour atteindre les basses énergies, puis conduits vers les aires expérimentales où se trouvent les instruments, au nombre de 15.

Livrée dans une première configuration avec une puissance de 2 MW au moyen de protons accélérés à 870 MeV, l'installation devrait monter en gamme sur une dizaine d'années pour atteindre les 5 MW.

## PARTENAIRES ET FINANCEMENT

- **13 pays européens** réunis en consortium, dont la France.
- Coût final : **3,7 milliards d'euros**. Le financement de l'ESS repose sur le principe de la contribution *in kind* : chaque pays partenaire amène une contribution en nature (savoir-faire, équipements, moyens humains) et un apport financier direct. La France, l'un des principaux contributeurs, participe globalement à hauteur de 9,2%, dont, *in fine*, la moitié en nature, à travers la conception et la construction d'une partie de l'accélérateur et de 5 instruments.
- En contrepartie des investissements et du financement partiel des frais de fonctionnement, les scientifiques français auront accès à au moins 15% du faisceau de neutrons.

↑ Site de l'infrastructure ESS à Lund, en Suède.

## POINTS FORTS

- **Sa puissance.** Chaque proton produisant en moyenne 20 neutrons, l'ESS sera la source la plus brillante<sup>(1)</sup> au monde. Conséquence : des temps d'acquisition considérablement réduits (en dessous de la minute), la possibilité de travailler sur des échantillons bien plus petits et de suivre en temps réel des phénomènes rapides, comme une réaction chimique ou le comportement d'un matériau soumis à des conditions extrêmes de température ou de pression.
- **La longueur de son pulse.** Les neutrons de l'ESS seront émis par jets de 2,86 millisecondes, la plus longue durée au monde, ouvrant la voie à des expériences de physique inédites.

(1) La brillance indique le nombre de particules émises par centimètre carré et par seconde.

## CALENDRIER

- 2009** ► décision de la construction de l'ESS en Suède.
- 2014** ► pose de la première pierre.
- Début 2026** ► mise en route de la cible et production des premiers neutrons.
- 2028** ► ouverture progressive des 15 premiers instruments aux utilisateurs.
- 2035** ► atteinte de la pleine puissance (5 MW) et ouverture de 7 nouveaux instruments.

## La contribution stratégique du CEA à la source européenne de spallation

**Helmut Schober,**  
directeur de l'ESS



La construction de l'ESS repose sur un modèle collaboratif mobilisant l'excellence européenne en neutronique et en accélérateurs. Le CEA y joue un rôle décisif, alliant excellence technique et coordination stratégique. Ses contributions sont essentielles pour faire de l'ESS un fleuron mondial de la recherche au service de la science, notamment celle des matériaux, de l'innovation sur les accélérateurs et de la collaboration européenne.

Le CEA a non seulement fourni les éléments essentiels que sont les cryomodules elliptiques supraconducteurs radiofréquence (SRF), mais aussi piloté l'intégration des SRF produits par les partenaires italiens et britanniques, assurant une performance homogène. Cette collaboration illustre la capacité du CEA à diriger, harmoniser et valider les contributions venues de différents collaborateurs européens. La production du quadripôle radiofréquence (RFQ), de l'instrumentation de faisceau et des systèmes de contrôle associés à ces composants est aussi à son actif.

Je souligne également son rôle clé dans le développement de l'instrumentation et des systèmes d'environnement d'échantillons, mené en collaboration avec le CNRS via le Laboratoire Léon Brillouin. À travers ces réalisations, le CEA démontre la pertinence des partenariats *in kind* pour fournir des technologies de pointe, renforcer les compétences industrielles et former la prochaine génération d'ingénieurs et de scientifiques.

La coopération entre l'ESS et le CEA est une expérience humaine remarquable fondée sur la confiance, et souvent à l'origine de liens personnels profonds et durables. C'est une base solide sur laquelle nous nous appuyerons pour poursuivre ensemble le développement de l'ESS dans les décennies à venir.

# Immersion au cœur de l'accélérateur

**Plus de 50 % de l'accélérateur de l'ESS est de conception et fabrication française. Des composants essentiels comme les cryomodules ont été assemblés à Saclay, dans les laboratoires du CEA.**

**S**ur près de 600 m de long, l'accélérateur de l'ESS ressemble davantage à une succession de wagons qu'à un tube uniforme. Production par la source, mise en forme du faisceau, formation de paquets de particules, accélération progressive... En suivant une série d'étapes, les protons sont amenés de quelques électronvolts à 2 gigaélectronvolts (2 GeV) pour atteindre 96 % de la vitesse de la lumière, le tout sous vide. La dernière ligne droite les conduit jusqu'à la cible, une roue tournante de tungstène de 2,5 mètres de diamètre, pesant près de 6 tonnes !

## Une première accélération

En début de chaîne, la cavité RFQ, pour « quadripôle radiofréquence », assure le passage des protons de 75 à 3 600 keV. « Entièrement conçue par le CEA, du design à l'installation sur site, démarrage inclus », précise Catherine Madec, cheffe de projet « accélérateur » jusqu'à mars 2025. Rien d'étonnant à cela quand on sait que l'organisme est l'un des plus grands experts mondiaux en la matière, livrant des RFQ à des infrastructures de recherche telles que le LHC au Cern et le Grand accélérateur

national d'ions lourds (Ganil) à Caen. Sur 4,6 m de long, 5 tronçons successifs en cuivre ultrapur, usinés avec une précision de 10 micromètres, transforment le faisceau continu de protons en un faisceau pulsé transmis à la section suivante de l'accélérateur. Cinq années de travaux auront été nécessaires pour finaliser la conception et l'assemblage avec le concours des sociétés Mecachrome et AMD, avant la livraison en Suède, en août 2019.

## 30 cryomodules

Les tout derniers tronçons de l'accélérateur, répartis en trois familles de cavités supraconductrices échelonnées sur 300 m, amènent alors les protons à leur vitesse maximale. Cette technologie, qui impose un refroidissement à -271°C, permettra l'accélération des particules sur des distances courtes grâce à un champ électrique



← Assemblage de cryomodule en salle blanche, au CEA Paris-Saclay.

supervision des ingénieurs-chercheurs du CEA. Au total, 29 cryomodules sur les 30 à fournir par le CEA ont été assemblés, puis livrés en Suède entre septembre 2020 et février 2025, qui viendront s'ajouter aux 13 autres confiés au CNRS.

## Un long processus de R&D

Pour veiller au parfait fonctionnement de l'installation, l'ESS regorge d'outils de diagnostic tout le long de la ligne accélératrice, assurant des réglages automatiques en cas de besoin. Certains lots ont été confiés au CEA, comme la mesure de la composition du faisceau, sa taille (longueur et largeur), sa pureté et son intensité.

« L'ESS est l'aboutissement d'un long processus, et notamment du programme européen CARE, lancé en 2003, dont l'objectif était de lever les verrous technologiques des futurs accélérateurs de protons, rappelle Catherine Madec. L'ESS a bénéficié de toute la R&D développée dans ce cadre et des prototypes construits. » Quelle suite pour les équipes du CEA maintenant que leur mission en Suède est accomplie ? D'abord, suivre de près la mise en route et le fonctionnement de l'accélérateur et en retirer des retours d'expérience pour les générations suivantes. « Nous allons peut-être blinder un peu plus notre cryomodule, choisir des matériaux différents, ou même opter pour une peinture qui absorbe davantage le rayonnement thermique », anticipe Catherine Madec. En parallèle, l'équipe travaille à d'autres projets, comme Icone, la source nationale de neutrons conçue par le LLB (voir p. 24), ou encore PIP-II, un projet américain d'accélérateur de protons imaginé pour produire non pas des neutrons, mais des neutrinos. Une tout autre aventure... ●

élevé, tout en limitant les pertes à quelques watts. « Notre principal défi a été la longueur du pulse de 2,86 ms, qui demande des champs élevés par rapport à d'autres machines et génère des échauffements, raconte Catherine Madec. Pour concevoir les cavités en respectant les performances demandées, nous avons dû inventer de nouvelles solutions, par exemple avec des traitements thermiques et chimiques du niobium, le métal supraconducteur utilisé. Ou encore en réalisant les assemblages dans des salles blanches de propreté équivalente à celles de la microélectronique. » Au-delà des cavités – conçues par le CEA mais fabriquées par un autre pays partenaire dans le cadre de l'*in kind* – il a aussi fallu penser tous les équipements qui les accompagnent. Et la liste impressionne : réseau de fluides cryogéniques pour les alimenter, blindage contre le champ magnétique, écrans thermiques pour limiter les pertes, tirants pour soutenir les cavités et régler leur alignement par rapport à l'axe du faisceau, etc.

C'est dans les grands halls des installations du CEA, à Saclay, que les prototypes des cryomodules – incluant chacun 4 cavités supraconductrices – ont été développés, et que les assemblages définitifs ont été réalisés par un industriel français, sous la

Découvrez la chaîne de montage des cryomodules de l'accélérateur du projet ESS, dans les locaux du CEA, à Saclay.



# Des instruments pour une science de pointe

Si 22 instruments seront à terme installés dans l'ESS, une première série de 15 a été sélectionnée pour la phase initiale de construction, couvrant la majorité des besoins scientifiques. 5 d'entre eux bénéficient d'une forte contribution française, impliquant le Laboratoire Léon Brillouin, en association avec une poignée de laboratoires européens.

« **N**ous avons dû concevoir une nouvelle génération d'instruments », annonce Stéphane Longeville, directeur de recherche au CEA en neutronique et instrumentation associée, plutôt habitué aux flux continus de neutrons générés par les réacteurs de recherche comme Orphée ou celui de l'ILL. En Suède, les neutrons seront envoyés en paquets – les chercheurs parlent de *pulse* – sur une durée de 2,86 ms. Pour les chercheurs, 2,86 ms, c'est long ! À tel point que Stéphane Longeville n'hésite pas à évoquer un changement de paradigme à la fois dans la conception des instruments, mais aussi dans les méthodes de collecte, de traitement et d'analyse des données. Les instruments ont notamment dû être allongés, « pour passer d'une vingtaine de mètres sur Orphée à des longueurs allant jusqu'à

160 m sur l'ESS ! », avec toutes les optimisations induites, notamment sur les matériaux des optiques.

## Diffraction et diffusion

Comme toujours en neutronique, les instruments se partagent en grandes catégories.

Certains d'entre eux sont conçus pour mesurer la diffraction des neutrons et étudier la structure des matériaux, y compris magnétique. En termes simples, il s'agit des phénomènes d'interférence qui se produisent lorsqu'une onde, ici celle formée par les neutrons, rencontre un obstacle ou une ouverture.

D'autres sont destinés à des expériences de diffusion de neutrons à petits angles, idéales pour accéder aux structures de gros objets et à leur organisation. Sont notamment concernées les macromolécules – comptant des dizaines, voire des centaines

## 5 INSTRUMENTS CONSTRUITS EN COLLABORATION AVEC LE LLB

**MAGIC** : diffractomètre polarisé ; accès aux structures magnétiques des matériaux.

**CSPEC** : spectromètre ; accès aux mouvements à l'intérieur de la matière.

**SKADI** : instrument de diffusion de neutrons aux petits angles ; étude de structures de grande échelle.

**DREAM** : diffractomètre non polarisé ; étude des structures atomiques des matériaux, hors propriétés magnétiques.

**BIFROST** : spectromètre dédié à l'étude des monocristaux, un état de la matière en structure ordonnée.



L'instrument Bifrost, conçu avec la contribution du CEA, est logé dans une casemate en béton de 10 m sur 10 installée au bout d'un guide de neutrons long de 160 m, transportant les neutrons de la cible à l'échantillon.

de milliers d'atomes – et les matières complexes que l'on trouve dans les métaux, les verres, la matière molle, vivante, inorganique, etc. Cette technique renseigne par exemple sur les interactions de protéines à l'intérieur de systèmes ou encore sur l'auto-organisation de polymères.

Enfin, les spectromètres apportent des informations sur les mouvements au sein de la matière, quelle qu'elle soit : solide, liquide, vivante ou non, à différentes échelles de temps (allant jusqu'à des durées aussi courtes que la picoseconde<sup>(1)</sup>) et de taille (de 1 à 1 000 angströms<sup>(2)</sup>, c'est-à-dire du niveau atomique à macroscopique).

## De nouveaux horizons scientifiques

La très haute brillance de l'ESS, ses *pulses* longs et ses instruments conçus sur mesure, tous achevés et livrés ou en cours de finition, forment une combinaison unique au

monde qui permettra d'ouvrir de nouveaux champs scientifiques. « *Il existe tellement d'expériences que l'on ne pouvait jusque-là pas envisager, et que l'on pourra désormais et a priori réaliser sur l'ESS, s'enthousiasme Arnaud Desmedt, directeur du Laboratoire Léon Brillouin, comme l'exploration des phénomènes d'alternance magnétique, ces nouvelles phases magnétiques découvertes dans les matériaux dans les années 2020. Ou encore des analyses de matériaux sous haute pression, qui ne peuvent être réalisées que sur de très petits échantillons, tout comme le suivi in-situ de toutes les étapes clés se déroulant lors de réactions électrochimiques au sein d'une batterie.* »

Alors que l'ESS n'a pas encore produit ses premiers neutrons, les appels à projets sont déjà lancés pour étoffer la collection des instruments de l'installation. Les meilleures équipes européennes sont à pied d'œuvre, parmi lesquelles celles du LLB, qui proposera 3 nouveaux instruments. ●

(1) 1 picoseconde = 1 millionième de millionième de seconde.

(2) 1 angström = 1 dixième de milliardième de mètre.



## ICONE, LA PETITE FRANÇAISE

Voilà une installation attendue avec impatience par la communauté scientifique française ! Portée par le CEA et le CNRS, avec le concours de partenaires industriels pour la construction, Icone devrait accueillir ses premiers utilisateurs autour de 2034.

60 fois plus petite en envergure que l'ESS, avec un accélérateur 15 fois plus court et 40 fois moins puissant. Comparée à l'installation européenne, Icone, dont l'implantation est prévue sur le site du CEA à Saclay, fait figure de « minisource » de neutrons. Les scientifiques la qualifient de compacte et intense. « Cela fait une dizaine d'années que nous travaillons sur ces concepts. Un démonstrateur, Iphi-neutrons, a d'ailleurs été construit, avec succès, sur le site CEA de Saclay », précise Arnaud Desmedt, le directeur scientifique d'Icone. Si bien que la France est aujourd'hui leader au niveau mondial dans le domaine des sources compactes. Accélérés sur 40 m, les protons seront lancés non pas sur une cible, mais sur deux cibles différentes, l'une recevant les faisceaux à *pulses* longs (2 ms), et l'autre ceux à *pulses* courts (400 ms), avec la possibilité à terme d'ajouter d'autres cibles. Cette modularité est

l'une des particularités d'Icone. Elle permettra de conduire plusieurs expériences en parallèle dans des domaines différents de la physique. Les neutrons seront quant à eux générés non pas par spallation à haute énergie comme dans l'ESS, mais via une réaction de basse énergie sur la cible, résultant de la désexcitation des noyaux après absorption des protons.

### Une première collection d'instruments

De l'autre côté des cibles, une première collection de 12 instruments sera installée. Elle devrait répondre à un grand nombre de besoins scientifiques. Les musées sont aussi intéressés, « par exemple pour analyser le contenu d'une jarre, très ancienne et scellée, sans avoir à l'ouvrir », illustre Arnaud Desmedt. Pour ceux-là, pouvoir disposer d'une analyse neutronique sur le sol français sera une aubaine. Icone se veut accessible. Pour accélérer les processus, trois appels à proposition seront donc lancés chaque année au lieu de deux, comme c'est habituellement le cas sur ce type d'installation. Et pour les « urgences »,

un accès rapide avec réponse sous un mois est prévu sur 20 % du temps de faisceau. « Typiquement pour des industriels ou des secteurs stratégiques comme le nucléaire ou la Défense, indique l'expert. Une manip supplémentaire pour boucler une publication peut aussi être une urgence. »

### L'avant-projet détaillé achevé

L'avant-projet détaillé, rédigé par le CEA et le CNRS avec les contributions d'une vingtaine d'autres laboratoires français et de quelques collaborateurs allemands et italiens, est quasi finalisé et a déjà été présenté aux tutelles. L'équipe prépare désormais le lancement des études préliminaires pour la construction du bâtiment. « L'objectif est, dans une décennie, d'y accueillir 600 utilisateurs par an sur les 1 500 neutroniciens de la communauté française, pour une capacité de 350 expériences annuelles », chiffre Nicolas Pichoff, le chef de projet. Dès 2034 sur une première tranche composée d'une cible et de 6 instruments, puis sur l'installation complète à compter de 2037. ●



## Une source nationale est indispensable pour la R&D sur les matériaux d'intérêt nucléaire »



Icone répondra à une large gamme de besoins scientifiques pour la recherche académique et en soutien aux industriels. Quelques avantages liés au caractère national de l'installation intéressent particulièrement les experts en matériaux pour le nucléaire, comme en témoigne **Jean-Luc Béchade**, directeur de recherche au CEA, spécialisé dans ce domaine.

Nos travaux sur les matériaux d'intérêt nucléaire touchent évidemment à des enjeux de souveraineté. La diffusion neutronique nous est indispensable, au même titre que d'autres outils comme le rayonnement synchrotron ou la microscopie électronique. Pouvoir en disposer au sein d'une installation nationale, c'est travailler en toute confidentialité sur des matériaux parfois sensibles, avec la garantie d'un accès sécurisé aux données acquises.

Certains de nos échantillons, extraits par exemple de gaines de combustibles usés, sont par ailleurs radioactifs. Icone, situé sur le site du CEA, sera pour nous un atout évident à la fois parce nous disposons sur place de laboratoires « chauds » et de toute la logistique liée à la radioprotection, mais aussi parce que cela nous affranchit des problématiques de transport à travers l'Europe.

J'ajoute qu'avec un accès moins concurrentiel, nous serons plus réactifs, comme lorsque nous disposions de la source Orphée. Et surtout, nous pourrions tester en amont, sélectionner et optimiser les expériences les plus pertinentes pour l'ESS. Nous pourrions n'en obtenir qu'une seule par an, il ne faut pas se rater ! Suivre l'évolution dynamique de la structure d'un matériau lorsqu'on le soumet par exemple à une forte température avec des données recueillies quasiment toutes les millisecondes, voilà ce que promet l'ESS, et c'est unique.

L'essentiel de nos besoins, au service de la filière nucléaire, est lié à la caractérisation de matériaux et composants : combustible (uranium, plutonium, américium et leur cortège de produits de fission),

gaine en alliage métallique qui l'enserme, et notamment celle des réacteurs de 4<sup>e</sup> génération, structures (comme la cuve du réacteur) incluant les soudures. Nous étudions leur vieillissement dans un environnement irradiant, tout comme leur comportement en situation accidentelle, et développons des microstructures innovantes. Les neutrons sont pour cela une sonde extrêmement polyvalente pour les étudier à toutes les échelles. Je citerai deux exemples. Nous traquons la présence d'hydrogène dans les métaux, car il les fragilise. Ce problème concerne en réalité de nombreux secteurs industriels, le nucléaire, mais aussi la production d'hydrogène, l'aéronautique, l'automobile, etc. Grâce à l'extrême sensibilité des neutrons à cet élément, nous savons quantifier et localiser sa teneur dans un matériau, et par conséquent optimiser nos matériaux. Nous développons également des matériaux composites renforcés. Des particules nanostructurées sont par exemple incluses au sein de matrices métalliques ou céramiques pour augmenter leur résistance mécanique. Là aussi, les neutrons nous apportent de précieuses données en nous renseignant sur la distribution, la taille et la composition de ces inclusions. Mes collègues qui travaillent sur le stockage et l'entreposage des déchets radioactifs et combustibles usés comptent aussi parmi les adeptes des neutrons. Ils étudient par exemple la dynamique de l'eau dans les milieux poreux.

En attendant la mise en service de l'ESS, puis d'Icone, il nous reste l'ILL sur le sol français, et exceptionnellement, quelques créneaux à l'étranger. D'où notre impatience ! ●

↑ Tests sur un prototype de source compacte de neutrons réalisés par une équipe du LLB dans le centre de recherche Jülich, en Allemagne.

# 80

ANS

## LA PREUVE PAR L'IMAGE

Alors que le CEA a célébré ses 80 ans tout au long de l'année 2025, retour en images sur quelques-unes de ses réalisations emblématiques, d'hier à aujourd'hui. Quatrième et dernière étape de ce voyage spatio-temporel : l'épopée de l'électronucléaire français.

Le 15 décembre 1948, l'impatience est à son comble au CEA de Fontenay-aux-Roses. À 12 h 12, Zoé, pour « Zéro Énergie, Oxyde d'uranium, Eau lourde », est mise en route, quinze mois et demi après le début de sa construction. C'est la première « pile atomique » française ! Grâce à elle se forme toute une génération de physiciens, chimistes et ingénieurs qui constitueront les premières équipes du CEA. Zoé produit des radioisotopes à destination des hôpitaux et des laboratoires, indispensables aux études biologiques et médicales. Mais surtout, jusqu'à son arrêt en 1976, elle est l'outil sur lequel sont conduites des mesures et expériences nécessaires à la conception des futurs réacteurs nucléaires français.



© Archives historiques CEA / Service de documentation - FA-1994-5-0184

# 1948

L'essentiel sur les SMR et AMR, en 1 min 30 s !



Aujourd'hui, les 57 réacteurs nucléaires à eau pressurisée d'EDF apportent à la France une électricité bas carbone, à laquelle s'ajoutent les énergies renouvelables. Pour l'avenir, une nouvelle génération de réacteurs pourrait bien compléter le paysage : les SMR et AMR, plus petits, flexibles et adaptés aux défis actuels de la décarbonation. Les AMR explorent notamment des technologies innovantes : réacteurs à neutrons rapides, à sels fondus ou encore à haute température. Le CEA contribue activement à cette nouvelle aventure par sa R&D conduite dans les installations expérimentales qui ont succédé à Zoé, accompagnant ainsi industriels et start-up.

# 2026



© A. Aubert / CEA

# Former les salariés du nucléaire, en étroite coopération avec les industriels

La Semaine des métiers du nucléaire se tiendra début 2026. La filière offre de beaux débouchés, avec des métiers adaptés à tous les profils.

Le regard de **Pascal Yvon**, directeur de l'INSTN, l'institut de formation du CEA.



© CEA

**E**n 2023, le Gifen, groupement des industriels français de l'énergie nucléaire, alertait : la filière a besoin d'environ 100 000 recrutements équivalents temps plein sur 10 ans. Un chiffre colossal qui recouvre en réalité une grande variété de métiers, de la construction jusqu'à la radioprotection. Les ambitions sont là : prolongation du parc, construction des EPR2, développement des petits réacteurs modulaires soutenu par le programme France 2030, sans oublier les chantiers d'assainissement-démantèlement. Établissement d'enseignement supérieur et organisme de formation continue du CEA, l'INSTN, Institut national des sciences et techniques nucléaires, y prend toute sa part et contribue à cet essor.

Nos cursus de formation initiale ont enregistré 1 500 inscriptions à la rentrée 2025, et gagnent 150 à 200 élèves chaque année. Nous proposons une quarantaine de diplômes, du niveau d'opérateur à celui d'ingénieur spécialisé. Sur nos cinq sites (Cadarache, Cherbourg, Grenoble, Marcoule et Saclay), il s'agit désormais de pousser les murs. À Cherbourg, nous construisons une extension pour accueillir plus de salles de cours. À Marcoule, nous avons le projet de transformer le Visiatome, ancien centre de vulgarisation, pour y installer un chantier-école. À Saclay, c'est l'ancien réacteur Ulysse, démantelé et déclassé, qui pourrait abriter un amphithéâtre et des salles informatiques supplémentaires. Nous avons aussi développé des cours hybrides, avec du e-learning.

Les résultats sont là : tous nos étudiants trouvent un emploi en fin de cursus. Le diplôme d'ingénieur en génie atomique affiche par exemple un taux d'insertion de 100 %, entièrement dans la filière. C'est une belle preuve de l'adéquation entre nos offres et la réalité du terrain. Nous la devons à un travail en étroite coopération avec les industriels, qui siègent dans nos instances de gouvernance, participent à l'élaboration de la maquette pédagogique, et assurent certains cours. Cette proximité est très appréciée par nos étudiants, et constitue un atout indéniable de l'INSTN qui fêtera ses 70 ans en 2026.

**« Les résultats sont là : tous nos étudiants trouvent un emploi en fin de cursus. »**

Cette dynamique se retrouve également dans nos formations continues, qui rassemblent plus de 7 000 apprenants chaque année. Là encore, nous sommes à l'écoute des besoins exprimés par le CEA et les industriels, avec la possibilité d'offres sur mesure, par exemple pour la validation collective des acquis de l'expérience en radioprotection.

L'éventail des métiers du nucléaire et de l'énergie est large. L'INSTN fait partie du réseau des établissements d'enseignement supérieur du développement durable, sous la tutelle du ministère de la Transition écologique, et est reconnu comme un acteur majeur de la formation dans les systèmes énergétiques bas carbone et les technologies pour la santé. Nous délivrons en effet des diplômes en médecine nucléaire. Là encore, le *numerus clausus* a été revu à la hausse et les classes font le plein. Sur les nouvelles technologies de l'énergie, nous avons mis en place une École de la batterie, à l'image de l'École du sodium qui existe dans le nucléaire. En bref, quel que soit votre projet professionnel, jeunes et moins jeunes, étudiants ou travailleurs en reconversion, une solution existe ! ●

# Performant Souverain frugal fiable...

DOSSIER  
02

... le data center  
du futur se dessine

# Des infrastructures vitales

**Pas une journée ne passe sans qu'ils fassent l'actualité. Les data centers et autres centres informatiques rassemblent tous les défis de la décennie : géopolitiques, environnementaux, économiques, démocratiques. Le CEA, fidèle à sa mission d'accompagner les entreprises et les collectivités face aux enjeux majeurs, développe des solutions depuis les systèmes d'alimentation énergétique jusqu'à la puce.**

Les centres de calcul et d'IA, qui travaillent à partir de ces données, irriguent tous les secteurs, depuis la santé jusqu'aux transports, en passant par l'agroalimentaire, l'énergie et la Défense.

Or, la multiplication de ces centres informatiques n'est pas sans défi. Leur consommation énergétique devrait plus que doubler selon l'Agence internationale de l'énergie, pour atteindre 950 TWh en 2030. En France, ils représentaient 2 % de la consommation totale en 2023 selon RTE, une part qui pourrait être multipliée par quatre d'ici à 2035. En parallèle, les besoins en composants et machines vont eux aussi croître exponentiellement, à tous les niveaux.

Acteur majeur des énergies bas carbone, le CEA irrigue l'ensemble de la chaîne de valeur pour garantir un développement stratégique, souverain, et le plus respectueux de l'environnement possible. Qu'il s'agisse de petits réacteurs nucléaires modulaires ou de logiciels pour piloter le mix énergétique, de refroidissement liquide ou d'interconnexions optiques, de puces frugales ou de calculs en mémoire, nos équipes explorent les solutions d'avenir.

**E**n 2024, la planète hébergeait près de 12 000 centres de données. Poussé par l'IA, ce chiffre devrait tripler d'ici à 2030. Si les États-Unis représentent la moitié des implantations, portés par les géants de la tech, l'Europe n'est pas en reste, avec près d'un quart de ces infrastructures.

Maîtriser les données et leur exploitation est un enjeu vital de souveraineté et de développement économique et industriel. Les centres de données, loin d'être simplement le lieu d'hébergement des photos de vacances, abritent des informations critiques pour les citoyens et les entreprises.

1963

Installation du premier ordinateur, un **IBM 7094**, sur le centre CEA de Limeil.

1982

Mise en service du ordinateur **CRAY 1S**, avec un seul processeur 64 bits.

1996

Début du programme **Simulation** pour la Défense, augmentation des besoins en calcul et modélisation.

2001

Mise en service de **Tera**, supercalculateur dont la première machine est construite par HP, sur le centre CEA de Bruyères-le-Châtel. Suivront plusieurs versions (Tera 10 en 2006, Tera 100 en 2009 et Tera 1000 en 2017) construites par Bull.

2003

Ouverture du **CCRT**, dédié aux besoins industriels.

2021

Mise en service de la première partition de **EXA1**, suivie en 2024 par la deuxième partition.

2025

Installation de deux machines quantiques au **TGCC**, des start-up Pasqal et Quandela.

2027

Mise en service prévue de la machine exaflopique européenne **Alice Recoque**.

## Centres de données ou de calcul ?

Les *data centers* ou **centres de données** en français, hébergent quantité de données, personnelles comme des photos, ou publiques et commerciales, comme des films à la demande. Aujourd'hui, les centres informatiques sont aussi des **centres de calcul**. Le CEA et l'industrie utilisent des **supercalculateurs** et le calcul haute performance (HPC) pour la réalisation d'opérations complexes, comme la simulation de protéines en pharmacologie. Enfin, ces dernières années ont vu l'explosion de l'IA, amenant la création d'**IA factory**. Calcul haute performance et IA affichant des problématiques semblables, les compétences reconnues du CEA dans le premier en font un acteur clé pour le second.

Enfin, les **hyperscalers** désignent les grands fournisseurs (et leurs centres), capables de mettre immédiatement à disposition des clients plus ou moins de serveurs en fonction des besoins, et donc d'apporter une puissance de calcul ou de stockage évolutive et réactive.

## Des baies et des lames ?

Un centre informatique (centre de données, de calcul ou dédié à l'IA) est un bâtiment, au sein duquel on retrouve plusieurs **baies**, des *racks* en anglais, sortes de grandes armoires métalliques. Selon les besoins, il peut s'agir de baies de stockage ou de baies de calcul. Ces baies sont divisées en unités, chaque unité abritant un ou plusieurs serveurs. On parle de **lames**, des *blades* en anglais, pour désigner les « tiroirs » contenant les serveurs et composants de calcul (CPU, CGPU et bientôt QPU).

## Les centres de calcul au CEA

Le CEA opère trois infrastructures de calcul. Celle dédiée à la **Défense** abrite notamment le supercalculateur EXA1, pour les besoins du programme Simulation, ainsi qu'un centre de calcul mutualisé avec des industriels partenaires, le CCMD.

Côté civil, le **TGCC** abrite la machine Joliot-Curie, dédiée à la recherche, ainsi que deux machines quantiques (Ruby de la start-up Pasqal et Lucy de la start-up Quandela). Le TGCC accueillera également le supercalculateur exaflopique européen Alice Recoque, qui viendra multiplier par 50 la puissance de calcul mise à disposition de la communauté scientifique.

Enfin, le **CCRT** (Centre de calcul recherche et technologie) comprend la machine Topaze et est exploité en lien avec des industriels civils.

# À Bruyères-le-Châtel, des centres de calcul haute performance et faible consommation

**Le CEA abrite plusieurs centres de calcul, pour la Défense et le civil. Des installations exceptionnelles, sur lesquelles sont testées de multiples innovations afin de les rendre toujours plus performantes et respectueuses de l'environnement.**

**L**e saint des saints ne se dévoile pas facilement. La sécurité y est drastique. Il faut décliner son identité, passer les contrôles et tellement de sas que l'on en perd le compte, taper les codes d'accès, et, évidemment, trouver son chemin dans un dédale de couloirs. Enfin, derrière de lourdes portes, les plus gros supercalculateurs français dédiés aux besoins industriels, académiques, et de la Défense.

Le site CEA de Bruyères-le-Châtel accueille ces machines hors norme, à l'intérieur de ses clôtures et au sein du TGCC. « *La dissuasion nucléaire passe notamment par le programme Simulation, qui vise à modéliser le fonctionnement des armes nucléaires*, débute Jacques-Charles Lafoucrière, à la tête du projet Numérique haute performance au CEA. *Ces modélisations font appel à des supercalculateurs. Entre la fin des années 1990 avec Tera 1 et aujourd'hui, leur puissance de calcul a été multipliée par 40 000.* » Dans le hall d'accueil, un ancien ordinateur Cray, avec son design arrondi pour optimiser les interconnexions, rappelle cet historique. Installé au début des années 1980, l'appareil

comprenait un unique processeur et affichait une puissance de calcul de 160 mégaflops\*, moins qu'un smartphone.

Aujourd'hui, la machine EXA1 et son stockage se situent sous les pelouses, dans la fraîcheur du sous-sol. Rien que l'une des deux partitions d'EXA1 compte 13 824 processeurs AMD, soit 884 736 cœurs de calcul, et affiche une puissance de calcul de 36 pétaflops\*. Au-delà du changement d'échelle, c'est un changement d'univers. « *Les calculateurs se sont densifiés* », explique Jacques-Charles Lafoucrière. Autrement dit : plus de capacités dans une même superficie. Chaque cluster comporte ainsi des centaines, voire des milliers d'ordinateurs qui fonctionnent en parallèle dans des baies, impliquant un incroyable réseau haut débit et faible latence. À cela s'ajoutent les questions d'alimentation électrique et de refroidissement. Afin de limiter l'impact environnemental et la facture énergétique,



#### FLOP

Unité de mesure qui correspond au nombre d'opérations en virgule flottante par seconde d'un système informatique

#### UN MÉGA

un million =  $10^6$

#### UN PÉTA

un million de milliards =  $10^{15}$

le CEA travaille sur des solutions logicielles qui garantissent un pilotage étroit et optimisé des centres informatiques, pour ses propres besoins comme pour ceux des autres acteurs industriels.

## Un refroidissement sans clim'

À Bruyères-le-Châtel, depuis deux générations (Tera1000 et EXA1), les machines sont refroidies à l'eau et non plus à l'air, comme les machines précédentes et comme l'est encore la majorité des centres informatiques dans le monde. Entre les rangées d'armoires métalliques noires, aucun bruit. Nul besoin de ventilation ou de climatisation, et les rares visiteurs n'ont pas à enfiler

une doudoune. « *Nous envoyons de l'eau à 35 °C au sein même des serveurs, et elle ressort à 44 °C* », décrit Jean-Marc Ducos, en charge de l'optimisation énergétique pour le complexe de calcul du CEA. Des tuyaux, installés sous le faux plancher, transportent l'eau jusqu'au pied des baies, où deux flexibles prennent le relais et entrent à l'intérieur de l'armoire, faisant circuler l'eau jusque dans chaque unité via un circuit de refroidissement secondaire fermé. « *Le refroidissement à eau présente de nombreux avantages*, détaille Alain Ruby, chef de programme Efficacité énergétique des systèmes complexes et des réseaux. *Il offre une très bonne capacité de refroidissement pour les baies, une récupération de chaleur localement au lieu d'un rejet fatal, et a un plus faible impact énergétique avec des pompes plus efficaces que les ventilations. La tech-*

**Pour découvrir l'histoire du calcul haute performance au CEA, c'est ici.**



**↓ Les installations du CEA abritent des centres de calcul et de stockage.**



nologie à cycle fermé permet par ailleurs de limiter l'impact sur la ressource en eau. » De fait, cette technologie devrait représenter plus de la moitié du marché du refroidissement pour les centres de données, soit autour de 20 milliards de dollars en 2030, selon les prévisions du cabinet McKinsey.

Le refroidissement à eau s'inscrit dans une logique circulaire. « La chaleur produite peut être valorisée en alimentant un réseau de chaleur urbain ou bien une piscine ou un équipement municipal, si le centre informatique est installé à proximité d'une ville », continue le responsable, qui rappelle toutefois que les réseaux de chaleur ont besoin d'une eau à plus de 60 °C pour des raisons sanitaires et techniques, afin d'assurer la transmission de la puissance vers les bâtiments. C'est ainsi que le centre CEA est chauffé l'hiver : l'eau sortante des supercalculateurs est envoyée vers une pompe à chaleur qui la remonte à 66 °C, puis la réin-

jecte dans le circuit de chauffage. L'été, lorsque le besoin de chauffage est inexistant et la température extérieure trop élevée, des tours adiabatiques à l'extérieur du bâtiment permettent de redescendre l'eau à 35 °C. « Il faut noter aussi les travaux menés par les constructeurs de puces pour que les machines puissent fonctionner à des températures plus élevées, limitant les besoins de refroidissement », rappelle Jacques-Charles Lafoucrière.

Reste un problème de poids : les systèmes pèsent plus lourds. La faute à l'augmentation de la densité et au refroidissement à eau. « Par exemple, les nouveaux équipements comportent des tuyaux en cuivre contre de l'aluminium avant, décrit Marc Berson, ingénieur et expert de ces sujets. La différence peut sembler minime, mais multipliée par le nombre de serveurs, cela pèse. » Le supercalculateur EXA1 affiche ainsi 2,5 tonnes au m<sup>2</sup>. Les fondations doivent être dimensionnées en conséquence. Les alimentations électriques aussi. À Bruyères-le-Châtel, le centre est desservi par deux lignes très haute tension, en direct du réseau RTE. De l'entrée du centre jusqu'au cœur du composant, une succession de convertisseurs viennent assurer l'alimentation des différents clusters informatiques, pour la Défense et le civil.

### Une construction modulaire

Quel que soit l'usage du centre de calcul, la question du bâti et des alimentations reste identique. Au CEA comme ailleurs, la mise en chantier intervient plusieurs années avant la réception des machines. Problème : « les composants évoluent tellement vite que si vous mettez trois ans à construire un bâtiment, soit la machine que vous installez dedans est déjà dépassée, soit il faut revoir toutes les alimentations en énergie et en eau », explique Marc Berson. Pour gagner



↑ En temps normal, les équipes ne travaillent pas directement à côté des supercalculateurs...

en temps de construction et en agilité, le CEA a privilégié une approche modulaire pour EXA1, conçu comme un Lego. Des containers abritent les machines et les servitudes et peuvent être assemblés ou changés selon les besoins. « Tout est précâblé, et chaque module peut être déplacé simplement sur un camion, décrit Jacques-Charles Lafoucrière. Cela nous permet de changer un module sans perturber le fonctionnement du reste. » Quand la modularité n'est pas possible, les équipes cherchent à adapter le bâti existant plutôt qu'à repartir de zéro, là encore pour gagner du temps. C'est le cas par exemple pour la future machine exascale Alice Recoque, qui sera construite par Eviden et AMD et installée dans le bâtiment du TGCC, à deux pas de la salle quantique, qui contient les nouveaux calculateurs de Pasqal et de Quandela.

Dans le futur hall d'Alice Recoque, les équipements et les tuyaux sont en cours d'installation sous le faux plancher. Au sous-sol, des pieux sont venus renforcer la dalle de béton pour que le bâtiment tienne la charge. C'est ici que sont installées les arrivées en eau et électricité, les onduleurs, les transformateurs et tous les équipements vitaux pour le maintien en opération. La mise en service est prévue pour 2027 avec, là encore, un refroidissement à eau tiède. « L'avantage d'avoir plusieurs centres de calcul au même endroit, c'est que l'on peut tester et valider les nouveautés sur une machine avant de les étendre à d'autres », reconnaît Marc Berson. À terme, cette installation devrait remplacer le supercalculateur Joliot-Curie, et sera l'une des plus puissantes machines exascale à l'échelle européenne. ●

### Un SMR pour les data centers ?

Les centres de données gagneraient-ils à être alimentés par des petits réacteurs modulaires ? « Pour cet usage, l'avantage des SMR sera leur proximité géographique et leur capacité à sécuriser l'approvisionnement en électricité », estime Philippe Amphoux, qui pilote le projet Idnes au CEA, sur l'utilisation des SMR pour la décarbonation. Mais sans raccordement au réseau, il faut penser une complémentarité entre le nucléaire et d'autres sources d'énergie pour les périodes de maintenance, car impossible de laisser les serveurs sans alimentation électrique.

« Les centres de données représentent une charge permanente et non flexible sur le réseau, en fonctionnant 24h/24 et 7j/7, confirme Alain Ruby, à la tête du programme sur l'efficacité énergétique des systèmes complexes. C'est une question de fond : faut-il les raccorder, et accepter ce poids sur notre consommation, ou leur dédier des sources autonomes, avec toutes les contraintes que cela comporte ? » Sans compter que les opérateurs de centres de données ne sont pas exploitants nucléaires ! « Il y a tout un modèle énergétique et économique à construire », conclut Philippe Amphoux. Le CEA a ainsi participé au projet européen Tandem pour l'intégration des SMR dans les systèmes énergétiques hybrides, qui s'est achevé cet automne.

Plus d'infos : <https://tandemproject.eu/>



Découvrez les supercalculateurs du CEA en vidéo.



À la rencontre d'Alice Recoque.



# La proximité du CEA est essentielle pour nous »



**Arnaud Lépinos, directeur général d'Eclairion, spécialiste de l'hébergement modulaire pour les calculateurs haute densité et l'IA, revient sur les liens fructueux avec le CEA et les besoins d'infrastructures souveraines européennes.**

jusqu'à trois ans et, dans l'intervalle, les caractéristiques techniques des serveurs évoluent. Les *data centers* du futur seront donc conçus différemment. Prenons l'exemple de la nouvelle génération de puces Blackwell de Nvidia. Elle impose un refroidissement liquide, et non par air comme il existe dans la majorité des *data centers*. Héberger cette technologie demande de tout revoir : circuits d'eau, refroidissement, électricité, aérations, canalisations... La modularité de notre solution nous a permis d'être prêts.

**Votre centre de calcul abrite aujourd'hui un seul client...**

**A. L.** — Oui, le Français Mistral IA. Seize entreprises ont répondu à leur appel d'offres et nous étions les seuls Français, et même les seuls Européens. En 10 mois, nous avons mis en production le plus gros calculateur IA en France, avec 18 000 GPU. Pour vous donner une idée de l'ampleur : notre centre de Bruyères-le-Châtel avait été conçu pour héberger 40 machines d'une puissance d'un mégawatt et celle de Mistral IA fait 40 mégawatts à elle seule !

**Pouvez-vous nous présenter Eclairion en quelques mots ?**

**Arnaud Lépinos** — Nous sommes une filiale de HPC Capital qui opère dans le domaine de l'hôtellerie et du *coliving*, et possède des participations dans les énergies renouvelables. Eclairion offre des solutions d'hébergement en colocation pour les calculateurs, et est également un bureau d'études et de conception. Notre approche réside dans l'informatique dite « en conteneur », très modulaire, également utilisée par le CEA.

Aujourd'hui, les innovations côté composants se succèdent à un rythme effréné. Résultat : les centres de calcul se construisent sans savoir quelles technologies ils abriteront ! La livraison d'un équipement haute tension peut prendre

**Pourquoi ce choix du site de Bruyères-le-Châtel ?**

**A. L.** — L'Essonne est un haut lieu des *data centers*, et l'écosystème autour de Bruyères-le-Châtel est très riche, avec le CEA, dont la proximité était essentielle pour nous, ainsi que Teratec, dont nous sommes membre, et Paris-Saclay. Notre relation avec le CEA est très forte et nous avons notamment collaboré sur le programme Data 2040 (*voir encadré*). Nous échangeons beaucoup et avons lancé des initiatives autour des jumeaux numériques, des chaînes de refroidissement et des chaînes de conversion de courant. Il existe ici un continuum unique entre la recherche académique, notamment au TGCC, et l'industrie.

Nous bénéficions aussi du soutien des élus locaux et de la région Île-de-France, notamment à travers le programme « IA-ction » démarré à l'automne. Une dizaine de start-up vont bénéficier d'un accès gratuit au calcul haute performance pendant 6 mois, pour faire mûrir leurs projets. La majorité des usages de l'IA aujourd'hui sont « B2C », pour des utilisateurs comme vous et moi. La priorité est donc de développer une IA à usage industriel, avec des capacités dédiées et souveraines. Cet enjeu est crucial à nos yeux. Eclairion est un acteur profondément français. Un combat se livre à l'échelle mondiale sur les infrastructures numériques, et elles définiront notre puissance géopolitique demain.

**La France et l'Europe ont-elles encore un coup à jouer dans cette bataille ?**

**A. L.** — La souveraineté numérique s'appuie sur cinq grands piliers. Le premier est la dimension énergétique. Nous avons la chance et l'opportunité d'avoir une énergie bas carbone et un réseau électrique d'une qualité exceptionnelle en France. Le deuxième pilier concerne la *hardware*, et la très grande majorité du matériel IA installé en

Europe provient des États-Unis ou de l'Asie, même si des initiatives européennes existent. Le troisième pilier est logiciel, et nous avons en Europe quelques pépites comme Mistral IA qu'il faut soutenir car, sans elles, nous devrions utiliser des IA développées en Asie et aux États-Unis, sans respect de nos réglementations. Le quatrième pilier, ce sont les talents, et nous bénéficions de formations de haut niveau. Enfin, le dernier pilier concerne les capitaux. Nous sommes obligés d'attirer des investisseurs étrangers compte tenu des sommes en jeu.

En résumé, l'Europe a perdu les batailles du *hardware* et des capitaux. Mais nous pouvons remporter les trois autres. Oui, les *data centers* et l'IA consomment de l'énergie, émettent des gaz à effet de serre, détruisent des emplois. Face à cela, deux approches sont possibles : ne rien faire et subir les conséquences sans en tirer les bénéfices, ou se mobiliser pour développer des alternatives plus responsables et souveraines. C'est à nous tous, acteurs et industriels de ce secteur, de nous engager pour reprendre le leadership. ●

**(1)** Dont Schneider Electric, Hyperion, Eclairion, Nexity, Enedis, Orange, RTE, EDF, la SNCF, Michelin, ou encore Thales.

## Nos données en 2040

Le CEA et son centre d'innovation Y.Spot ont lancé, avec une quinzaine d'industriels français<sup>1</sup> et le ministère des Armées, une étude prospective sur les données à l'horizon 2040. Objectif ? Décrypter la chaîne de valeur et les opportunités, tout en identifiant des futurs possibles argumentés. Quatre scénarii ont été explorés, tel celui d'un monde de la donnée très polarisé entre les États-Unis et la Chine, avec des hyperscalers ; celui où l'Europe connaît un renouveau et impose ses réglementations pour son marché intérieur, avec un développement de l'*edge computing* ; ou encore celui où la frugalité et la résilience sont les maîtres-mots, avec des petits centres de données alimentés par des énergies décarbonées. À l'issue de cette étude, un hub a été mis en place pour dégager des feuilles de route et effectuer des premières simulations.

**L'IA a entraîné des bouleversements pour les usagers, mais aussi pour les fabricants de composants, les opérateurs de centres de calcul, les industriels du numérique et toute la chaîne de valeur. Le CEA, acteur majeur de l'innovation, apporte son soutien à l'ensemble de cet écosystème, avec des solutions technologiques permettant de lever plusieurs verrous, notamment sur l'énergie et le calcul.**

### Accélérer l'IA

L'IA et son gigantisme ont bouleversé les centres informatiques. « *Les CPU, processeurs classiques, ont été détrônés par les GPU, processeurs graphiques qui permettent d'effectuer plus d'opérations en parallèle et sont très efficaces pour l'entraînement des IA, retrace Denis Dutoit, au département Systèmes et circuits intégrés numériques du CEA. Mais ces derniers montrent leurs limites compte tenu de leur consommation énergétique exponentielle, parce qu'ils n'ont pas été conçus pour cela au départ. Cela revient à essayer de grimper un col avec un vélo de ville : c'est faisable, mais cela demande plus d'énergie.* »

En IA, le vélo « spécial montage » s'appelle un accélérateur, et le CEA, fort de son expertise en supercalculateurs et en microélectronique, y contribue pleinement. « *Ni CPU ni GPU, ces composants sont spécialisés et optimisés pour certaines tâches très souvent répétées, permettant un gain de temps et de consommation énergétique* », explique le responsable. Ces accélérateurs sont rentables en raison du nombre de « cols » à franchir. C'est d'ailleurs l'un des objets du programme CamelIA dédié aux composants pour l'IA et leur intégration, coporté par les agences de programmes du CEA et de l'Inria sur le numérique et les composants. Le CEA participe aussi à AI Factory France, piloté par Genci, pour l'aval côté usages. Ce projet a pour ambition de fédérer tout l'écosystème (industriel, recherche, formation) dans un hub unique en France. Ce dernier facilitera l'accès aux ressources nationales et européennes, ainsi qu'aux compétences et services associés, afin de dynamiser la recherche et les applications.

### Calculer dans la mémoire

Le meilleur moyen de gagner du temps et de l'énergie dans les centres informatiques ? Rapprocher le calcul de la mémoire. Aujourd'hui, le transfert peut représenter jusqu'à 80% du coût énergétique du traitement des données. « *L'edge computing, avec son modèle décentralisé, permet un continuum du capteur au data center, et les données sont traitées au niveau le plus pertinent*, décrit Denis Dutoit. *Rapprocher le calcul de la source des données, capteur ou mémoire, permet des gains importants en énergie et en temps, en évitant les transferts superflus.* » Ce calcul rapproché est au cœur des traitements en temps réel, essentiels pour certaines applications embarquées. Le CEA développe pour cela de nouveaux matériaux et de nouvelles architectures, telles les puces neuromorphiques. Il poursuit également ses travaux sur la puce NeuroCorgi, basée sur la technologie FD-SOI. Avec son architecture de calcul proche mémoire, elle réduit d'un facteur 1 000 la consommation énergétique et affiche un temps de latence de moins de 10 ms.

### Utiliser les photons pour les connexions

En parallèle du développement du calcul dans la mémoire, le CEA cherche à améliorer les interconnexions grâce à la photonique sur silicium. « *Il s'agit d'utiliser des photons, de la lumière donc, pour transporter les informations dans les composants, à la place des électrons* », simplifie Eléonore Hardy, responsable des partenariats photonique sur silicium. Autrement dit, mettre l'équivalent de la fibre optique dans les circuits eux-mêmes, au lieu du cuivre. Dans les centres informatiques, les fibres optiques s'arrêtent en entrée des baies, où des convertisseurs transforment le signal optique en signal électrique. « *Mais l'IA a de gros besoins, et le cuivre montre ses limites*, poursuit la spécialiste. *Avec le copackage optique, le CPO, nous faisons entrer la liaison optique dans les serveurs.* » Ces puces photoniques permettent des économies en énergie et une rapidité de transfert accrue. Le CEA travaille sur ces composants et leur intégration, notamment au niveau des substrats, en explorant les matériaux dit « III-V ». Outre ses travaux en propre, le CEA accompagne tous les acteurs du marché et a essaimé plusieurs start-up, dont Scintil Photonics. Cette dernière a levé 50 millions d'euros à l'automne avec la participation de NVidia, et propose un module laser multilongueur d'ondes LeafLight. Le CEA participe aussi au projet StarLight piloté par STMicroelectronics, lancé en septembre dernier, et qui vise à renforcer la souveraineté européenne dans le domaine.

### Assurer des conversions performantes

Entre les câbles haute tension en sortie du réseau RTE et les puces à l'intérieur des serveurs, l'alimentation des centres de calcul nécessite une succession d'étapes de conversion. « *Depuis le réseau à plus de 20 000 volts, les convertisseurs de puissance s'enchaînent pour aboutir à moins d'un volt dans les serveurs*, décrit Sylvain Bacquet, à la tête du laboratoire Électronique énergie et puissance au CEA. *Il faut donc limiter au maximum les déperditions.* » Afin de garantir le meilleur rendement possible, le CEA développe des composants haute performance et des systèmes de pilotage optimisés, visant à réduire le nombre d'étapes. « *Nous travaillons sur l'architecture des convertisseurs et sur les matériaux à large bande interdite, les composants "grand gap". Le CEA participe ainsi aux projets européens GaN4AP, sur le nitrure de gallium, et FastLane, sur le carbure de silicium, aux côtés d'industriels et d'autres organismes de recherche*, détaille l'expert. *Ces matériaux permettent une densité de puissance extrême nécessaire pour les centres de calcul IA.* » Il s'agit ensuite de les mettre en œuvre, jusqu'à leur packaging et leur intégration, « *à l'aide de simulations et de jumeaux numériques* ».



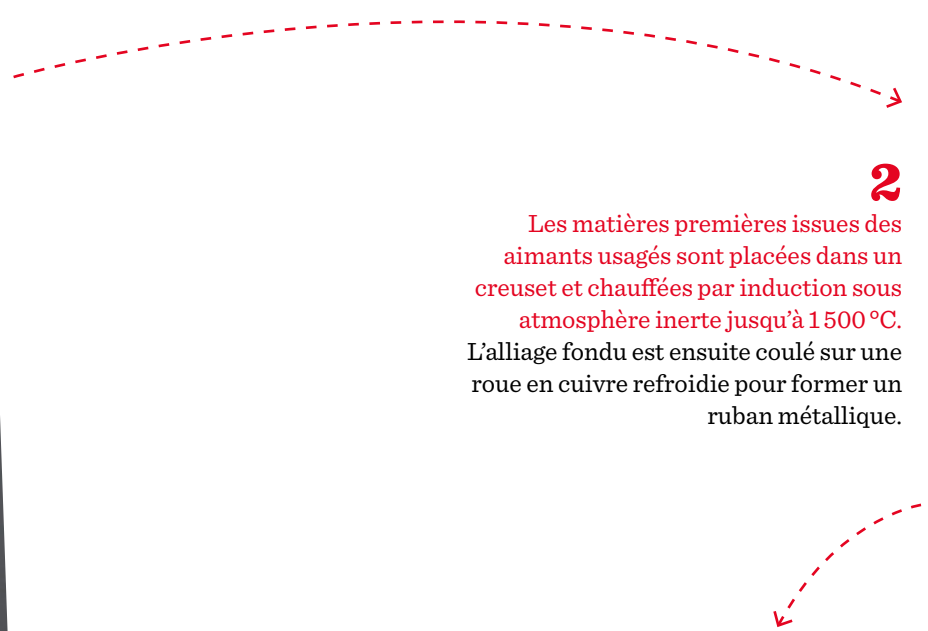
**1**

**Bienvenue sur la ligne pilote CEA-Orano!**  
 Cette infrastructure rare en Europe permet de fabriquer et de recycler des aimants à base de néodyme, fer et bore, ainsi que de relocaliser un savoir-faire clé sur des procédés réalisés aujourd'hui principalement en Chine.

# Des **AIMANTS RECYCLÉS** pour l'énergie

Récemment inaugurée à Grenoble, la ligne pilote CEA-Orano vise à développer des procédés préindustriels pour la fabrication et le recyclage d'aimants de haute performance à base de terres rares. Les aimants sont des composants indispensables pour la transition énergétique, en particulier pour la mobilité électrique et les éoliennes, ce qui en fait une thématique au cœur des enjeux géopolitiques actuels.

Reportage © A. Aubert/CEA



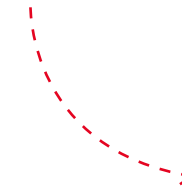
**2**

Les matières premières issues des aimants usagés sont placées dans un creuset et chauffées par induction sous atmosphère inerte jusqu'à 1500 °C. L'alliage fondu est ensuite coulé sur une roue en cuivre refroidie pour former un ruban métallique.



**3**

Ces rubans font quelques dixièmes de millimètre d'épaisseur.



**4**

Les rubans sont ensuite exposés à de l'hydrogène gazeux dans un four dédié. L'hydrogène réagit avec eux, ce qui les rend plus friables. Ils sont ensuite réduits en poudre fine (quelques microns) dans un broyeur à jets de gaz.





**5**

La poudre obtenue est transférée vers la presse dans des conteneurs étanches. Cet équipement permet de comprimer la poudre tout en alignant les grains au moyen d'un champ magnétique puissant, le tout sous atmosphère inerte.



**6**

En sortie de la presse, les compacts de poudre sont transférés dans un four de frittage via une boîte à gants mobile pour éviter toute contamination à l'air.



**7**

Dans le four de frittage, ces compacts sont portés à haute température sous vide. Durant ce traitement, les porosités sont comblées, ce qui permet d'obtenir des aimants totalement denses avec la microstructure appropriée.



**8**

Après usinage, les aimants sont caractérisés dans l'hystérésigraphe. Cet appareil sert à mesurer leurs propriétés magnétiques pour s'assurer de l'atteinte des performances visées.



**9**

Et en bout de ligne, un aimant fonctionnel !

# L'espace, l'ultime frontière

DOSSIER  
03

Il y a un peu plus d'un siècle, à la fin des années 1920, l'astronome américain Edwin Hubble révolutionnait notre regard sur l'Univers, en démontrant qu'il existait d'autres galaxies en dehors de la nôtre et que plus elles étaient loin, plus elles s'éloignaient vite. Cette découverte majeure ouvrit la voie à l'astrophysique contemporaine. Depuis plus de 60 ans, en collaboration avec ses partenaires nationaux et internationaux, le CEA participe activement à l'exploration de l'espace, une « ultime frontière » pour laquelle il développe des instruments de haute technologie tout en menant des travaux d'analyse des données et de modélisation au meilleur niveau international. Cette approche intégrée permet à ses équipes d'être présentes sur l'ensemble des grands projets européens et internationaux, destinés à mieux comprendre l'Univers.

# « L'Univers est un laboratoire de physique extraordinaire »

Entretien avec **Stéphane Mathis**, directeur de recherche et chef du Département d'astrophysique, unité mixte de recherche CEA/CNRS.



© E. Lemoine/CEA

**Pourquoi investir dans des missions spatiales et des instruments d'observation de l'Univers ?**

**Stéphane Mathis** — Depuis le début de l'humanité, l'homme s'est intéressé à son environnement proche et lointain. Le ciel a toujours fait partie de ses interrogations, avant même qu'il n'en ait la compréhension. Du point de vue spécifique de la recherche fondamentale, l'Univers est un laboratoire de physique extraordinaire qui réunit des conditions physiques très variées, parfois différentes de celles que nous connaissons sur Terre, mais aussi parfois semblables. Ce laboratoire nous sert à creuser des questions fondamentales, comme l'origine et l'évolution de la vie sur Terre ou l'avenir de notre planète, mais aussi à chercher à savoir si nous sommes seuls dans l'Univers et comment ce dernier se structure et évolue. Apporter des réponses à ces questions fondamentales constitue la motivation des astrophysiciens et représente le sens de leurs recherches.

(1) Inobservable en lumière visible, l'Univers froid devient très brillant, donc visible, dans le domaine de l'infrarouge lointain.

(2) Ensemble des moyens et équipements au sol nécessaires à la réalisation d'une mission spatiale : stations de communication, centres de contrôle et de traitement des données.

**Le CEA est davantage connu pour ses recherches dans le domaine des énergies. Pourquoi y fait-on de l'astrophysique ?**

**S.M.** — Le CEA a été fondé en 1945 dans le but d'assurer la maîtrise et la souveraineté de la France dans les sciences de l'atome. Pour mener à bien cette mission, et à la demande du général de Gaulle, il a développé un socle de recherche fondamentale solide et large, au meilleur niveau international, dont l'astrophysique est une des branches. L'essor initial de l'astrophysique au CEA repose sur ses compétences en physique des détecteurs de rayonnements à haute énergie. Quand le Cnes a été créé au début des années 1960, nous avons donc rapidement travaillé ensemble et c'est ainsi que le CEA a développé son premier pilier dans le domaine des hautes énergies. Avec le Cnes, nous avons embarqué d'abord sur des ballons, puis sur des fusées-sondes et enfin sur des satellites, des détecteurs capables de caractériser des rayonnements à haute énergie venant de l'Univers et des couches externes de l'atmosphère terrestre. Dès cette époque, l'exploration de l'espace s'est accompagnée d'un volet « interprétation des données astrophysiques » grâce à des collaborations fortes avec des astrophysiciens comme Hubert Reeves ou



© L.Godard/CEA

## L'Univers en équations

Historiquement liées aux travaux du CEA dans le domaine des hautes énergies, les recherches menées à l'Institut de physique théorique de Saclay (CEA/CNRS) offrent une approche complémentaire et déterminante aux travaux menés en astrophysique et en physique des particules. Elles visent à résoudre plusieurs questions fondamentales de la cosmologie pour comprendre la dynamique de formation de l'Univers : la nature de la matière et de l'énergie noires, l'effet de la gravité sur la distribution de la matière à grande échelle ou encore la physique des trous noirs et la production d'ondes gravitationnelles. Comment ? En bâtissant des modèles d'équations décrivant l'Univers comme un système physique et en les confrontant, pour éprouver leur robustesse, aux données observationnelles recueillies au sol comme dans l'espace et à celles obtenues par simulation numérique. La traque de l'énergie noire fait ainsi l'objet d'une intense activité pour mettre au point des modèles d'extension de la relativité générale destinés à en tester la stabilité ou encore à vérifier que les ondes gravitationnelles produites dans ces modèles correspondent bien aux observations. Autre approche : le développement de nouvelles idées, comme la matière noire « ultralégère » qui se comporterait comme une onde à l'échelle galactique. Autant d'explorations analytiques qui font toute la valeur ajoutée de la physique théorique.

↑ Inspection des sous-systèmes de la chaîne de détection développés pour le spectromètre infrarouge AIRS dans le cadre de la mission spatiale Ariel de l'Esa.

Michel Cassé du CNRS, spécialistes de l'astrophysique nucléaire et des rayonnements cosmiques.

Une nouvelle page de notre histoire s'est écrite à partir des années 1990, sous l'impulsion visionnaire de Catherine Cesarsky. En synergie avec les compétences en détection infrarouge développées au CEA-Leti, nous avons élargi notre spectre d'activités pour explorer l'Univers et ses objets dans différentes longueurs d'onde, en ouvrant notamment une nouvelle fenêtre sur l'Univers froid<sup>1</sup>, celui où se forment et évoluent les galaxies, les étoiles, les planètes et les systèmes planétaires.

**Quelle est la spécificité du CEA par rapport à des organismes de recherche comme le Cnes ou le CNRS ?**

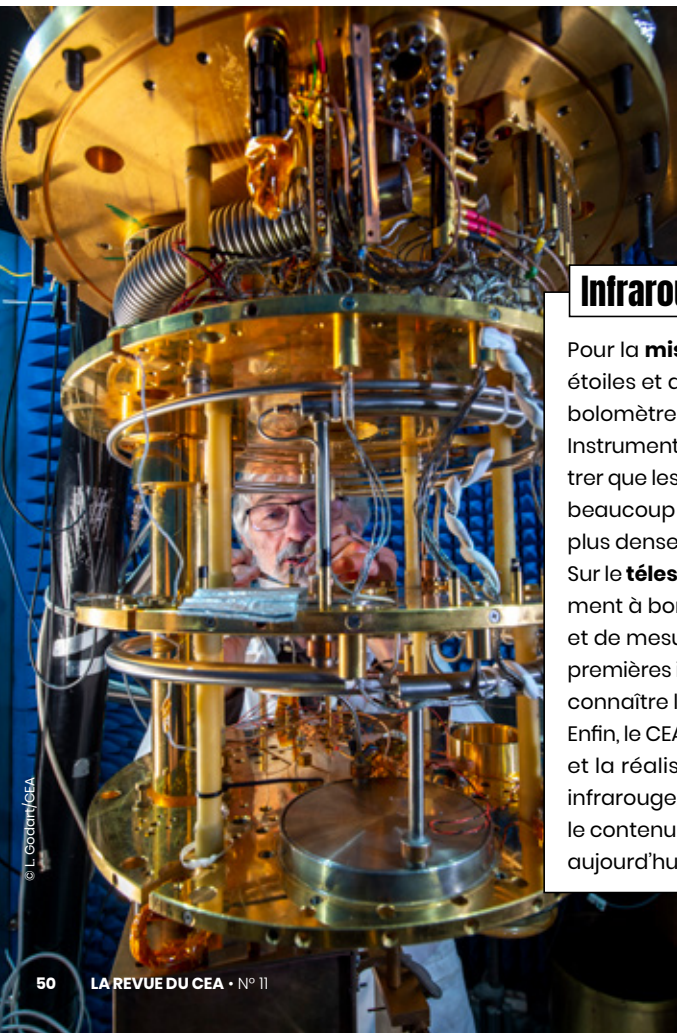
**S.M.** — En tant qu'organisme de recherche et de technologie, le CEA tire sa force et sa crédibilité d'une part des travaux académiques menés en astrophysique au meilleur niveau international, d'autre part

de sa capacité à développer des instruments de haute technologie et d'en assurer la maîtrise d'œuvre, en particulier des détecteurs et les chaînes de détection associées ainsi que leurs bancs de test ou d'intégration. Cette connaissance des instruments nous permet de proposer le segment sol<sup>2</sup> le mieux adapté pour réaliser les observations et l'interprétation des données. Ce travail se

fait, main dans la main, entre astrophysiciens et spécialistes de l'instrumentation. Ce sont les deux jambes de l'astrophysique au CEA qui participent à former un « cercle vertueux » : il débute par une question scientifique majeure, se poursuit par le développement d'une instrumentation de pointe permettant au CEA de prendre des responsabilités stratégiques dans les projets et d'obtenir le plus souvent du temps garanti d'observation, ce qui lui assure au final un positionnement scientifique optimal pour l'interprétation astrophysique. Cette approche intégrée associe, sans distinction, ingénieurs, chercheurs et techniciens, et positionne le CEA comme un acteur et un contributeur clé pour les missions spatiales européennes et internationales dans le cadre de notre partenariat stratégique avec le Cnes et sur les grands observatoires au sol.

- (3) Planètes en dehors de notre système solaire.
- (4) Supercalculateurs capables d'exécuter un milliard de milliards d'opérations à la seconde.

↓ Cryostat à dilution pour la future mission Athena.



### Infrarouge : le rôle clé du CEA

Pour la **mission Herschel (2009-2013)** destinée à étudier la formation des étoiles et des galaxies, le Leti a conçu et réalisé les premières matrices de bolomètres pour l'instrument Pacs, que l'Irfu a ensuite testées et intégrées. Instrument le plus utilisé sur Herschel, Pacs a notamment permis de démontrer que les filaments gazeux présents dans les nuages interstellaires étaient beaucoup plus répandus que prévu et que les étoiles se formaient dans les plus denses d'entre eux.

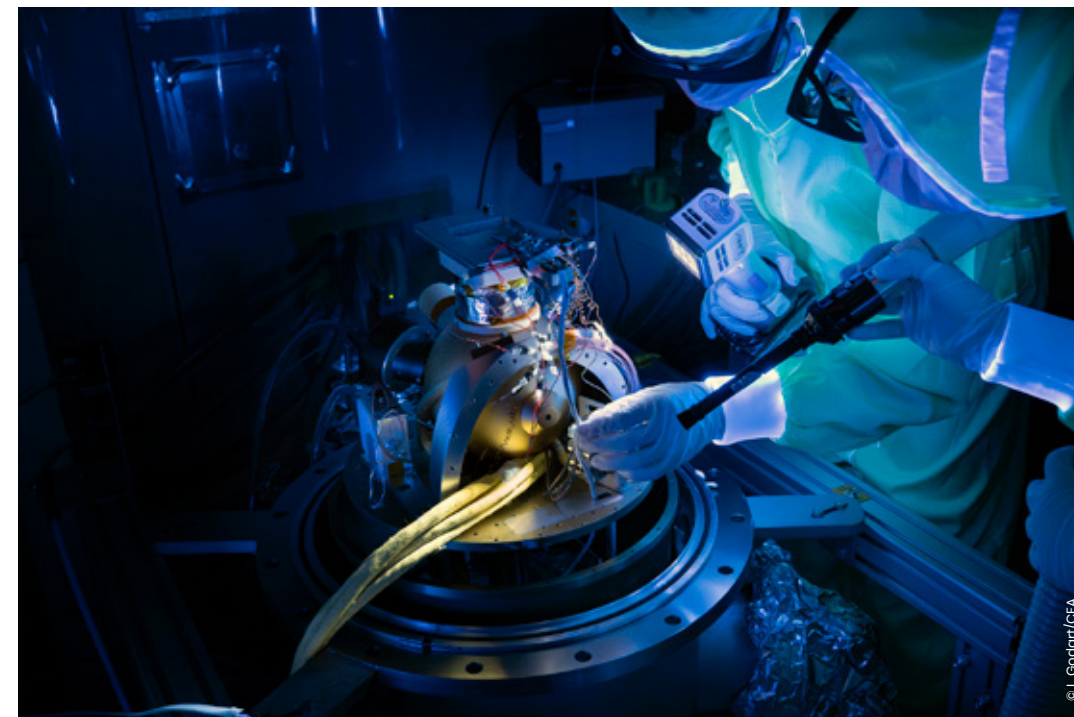
Sur le **télescope spatial Webb**, le CEA a développé l'imageur Miri, seul instrument à bord capable de capter la faible lueur émise par des exoplanètes<sup>3</sup> et de mesurer les composants de leur atmosphère ou de leur surface. Ses premières images d'une taille et d'une netteté inédites ont contribué à mieux connaître l'Univers.

Enfin, le CEA joue un rôle majeur dans la **mission Euclid**, depuis la conception et la réalisation de sous-systèmes clés des deux instruments, visible et infrarouge, jusqu'à l'exploitation scientifique des données. Objectif : étudier le contenu de l'Univers, notamment ses composantes sombres qui mettent aujourd'hui au défi les modèles physiques.

### Quels sont nos autres points forts ?

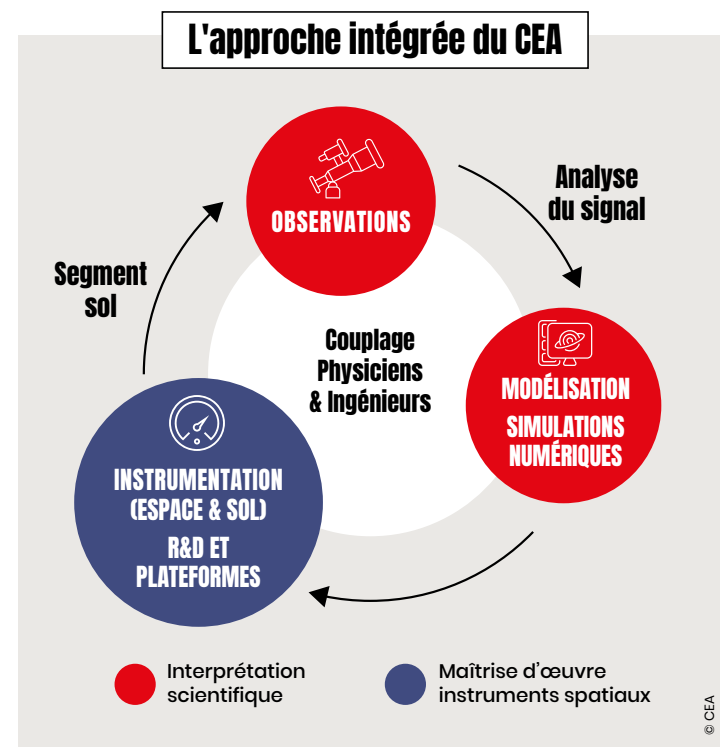
**S.M.** — Le large spectre de compétences de ses équipes est l'atout qui permet au CEA de couvrir l'ensemble des thématiques astrophysiques. Au sein de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers, astrophysiciens et physiciens des particules collaborent, par exemple, en cosmologie et en astrophysique des hautes énergies et multimessagers, notamment sur une thématique en plein essor : les ondes gravitationnelles. En cosmologie fondamentale, les travaux menés à l'Institut de physique théorique ont conduit Francis Bernardeau, son directeur, à jouer un rôle très important dans le consortium Euclid. Enfin, nous bénéficions des compétences développées par ailleurs au CEA en calcul haute performance et en IA pour la modélisation et le traitement de données. Nous avons également des liens très forts avec nos partenaires. Si le Cnes est notre partenaire principal et stratégique, nous travaillons en étroite collaboration avec le CNRS et les universités, dont nous accueillons des chercheurs et des enseignants-chercheurs depuis longtemps, avec l'Esa et l'Eso au niveau européen et avec nos partenaires internationaux comme avec la Nasa (États-Unis) pour Webb ou avec la Chine pour la mission Svom.

→ Inspection à la lumière ultraviolette de l'intérieur d'un cryostat pour limiter la contamination particulaire sur ses éléments les plus sensibles avant étalonnage et mesure de performances.



### Quels sont les principaux enjeux technologiques et scientifiques à relever ?

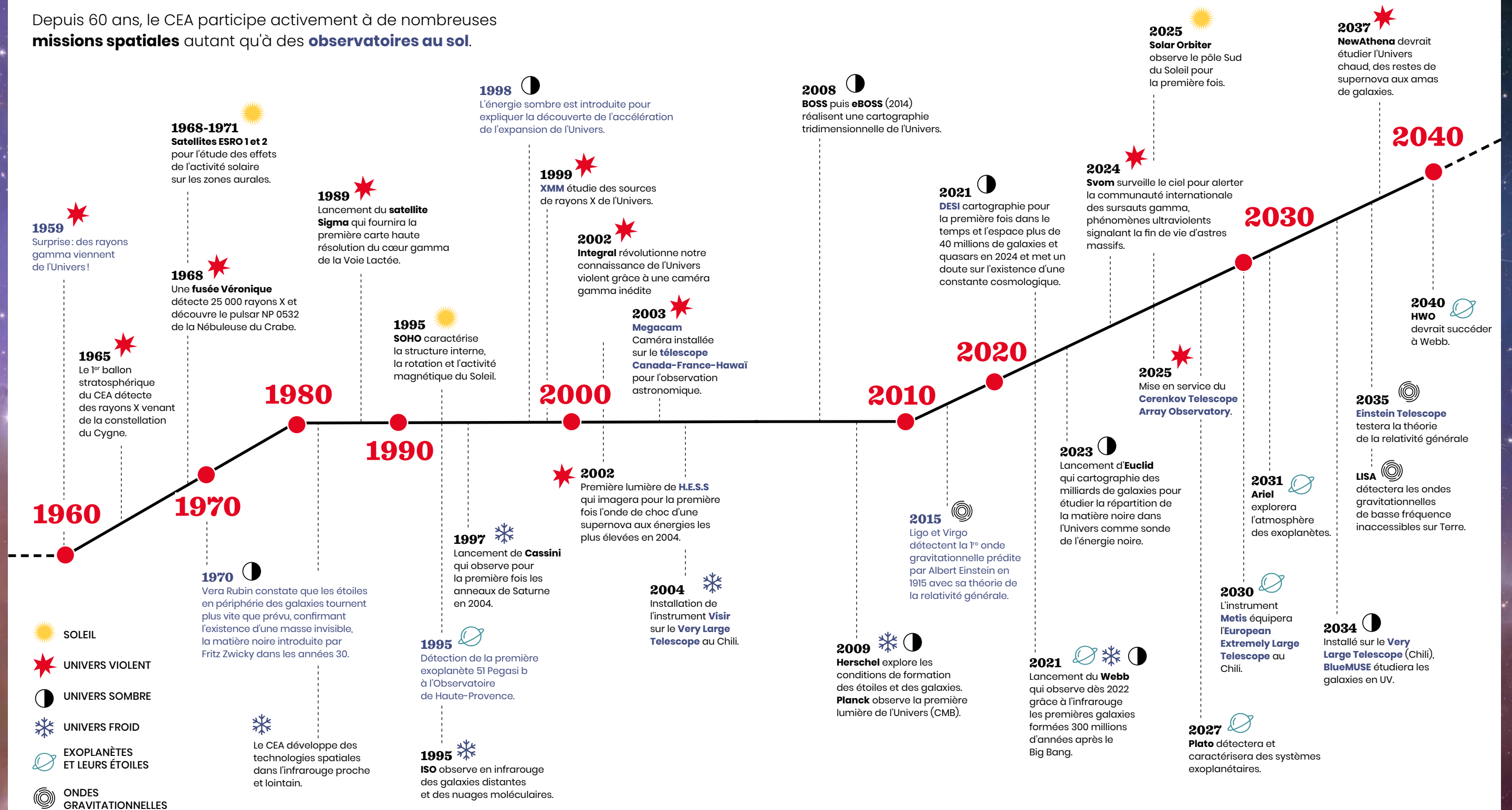
**S.M.** — Pour répondre à de grandes questions, comme l'origine de la vie ou l'Univers sombre, nous avons besoin d'outils toujours plus puissants qui s'appuient sur des technologies innovantes de pointe. Avec l'arrivée prochaine des supercalculateurs exascale<sup>4</sup>, nous espérons une précision accrue de nos modèles pour les confronter aux données recueillies. Sur le plan de la recherche, l'astrophysique s'inscrit dans le temps long : il faut au moins vingt ans pour monter une mission spatiale ! Face aux investissements massifs, publics comme privés, dans le monde, la France et l'Europe doivent tenir leur rang : ne pas investir dans une des longueurs d'onde de la lumière – des rayons gamma au submillimétrique – c'est perdre en souveraineté et en expertise scientifique et technologique. Or, les technologies et la connaissance développées pour l'astrophysique trouvent très souvent des applications dans notre vie quotidienne, depuis le GPS jusqu'à la météo de l'espace. ●



↑ Les compétences du CEA en instrumentation permettent aux équipes d'obtenir du temps d'observation sur les grandes missions, dont les données nourrissent modèles et simulations numériques et servent aussi à alimenter le développement d'outils toujours plus puissants.

# Le CEA et l'espace

Depuis 60 ans, le CEA participe activement à de nombreuses **missions spatiales** autant qu'à des **observatoires au sol**.



- SOLEIL
- UNIVERS VIOLENT
- UNIVERS SOMBRE
- UNIVERS FROID
- EXOPLANÈTES ET LEURS ÉTOILES
- ONDES GRAVITATIONNELLES

# INDISPENSABLE MÉTÉO DE L'ESPACE

L'environnement de la Terre est en grande partie contrôlé par l'activité de son étoile, le Soleil. Ses « sautes d'humeur », comme les vents et les éruptions solaires, peuvent perturber le champ magnétique terrestre qui nous protège. Certains de ces phénomènes sont même susceptibles d'avoir des impacts importants : endommagement voire destruction de satellites, vieillissement prématuré de leurs composants ou dérèglement de leur positionnement, lancement retardé ou raté de vols spatiaux, irradiation des astronautes et des passagers des avions long-courriers... jusqu'au blackout de réseaux de distribution de l'électricité comme en 1989 au Canada ou la fermeture de l'aéroport de Stockholm en 2015.

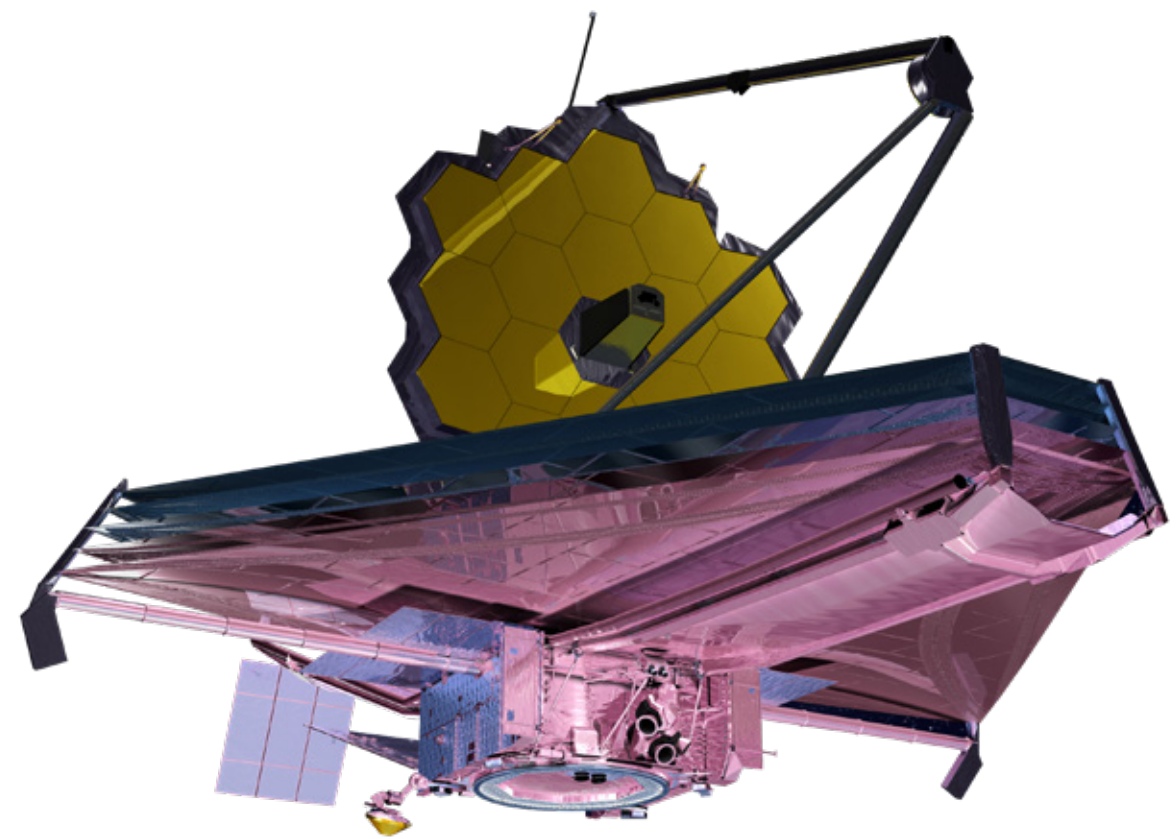
La détection rapide de ces événements est donc primordiale : les particules très énergétiques qui sont émises parviennent jusqu'au champ magnétique terrestre en un quart d'heure à peine, et de larges nuages de matière coronale peuvent nous atteindre en 14 heures – pour le plus rapide jamais observé – jusqu'à quelques jours.

Grâce à ses recherches sur l'activité du Soleil, le CEA est très impliqué dans ce domaine. Il développe des prévisions de son cycle magnétique de 11 ans<sup>(1)</sup>, « le maximum du cycle actuel venant d'être

passé », précise Sacha Brun, et des modèles multidimensionnels d'éruption et de vent solaires qui alimentent le *Virtual Space Weather Modeling System* (VSWMC) développé sous l'égide de l'ESA. L'objectif est double : comprendre et prévoir l'état du Soleil et ses effets sur les environnements planétaires ; analyser en temps réel et anticiper d'éventuelles conséquences sur terre. À l'heure où les systèmes de communication et d'information sont le nerf de la guerre, c'est un enjeu majeur de souveraineté pour l'Europe comme les récentes tempêtes solaires très intenses en novembre dernier nous l'ont encore rappelé. À partir de 2031, la mission Vigil, conçue dans le cadre du *Space Safety Program* de l'ESA et dont le CEA assurera notamment l'accompagnement scientifique de l'instrument JEDI, verra les régions susceptibles de déclencher des éruptions solaires avant même qu'elles ne soient visibles depuis la Terre.

Ces travaux bénéficient également à l'exploration de nouveaux systèmes **étoiles-planètes** : « *Les interactions entre le Soleil et la Terre constituent un système prototype que nous pouvons comparer avec ce que l'on observe par ailleurs pour bien en comprendre les mécanismes* », souligne Antoine Strugarek.

(1) Cycle durant lequel le champ magnétique du Soleil s'inverse en s'accompagnant de phénomènes éruptifs très énergétiques.



© NASA, ESA, CSA, Northrop Grumman

## Au début du monde

On sait que les étoiles s'organisent en galaxies qui peuvent se regrouper entre elles et sont reliées par la toile cosmique. Mais **comment l'Univers s'est-il ainsi structuré ?** Pour y répondre, il faut remonter très loin dans le temps, à la fin de l'âge sombre<sup>(1)</sup>, quand se sont formées et allumées les premières étoiles. C'est une des missions confiées à l'observatoire spatial James Webb, plus gros télescope jamais lancé. Trente ans après le décollage de la mission Iso pour laquelle le CEA avait développé sa première caméra infrarouge baptisée Isocam, son expertise grandissante dans ce domaine de longueur d'onde l'a conduit à jouer un rôle majeur pour

Webb, notamment dans la mise au point de l'imageur Miri et l'exploitation des données. « *Webb s'inscrit dans la continuité de cette histoire qui nous permet aujourd'hui de participer à l'exploration de cette terra incognita de l'Univers !* », s'enthousiasme David Elbaz.

À l'instar d'un sous-marin sondant les abysses océaniques, Webb a été conçu pour aller le plus loin possible dans l'espace, et donc aussi dans le temps, et les images qu'il en a déjà ramenées ne cessent pas de faire débat. Mais qu'a-t-il donc vu dans ces premiers instants ? Une myriade de « petits points rouges » qui signent la présence de bien plus de « bébés galaxies », donc une plus grande fécondité de l'Univers jeune qu'envisagé. Les observations ont ainsi bouleversé la théorie !

L'installation fin 2026 du supercalculateur exaflopique Alice Recoque au CEA constituera un apport majeur pour affiner les modèles et aider à comprendre la naissance des galaxies. Une arrivée impatientement attendue par les astrophysiciens.

(1) Période d'environ 200 millions d'années après le Big Bang qui précède la naissance des premières étoiles.

**B**ranche à part entière de l'astrophysique, la **cosmologie** considère l'Univers comme un objet en soi pour comprendre ce qu'il a été, ce qu'il est aujourd'hui et ce qu'il sera demain. « Depuis la découverte de l'expansion de l'Univers, le modèle standard de la cosmologie que nous avons progressivement construit explique très bien ce que l'on voit », souligne Jean-Baptiste Melin. Mais il y a un hic... Pour décrire l'évolution de l'Univers, ce modèle repose sur trois composantes, dont deux restent encore aujourd'hui invisibles : la matière et l'énergie dites « noires » qui constituent à elles seules 95 % de l'Univers à côté de la matière visible, comme les étoiles ou les planètes. La matière noire structure l'Univers en formant une immense « toile cosmique » tandis que l'énergie noire dilate l'Univers en éloignant les galaxies les unes des autres, et de plus en plus vite.

Comment alors voir l'invisible ? En cartographiant minutieusement de larges portions de l'Univers pour reconstruire la distribution spatiale de la matière visible. C'est l'ambition de deux missions clés, assurées par les téles-

copies Euclid dans le ciel et DESI au sol pour cartographier la matière noire et l'énergie noire sur une période allant jusqu'à 10 milliards d'années dans le passé. La contribution du CEA y est à la fois instrumentale, analytique et théorique. En Arizona, DESI braque, toutes les nuits, ses 5 000 fibres optiques sur un ensemble préalablement identifié de galaxies et de quasars pour mesurer leur spectre et en déduire leur distance. Euclid, en orbite autour du point de Lagrange L2<sup>1</sup>, prend des photos les plus précises possible des galaxies et de leurs formes avec la caméra VIS et mesure leur distance avec le spectrophotomètre infrarouge NISP. Des instruments dont le CEA a conçu une partie des composants.

Ces observations célestes et terrestres génèrent une très grande quantité de données brutes qu'il faut ensuite analyser grâce à des chaînes de traitement, des pipelines, dans lesquels de nombreux laboratoires sont impliqués. L'apport de la théorie est ici nécessaire, notamment pour confronter modèles et données expérimentales (voir p. 49).

(1) Point situé à 1,5 million de la Terre dans la direction antisolaire, idéal pour observer l'Univers lointain.

## LA FACE CACHÉE DE L'UNIVERS

## À la rencontre des premiers âges

**D**es phénomènes très violents peuvent se produire dans l'Univers, comme la coalescence ou l'explosion d'étoiles massives, les supernovæ, dont certaines émettent un flash de quelques fractions à quelques dizaines de secondes en rayons gamma. Ces sursauts gamma sont de bons candidats pour témoigner de ces premiers âges : particulièrement lumineux, ils servent de phares pour sonder l'évolution des galaxies dans un Univers jusqu'à dix fois plus petit qu'aujourd'hui.

Pour détecter et identifier ces événements, c'est toute une chaîne d'instruments, depuis l'espace jusqu'au sol et inversement, qui travaille de concert. Concrètement, comment ça marche ? Dans l'espace, l'observatoire spatial franco-chinois Svom, spécifiquement conçu pour traquer les sursauts gamma au moment où ils se produisent, envoie une alerte dès qu'il en détecte un. Entrent alors en scène différents instruments : les grands télescopes au sol, comme H.E.S.S. en Namibie, pour capturer la lumière de très haute énergie émise durant le sursaut, celle-ci n'étant observable que depuis la Terre, et des télescopes, opérant en lumière visible au sol ou dans l'espace, pour préciser sa localisation. Une fois l'événement bien localisé, les grands observatoires comme Webb ou VLT prennent le relais pour mesurer le spectre de la galaxie dans laquelle s'est produit le sursaut gamma et en déduire la distance. *A contrario*, depuis le nord du Chili, l'observatoire Vera-C.-Rubin, qui scanne chaque nuit tous les objets du ciel, envoie des alertes qui sont ensuite triées et classées en cibles d'opportunités pour que les autres observatoires, dont Svom et H.E.S.S., les explorent. Cette coordination entre la surveillance et l'identification de ces phénomènes, partagées en temps réel sur la plateforme Astro-COLIBRI et s'appuyant sur des technologies comme les applications mobiles et l'IA, « contribue à une nouvelle façon d'explorer l'Univers transitoire », soulignent Arnaud Claret et Fabian Schussler. Plus de 100 sursauts gamma ont déjà été détectés par Svom, dont l'un est survenu seulement 630 millions d'années après le Big Bang.

D'autres messagers, comme les neutrinos de haute énergie, les rayons cosmiques ou les ondes gravitationnelles, peuvent aussi être utilisés pour sonder le « ciel à haute énergie », notamment les vestiges de supernovæ.



Tout savoir sur l'un des plus lointains sursauts gamma jamais identifiés.

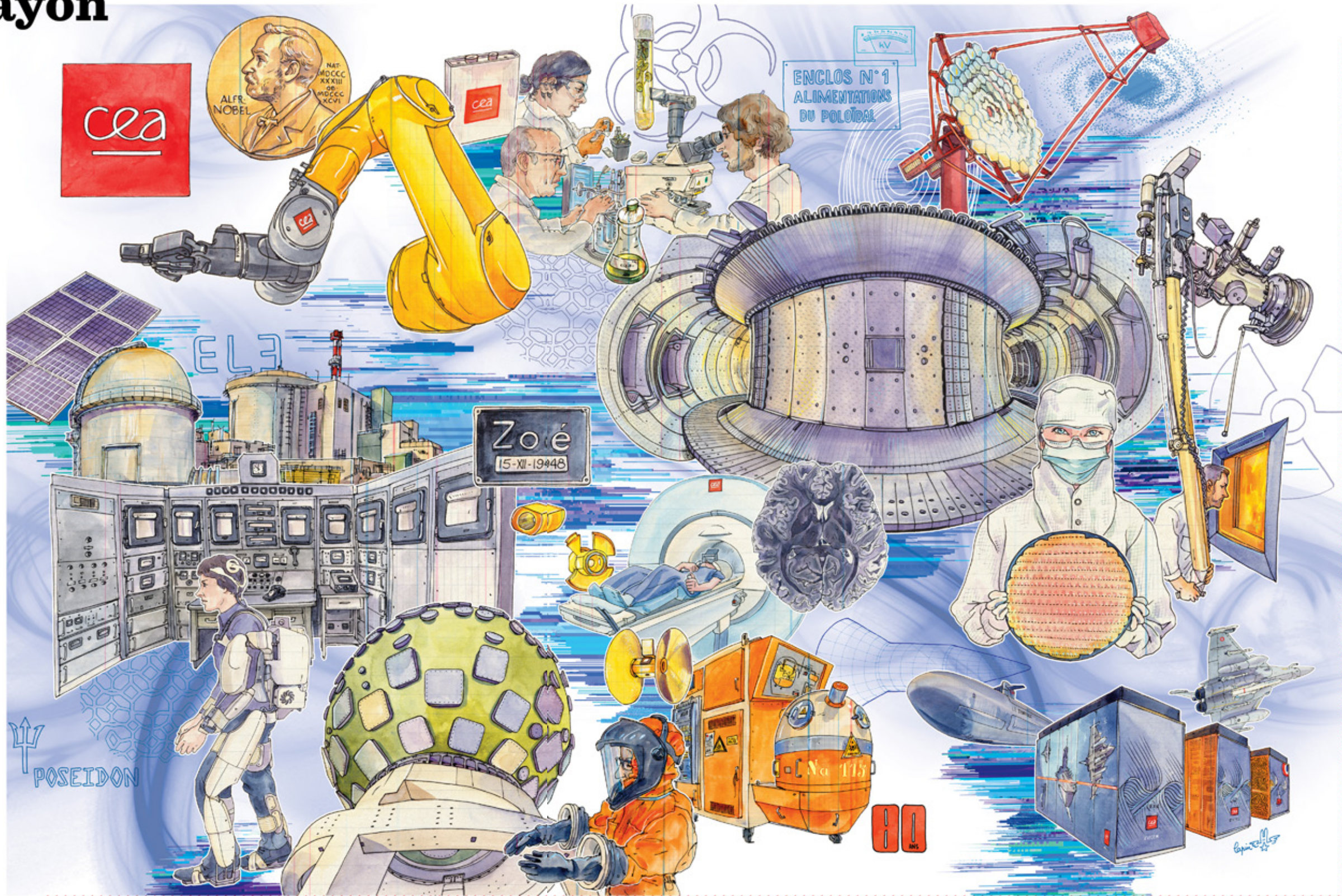


# Le CEA sous le crayon de Lapin

À l'occasion de ses 80 ans, le CEA a confié la création d'une fresque au dessinateur Lapin, spécialisé en reportage et peintre de l'Air et de l'Espace.



Muni de son carnet et de ses pinceaux, Lapin est parti à la découverte des installations du CEA. Avec un objectif : saisir sur le vif les formes, les couleurs, mais aussi les gestes des scientifiques en plein travail. Un défi de taille pour celui qui aime se définir comme un « illustrateur nomade ». « Afin de pouvoir représenter une installation, il faut que je comprenne cette expérience pour la rendre intelligible pour le spectateur, c'est la clé du dessin ! » Après des dizaines de croquis et dessins, et autant de matière première, Lapin nous livre cette fresque de 3 m sur 2 m, et conclut : « Chercheur, explorateur, dessinateur, carnetiste, des activités somme toute pas si différentes les unes des autres ! »



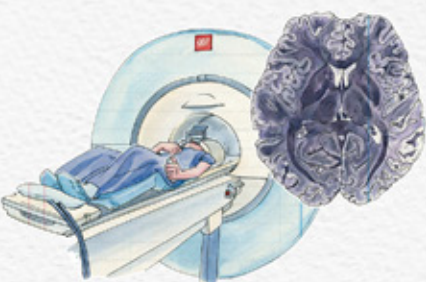
Retrouvez les explications et le processus créatif de Lapin en vidéo.





**Maximum power**

Petites mais puissantes. Les batteries font rouler les voitures, stockent l'électricité, soutiennent le réseau. Chaque matériau et chaque format compte pour repousser les limites : densité, puissance, durée de vie et impact environnemental.



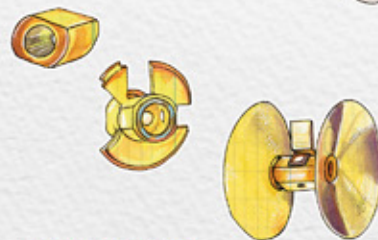
**Le cerveau en ultra HD**

L'IRM Iscoul du CEA, le plus puissant au monde avec son champ magnétique de 11,7 teslas, révèle le cerveau humain comme jamais.



**Disco-joule**

Le laser Mégajoule (LMJ) est la plus grande installation laser d'Europe et permet d'observer la matière portée à des températures et à des pressions très élevées, comme lors du fonctionnement d'une arme nucléaire. Il est au service de la dissuasion nucléaire française et, couplé à PETAL, de la recherche académique.



**Dans le mille**

Au cœur d'un cylindre d'or pas plus grand qu'un dé à coudre se cache la microcible du laser Mégajoule. Elle recrée des conditions extrêmes, proches des étoiles ou d'une arme nucléaire.



**Exorévolution**

De la santé à l'industrie en passant par la Défense, les exosquelettes assistent les mouvements humains et repoussent les limites du corps.



**Spationaute des réacteurs**

Le CEA étudie les métaux liquides, comme le sodium, essentiels à certains réacteurs de 4<sup>e</sup> génération. Dans des boîtes à gants et « boucles » expérimentales, les équipes développent des procédés sûrs, qualifient composants et instruments, et accompagnent la R&D.



**Transistor-verse**

Le wafer est la pierre angulaire de l'électronique. Disque de silicium poli, il abrite des milliards de transistors qui font fonctionner satellites, automobiles, dispositifs médicaux, IA et smartphones.



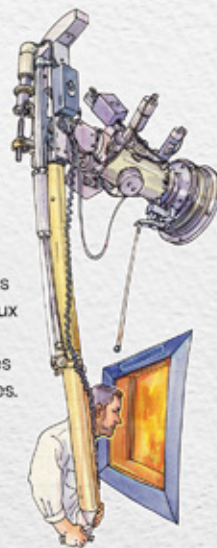
**Un R2-D2 au sodium**

Avec cette « boucle » pédagogique, nos chercheurs étudient le sodium liquide pour préparer les réacteurs du futur.



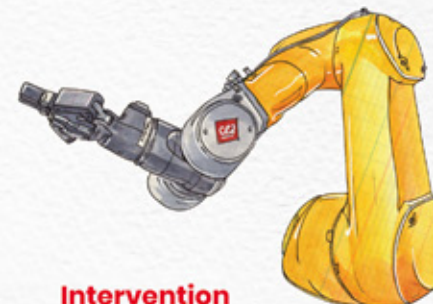
**Des solutions venues du vivant**

Dépolluer les sols ? Soigner des tumeurs avec des bactéries ? Aider l'agriculture ? Le vivant est un allié pour inventer des biotechnologies capables de soigner, et de répondre aux défis énergétiques, climatiques et environnementaux.



**Bras de titan**

Les chercheurs du CEA manipulent des combustibles irradiés derrière d'épaisses parois, grâce à des bras téléopérés. Leurs travaux alimentent les bases de données et les codes de simulation nucléaires.



**Intervention en milieu hostile**

Sur les chantiers de démantèlement des installations nucléaires, les bras robotisés permettent la découpe laser de matériaux, en faisant preuve d'une agilité exceptionnelle.



**Couteau suisse made in France**

Unique en Europe, le réacteur de recherche Jules Horowitz (RJH) permettra le vieillissement accéléré des matériaux nucléaires et produira jusqu'à 50% des radioéléments nécessaires à la médecine européenne.



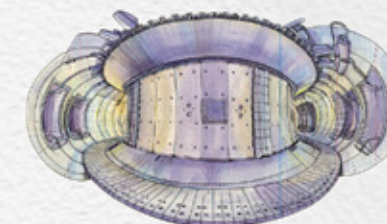
**20 000 lieues sous les mers**

Les sous-marins et le porte-avions français sont équipés de chaufferies nucléaires qui les propulsent et les alimentent en énergie électrique. Elles garantissent puissance, autonomie et discrétion.



**Quantique et course à la lumière**

En 2023, Anne L'Huillier et Pierre Agostini ont remporté le prix Nobel de physique pour des recherches initiées au CEA sur la physique attoseconde, ouvrant une fenêtre inédite sur la matière. En 2025, Michel Devoret est récompensé pour ses travaux sur l'effet tunnel quantique macroscopique et les circuits quantiques supraconducteurs, des avancées utiles à certains calculateurs quantiques.



**Un soleil en boîte**

À Cadarache, le tokamak West du CEA reproduit l'énergie des étoiles pour étudier la fusion nucléaire et développer une nouvelle source d'énergie. En février 2025, il a battu un record mondial avec 1 337 secondes de plasma !



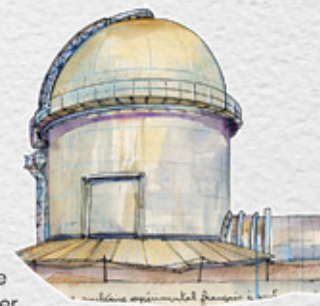
**Traque universelle**

Le CTAO, un réseau de 60 télescopes répartis entre les Canaries et le Chili, traque les phénomènes les plus violents de l'Univers : supernovae, trous noirs, rayons ultraénergétiques...



**Mission simulation**

Le CEA conçoit et fabrique les têtes nucléaires françaises et garantit leur sûreté et leur fiabilité sans essais nucléaires nouveaux, grâce au programme Simulation.



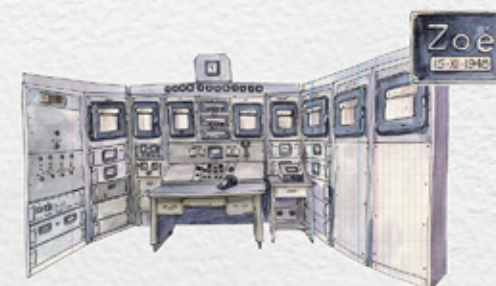
**Réacteurs à neutrons rapides**

En 1967, Rapsodie devient le premier réacteur à neutrons rapides français. Unique et pionnier, il a jeté les bases de futurs réacteurs comme Phénix, ouvrant la voie à une meilleure gestion des ressources et des déchets nucléaires.



**1,2,3 soleil**

Au CEA, le solaire de demain prend forme : cellules à hétérojonction, tandems pérovskite/silicium, photochromiques ou organiques, pour produire plus, mieux et durablement.



**Cockpit atomique**

Zoé est la première pile nucléaire française, mise en service en 1948, sur le site CEA de Fontenay-aux-Roses. Sa salle de commande, conservée en l'état, témoigne de ce pari scientifique audacieux.



**Course intensive**

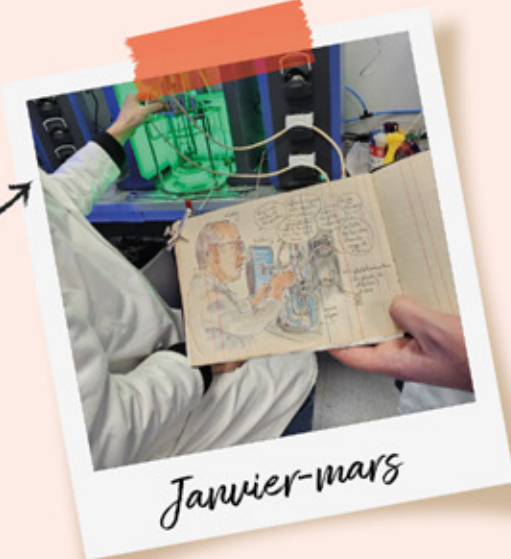
Le supercalculateur EXA1-HE répond aux besoins du programme Simulation de la Direction des applications militaires du CEA, dont le but est de garantir la sûreté et la fiabilité des armes nucléaires françaises.

# Souvenirs, souvenirs!

Retour en images sur quelques moments forts de la célébration des 80 ans du CEA tout au long de l'année 2025.

## Un bon coup de crayon

En visite en début d'année dans les labos du CEA, l'illustrateur Lapin croque sur le vif le travail des équipes de recherche. Son carnet à dessin l'a aidé à réaliser la fresque qui célèbre 80 ans d'innovations au CEA. Dévoilée en décembre aux salariés, elle est à retrouver en page 58 de ce numéro!



Janvier-mars

## Rendez-vous à Bruxelles

Au menu de cet événement organisé par le CEA pour témoigner de son engagement européen : une exposition, plusieurs tables rondes sur des défis scientifiques majeurs pour la France et l'Europe — technologies quantiques, microélectronique, calcul haute performance, technologies pour la santé et énergies bas carbone — et une keynote d'Anne L'Huillier, prix Nobel de physique 2023. En prime, le CEA y reçoit le prix Clarivate Top 100 Innovators 2025, qui confirme sa position de premier organisme mondial de recherche le plus innovant.



Mai

## Ohayo Osaka!

Le 13 juin, le CEA investit pour 4 semaines l'espace « Exposition temporaire » du pavillon France à l'Exposition universelle, organisée à Osaka, au Japon. Il y propose une visite immersive de l'infiniment petit à l'infiniment grand, mettant en avant les avancées réalisées dans différents domaines dont la santé, le climat et le numérique, ainsi qu'une galerie de portraits de grands scientifiques français comme Marie Curie, que plus de 500 000 curieux ont parcourue. L'occasion aussi pour l'organisme de réunir ses partenaires japonais afin d'échanger sur les coopérations dans le nucléaire, le calcul haute performance et les neurosciences.



Juin



Juillet

## À l'heure asiatique

À Séoul, l'exposition sur les 80 ans du CEA est inaugurée le 1<sup>er</sup> juillet par l'ambassadeur de France. Puis direction l'Ambassade de France à Tokyo, où l'exposition est visible le 17 novembre. Ces deux événements mettent en valeur les liens étroits qui unissent le CEA, d'une part à la Corée du Sud, d'autre part au Japon, et reviennent sur plusieurs réalisations emblématiques.

## Attention, serious game

Tandis que l'automne s'avance, les salariés du CEA découvrent, en avant-première, CEA le Jeu, coconstruit avec certains d'entre eux autour de ses missions et des recherches. Un reveal très apprécié par ceux qui ont « joué le jeu » dans chaque centre du CEA!



Octobre-novembre

## Décor viennois

En marge de la conférence générale de l'AIEA, pour laquelle Anne-Isabelle Etievre, administratrice générale du CEA, conduit la délégation française, la représentation permanente de la France à Vienne accueille une exposition qui rappelle les liens forts qui unissent, depuis toujours, l'AIEA et le CEA. Avec l'organisation Iter, sur le site de Cadarache, le CEA accueillera d'ailleurs cette année une session du programme Lise Meitner de l'AIEA, qui vise à renforcer la participation des femmes dans le secteur nucléaire.



Septembre

## Festivals à foison

Depuis Sur les épaules des géants au Havre fin septembre jusqu'aux Utopiales à Nantes début novembre, en passant par la Fête de la science à Paris en octobre, le CEA a offert à un public curieux de sciences une exposition consacrée à quelques-unes de ses plus grandes réussites.



Décembre

## Pionniers d'hier, précurseurs de demain

Clap de fin ou presque pour la célébration des 80 ans du CEA, au musée des Arts et Métiers à Paris le 8 décembre. L'occasion de revenir sur son histoire, avec les témoignages de plusieurs grandes figures qui ont marqué l'organisme de leur empreinte et de jeunes chercheuses et chercheurs talentueux et prometteurs.



# Le vrai du faux

Si vous avez bien lu les trois dossiers de ce numéro, ce jeu sera une simple formalité !

**1.**  
L'ESS, la source européenne de neutrons, est située en Suède.

VRAI  FAUX

**2.**  
**Idole**  
Nom du projet de source nationale de neutrons.



VRAI  FAUX

**7.**  
**35°C**

Température à laquelle est envoyée l'eau pour refroidir les supercalculateurs du CEA.

VRAI  FAUX

**3.**  
**50%**  
part de l'accélérateur de l'ESS de conception et fabrication française.

VRAI  FAUX



**4.**  
On observe l'Univers froid dans le domaine de l'infrarouge.



VRAI  FAUX

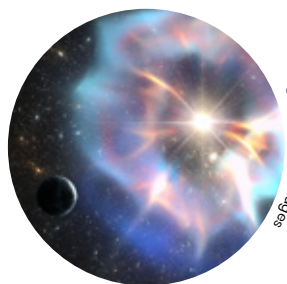
**5.**  
La photonique sur silicium vise à produire des puces pour les panneaux solaires.

VRAI  FAUX

**6.**  
**Grace Hopper:**  
informaticienne célèbre qui donne son nom à la prochaine machine exascale européenne.

VRAI  FAUX

**9.**  
**Un SURSAUT GAMMA,**  
c'est une planète qui décroche de son orbite.



VRAI  FAUX

**8.**  
**L'âge sombre**  
Période d'environ 200 millions d'années après le Big Bang qui précède la naissance des premières étoiles.



VRAI  FAUX

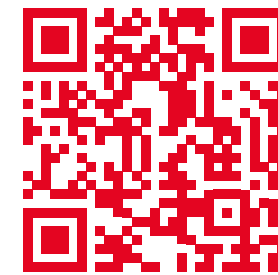
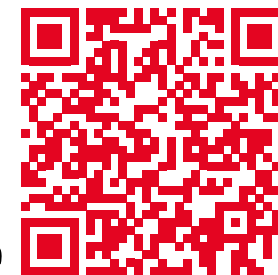


# Notre sélection

Que vous ayez 90 secondes ou une heure, que vous vous intéressiez à l'histoire ou à la microélectronique, que vous soyez plutôt grandes conférences ou petits schémas de vulgarisation, le CEA vous a concocté une sélection de vidéos avec ses partenaires.

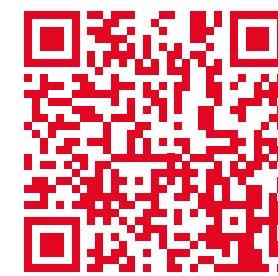
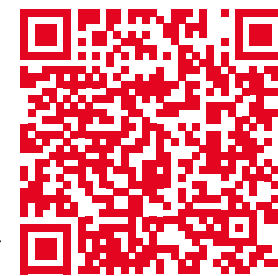
## La dissuasion nucléaire, une histoire d'eau et d'hommes

De l'eau lourde aux océans du globe où patrouillent les sous-marins nucléaires d'attaque, la dissuasion nucléaire est une aventure humaine, faite de rebondissements. C'est à une plongée dans ce pan de l'histoire de France que nous invitent Dominique Mongin, historien spécialiste de la dissuasion nucléaire, et Paul Zajac, directeur de l'analyse stratégique du CEA, en compagnie de la vulgarisatrice scientifique Marie Treibert.



## Plongée dans une puce

Comment, à partir de sable, peut-on créer des composants de pointe plus fins qu'un cheveu ? Micke Science, ingénieur en nanotechnologies et vulgarisateur scientifique sur les réseaux sociaux, a pu arpenter les salles blanches du CEA Leti, pour y découvrir nos techniques de pointe. Et grâce à un joli cœur, une petite étoile et un matelas de yoga (oui oui !), il vous explique une étape clé de la réalisation des puces : la photolithographie.



## Le choc des photos

La science, ce ne sont pas que des calculs complexes et des manipulations de haute précision. Ce sont aussi des images, issues d'instruments qui observent le monde depuis le cœur de nos cellules jusqu'aux confins de l'Univers. En partenariat avec le CENTQUATRE-Paris, les chercheurs du CEA se sont prêtés au jeu de décoder leurs clichés les plus marquants.

## Avez-vous déjà vu... un crâne de mammouth ?

Après cette vidéo, oui ! Nota Bene, créateur de contenus spécialisé dans l'Histoire, a fait découvrir à ses deux millions d'abonnés l'histoire incroyable qui lie le CEA à un squelette de mammouth vieux de près d'un million d'années. Exposé au Muséum national d'histoire naturelle, ce squelette a été démonté pour restauration en 2022. L'occasion idéale de passer son crâne au tomographe, un appareil du CEA qui sert normalement à étudier les colis de déchets nucléaires.



Organisé par



en partenariat avec



**Redonner toute sa place à la science, au service de la société.** Voilà la promesse du *Paris Saclay Summit - Choose Science*, qui revient pour une troisième édition les 18 et 19 février 2026 à CentraleSupélec. Plus de 80 conférences et tables rondes viendront éclairer le rôle décisif de la science, et surtout de celles et ceux qui la font au quotidien.

Santé, climat, énergies, intelligence artificielle, transports ou encore alimentation... Les travaux de recherche dessinent un quotidien plus durable.

Partenaire de l'événement, le CEA vous emmènera au cœur des défis énergétiques de demain, avec notamment l'intervention d'Anne-Isabelle Etievre, son administratrice générale. Julie Galland reviendra sur la consommation énergétique du numérique et Valérie Masson-Delmotte sur le sort des pôles. Et pour vous évader, David Elbaz vous proposera un voyage dans les étoiles... Rejoignez-nous!



## Qui sommes-nous ?

Le CEA est un organisme public de recherche dont le rôle est d'éclairer la décision publique et de donner aux entreprises françaises et européennes ainsi qu'aux collectivités les moyens scientifiques et technologiques pour mieux maîtriser quatre mutations sociétales majeures : la transition énergétique, la transition numérique, la santé du futur, ainsi que la défense et la sécurité globale. Sa raison d'être est d'agir pour assurer à la France et à l'Europe un leadership scientifique, technologique et industriel, ainsi qu'un présent et un avenir mieux maîtrisés et plus sûrs pour tous.

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



Fiers d'avoir  
fêté nos

80  
ANS

avec vous !



*Découvrez notre  
histoire ici.*