

# 12 LA REVUE DU CEA

DÉFENSE

**Les 30 ans  
du programme  
Simulation**

- Page 12

ÉNERGIE

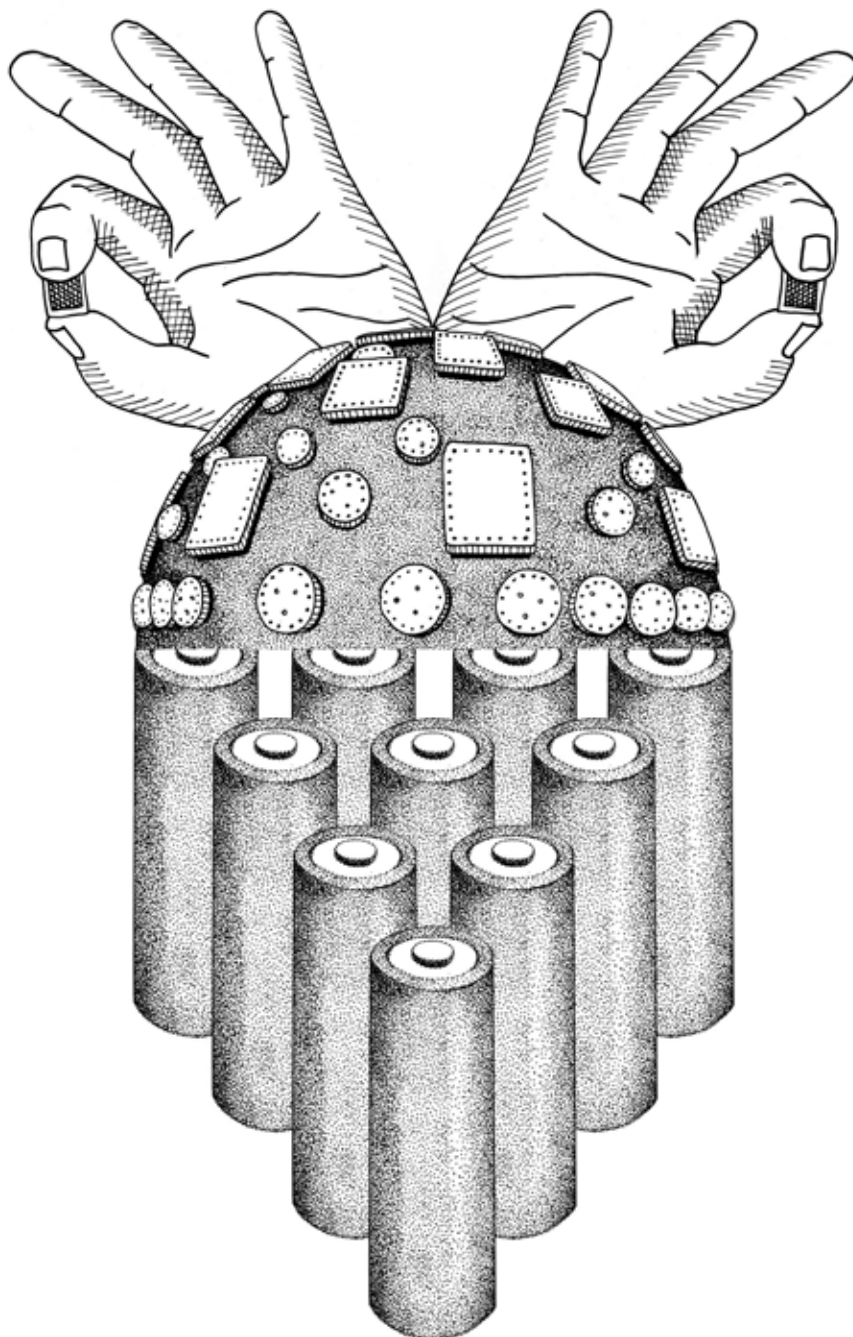
**Les batteries  
du futur**

- Page 28

ÉCRANS

**Vers une nouvelle  
révolution**

- Page 48



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

**Illustration de couverture**

La Hache illustration

**Conception graphique**

bearideas

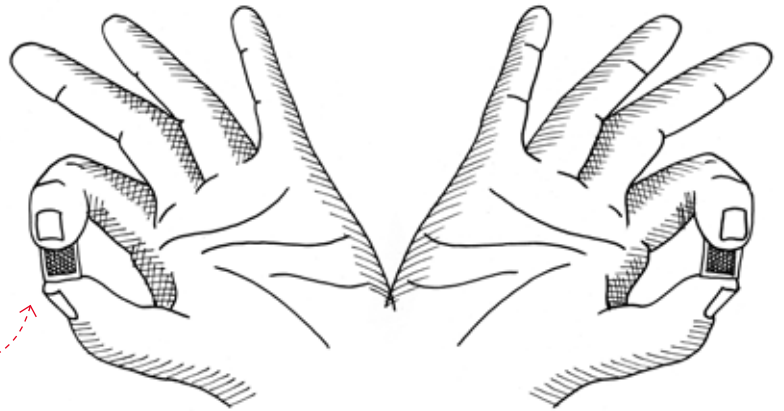
**Des remarques, des suggestions ?**

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

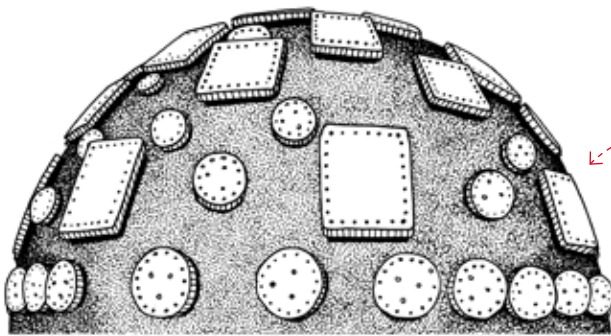
**ISSN 2999-926X**

### **Fenêtres miniatures**

Entre deux doigts, cet écran ouvre des possibilités infinies. Au CEA, on repousse les limites de l'affichage des microécrans pour préparer les technologies et les usages de demain. Un enjeu stratégique, car des cockpits d'avion aux lunettes immersives, les microécrans sont utilisés partout.



## **La couverture déchiffrée**

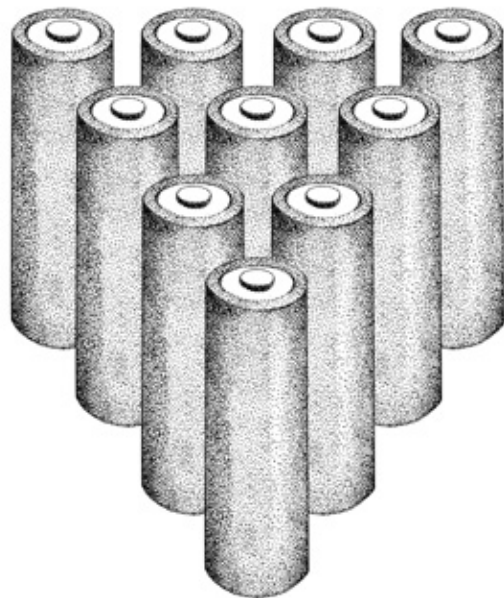


### **Dôme de savoir**

Un dôme colossal, de 10 mètres de diamètre, où convergent plus d'une centaine de faisceaux laser. C'est là, au sein du laser mégajoule, que le CEA reproduit les conditions rencontrées lors de la phase de fusion thermonucléaire des armes et au cœur des étoiles. Une installation phare du programme Simulation, lequel combine physique, calcul et expérimentation pour concevoir et garantir la dissuasion nucléaire française.

### **Des batteries à gogo**

Une forêt de piles... qui symbolise l'omniprésence des batteries dans nos vies : dans nos voitures, au sein des réseaux électriques, dans nos objets du quotidien. Demain, elles seront encore plus performantes, davantage économes en matières premières, recyclables... Ces nouvelles générations se préparent dans les labos du CEA.



**1.** Disposant de 30 ans d'expérience dans les semi-conducteurs, les télécommunications et l'optoélectronique, **Félix Marchal**, *Chief Sales and Marketing Officer* d'Aledia, a occupé différents postes de direction ainsi que géré et développé des unités d'affaires partout dans le monde. Il est certain que la promesse technologique des microLED va très vite se transformer en une réalité industrielle.

© Aledia

**2. Sébastien Patoux**, *Senior Fellow*, dirige le Service des technologies batteries du CEA. Avec 25 ans de travaux sur les batteries de toutes natures, depuis les technologies lithium-ion jusqu'aux générations futures, c'est l'expert incontournable du sujet. Son objectif ? Contribuer à construire une filière industrielle française robuste de la batterie, de l'amont à l'aval de la chaîne de valeur.

© L. Patoux



# Les invités de la revue

**7. Thierry Bissuel**, PDG de Microoled, a travaillé durant plus de trente ans dans l'industrie des semi-conducteurs. Fort d'une expérience diversifiée et très internationale, il parie sur l'avenir de la technologie Oled pour répondre aux nouveaux usages des écrans sur un marché en pleine croissance.

© studiolecarre

**6. Stéphanie Riché** porte le programme Économie circulaire des matériaux du CEA. Cette démarche d'économie circulaire, en particulier des matériaux critiques, est intégrée dans les programmes de recherche du CEA, incluant ceux sur les batteries de nouvelle génération. L'enjeu est à la fois de sécuriser nos approvisionnements et de limiter les impacts environnementaux liés à leur exploitation.

© Christian Morel/CEA

**3. Prix Nobel de physique 2025** pour ses travaux pionniers en mécanique quantique, **Michel Devoret** a effectué la première partie de sa carrière au CEA avant de rejoindre l'université Yale. Enseignant à l'université de Californie à Santa Barbara et directeur scientifique de Google Quantum, il revient sur son parcours avec sensibilité et humilité.

© Karen Zhou

**4. Denis Vacek** est directeur du programme Simulation à la Direction des applications militaires du CEA. Lancé en avril 1996, ce programme a été bâti pour pérenniser la dissuasion française après l'arrêt définitif des essais nucléaires. Son directeur nous fait découvrir ce socle de la dissuasion, des équations de physique jusqu'aux installations expérimentales.

© Cadam / CEA

**5. Dominique Mongin** est historien, docteur en histoire de l'université de Paris I Panthéon-Sorbonne. Il est chercheur et enseigne, en tant qu'expert associé, au Centre interdisciplinaire sur les enjeux stratégiques (Ciens) de l'ENS-Ulm. Il retrace pour nous l'épopée du programme Simulation depuis la fin de la guerre froide.

© D. Mongin / CEA

# Éditorial

Garantir la souveraineté scientifique, technologique et industrielle de la France et de l'Europe est un enjeu crucial. C'est ce qu'illustre ce nouveau numéro de *La Revue du CEA* en mettant en avant la contribution de l'organisme dans les domaines de la défense, de l'énergie et du numérique.

Destiné à garantir la crédibilité et la pérennité de la dissuasion française sans nouveaux essais nucléaires, conformément aux engagements internationaux de la France, le programme Simulation a 30 ans. Grâce aux équipements de pointe développés par le CEA et aux compétences exceptionnelles des équipes, il assure la conception et la garantie des armes nucléaires. Récit d'un succès en page 12.

Le CEA prépare aussi les prochaines générations de batteries, l'un des piliers de la transition énergétique. Elles seront plus performantes, moins gourmandes en matières critiques, plus sûres et davantage recyclables, en misant notamment sur l'économie circulaire (p. 28).

Dans le domaine des écrans, aujourd'hui dominé par l'Asie, le CEA développe des technologies souveraines pour la défense, l'aéronautique et la santé. Son approche s'appuie à la fois sur la R&D réalisée dans ses labos et le soutien aux industriels pour concevoir les briques technologiques clés (p. 48).

Autre domaine concurrentiel, celui des technologies quantiques dont Michel Devoret, prix Nobel de physique 2025, fut l'un des pionniers (p. 62). Son parcours, du CEA à Berkeley puis Yale, illustre l'importance des collaborations internationales. Celles du CEA seront désormais mises en lumière dans chaque numéro (p. 46).

Bonne lecture !

## Merci également à

Didier Besnard  
Aymeric Canton  
Caroline Celle  
Anthony Cibié  
Philippe Despesse  
Roch Espiau de Lamaestre  
Hervé Floch

Vygintas Jankus  
Othman Ladhari  
Mélissa Larbi  
Olivier Laurent  
Maxime Legallais  
Patrick Le Maître  
Hélène Lorient

Sandrine Lyonnard  
Nathalie Neri  
Sami Oukassi  
Michaël Pelissier  
Fabien Perdu  
Stanislas Pommeret  
Léonard Rivier

François Templier  
Caroline Vienne  
Gunay Yildirim  
Et tous ceux qui ont aidé  
à réaliser cette revue !

## 01

### Les 30 ans du programme Simulation **12**



Un programme visionnaire **14**

Trois piliers pour un outil intégré **16**

Epure: l'appareil photo 3D **18**

LMJ: le labo de la fusion **20**

Des applications qui rejaillissent  
dans le domaine civil **22**

#### Et aussi...

**Dans les coulisses du CEA 8**

**Portfolio : Icos, vigie des gaz à effet  
de serre 24**

**Le grand entretien avec Michel Devoret,  
prix Nobel de physique 2025 44**

**Autour du monde 46**

**Carte blanche : la sécurité, une nécessité  
dans un monde changeant 62**

**La playlist 64**

**À vous de jouer 65**

**Save the date 66**

# 02

## Les batteries du futur 28



L'essentiel sur la batterie lithium-ion 32

Dans les labos de chimie 33

Une économie circulaire pour gagner  
en souveraineté 38

Robots et IA 40

Vers des BMS de nouvelle génération 41

La chimie, c'est la clé 43

# 03

## Écrans : vers une nouvelle révolution 48



Les écrans en bref 50

Quelle place pour la France et l'Europe ? 52

Des microécrans plus performants 55

Écran multifonction, le futur  
couteau suisse 56

Communications optiques,  
le pari des microLED 57

Entretien avec Félix Marchal, *Chief Sales  
and Marketing Officer* d'Aledia 58

Entretien avec Thierry Bissuel,  
PDG de Microoled 60

# Dans les coulisses du CEA

De nouvelles start-up et des chercheurs distingués pour leurs travaux, la fermeture du cycle, un cerveau en apnée et des glaçons pour la fusion ! Tour d'horizon de l'actualité qu'il ne fallait pas manquer.

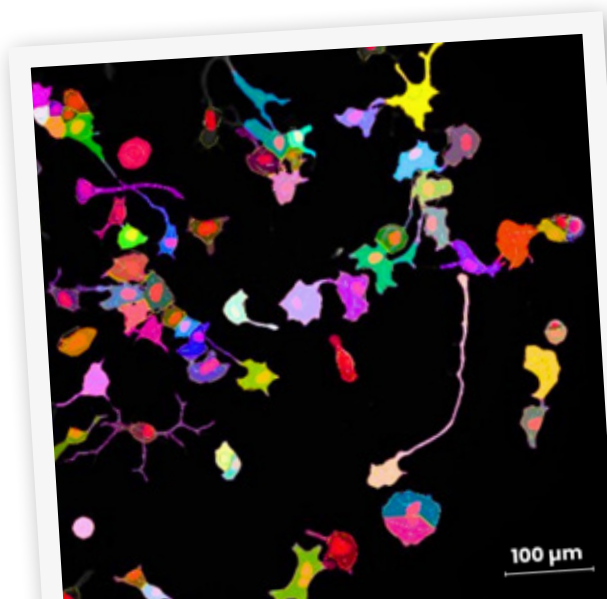
## Un neurone, ça se mesure

Pour comprendre comment les neurones se développent, se connectent ou réagissent à des traitements, les chercheurs mesurent la longueur de leurs prolongements, les neurites. Une tâche essentielle, mais encore souvent réalisée à la main, image par image. Une équipe du CEA a développé un outil qui réalise automatiquement cette mesure en quelques minutes. Fiable et simple à utiliser, il est aussi *open source*, et donc gratuit pour la communauté des neurobiologistes. De quoi faciliter les projets de grande ampleur, impliquant l'étude de très nombreux neurones.

↓ L'outil mis au point par le CEA reconnaît et mesure les prolongements neuronaux sans intervention humaine, en segmentant automatiquement les noyaux, les corps cellulaires et les neurites.

# 12

C'est le nombre de nouvelles start-up issues du CEA en 2025, preuve de la vitalité de ses travaux ! Dans des domaines aussi variés que le diagnostic rapide pour la santé, les capteurs pour la mobilité, la cryptographie, la photonique sur silicium ou encore la télé-échographie, nos équipes mettent au point des solutions utiles à la société et accompagnent les industriels vers de nouveaux marchés.



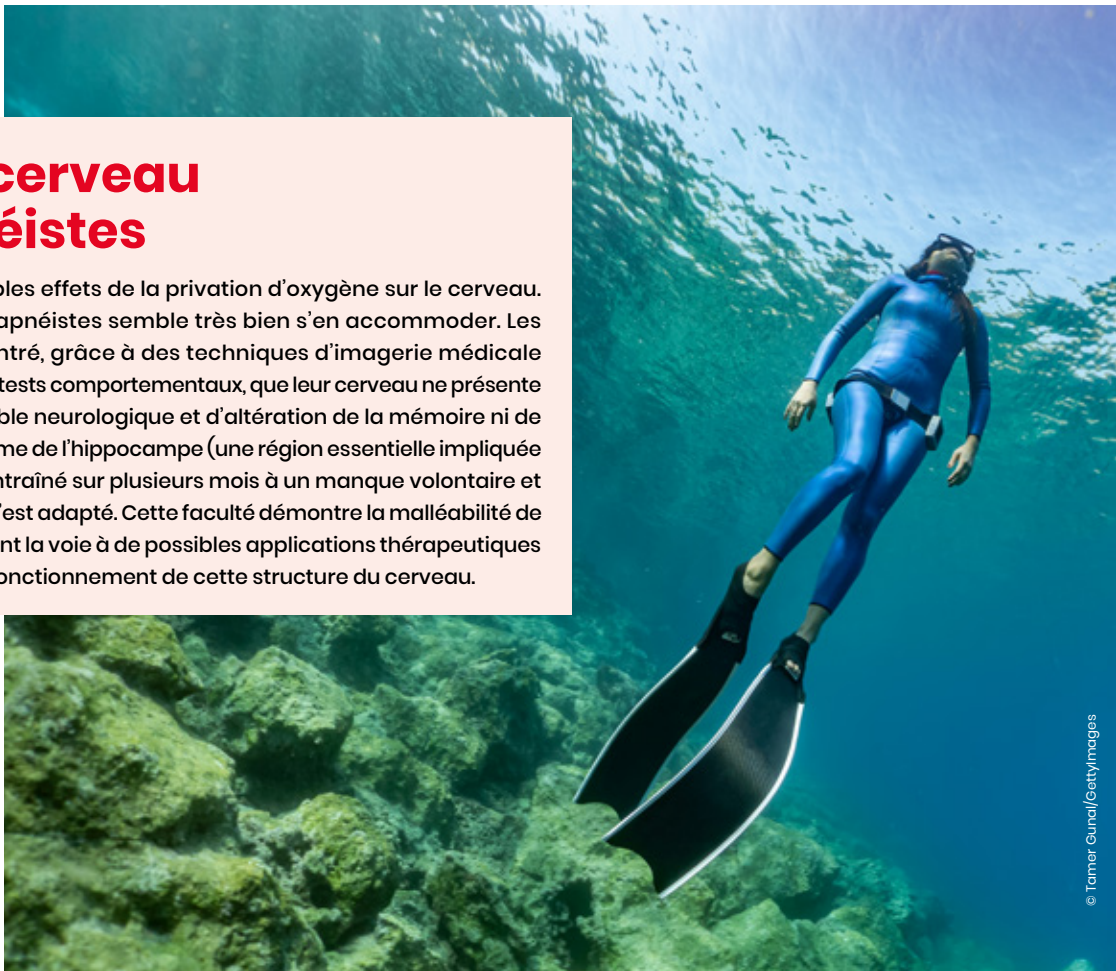
© CEA/eNeuro 2026

## Dans le cerveau des apnéistes

On connaît les terribles effets de la privation d'oxygène sur le cerveau. Pourtant, celui des apnéistes semble très bien s'en accommoder. Les chercheurs ont montré, grâce à des techniques d'imagerie médicale comme l'IRM et à des tests comportementaux, que leur cerveau ne présente aucun signe de trouble neurologique et d'altération de la mémoire ni de modification du volume de l'hippocampe (une région essentielle impliquée dans la mémoire). Entraîné sur plusieurs mois à un manque volontaire et répété d'oxygène, il s'est adapté. Cette faculté démontre la malléabilité de l'hippocampe, ouvrant la voie à de possibles applications thérapeutiques dans les cas de dysfonctionnement de cette structure du cerveau.



Pour en savoir plus, c'est ici!

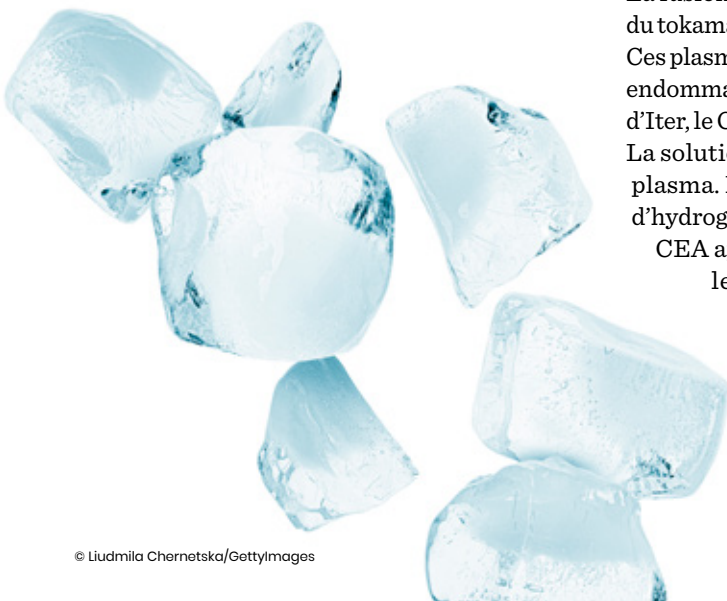


© Tamer Gunal/Gettyimages

## Des glaçons pour la fusion

La fusion nucléaire évoque des températures extrêmes : le plasma du tokamak West, au CEA, atteint ainsi plus de 50 millions de degrés ! Ces plasmas à haute énergie connaissent des instabilités qui peuvent endommager les parois du réacteur. Dans le cadre du développement d'Iter, le CEA participe au projet DMS afin de limiter ces instabilités. La solution ? Injecter des glaçons cryogéniques dans la chambre plasma. D'une taille de quelques centimètres, ils sont composés d'hydrogène, de néon, de deutérium, ou d'un mélange des trois. Le

CEA apporte ses compétences mondialement reconnues pour leur fabrication et leur propulsion à des températures avoisinant  $-270^{\circ}\text{C}$ , et a récemment conçu un système de caractérisation de leur impact, en collaboration avec le CNRS et l'université Grenoble Alpes. Des travaux essentiels pour la sécurisation du fonctionnement des réacteurs de fusion.



## Le Conseil de politique nucléaire valide un **programme ambitieux** sur la fermeture du cycle

Dans la continuité du Sommet sur le nucléaire civil, où Emmanuel Macron a salué « *la force du CEA* », le Conseil de politique nucléaire (CPN) a validé l'engagement d'un programme de recherche destiné à préparer la fermeture du cycle du combustible nucléaire. Une phase d'études de quatre ans sera lancée pour concevoir les installations nécessaires, englobant un réacteur à neutrons rapides. Le CEA et les acteurs de la filière nucléaire sont pleinement mobilisés. Le CPN a acté la poursuite du programme « aval du futur » qui permettra de préparer les technologies, les procédés et les infrastructures du cycle du combustible appelés à succéder aux installations actuelles. Il a également demandé au CEA de poursuivre sa mobilisation aux côtés des acteurs émergents.



↑ Emmanuel Macron, Ursula von der Leyen et Rafael Grossi, à l'occasion du Sommet sur le nucléaire civil à Paris, le 10 mars.

## Des **cibles** pour les scintigraphies

Les cibles Molfi ? Non, ce n'est pas le dernier jeu à la mode mêlant fléchettes et quilles en bois... Ces cibles « MOlybdène de FISSION » sont utilisées pour produire le molybdène 99. Lui-même est à l'origine du technétium 99m, radioélément essentiel au diagnostic en médecine nucléaire. Les équipes de l'institut Iresne du CEA travaillent avec celles du projet RJH et plusieurs partenaires pour préparer leur intégration dans le futur réacteur de recherche Jules Horowitz (RJH), en construction sur le site CEA de Cadarache. Des travaux essentiels pour permettre des millions de scintigraphies en Europe.

Pour tout comprendre à la médecine nucléaire et au rôle du RJH, direction La Revue du CEA n° 10 !



**Le CEA est toujours l'organisme de recherche public le plus innovant au monde**, selon le Top 100 Global Innovators publié par Clarivate en début d'année. Depuis le lancement de ce classement qui évalue, tous les ans, plus de 3 000 entreprises et organismes de recherche du monde entier, il est le seul de sa catégorie à maintenir un tel niveau de présence et d'influence. Une dynamique que confirme le palmarès annuel des inventeurs réalisé par *Le Point* dans lequel le CEA figure parmi les organismes les plus cités, que ce soit à travers ses chercheurs ou son écosystème de start-up. Et une stratégie également confortée par le classement 2025 des principaux déposants de brevets français établi par l'Inpi : comme les années précédentes, le CEA s'y impose comme le premier organisme de recherche avec 568 brevets déposés. Enfin, selon l'Office européen des brevets, le CEA confirme sa place parmi les grands innovateurs européens en 2025.

# 0,55 T

**C'est le champ magnétique de l'IRM inauguré en ce début d'année au service hospitalier Frédéric-Joliot, à Orsay.**

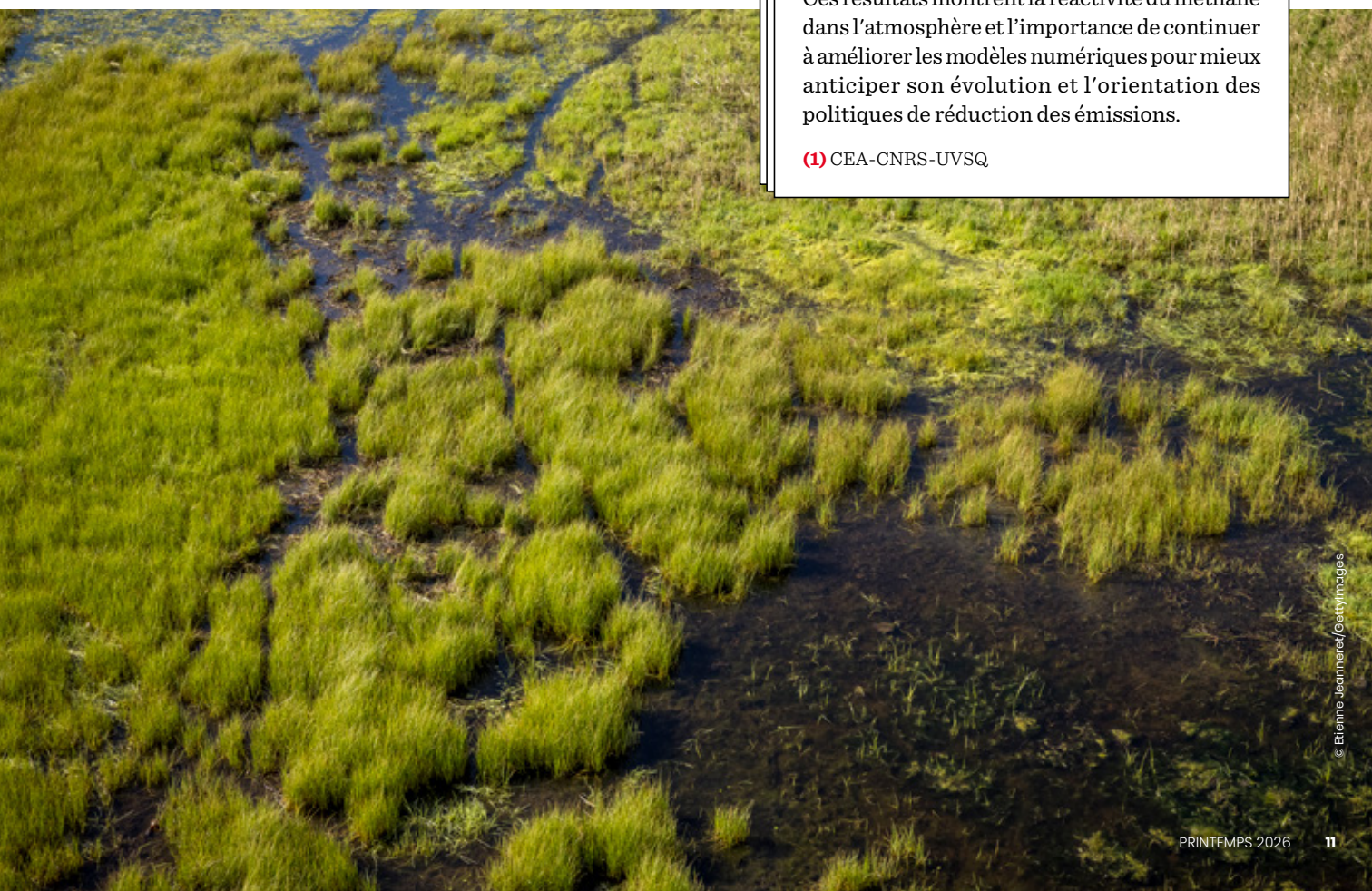
Après Iseult et son IRM à 11,7 T pour explorer le cerveau dans tous ses méandres (voir *La Revue du CEA* n°4), le CEA fait le grand écart ! Une équipe pluridisciplinaire associant le CNRS, l'université Paris-Saclay et le CEA développe de nouvelles méthodes instrumentales et numériques pour repousser les limites de l'IRM « bas champ ». L'objectif est de proposer un outil diagnostic à la fois performant, accessible et économiquement soutenable. Les premières études montrent notamment un intérêt pour ce système dans l'imagerie musculosquelettique et celle de la fonction respiratoire.

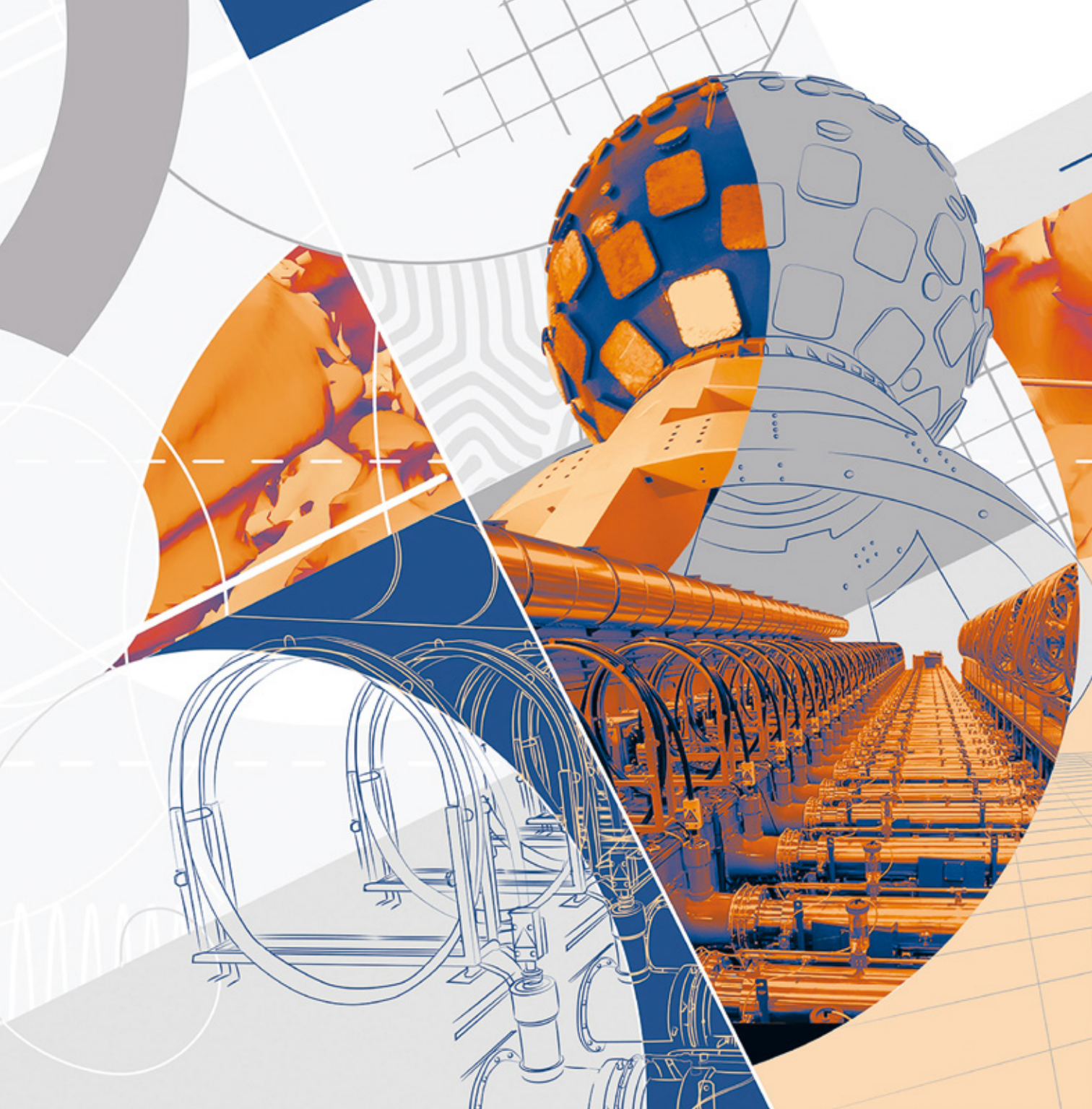
## Les fluctuations du méthane

Au début des années 2020 et de manière inédite, les émissions de méthane dans l'atmosphère, le second gaz à effet de serre, ont très fortement augmenté, avant de revenir à des taux de croissance plus habituels à partir de 2023. Pourquoi une telle anomalie ? Une vaste étude internationale pilotée par le LSCE<sup>1</sup> a montré la combinaison de deux facteurs. Des conditions climatiques davantage pluvieuses de 2020 à 2023 (La Niña) ont alimenté une partie des zones humides (marais, lacs) et saturé des sols en eau (notamment en zones tropicales), favorisant une activité microbienne plus intense, naturellement émettrice de méthane.

En parallèle, la diminution des activités humaines (notamment des trafics aériens et routiers) lors des confinements liés au Covid-19 a abouti à moins de polluants dans l'atmosphère, comme les oxydes d'azote et le monoxyde de carbone. Or ceux-ci interviennent dans les processus et réactions de chimie atmosphérique qui entrent en jeu dans l'élimination du méthane. Ces résultats montrent la réactivité du méthane dans l'atmosphère et l'importance de continuer à améliorer les modèles numériques pour mieux anticiper son évolution et l'orientation des politiques de réduction des émissions.

(1) CEA-CNRS-UVSQ





DOSSIER  
01

# Les 30 ans du programme



© Hard Deco pour le CEA DAM

# SIMULATION



Les premières générations de calculateurs du centre CEA de Limeil. ↑

# Un PROGRAMME visionnaire

**Lancé en avril 1996, le programme Simulation a 30 ans. Depuis le moratoire sur les essais nucléaires décidé par le président François Mitterrand à la fin de la guerre froide jusqu'à la livraison fin 2025 de la 3<sup>e</sup> génération de têtes nucléaires conçues par la simulation, récit d'un succès.**

**P**ourquoi un programme Simulation ? La question peut surprendre dans un tel dossier tant la mission semble évidente : garantir la crédibilité et la pérennité de la dissuasion française sans réaliser de nouveaux essais nucléaires, conformément aux engagements internationaux de la France. Mais pourquoi ne nous contentons-nous pas du stock d'armes qui ont été conçues grâce aux essais nucléaires passés ? « Très simplement parce que les têtes nucléaires, mises à disposition des forces aériennes et océaniques, vieillissent, débute Denis Vacek, directeur du programme Simulation à la Direction des applications militaires du CEA. Au bout de quelques dizaines d'années, nous devons les renouveler. » Dans

ce cas, pourquoi ne pas les reconstruire à l'identique ? En réalité, l'identique n'existe pas pour des objets d'un si haut niveau de conception, compte tenu des évolutions des outils industriels qui les ont fabriqués et des vecteurs qui les embarquent.

Ce renouvellement est également l'occasion d'une « mise à niveau ». Chaque arme française se doit d'être pleinement efficace et de passer les défenses ennemies. « *Celles-ci évoluent et nous adaptons en conséquence le design des têtes nucléaires, poursuit le responsable. Tout l'objectif du programme est de garantir que nos armes délivreront l'énergie pour laquelle elles ont été conçues, avec la précision requise.* »

## Le moratoire et le programme Palen

Clé de voute de la dissuasion, cette crédibilité a longtemps été garantie par les essais nucléaires. La France en a réalisé 210 au total, de 1960 à 1996. « *Toutefois, en avril 1992, le Premier ministre Pierre Bérégovoy annonce un moratoire sur les essais*

nucléaires, rappelle Dominique Mongin, docteur en histoire et auteur de *Dissuasion et Simulation*<sup>1</sup>. *La fin de la guerre froide favorise le désarmement. L'URSS avait déjà annoncé l'arrêt de ses essais et les États-Unis suivent la France quelques mois plus tard.* »

Le CEA avait anticipé cette évolution et lancé dès 1991 le programme Palen, préparatoire à une limitation des essais nucléaires. « *Ce programme visionnaire comprenait déjà les trois grands axes (physique des armes, simulation numérique et validation expérimentale) que l'on retrouve aujourd'hui dans le programme Simulation* », explique l'historien. L'installation Airix, ancêtre d'Epure (voir p. 18), est décidée en 1992. L'année suivante, c'est l'avant-projet du futur laser mégajoule (LMJ, voir p. 20) qui est lancé.

Reste un problème : comment garantir les performances sans essai nucléaire pour le démontrer ? La dernière tête conçue, la TN75, est un bijou technologique fortement optimisé. Dans le contexte du moratoire, et conformément au programme Palen, il fallait pouvoir tester lors d'une ultime campagne d'essais un concept nouveau, celui de la « charge robuste », qui allait permettre, sans essai nucléaire nouveau, de pouvoir accepter les écarts de définition et de fabrication avec les incertitudes de simulation de l'époque et de s'engager dans une démarche de garantie par la simulation.

### Des têtes nucléaires garanties par la simulation

Pour valider ce nouveau design robuste, la communauté française du nucléaire de défense avait besoin de données nouvelles et donc d'une ultime campagne d'essais. « *Cette campagne est destinée précisément à passer au programme Simulation et permet de mener des expériences de physique très instrumentées*, décrit Dominique

Mongin. *Jacques Chirac, alors président de la République, accepte ces ultimes essais malgré une forte hostilité, surtout à l'étranger.* » En parallèle, la France s'engage en faveur du traité d'interdiction complète des essais nucléaires, le Tice, et devient le premier État à le signer en septembre 1996, aux côtés du Royaume-Uni. « *Le gouvernement supprime également la composante sol-sol du plateau d'Albion, et lance le démantèlement du Centre d'expérimentation du Pacifique, complète-t-il. La France est, encore aujourd'hui, le seul pays à avoir démantelé ses sites d'essais nucléaires.* »

Six essais sont réalisés entre septembre 1995 et janvier 1996 et permettent de récolter l'ensemble des données nécessaires. Tout est en place pour le programme Simulation. Le 25 avril 1996, Alain Juppé officialise son lancement à l'occasion d'un déplacement au centre CEA du Cesta. En 2009, les TNA, têtes nucléaires aéroporées, sont opérationnelles. Ce sont alors les premières têtes nucléaires au monde conçues et garanties entièrement par la simulation numérique. Suivent en 2016 les TNO (têtes nucléaires océaniques) et en 2025 les nouvelles TNO-2. « *Le CEA a développé et intégré les avancées technologiques pour atteindre un fort degré de maturité*, déclare Dominique Mongin. *30 ans après son lancement, le programme Simulation est un vrai succès.* » ●



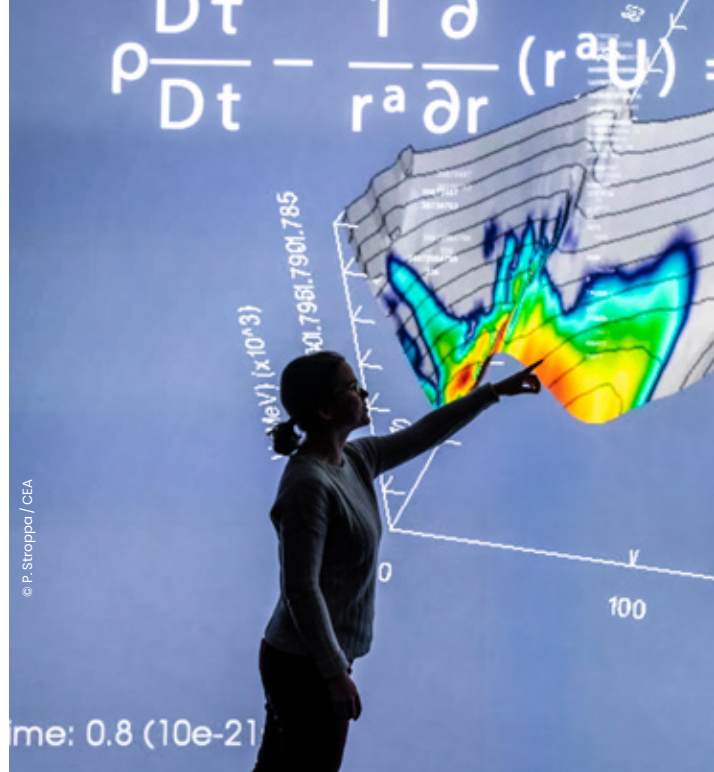
**(1)** *Dissuasion et Simulation. Le défi du programme Simulation depuis la fin des essais nucléaires français en 1996, aux éditions Odile Jacob, à paraître au deuxième trimestre 2026.*

→  
Le supercalculateur EXA 1 a aujourd'hui pris la relève pour les besoins du programme Simulation.



# Trois piliers pour un outil intégré

**Le programme Simulation repose sur un triptyque indispensable à sa crédibilité. Explications.**



© P. Stroppa / CEA

**L**e programme Simulation est une démarche scientifique qui s'appuie sur trois piliers : la description de la physique par des équations, la simulation numérique de tous les phénomènes, et enfin la validation expérimentale pour se raccrocher à la réalité.

Le fonctionnement des armes nucléaires fait intervenir des milliers de paramètres physiques, sur des échelles de temps et d'espace très variées : la matière passe par des états extrêmes en termes de pression, de température et de déformation. La description de ces phénomènes physiques doit être la plus fine possible pour servir de base aux modèles numériques qui les reproduisent sur des superordinateurs. Cette suite logique, alimentée par les données de base,

soutenue par des outils numériques et validée sur un périmètre expérimental constitue le standard de garantie des armes.

## D'importants moyens de calcul et de simulation

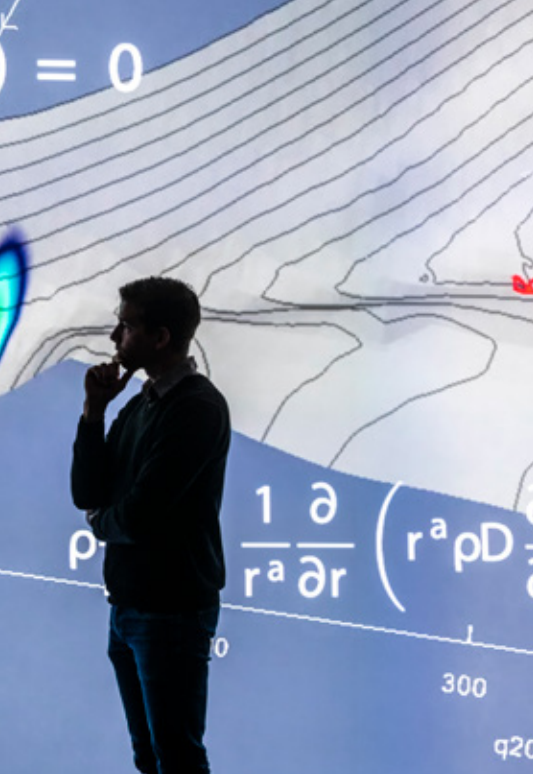
La modélisation physique des phénomènes par des équations complexes alimente la simulation numérique. Le centre CEA de Bruyères-le-Châtel abrite ainsi le complexe de supercalculateurs dédiés à la défense. Depuis 2025, les deux partitions d'Exa1, construites par Bull, permettent de réaliser plusieurs centaines de millions de milliards d'opérations par seconde. « *La complexité de notre simulation numérique peut être comparée à celle pour le climat*, explique Denis Vacek, directeur du programme Simulation. *Nous rencontrons les mêmes stratégies multiéchelles et les mêmes problématiques de systèmes multiphysiques, avec de la thermodynamique, de l'hydrodynamique, de la chimie... et de la physique atomique et nucléaire.* » La très grande variété des phénomènes impliqués oblige à choisir le bon niveau de découpage temporel et spatial pour les décrire. Plus une simulation est précise, plus elle demande du temps et de la ressource en calcul. À la direction des applications militaires du CEA, l'usage du calcul pour la défense n'est pas récent. Dès les années 1960, il



**Tout comprendre à la dissuasion nucléaire en une minute chrono!**

## Les phases de fonctionnement d'une arme nucléaire

Une arme thermonucléaire se décompose en deux grandes phases : une phase pyrotechnique dite « froide » qui permet de mettre la matière nucléaire en condition, puis une phase nucléaire dite « chaude » qui délivre l'énergie par des réactions nucléaires de fission et de fusion. Au CEA, l'installation Epure permet d'étudier la première phase, et le laser mégajoule la seconde.



← Le programme Simulation repose sur des modèles physiques complexes.

permettait d'anticiper les résultats des essais nucléaires et de les calibrer. Mais les simulations d'aujourd'hui n'ont rien à voir avec celles des débuts ni avec celles de demain. « *Les phénomènes physiques restent identiques, mais notre compréhension et l'échelle de finesse à laquelle nous pouvons les appréhender ont incroyablement évolué* », abonde le responsable.

### Se confronter au réel

Mais la simulation ne fait pas tout. Le programme repose sur le réel grâce à la validation expérimentale. « *Les moyens expérimentaux servent à recalibrer et affiner les modèles*, explique Denis Vacek. *Ils sont aussi utiles pour former les équipes et les confronter au réel.* » Les étapes clés de fonctionnement d'une tête nucléaire sont reproduites séparément et à des échelles réduites au sein des deux grands instruments, Epure et le LMJ. Les expériences de physique menées permettent une validation par partie, le juge de paix de la simulation étant la confrontation aux données issues des essais nucléaires.

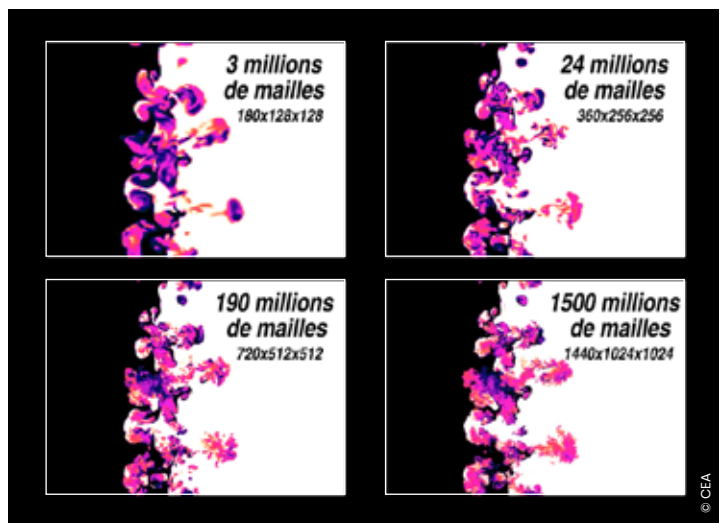
Référentiel indispensable et irremplaçable, les résultats des essais nucléaires français constituent une base de données vivantes, qui sont interrogées et réinterprétées, notamment avec des outils de modélisation 3D. Il est même possible de récolter de nou-

velles informations à partir d'anciens enregistrements : par exemple, ce que l'on pensait être du bruit peut devenir une information exploitable grâce aux progrès en traitement de signal ou à de nouvelles interprétations physiques des experts.

Ces données passées servent également d'outil de formation pour les concepteurs d'armes. Une telle formation dure plus de dix ans, et se réalise en compagnonnage avec des experts, dont certains ont connu les essais. « *La pérennité de la dissuasion passe par la pérennité des savoirs et des savoir-faire, l'enjeu RH est donc important*, reconnaît le directeur du programme. *Au sein de la Direction des applications militaires, nous travaillons beaucoup sur la capitalisation et l'exploitation des connaissances et des données.* »

Enfin, si la conception et la garantie de la charge nucléaire restent au cœur des travaux, le programme Simulation a intégré d'autres aspects : la mécanique du vol et la rentrée atmosphérique ; la furtivité, avec des questions d'électromagnétisme et de détection infrarouge ; ou encore le durcissement de la tête nucléaire face aux défenses ennemies. En trente ans d'existence, les installations expérimentales et les supercalculateurs ont aussi irrigué la recherche industrielle et académique (voir p. 22-23). « *Cette ouverture nous permet de prouver que nous menons des travaux de très haut niveau scientifique sans divulguer d'information classifiée, contribuant ainsi à notre crédibilité, et donc à notre dissuasion* », conclut Denis Vacek. ●

↓ La simulation numérique s'appuie notamment sur le découpage géométrique de l'objet à simuler, appelé « maillage ». Plus le découpage est fin (et donc le nombre d'éléments unitaires est grand), plus les phénomènes sont simulés avec précision.



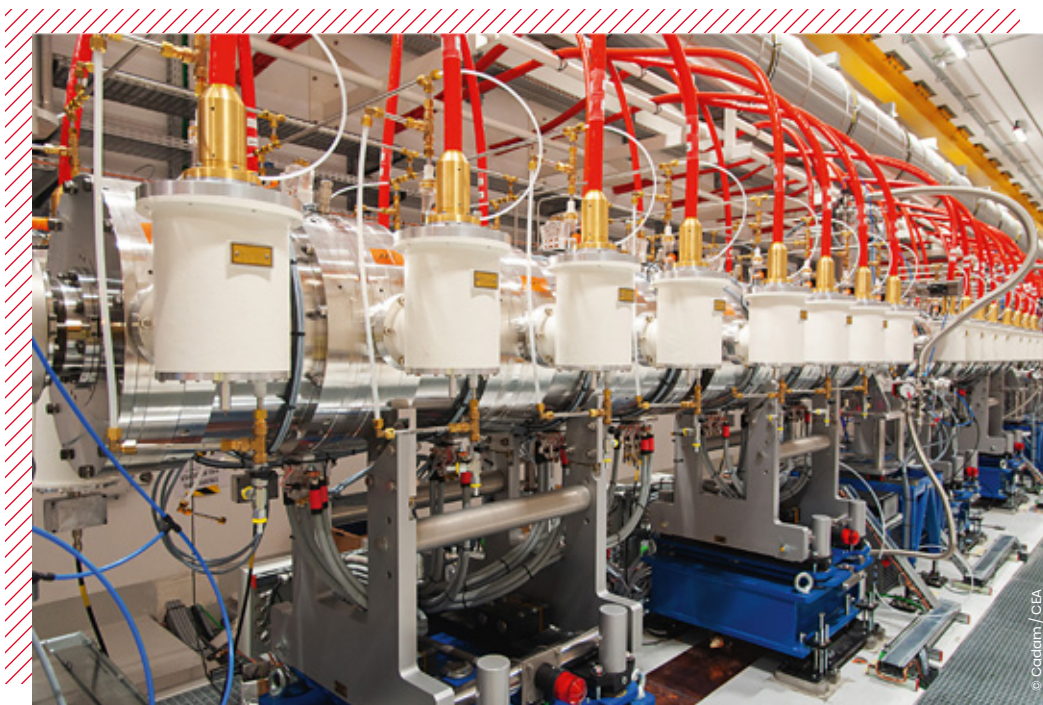
© CEA

Grâce aux équipements de pointe développés par le CEA et aux compétences exceptionnelles des équipes, les installations expérimentales et les expériences de physique qui y sont menées permettent de valider par partie le fonctionnement d'une arme nucléaire, dans le respect des engagements internationaux de la France. L'installation Epure permet d'étudier la première phase d'une arme et le LMJ la seconde.

## Phase 1

# EPURE

## L'appareil photo 3D



### TYPE D'INSTALLATION

Radiographie « éclair » pour étudier les comportements ultrarapides de la matière dans le cadre d'expériences hydrodynamiques.

### DATE DE MISE EN SERVICE

**2014**  
(Lancement du programme en 2008, en remplacement de l'installation Airix.)

### LIEU

Centre CEA de Valduc



## À quoi sert l'installation ?

Grâce à la radiographie, Epure permet de caractériser, avec une haute précision, l'état et le comportement d'un matériau d'intérêt (densité, vitesse, position des interfaces, etc.), dont le plutonium, dans les conditions thermodynamiques extrêmes rencontrées lors de la première phase de fonctionnement d'une arme nucléaire. Dans Epure, la matière, comprimée par des explosifs conventionnels, subit une très forte et rapide compression, laquelle conduirait au déclenchement des réactions de fission dans une arme. On parle d'expériences « hydrodynamiques », car la matière se comporte alors comme un fluide.

Deux types d'expériences peuvent être réalisées :

- > à échelle 1, mais avec un matériau dit « fantôme » (non nucléaire) qui se comporte comme le plutonium en termes d'hydrodynamique ;
- > à échelle très réduite avec une quantité de plutonium trop faible pour atteindre le seuil de criticité ; cette expérience ne provoque donc pas de dégagement d'énergie nucléaire, conformément aux engagements pris par la France vis-à-vis du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires (TICE).

Le premier cas permet d'étudier les comportements à échelle réelle, mais sans les matériaux mis en œuvre dans les armes, tandis que le deuxième renseigne sur les matériaux réels, mais à une échelle non représentative.

## Comment ça marche ?

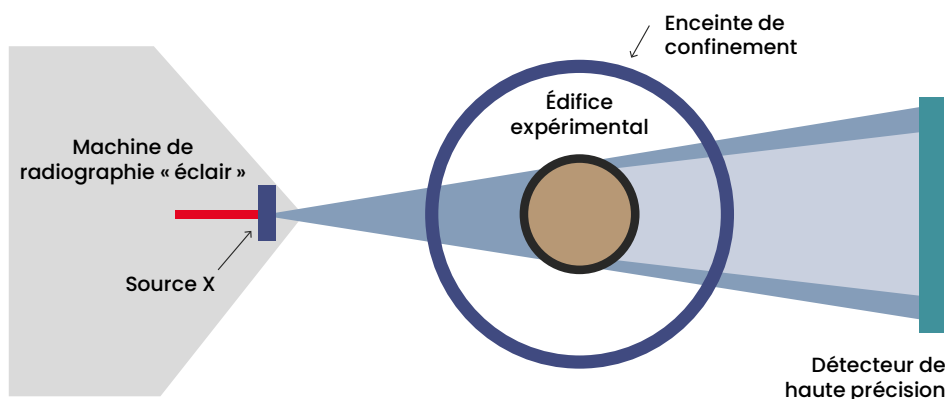
Epure utilise la radiographie dite « éclair », qui permet de regarder des comportements ultrarapides d'un matériau extrêmement dense, un peu comme un photographe saisit le mouvement à l'aide d'une succession de clichés.

L'installation produit des flashes de rayons X hautement énergétiques, capables de traverser l'enceinte de confinement et la matière pendant sa phase de compression. Cette dernière atteint des densités de l'ordre de plusieurs dizaines de grammes par  $\text{cm}^3$  et des vitesses de plusieurs kilomètres par seconde. Les flashes doivent être ultrabrefs, de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes – d'où le terme de radiographie « éclair » – afin de fournir une image nette de l'expérience. Celle-ci ne dure en effet que quelques dizaines de microsecondes, soit mille fois moins qu'un battement de cils. En sortie, un détecteur de très haute précision récupère le signal, analysé par les physiciens.

Afin de pouvoir mener des expériences sous différents angles et à différents temps, Epure comporte trois axes de radiographie pleinement opérationnels depuis fin 2025. Résultat de plusieurs décennies de recherche et développement au CEA et chez nos homologues britanniques de l'AWE, ces machines radiographiques font appel à des savoir-faire uniques tant pour leur conception que pour leur exploitation.

### UNE COOPÉRATION FRANCO-BRITANNIQUE

Dans le cadre du traité de défense franco-britannique signé fin 2010, le président de la République française et le Premier ministre britannique ont également signé un traité spécifique, le traité Teutatès, relatif au partage d'installations radiographiques pour leurs programmes de dissuasion respectifs. Les besoins techniques et calendaires des deux nations étant très similaires, la construction et l'exploitation d'un seul outil a permis de réduire significativement les coûts. Si les technologies nécessaires aux expériences sont mises en commun, les deux pays les réalisent séparément, en totale souveraineté.

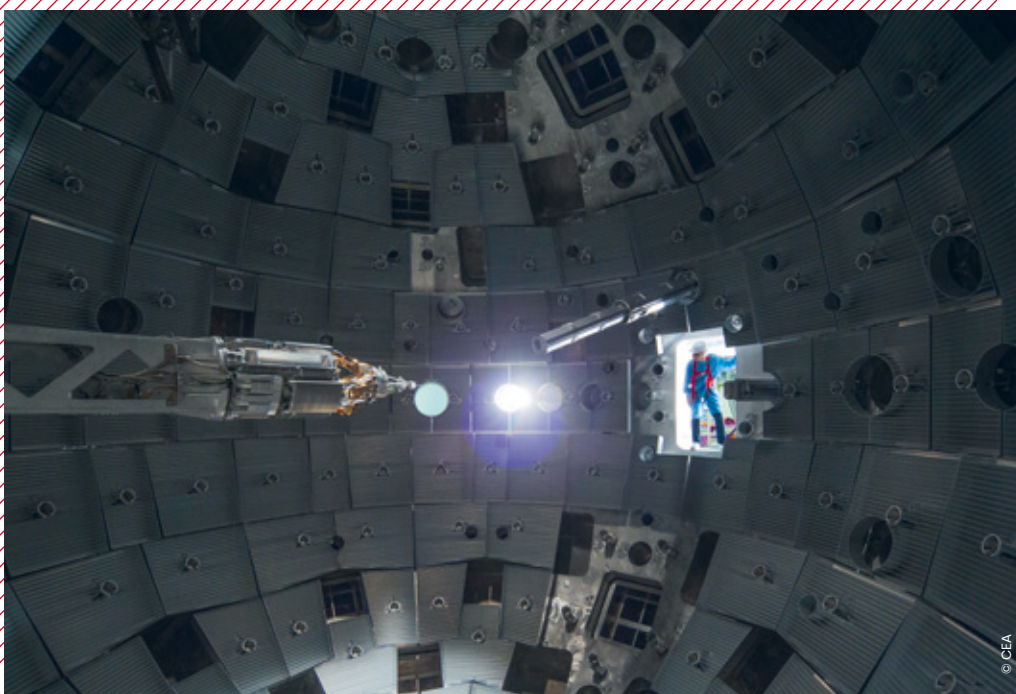


← Schéma d'une expérience au sein d'Epure. L'installation envoie des rayons X très énergétiques qui traversent l'expérience et permettent de caractériser le comportement des matières.

# Phase 2

## LMJ

### Le labo de la fusion



#### TYPE D'INSTALLATION

Laser de très haute énergie pour récréer par confinement inertiel les conditions extrêmes de la phase de fusion nucléaire.

#### DATE DE MISE EN SERVICE

**2014**  
(Lancement du programme en 1993.)

#### LIEU



## À quoi sert l'installation ?

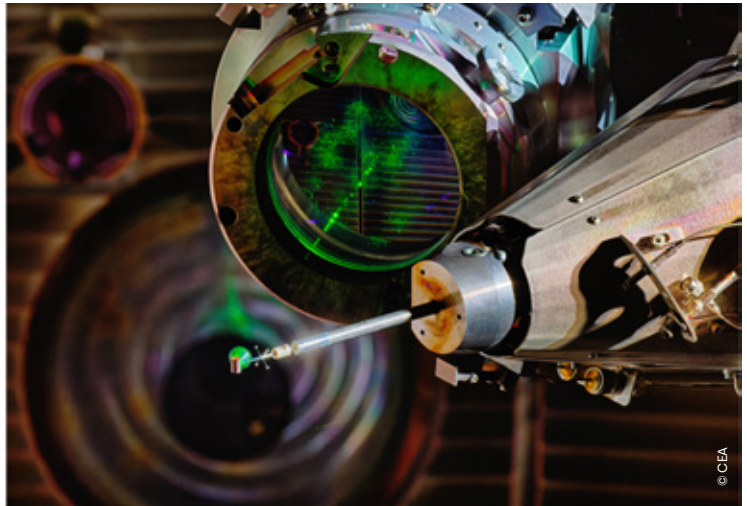
Équipement exceptionnel du programme Simulation, le LMJ, laser mégajoule, permet de recréer en laboratoire les niveaux de pression, de densité et de température rencontrés lors de la phase de fusion thermonucléaire des armes ou encore au cœur des étoiles. Le LMJ est l'une des deux seules installations de ce type au monde, l'autre étant la *National Ignition Facility* (NIF) aux États-Unis.

Mis en service en 2014, le LMJ a vu sa configuration évoluer au fur et à mesure du montage de ses chaînes laser, offrant l'opportunité de réaliser des expériences de plus en plus représentatives. La première expérience de fusion au LMJ a eu lieu en octobre 2019. De nombreuses campagnes d'expériences de physique des armes se sont succédé et, depuis décembre 2025, toutes les chaînes laser sont montées. Cette complétude ouvre la voie à des expériences utilisant la pleine capacité de cette installation majeure.

### DES APPLICATIONS CIVILES DANS L'ÉNERGIE

Le LMJ a permis de structurer et de fédérer une importante communauté scientifique autour des lasers, de l'optique et de la fusion. Il peut être couplé à un faisceau supplémentaire, Petal, financé en grande partie par la Région Nouvelle-Aquitaine. Ouvert à la recherche académique à hauteur de 25 % de son temps, LMJ-Petal permet d'adresser les domaines de recherche autour de l'astrophysique, la santé ou encore l'énergie avec la fusion par confinement inertiel.

Découvrez le fonctionnement du LMJ en vidéo.



↑ La cible à l'intérieur de l'installation de dix mètres de diamètre, ne fait, elle, que quelques centimètres.

## Comment ça marche ?

Quatre halls, situés de part et d'autre de la chambre d'expérience sphérique de 10 mètres de diamètre, abritent des chaînes laser qui vont amplifier l'énergie de 176 faisceaux, dont la lumière est ensuite convertie de l'infrarouge à l'ultraviolet grâce à un cristal. Dirigés vers la chambre d'expérience, les faisceaux sont focalisés sur la cible expérimentale, positionnée au centre de la sphère.

Cette cible, petit cylindre de taille millimétrique, est le centre de toutes les attentions. Les faisceaux laser pénètrent dans sa cavité et viennent impacter ses parois intérieures en or. Ainsi ionisées, ces dernières émettent le rayonnement X nécessaire à l'expérience. Selon la nature de l'expérience à réaliser, ce rayonnement est utilisé pour solliciter un échantillon. Dans le cas d'une expérience de fusion, il s'agit d'une petite capsule de deutérium et de tritium pas plus grosse qu'une tête d'épingle. Cette capsule, illuminée par le rayonnement, implose et se comprime jusqu'à atteindre les conditions de température et de pression nécessaires pour enclencher les réactions de fusion. Tout autour, une quinzaine d'instruments de haute précision sont à l'affût pour enregistrer les mesures et les comparer aux prévisions issues de la simulation numérique.

Si chaque étape, de l'absorption des faisceaux laser jusqu'à la phase de fusion nucléaire, ne dure que quelques milliardièmes de seconde, presque trois ans sont nécessaires pour préparer une telle campagne d'expériences. Le processus fait appel à des compétences et des métiers très variés : simulation numérique, physique des plasmas, optique, chimie des matériaux, microtechnologie, instrumentation et mesure, traitement d'images...

# Des applications qui rejaillissent dans le domaine civil

**Renouveler les armes de la dissuasion, c'est contribuer à la compétitivité de l'industrie française et au renforcement des filières d'excellence, créatrices d'emplois dans les territoires. Témoignages.**



Dès la décision d'implanter le LMJ sur le centre du Cesta, en Gironde, les acteurs locaux ont vu l'opportunité de développer une dynamique d'innovation. Pour la réalisation du LMJ, le CEA a mis en place une politique industrielle ambitieuse et fait appel aux entreprises de la région dans des secteurs tels que le génie civil, les lasers, l'optique, la mécanique, ou encore l'électronique. Les volontés se sont structurées dès 2002 autour de la Route des lasers. Cet écosystème humain et technique est devenu, en 2005, un pôle de compétitivité labellisé par l'État.

Présidé par le CEA, le pôle ALPHA-RLH agit en faveur du transfert de technologies entre les laboratoires amont et l'industrie dans trois domaines : photonique et lasers, électronique et hyperfréquences, et enfin matériaux. Les applications vont de l'aéronautique aux dispositifs médicaux, en passant par les communications, l'énergie, le bâtiment intelligent et la mobilité durable.

Notre réseau compte aujourd'hui 300 membres, dont 75 % d'entreprises situées à différents maillons de la chaîne de valeur. Avec son double regard, scientifique et industriel, le pôle de compétitivité ALPHA-RLH est avant tout un facilita-

teur : nous identifions et mettons en relation les bons profils pour favoriser l'innovation collaborative et faire émerger des idées. Nous accompagnons la structuration et le montage de projets, et aidons si besoin à trouver des guichets de financement à tous les échelons, local comme européen.

En vingt ans, nous avons contribué à la création d'une centaine de start-up, dont plus de 90 % existent toujours. Certaines, comme Amplitude Laser Group, spécialiste mondial des lasers femtosecondes, ont très bien grandi en devenant une ETI, avec un marché à l'export.

C'est une grande satisfaction et une vraie fierté de voir nos jeunes pousses naître et se développer sur le territoire, accompagnées par des équipes dont je salue l'implication. La dynamique née autour du programme Simulation le dépasse aujourd'hui pour irriguer toute l'économie locale. Au moins 6 000 emplois directs et plus de 20 000 emplois indirects ont été créés depuis la mise en place du pôle de compétitivité, et chaque euro investi par la puissance publique en appelle trois dans les PME. Preuve que le modèle fonctionne et permet un impressionnant effet levier.

Ce succès est aussi une démonstration de la capacité du CEA à entraîner le tissu local et plus largement la base industrielle française, contribuant ainsi à la souveraineté de notre pays. »



**Hervé Floch,**  
directeur général du pôle  
de compétitivité ALPHA-RLH

**Didier Besnard,**  
président du conseil d'administration  
de l'association Teratec



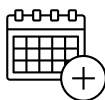
Le programme Simulation a permis à la France d'assurer la crédibilité et la pérennité de sa dissuasion après l'arrêt des essais nucléaires. Les avancées scientifiques et technologiques nées de cet impératif stratégique sont ensuite venues irriguer tous les secteurs économiques, et Teratec a joué un rôle de premier plan dans le développement de l'écosystème du calcul haute performance (HPC).

La simulation numérique est aujourd'hui un pilier incontournable de la recherche et de très nombreux secteurs industriels grâce aux progrès considérables des supercalculateurs et au développement de nouvelles technologies matérielles et logicielles, dont le quantique et l'IA. Le besoin était là, et le succès au rendez-vous.

L'expertise développée dans le cadre du programme Simulation a été le germe de Teratec, et nous continuons à travailler en étroite relation avec le CEA. Je tiens d'ailleurs à rappeler le rôle majeur de Daniel Verwaerde, fondateur de notre association, qui a été le premier directeur du programme Simulation, avant de devenir directeur des applications militaires puis administrateur général du CEA.

Teratec, c'est aujourd'hui une communauté regroupant tous les acteurs de l'écosystème HPC, IA et quantique, avec plus de 80 membres (industriels, acteurs de la recherche et collectivités territoriales). L'une de nos forces est ainsi de compter aussi bien des entreprises qui conçoivent et fabriquent les composants et les infrastructures, que des entreprises utilisatrices de ces infrastructures. L'idée est que chacun bénéficie de l'expertise et des connaissances des autres pour avancer de concert.

La course à la puissance informatique se fait à l'échelle mondiale. L'Europe a su unir ses forces, avec par exemple le programme EuroHPC. Teratec en est partie prenante. Nous évoluons selon trois axes : développer nos interactions avec les acteurs de la recherche pour favoriser l'émergence de projets et intégrer leurs start-up dans notre écosystème, apporter une expertise et des analyses prospectives, et contribuer à la formation continue, car les technologies évoluent très vite. L'un de nos rendez-vous phare est le Forum Teratec, qui réunit plus de 1500 personnes et permet de découvrir les technologies et les acteurs émergents. C'est aussi une vitrine pour le recrutement, car la filière manque cruellement d'ingénieurs, et surtout de femmes. >>>



### **Forum Teratec**

Les 20 et 21 octobre 2026  
au Palais des Congrès de Paris.  
Infos et inscription sur  
<https://forum-teratec.com>

# ICOS

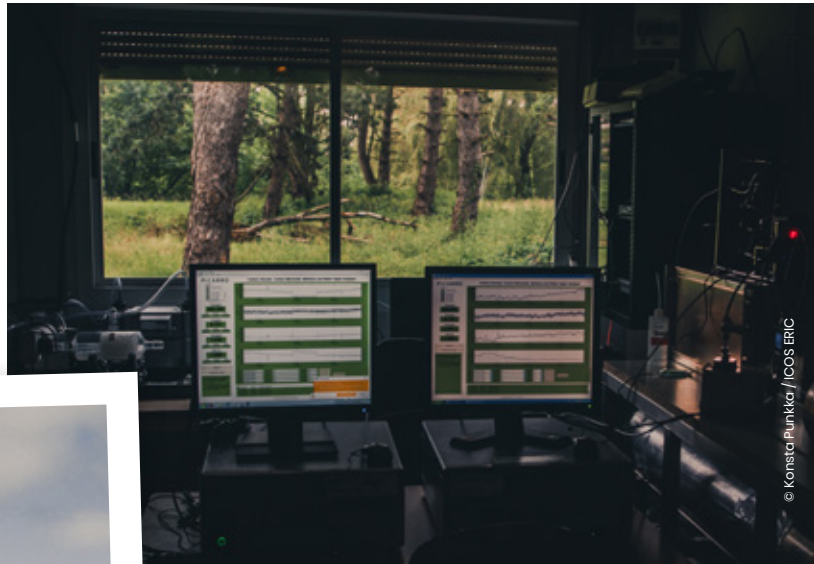
## Vigie des gaz à effet de serre

**CO<sub>2</sub>, méthane, oxydes nitreux... Le réseau européen Icos mesure les gaz à effet de serre sur tout le continent. Un suivi crucial pour mieux comprendre leurs évolutions et notamment l'influence des activités humaines sur le cycle du carbone et leur impact sur le changement climatique.**

*Qu'est-ce que l'effet de serre ? La réponse en moins d'une minute !*



© Konsta Punkka / ICOS ERIC



## 2

Les émissions des gaz sont mesurées grâce à des instruments étalonnés et standardisés, offrant **des données de haute précision et justesse à la communauté scientifique et aux décideurs.**



## 1

**Le réseau Icos comprend près de 200 stations réparties dans 16 pays européens,** qui mesurent en continu les concentrations de différents gaz à effet de serre. Le suivi s'effectue sur trois composantes : l'atmosphère, l'océan et les écosystèmes (forêts, champs, villes, etc.).



**3**

Le LSCE (Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement), sous cotutelle du CEA, héberge le **laboratoire de métrologie des gaz à effet de serre pour l'ensemble des stations atmosphériques européennes.**

Cette étape de « cal-val » (calibration-validation) est cruciale afin d'assurer la qualité des données, qui sont ensuite mises à disposition.

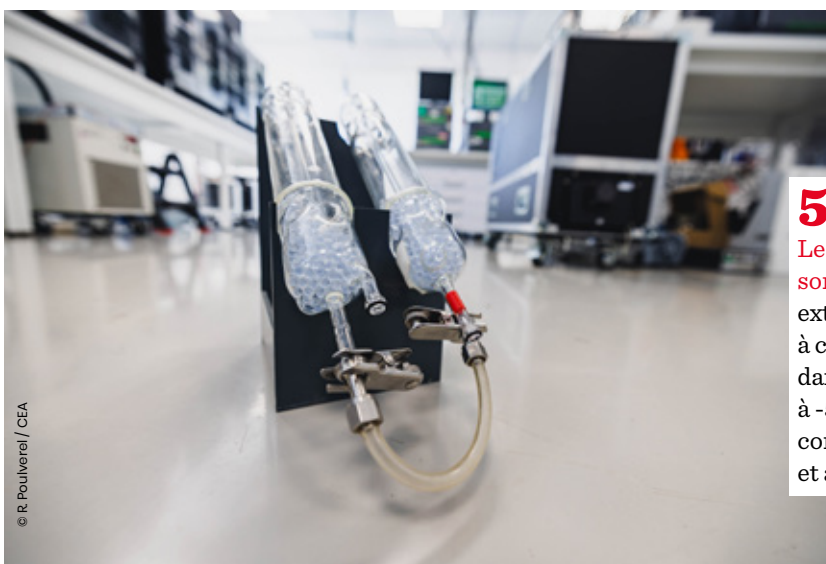
© R. Pouilverel / CEA



**4**

Les capteurs et les instruments des stations **Icos** sont testés ici, pour tous les gaz à effet de serre analysés.

© R. Pouilverel / CEA



**5**

Les concentrations de gaz à effet de serre sont rapportées en air sec. Il faut donc extraire l'humidité de l'air en amont grâce à ces pièges à froid, avant de l'injecter dans l'analyseur. Un bain d'alcool à  $-50^{\circ}\text{C}$  permet de congeler la vapeur d'eau contenue dans l'air échantillonné, et ainsi d'obtenir un air sec.

© R. Pouilverel / CEA



7

Le LSCE contribue aussi à la « cal-val » des satellites dans le cadre du programme européen Copernicus, pour l'observation de la Terre et le suivi des effets du changement climatique. Sur le toit du laboratoire, des spectromètres infrarouges analysent la colonne atmosphérique (entre le Soleil et le sol) par temps clair. Installés dans un caisson développé par les équipes du CEA, ils fonctionnent ainsi de manière autonome et automatique.



© R. Poulverel / CEA

6

Le LSCE dispose d'une chambre climatique qui permet de reproduire différentes conditions de température (de  $-70^{\circ}\text{C}$  à  $+100^{\circ}\text{C}$ ), d'humidité et de pression. Les équipes peuvent ainsi tester la réponse des équipements à l'environnement où ils seront implantés et en conditions extrêmes.



© R. Poulverel / CEA

# LES BATTERIES du FUTUR

DOSSIER  
02

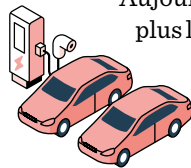


**C'est l'une des composantes de la transition énergétique et elle est en plein essor. La batterie, technologie clé du véhicule électrique, s'installe désormais dans les châssis des poids lourds, dans les réseaux électriques ou encore au sein des *data centers*. Si les qualités des technologies actuelles, dites lithium-ion, ne sont plus à démontrer, les équipes de R&D du monde entier se démènent pour mettre au point de nouveaux concepts plus performants, moins gourmands en matières critiques, plus sûrs et davantage recyclables. Plusieurs technologies sont en lice, qui dessineront l'univers de la batterie du futur.**

**L**a technologie reine de la batterie, c'est le lithium-ion (Li-ion), que l'on retrouve dans l'essentiel des véhicules électriques et hybrides. « Cette technologie a considérablement progressé ces dernières années en durée de vie, sécurité et coût, et la R&D internationale reste intense, rappelle Fabien Perdu, expert en batteries à l'institut Liten du CEA. Les batteries atteignent des densités de 260-280 Wh/kg, ce qui est un bon compromis, et on voit déjà des prototypes autour de 360 Wh/kg<sup>1</sup>. » Si bien que le lithium-ion devrait conserver sa place pendant au moins la décennie qui vient, même si ses performances se rapprochent aujourd'hui de ses limites.

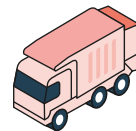
### La check-list idéale

Il n'empêche, pour répondre aux besoins croissants d'une économie décarbonée, dépasser cette technologie semble incontournable. La batterie du futur aurait de meilleures densités d'énergie et de puissance\*. Elle fonctionnerait aussi bien quand il fait trop chaud ou très froid, aurait une meilleure durée de vie, serait plus sûre (c'est-à-dire peu ou pas sujette au risque de départ de feu), peu chère, en particulier exempte de matériaux critiques (cobalt, nickel, lithium, graphite et manganèse), recyclable, moins polluante à fabriquer. En somme, la check-list idéale ! Avec en plus, pour la France et l'Europe, une souveraineté conservée sur toute la chaîne (matériaux, équipements et fabri-



cation) afin de s'affranchir de la domination de la Chine, aujourd'hui massive. « Il n'est pas exclu que la technologie actuelle lithium-ion fasse aussi partie des batteries de demain si elle continue de s'améliorer », nuance Stanislas Pommeret, référent énergie à la Direction de la recherche fondamentale du CEA.

### La mobilité, moteur de la R&D



À l'avenir, plusieurs solutions technologiques coexisteront probablement pour satisfaire la diversité des usages et la montée en puissance des besoins. En tête de liste : la mobilité routière, qui accapare plus de 80 % du marché des batteries et reste en forte croissance, poussée par les exigences de décarbonation. « C'est le moteur de l'innovation sur les batteries, reconnaît l'expert. Deux variables prédominent : la quantité d'énergie embarquée, autrement dit l'autonomie du véhicule, et le coût. »

Aujourd'hui, les véhicules légers ne sont plus les seuls destinataires des batteries.

Bus et poids lourds urbains équipés sillonnent également les villes. En Chine, entre 25 et 30 % des poids lourds vendus sont désormais électriques ! « Pour les très longues distances, cette solution est pertinente lorsque l'autonomie de la batterie est compatible avec le temps de conduite des chauffeurs, et les recharges avec leurs temps de pause », ajoute Aymeric Canton, chef de programme « Stockage et solutions de flexibilité » à la Direction des énergies.



#### DENSITÉ D'ÉNERGIE

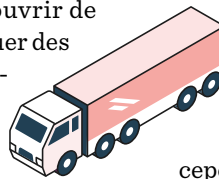
Capacité à stocker de l'énergie. À volume et masse constants, une densité d'énergie élevée améliore l'autonomie des véhicules.

#### DENSITÉ DE PUISSANCE

Capacité à se charger rapidement.

(1) Densité de la cellule de la batterie (voir infographie p. 32).

En revanche, pour la propulsion des bateaux, trains et avions, la batterie seule ne sera pas la solution, les autonomies actuelles n'étant pas suffisantes pour couvrir de longs trajets. À moins d'embarquer des quantités importantes de batteries, une option inenvisageable pour des questions de poids et de coût. Sur des itinéraires courts et réguliers, comme c'est déjà le cas sur des trains hybrides caténaire-batteries ou dans des ferries, l'option redevient pertinente.

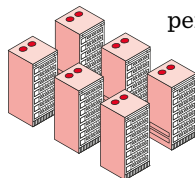


l'allongement de leur autonomie, passée de 2 heures il y a encore 3 ans, à 4, voire 8 heures. « *De quoi gérer les intermittences à l'échelle de la journée, mais pas les fluctuations saisonnières, lorsque la production solaire est maximale l'été alors que la demande l'est en hiver* », note cependant Fabien Perdu.

Les *data centers*, gourmands en électricité (voir La Revue du CEA n°11) s'équipent eux aussi de batteries en remplacement des groupes diesel de secours, pour pallier les pannes de réseau, lisser les pics de consommation et « s'effacer » en cas de surcharge du réseau – autrement dit restreindre momentanément leur consommation sous un seuil prédéfini – comme l'envisagent les fournisseurs d'électricité.

### La percée des usages stationnaires

La batterie s'installe aussi dans le réseau électrique pour répondre aux pics de demande d'électricité et mieux gérer les variations de production des énergies renouvelables, notamment photovoltaïque. Cet usage de la batterie, dit « stationnaire », connaît un fort développement et devrait



perdurer dans les années à venir. « *La pénétration des énergies renouvelables dans le réseau électrique est une grande vague qui atteint tous les pays, avec des problématiques de décalage entre la production photovoltaïque – maximale entre midi et 16 h – et la demande qui augmente en fin de journée, notamment l'hiver* », précise Aymeric Canton. Équiper le réseau de moyens de stockage est par conséquent indispensable, parmi lesquels les batteries, qui deviennent compétitives en raison de la baisse considérable de leur prix et de

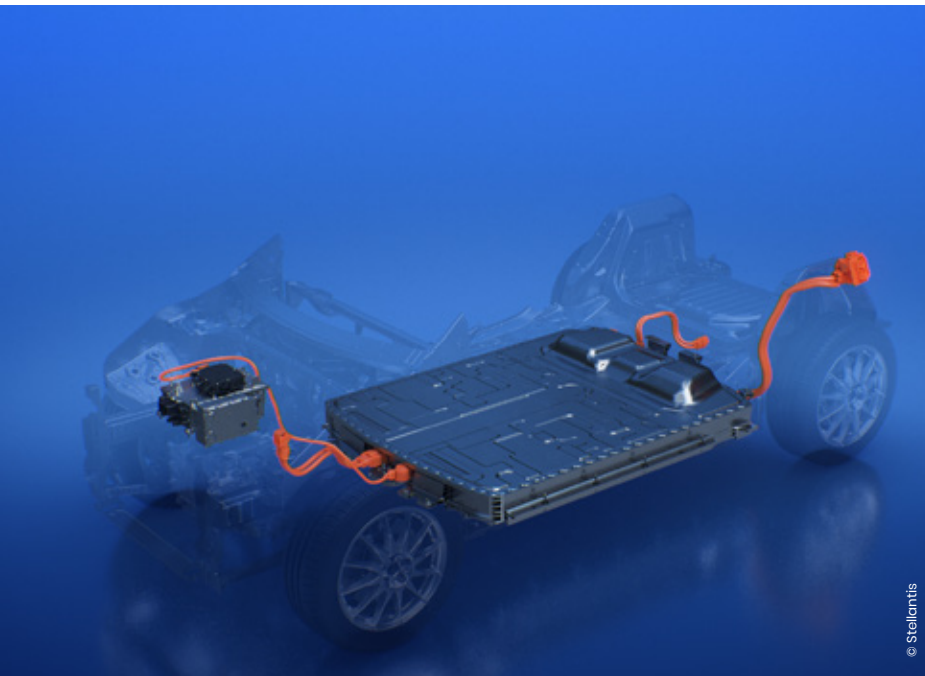
### Un mix de solutions technologiques

Imaginer quels seraient les usages des batteries dans un futur proche reste évidemment un exercice difficile, comme l'illustre Fabien Perdu : « *Si on regarde le volume total de besoin en stockage journalier pour le stationnaire, les batteries des voitures suffisent !* » Dans ce modèle dit *vehicule to grid*, le réseau récupère de l'électricité dans les batteries des voitures garées et branchées, par exemple la nuit. S'il devenait efficace, généralisé et accepté, le besoin de batteries pour l'usage stationnaire disparaîtrait. « *Il y a encore un fort potentiel d'optimisation en travaillant sur les usages* », poursuit-il. Techniquement, à quoi ressemblera la batterie du futur ? « *Si nous voulons dépasser les concepts actuels et aller vers des modèles davantage en rupture, il faut envisager d'autres chimies* », avance Aymeric Canton. Plusieurs voies sont explorées. Des chimies moins chères, sans matériaux critiques et s'appuyant sur des ressources abondantes, reviennent sur le devant de la scène, tels les concepts sodium-ion ou potassium-ion (voir p. 35). La batterie tout-solide, à l'électrolyte solide au lieu de liquide, comme c'est le cas dans les batteries actuelles (voir infographie p. 32), figure aussi en bonne place dans les projets de R&D en raison de sa grande performance espérée (voir p. 33).



**Si nous voulons dépasser les concepts actuels et aller vers des modèles davantage en rupture, il faut envisager d'autres chimies. >>>**

**Aymeric Canton**, chef de programme « Stockage et solutions de flexibilité » à la Direction des énergies.



© Stellantis

↑ Plateforme de batteries pour véhicule électrique, logée au niveau du châssis (Stellantis-modèle STLA medium).

(2) Programme et équipements prioritaires de recherche, volet R&D de la stratégie nationale d'accélération de la même thématique.

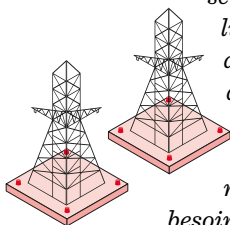
(3) ACC (coentreprise de Stellantis, TotalEnergies Saft et Mercedes), AESC Envision (Entreprise japonaise associée à Renault-Nissan) et Verkor.

Bien d'autres concepts sont testés, dont on ne fera pas la liste ici, parmi lesquels des batteries lithium-air, organiques, aux ions divalents, etc. Si la chimie reste le cœur de la batterie, l'innovation passe aussi par l'optimisation des packs, qui deviendraient plus modulaires, plus démontables, plus réparables et faciles à recycler, ainsi que par l'amélioration des procédés de fabrication, moins énergivores et utilisant moins de solvants.



### Collaborations industrielles

La recherche française est bien lancée et s'est organisée, notamment via le PEPR<sup>2</sup> Batteries copiloté par le CEA et le CNRS, et dans une moindre mesure, via le PEPR Recyclage, recyclabilité et réutilisation des matières. « Au CEA, l'essentiel de notre R&D se concentre évidemment sur l'amélioration continue des technologies actuelles à lithium-ion, en soutien aux industriels. Mais nous pensons aussi à l'après-demain, en travaillant sur des concepts en rupture avec l'existant, adaptés aux besoins des marchés du transport et du



stationnaire », résume Aymeric Canton. Matériaux, cellules, sécurité, procédés de fabrication, fin de vie... D'un projet de R&D à l'autre, au CEA, toute la chaîne de valeur est repensée. Comme toujours, les industriels ne sont jamais loin. Quelques grands noms de la batterie se sont associés à l'organisme à travers des collaborations, tels que Saft, une filiale de TotalEnergies, Stellantis, Umicore (groupe franco-belge), Syensqo (ex-Solvay), Orano ou encore le Taïwanais Prologium. Ce dernier a récemment installé en France (à Paris-Saclay) son premier centre de R&D à l'étranger, et entame la construction d'une giga-usine à Dunkerque.

### Une quête de souveraineté

Évidemment, dans cette quête de la batterie de demain, il faut compter avec la Chine, qui fournit 90 % du marché. Dans ce contexte, les entreprises françaises et européennes ont-elles encore une chance de se faire une place ? « C'est un marché en croissance, très dynamique, marqué par des accords qui se nouent et se dénouent.

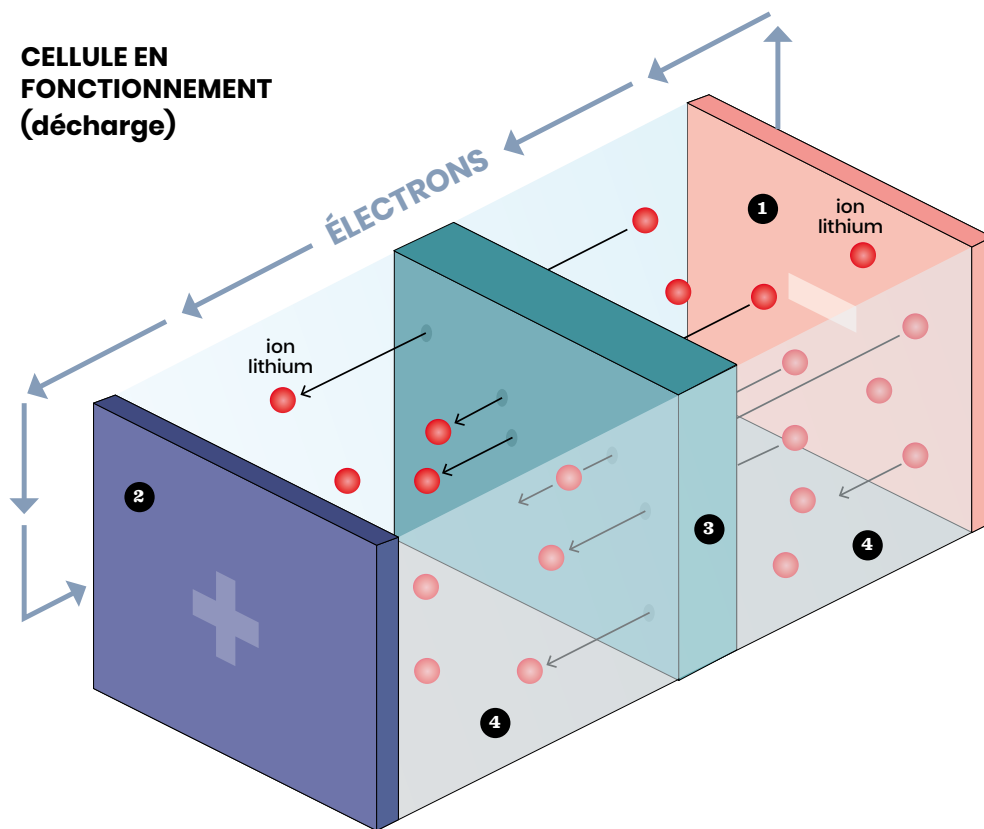
Les opportunités sont nombreuses. Donc, continuons à aller de l'avant », lance Sébastien Patoux, chef du Service des technologies batteries à l'institut Liten.

D'aucuns diront que les giga-usines françaises<sup>3</sup>, construites pour produire du lithium-ion et à peine sorties de terre, ne feront pas de sitôt la bascule vers d'autres procédés, compte tenu des investissements colossaux exigés. « Réussir à produire des batteries sans défaut est très complexe, répond Fabien Perdu. Toute l'expérience industrielle acquise sur nos giga-usines lithium-ion servira à la seconde génération d'usines, dédiée aux technologies futures. » Et Stanislas Pommeret de conclure : « Pour une giga-usine qui se monte en Europe, 10 éclosent en Chine, voire plus. Le rapport de force est évidemment très inégal, y compris en nombre de chercheurs impliqués. Mais si on ne veut pas disparaître sous la vague chinoise, il ne faut pas ralentir, il faut accélérer. » ●

# L'essentiel sur la batterie lithium-ion

La batterie est un système de stockage d'énergie qui permet de transformer de l'énergie chimique en énergie électrique, et vice versa. **La cellule** (ou accumulateur) en est l'unité électrochimique de base. Les véhicules électriques peuvent en contenir jusqu'à plusieurs milliers !  
Voici les principaux éléments d'une **cellule de batterie lithium-ion**, la technologie la plus répandue.

**CELLULE EN FONCTIONNEMENT (décharge)**



**L'électrode négative 1**, par convention appelée anode, en général en graphite.

**L'électrode positive 2**, par convention appelée cathode (souvent un oxyde métallique de lithium).

**Le séparateur 3**, fine membrane empêchant tout contact direct entre les deux électrodes.

**L'électrolyte 4** dans lequel baigne l'ensemble, composé de sels de lithium dissous dans un mélange de solvants.

En fonctionnement (décharge), les **ions lithium** migrent de l'électrode négative vers la positive en traversant le séparateur, tandis que des électrons se dirigent vers la cathode, en suivant un circuit extérieur à la cellule, générant le courant électrique. En recharge, le processus s'inverse, les ions lithium regagnent l'électrode négative.

Dans un **pack batterie**, on trouve des cellules en plus ou moins grand nombre (parfois assemblées entre elles pour former des **modules**), le boîtier électronique qui pilote le fonctionnement de la batterie, appelé **BMS** (*Battery Management System*), le tout encapsulé dans un coffret de protection.

# Dans les labos de chimie

**Focus sur la batterie tout-solide et sur celle sans matériaux critiques, deux concepts prometteurs sur lesquels travaillent les équipes du CEA. Objectifs : lever des verrous technologiques et gagner en maturité pour que ces générations soient industrialisables, puis déployées.**

## Tout-solide

Une densité d'énergie inégalée, autrement dit une autonomie plus grande pour les véhicules électriques, et une sécurité renforcée, voilà ce que promet la batterie tout-solide. « Avec elle, atteindre 400, voire 500 Wh/kg<sup>1</sup> semble envisageable industriellement », avance Sébastien Patoux. Ceci grâce à une combinaison gagnante : son électrode négative en lithium métal au lieu du classique graphite, et un électrolyte solide, évacuant également la toxicité et l'inflammabilité des versions liquides.

Un concept simple sur le papier et assez ancien, datant des années 1970-1980, mais qui cache en réalité de nombreux défis, en partie relevés. Le premier d'entre eux est d'arriver à faire déplacer les ions lithium dans l'électrolyte solide aussi bien que s'ils évoluaient dans un liquide. Comment ? En jouant sur les textures et le choix du matériau. Il existe en réalité tout un continuum de textures qui vont du mi-liquide, comme les gels polymères, au tout solide, tout comme il existe plusieurs familles de matériaux : polymères, oxydes (matériaux réfractaires rappelant la consistance des briques) et sulfures. « Ces derniers sont la solution la plus viable industriellement, assure l'expert, celle sur laquelle les principaux leaders asiatiques sont les plus avancés. Au CEA, nous y travaillons depuis plus de 10 ans, après une première collaboration



© Sébastien Veyre/CEA

avec Panasonic. En faisant le choix des sulfures, le verrou de la bonne conductivité des ions lithium dans l'électrolyte semble aujourd'hui levé. »

### Le défi de l'assemblage

Le second défi vient de l'anode en lithium métal, ultralégère, qui confère à la batterie sa densité d'énergie boostée, mais pose de sérieux problèmes de sécurité et de durée de vie. Le lithium métal a en effet une fâcheuse tendance à développer au fil du temps des excroissances appelées dendrites, qui se rapprochent dangereusement de l'autre électrode, jusqu'à provoquer des courts-circuits et des départs de feu. Problème que le pas-

↑ Banc d'enduction utilisé pour la réalisation d'électrodes de batterie, voire d'électrolytes, en salle anhydre.

(1) À l'échelle de la cellule de la batterie.



↑ Recherche sur les batteries tout-solide.  
Mise en forme de membranes électrolytes.

sage à un électrolyte solide, à même de contenir la croissance des dendrites, devrait à terme résoudre.

L'étape ultime, qui nécessite davantage de R&D, serait d'opter pour une cathode en soufre. Auquel cas, la densité d'énergie monterait d'un léger cran, tout en réduisant l'emploi de matériaux critiques, et donc le coût.

Reste un dernier verrou à lever, celui du montage de la cellule de la batterie, sur lequel travaille le monde entier. Si combler tous les espaces vides est aisé avec un électrolyte liquide qui s'insère partout, l'histoire est tout autre avec un solide, *a fortiori* pas toujours en parfait contact avec les électrodes. La solution industrielle consiste en une étape de forte compression. Mais là encore, la recherche doit continuer. Il y va de l'efficacité de la cellule, mais aussi de sa sécurité. « *Nous cherchons comment comprimer le mieux possible en appliquant une force minimale, en jouant sur la granulométrie et la morphologie des matériaux, et sur le procédé de compression* », précise Sébastien Patoux.

En attendant que la technologie tout-solide soit suffisamment mature pour être industrialisée à grande échelle – pas avant 2030, voire 2035 – de premières solutions intermédiaires pourraient être commercialisées, à base de polymères plus ou moins gélifiés. ●

Le défi des batteries de demain, c'est ici!



## Tout-solide et toute mini

Changeons d'échelle et passons du châssis de voiture à la taille d'un demi-grain de riz! C'est dans ce microvolume que les équipes de l'institut Leti du CEA ont réussi, et c'est une première, à loger une microbatterie tout-solide. « *Ce sont les plus petites batteries commercialisables au monde avec les plus fortes densités d'énergie, de l'ordre de 1 000 Wh/l* », indique Sami Oukassi, chef du Laboratoire des composants pour la radiofréquence et l'énergie. Elles sont aussi rechargeables, très fiables et sûres.

Le procédé est aujourd'hui porté par la start-up Injectpower, essaimée du CEA en 2020, qui vise dès 2028 le marché des microbatteries biocompatibles implantables. Celles-ci viendront alimenter en énergie de tout petits capteurs de pression implantés dans l'œil, le cerveau ou encore le cœur, pour un suivi en continu de patients présentant un risque de glaucome ou de pathologie cardiaque, le monitoring des hydrocéphalies et des traumatismes crâniens, ou encore de la neurostimulation. « *Ce suivi en temps réel, indiquant des mesures régulières de pression – toutes les minutes, une fois par jour, etc. – est une réelle avancée. Il permettra d'engager une action thérapeutique dès la moindre alerte* », affirme l'expert. À raison d'une recharge rapide par semaine (par exemple par induction entre la monture de la lunette et la microbatterie, sans échauffement ni interaction avec les tissus biologiques), les microbatteries d'Injectpower sont conçues pour durer dix ans.

Rien à voir cependant avec les batteries tout-solide envisagées pour les véhicules ou les usages stationnaires (voir p. 33). Si les chimies sont similaires, ici avec un oxyde pour électrolyte et *in fine* des électrodes contenant du lithium, la comparaison s'arrête là. Chez Injectpower, la conception est optimisée pour réduire le volume à l'extrême, et les courants délivrés sont sans commune mesure, de l'ordre de quelques microampères, soit 50 à 100 millions de fois moins que dans une voiture. Le processus de fabrication, radicalement différent, repose sur des dépôts successifs de couches minces réalisés en salle blanche selon les techniques de la microélectronique. Un procédé inenvisageable pour des volumes de matière plus importants, car trop coûteux.

# Sans matériaux critiques

Est-il possible de faire fonctionner une batterie sans lithium, un élément considéré comme critique par l'Europe ? La piste du sodium, la première explorée, semble désormais lancée sur la voie industrielle (voir encadré p. 36). Celle du potassium (symbole K), balbutiante, cumule elle aussi bien des atouts. C'est notamment l'un des 7 éléments les plus abondants sur terre, totalisant 2,6 % du poids de la croûte terrestre ! « Une batterie K-ion s'affranchit non seulement du lithium, mais aussi des autres matériaux critiques habituellement utilisés, comme le nickel, le cobalt et le cuivre », ajoute Caroline Celle, cheffe du Laboratoire matériaux pour les batteries à l'institut Liten. Le potassium promet donc des batteries moins chères et une souveraineté européenne sur les matières.

L'autre avantage est industriel, avec un procédé de fabrication plus simple et bien moins énergivore. Nul besoin en effet des quelque 800 °C exigés pour la fabrication des matériaux actifs<sup>1</sup> des cathodes des batteries lithium-ion, mais d'une simple synthèse à température ambiante. Il serait en outre relativement aisé de reconvertir les outils de production actuels, sans que le coût soit prohibitif.

## Un prototype fonctionnel

Avec des batteries K-ion, ce n'est pas tant l'augmentation de la performance qui est recherchée, mais son faible impact environnemental, essentiel pour une transition écologique durable, à la fois *via* le choix des matériaux et les procédés industriels. « Ces batteries plafonneront probablement aux alentours de 200 Wh/kg, à peu égal avec les batteries Li-ion LFP », estime l'experte (voir encadré). En visée : les marchés des véhicules électriques entrée de

gamme, mais aussi ceux du stationnaire, par exemple à proximité des parcs solaires et éoliens, là où la faible densité énergétique des batteries peut être compensée par la multiplication à l'envi de leur nombre.

## Lithium-ion : deux technologies prédominantes

NMC (nickel, manganèse, cobalt, en proportions variables) et LFP (lithium, fer, phosphate) sont les deux approches pour la batterie lithium-ion. La NMC est la voie choisie par les giga-usines construites en France ou en voie d'achèvement. Bien que les laboratoires européens et nord-américains aient abondamment étudié la technologie concurrente LFP dès la fin des années 1990, c'est la Chine qui l'a depuis amenée à maturité. Les différences ? La batterie NMC est connue pour sa haute densité énergétique (en Wh/kg). La version LFP est de prime abord un peu moins performante, mais la sécurité et la vitesse de charge ont été augmentées : le risque d'emballement thermique, et donc d'incendie, y est réduit. Et surtout, elle est moins chère du fait d'une quantité moindre de matières critiques, si bien qu'au niveau mondial, c'est la technologie dominante dans les véhicules électriques.

Dans son laboratoire, Caroline Celle dispose d'un prototype fonctionnel avec une cathode conçue en analogue de bleu de Prusse<sup>2</sup>, contenant du potassium, du fer et un peu de manganèse – c'est la piste privilégiée à ce jour – une anode en graphite et un électrolyte standard à base de sels de potassium. En attendant que les industriels, aujourd'hui accaparés par les technologies Li-ion s'intéressent au sujet, la R&D va bon train dans le but d'estimer la viabilité technique et économique de cette nouvelle génération de batteries. « On sait que le graphite fonctionne pour l'anode, même si nous devons continuer à l'adapter au potassium, qui est un ion plus volumineux que le lithium », explique Caroline Celle. Mais c'est la cathode qui concentre les efforts des équipes, avec la synthèse

(1) Blanc/bleu de Prusse, potassium, graphite, lithium, fer, nickel, manganèse, cobalt, etc., selon les concepts d'électrodes. Ces dernières sont un mélange de ces matières actives, de liant polymère et d'additifs conducteurs.

(2) Composé de couleur bleue, à base de fer et d'ions cyanures.

contrôlée des analogues de bleu de Prusse. « Nous intervenons sur la structure intime de ces matériaux afin qu'ils conduisent le mieux possible les ions potassium et qu'ils s'imprègnent facilement de l'électrolyte, ce qui permettrait d'atteindre les meilleures densités d'énergie. » Un jeu de Tetris en laboratoire qui consiste à faire entrer dans un objet – la cathode – la plus grande quantité de matière active en jouant sur la forme et la taille des particules. Une fois cette étape aboutie, il restera à étudier la stabilité

de ces matériaux, autrement dit investiguer le sujet de leur sécurité.

Pour le moment, les Chinois, focalisés sur les marchés des batteries lithium-ion, puis sur ceux du sodium-ion, semblent peu présents sur le potassium. Y aurait-il là un chemin pour initier une future filière européenne du potassium, au moment où le sujet est encore suffisamment vierge ? L'experte veut y croire... à condition d'écarter et d'aller vite. ●



← Réacteur de laboratoire (à gauche) pour la synthèse à grande échelle de matériaux de batterie, sous atmosphère contrôlée.

## La voie bien lancée du sodium

La batterie au sodium, concept imaginé au début des années 1980 mais abandonné au profit du lithium, revient sur le devant de la scène. La technologie, davantage mature que celle du potassium, commence à être industrialisée. En France, une visseuse électrique à batterie sodium-ion, commercialisée par la société française Tiamat née des travaux du CEA et du CNRS, est déjà proposée en magasin de bricolage. Plusieurs industriels chinois construisent des usines de production de masse, qui devraient bientôt être opérationnelles.

### À RETENIR

#### Tout-solide

- ✓ Électrolyte solide & anode en lithium métal
- ✓ Densité d'énergie améliorée
- ✓ Plus grande sécurité à terme
- ✓ Des verrous technologiques à lever

#### Potassium-ion

- ✓ Batterie avec peu de matériaux critiques, moins chère
- ✓ Densité d'énergie moyenne
- ✓ Faible empreinte environnementale
- ✓ Technologie peu mature

# Une plateforme batteries à Bordeaux

**Dès qu'il s'agit de faire avancer la R&D sur les batteries actuelles ou de nouvelle génération, la plateforme batteries de Bordeaux<sup>1</sup> est de la partie, en forte synergie avec les autres équipes du CEA.**

## SPÉCIALITÉS

Optimisation des interfaces entre l'électrolyte et les électrodes des nouvelles générations de batterie, *via* différentes techniques de dépôt de couches minces sur des poudres ou des électrodes composites ; recherche et élaboration des meilleurs matériaux pour l'élaboration de ces couches minces.

## ATOUTS

Protection des matériaux ; amélioration de leurs performances, notamment de la conductivité des ions (lithium, potassium, etc.) entre les électrodes et l'électrolyte ; diminution des problématiques d'interface entre les matériaux, améliorant *in fine* les performances de la batterie.

## MOYENS

Dépôt de couches minces par diverses techniques, dont l'ALD (*Atomic Layer Deposition*), une technique de dépôt chimique en phase vapeur permettant la réalisation de dépôts uniformes et ultrafins, épais de quelques nanomètres.

## NIVEAU DE MATURITÉ

Recherche amont.

## COLLABORATIONS

### Implication dans 2 projets du PEPR Batteries :

Limasse (développement de prototypes fiables de batteries solides, utilisant le lithium métal à l'électrode négative) et Upbeat (levée des verrous de la batterie potassium-ion en optimisant la réactivité du potassium, les matériaux et la sécurité).

### Projets de R&D industrielle. Exemple avec

**Saft et ACC** : maîtrise de la mise en œuvre d'anodes en lithium métal très fines et uniformes en épaisseur – l'un des défis de la batterie tout-solide – par un procédé d'évaporation du lithium et de protection de surface, réalisé en boîte à gants et compatible avec une production industrielle.

↓ Vue du hall de la plateforme batteries de Bordeaux.

**(1)** Les plateformes régionales du CEA, opérées par l'institut CEA Tech en région, ont pour objectif d'accompagner le tissu industriel local dans les politiques d'innovation, en s'appuyant sur les compétences, le savoir-faire et le portefeuille de brevets du CEA.



# Une économie circulaire pour gagner en souveraineté



**Stéphanie Riché,**  
cheffe du programme  
Économie circulaire des matériaux  
du CEA

© Christian Morel / CEA



**LES MATÉRIAUX CRITIQUES  
ET STRATÉGIQUES SELON  
L'UNION EUROPÉENNE**

**34 matériaux critiques:**  
cruciaux pour l'économie  
et sujets à des risques  
élevés de rupture  
d'approvisionnement.

**17 matériaux stratégiques:**  
sous-ensemble des  
matériaux critiques,  
essentiels aux secteurs  
stratégiques.

## Que recouvre la notion d'économie circulaire ?

**Stéphanie Riché** — Il s'agit de passer d'une économie linéaire – de la mine aux déchets – à circulaire, en agissant sur plusieurs leviers : le recyclage des batteries, leur seconde vie lorsque les performances ont diminué, l'augmentation de leur durée de vie et la sobriété en ressources, non seulement en matériaux critiques\*, mais aussi en quantité de solvants, d'eau et d'énergie utilisée dans les procédés industriels. L'enjeu est évidemment de s'affranchir des aléas sur les matières critiques – volatilité des prix, concentration géographique des ressources, tensions géopolitiques – et d'acquiescer une souveraineté industrielle.

## Que dit la réglementation européenne à ce sujet ?

**S. R.** — Le nouveau règlement européen sur les batteries (*voir encadré*), entré en vigueur le 18 août 2025, impose une série de normes ambitieuses : collecte des batteries usagées, taux de recyclage, de récupération des matières critiques, taux minimum d'incorporation des matières recyclées dans les batteries neuves, etc.

Autre nouveauté, dès février 2027, les voitures électriques neuves vendues en Europe devront disposer d'un « passeport batterie ». Ce document numérique, accessible *via* un QR code placé dans le véhicule, renseignera sur l'état de santé de la batterie, la recyclabilité des matériaux, etc. Il sera un outil de traçabilité important pour le marché d'occasion.

La loi européenne sur les matières premières critiques (CRM Act), adoptée en 2024, incite elle aussi à la circularité. Selon ce texte, d'ici 2030, au moins 25 % de la consommation annuelle des matériaux stratégiques\* devra être issue du recyclage. La *black mass*, c'est-à-dire le broyat de batteries usagées qui contient toutes les matières critiques, est de plus classée « déchet dangereux », de sorte qu'elle ne peut quitter le territoire et par exemple retourner en Chine pour traitement. Les enjeux sont donc environnementaux, mais pas seulement. L'idée est de pouvoir conserver la matière première sur le sol européen. La France a aussi créé l'Ofremi en 2022, l'Observatoire français des ressources minérales pour l'industrie. C'est un service d'intelligence stratégique, et le CEA y contribue.

## Quelle est la situation du recyclage des batteries en France ?

**S. R.** — Le recyclage en masse de batteries de voitures n'est pas encore pleinement opérationnel pour deux raisons principales : le marché du véhicule électrique a mis plus de temps que prévu à émerger, et



la durée de vie de la batterie, estimée entre 10 et 15 ans, engendre de fait un décalage temporel.

Aujourd'hui, les giga-usines françaises de fabrication de batteries sont tout juste en train de sortir de terre et de caler leurs lignes de production, et les taux de rebuts peuvent atteindre les 40 %, voire plus lors de leur démarrage. Produire des batteries de qualité n'a en effet rien de simple. Le sujet du moment pour la filière du recyclage, c'est donc de traiter ces rebuts. Le recyclage des batteries usagées lithium-ion, NMC mais aussi LFP (voir encadré p. 35), montera ensuite en puissance. Les techniques d'optimisation des procédés développées pour ces premières générations de batteries, et toute l'expertise acquise, seront dès lors profitables au recyclage des générations futures.

### Que propose le CEA ?

**S. R.** — Nos projets sont nombreux et souvent en collaboration, tels ceux du PEPR Recyclage, recyclabilité et réutilisation des matières. Nous travaillons aussi avec des industriels comme Orano, avec qui nous avons monté en 2019 un laboratoire commun pour innover sur les procédés de recyclage des batteries Li-ion des véhicules électriques. Je citerai quelques exemples. Abaisser les dépenses d'investissements des futures usines de recyclage, qui se chiffrent en centaines de millions d'euros, est ainsi un enjeu fort. L'une des approches

## Notre procédé de recyclage pour la récupération des métaux est complet. Il est en voie d'industrialisation chez Orano. »

consiste à réduire ou accélérer les étapes du recyclage. Avec Orano, nous avons mis au point une technique 2-en-1 de décharge et désactivation<sup>1</sup> simultanées, étapes essentielles de sécurité avant le démontage, quelle que soit la chimie de la batterie. D'autres équipes développent des procédés d'automatisation intelligente du démontage, au moyen de robots (voir p. 40).

Toujours avec Orano, nous nous sommes appuyés sur notre expertise commune en hydrométallurgie, technique utilisée pour le traitement des combustibles nucléaires usés, et l'avons adaptée aux batteries. En termes simples, on part de la *black mass*, on dissout les matériaux, puis on extrait de manière sélective les matières d'intérêt. Aujourd'hui, notre procédé est complet. Il permet de purifier et de récupérer séparément les métaux (lithium, cobalt, nickel, manganèse, etc.) et est en voie d'industrialisation chez Orano. La tendance actuelle est bien d'aller vers ces procédés, moins polluants que la voie pyrométallurgique<sup>2</sup>. C'est ce que fait la Chine, qui a déjà déployé des capacités neuf fois supérieures à son besoin interne dans l'idée de garder le contrôle sur les matières. ●

(1) Désactiver une batterie la rend inerte, empêchant toute réaction chimique résiduelle. Les batteries lithium-ion peuvent notamment être instables même après décharge.

(2) Cette méthode utilise des températures élevées pour extraire les métaux et comprend plusieurs étapes.

### UNE LOI EUROPÉENNE AMBITIEUSE

**70 %**

Taux de recyclage des batteries des véhicules électriques d'ici 2030.

#### Taux de récupération des matières critiques dans les batteries usagées

**50 %**

du lithium d'ici à la fin 2027, et **80 %** d'ici à la fin 2031.

**90 %**

du cobalt, du cuivre, du plomb et du nickel d'ici à la fin 2027, et **95 %** d'ici à la fin 2031.

#### Taux minimum d'incorporation de matériaux recyclés dans les batteries neuves

**16 %**

pour le cobalt.

**6 %**

pour le lithium.

**85 %**

pour le plomb.

**6 %**

pour le nickel (à partir du 18 août 2031).

# Robots et IA

**Les équipes de robotique interactive de l'institut List du CEA sont à pied d'œuvre pour concevoir un robot intelligent capable de démonter une batterie.**

## L'enjeu

Anticiper les cadences croissantes de réparation et de recyclage des batteries d'ici 20 ans.

## La question

Trouver une solution pour alléger ou remplacer les procédures de démontage des packs batteries, aujourd'hui entièrement manuelles, pénibles, longues et coûteuses.

## Le prototype

- Un bras robotisé capable de dévisser les vis du pack batterie, pour en démonter le couvercle (celui-ci est presque aussi long que le châssis de la voiture), puis de retirer les barres de liaison entre les modules, et enfin de dévisser ces derniers.
- Commandé *via* une interface homme-machine, permettant une interaction naturelle avec le robot.

## Des collaborations

- Avec un fabricant d'équipements dans l'industrie automobile : démonstrateur de laboratoire validé, démonstrateur usine en cours d'élaboration pour des tests sur site.
- Avec le CNRS dans le cadre du projet Scar du PEPR Batteries. Objectif : concevoir des batteries plus faciles à démonter pour améliorer les réparations et le recyclage, en incluant notamment l'automatisation du démontage à l'aide d'un robot intelligent.

## Le projet

Concevoir un robot interactif, intelligent, autonome et facile à programmer, capable de s'adapter à la très grande variété de batteries proposées par les constructeurs.

## Comment ça marche ?

- L'opérateur dialogue avec le robot *via* un jumeau numérique du pack batterie installé sur son écran d'ordinateur ou sa tablette, en cliquant sur les vis à atteindre puis à dévisser ; ou en parlant à l'interface qui comprend la consigne, grâce à des algorithmes d'IA de compréhension du langage et de la vision.
- La séquence complète de démontage se construit en quelques clics par une programmation intuitive.



© C. Comey/CEA

# Vers des BMS de nouvelle génération

**Si la chimie est le cœur de la batterie, le BMS – ou *Battery Management System* – en est le cerveau. Ce boîtier électronique pilote en effet le fonctionnement de la batterie en surveillant son état en temps réel. De nouvelles générations de BMS bien plus évoluées se profilent, aujourd’hui sur les batteries lithium-ion et demain sur les technologies futures.**

Le BMS, c’est le centre de contrôle, l’organe de sécurité de toute batterie lithium-ion. Il suit en temps réel tous les paramètres critiques – tension, courant, température, état de charge, etc. Objectifs : performance et sécurité, c’est-à-dire assurer le fonctionnement optimal de la batterie en veillant par exemple à ce que toutes les cellules aient toujours le même niveau de charge, et surtout empêcher tout risque de départ de feu, provenant par exemple de surtensions ou de surintensités.

Avec l’avènement du véhicule électrique et de batteries de plus en plus puissantes, de nouveaux enjeux se dessinent pour les constructeurs, comme l’adaptation des performances de la batterie en fonction de

chaque usage – vélo, véhicule léger, poids lourd, stationnaire, etc. – mais surtout l’augmentation de leur durée de vie et la réduction de la maintenance, pour des raisons à la fois économiques et environnementales, liées à une consommation raisonnée des ressources.

C’est là qu’entre en jeu le BMS, dans une version boostée qui collecte davantage de données. L’idée est de lui confier la protection optimale de tous les éléments de la batterie, en lui permettant de détecter en temps réel toute anomalie – une contrainte mécanique trop forte, une température trop élevée, un flux d’ions lithium anormal – puis de décider de l’action corrective à apporter, notamment *via* le pilotage optimisé des phases de charge et de décharge. Plus simple à dire qu’à faire ! Car la conception de ces BMS de nouvelle génération implique au préalable une compréhension très fine de la physique et de la chimie de la batterie et de tous ses mécanismes de dégradation (*voir p. 43*), puis le développement de modèles numériques représentatifs des phénomènes physicochimiques mais aussi électriques, qui eux-mêmes serviront à élaborer des algorithmes prédictifs installés *in fine* dans le BMS et à même de traiter les données collectées *via* les capteurs embarqués.

↑ Le système Sigma Cells, intégrant batterie, BMS et convertisseur de puissance, ici testé pour alimenter un vélo électrique.

## Des capteurs physiques et virtuels

Un autre pan de recherche concerne les capteurs. « L'enjeu est d'accéder à davantage de données sans ajouter trop de capteurs, voire pas du tout, pour des questions de coût. Les constructeurs automobiles y sont très sensibles », rapporte Philippe Despesse, du département Systèmes à l'institut Leti du CEA. La parade ? Ajouter des capteurs virtuels ! Par exemple pour suivre de près les phases de charge rapide de la batterie, très demandées par les utilisateurs, mais potentiellement nocives sur la durée de vie. « Ce qui demande un énorme travail de développement : analyses et tests en laboratoire sur une vraie cellule que l'on pousse dans ses limites de fonctionnement afin de construire le modèle numérique qui saura prédire sa dégradation en fonction de l'intensité du courant qu'elle subit lors de la charge. C'est un exemple, mais nous en avons tellement d'autres ! », complète Othman Ladhari, chef du Service transverse des technologies de conversion électrochimique et électrique à l'institut Liten.

Le CEA ne s'est pas arrêté là et a développé un concept complètement en rupture, associant BMS de nouvelle génération et architecture de batterie. Dans un système

standard, le pack batterie (incluant le BMS) alimente un onduleur, qui envoie un courant alternatif au moteur. Et il faut aussi un chargeur. « Nous avons développé une solution tout-en-un, Sigma Cells, qui assure à la fois les fonctions de BMS, onduleur et chargeur, dans laquelle chaque cellule de la batterie est individuellement pilotée », présente Othman Ladhari. Conséquences : moins d'équipements et donc une batterie plus compacte, un temps de charge optimisé et une maintenance améliorée. « Dans une batterie classique, toutes les cellules sont soudées. Une seule cellule défaillante suffit à mettre la batterie hors-service. Notre système rend possible la détection, puis le changement de cette cellule défaillante. » De fait, Sigma Cells facilite la seconde vie des batteries et le recyclage. Plusieurs transferts industriels ont permis de valoriser ce travail de R&D impliquant 19 brevets, dont celui avec l'équipementier allemand Vitesco, spin-off de Continental, devenu Schaeffler. ●

« Nous avons développé une solution tout-en-un, Sigma Cells, qui assure à la fois les fonctions de BMS, onduleur et chargeur. »  
Othman Ladhari, chef de service à l'institut Liten.

→ Prototype de pack batterie destiné à des applications aéronautiques, incluant le BMS, testé par un opérateur.



© A. Aubert / CEA



# La chimie, c'est la clé

**Imaginer finement piloter une cellule de batterie – un système électrochimique extrêmement complexe – via un BMS sans comprendre son fonctionnement est illusoire. Sandrine Lyonnard, directrice de recherche à l'institut Irig, en décrypte tous les mécanismes.**

« Quels sont les phénomènes qui se déroulent pendant le fonctionnement de la batterie ? Comment peut-on les « voir » pour mieux les comprendre ? C'est tout l'objet de mes recherches, et ce dans tous types de batteries, qu'il s'agisse de lithium-ion, sodium-ion ou encore tout-solide. Les signes extérieurs visibles de dégradation – une batterie qui se recharge moins vite parce qu'elle vieillit, par exemple – trouvent leur origine aux échelles atomiques, nanométriques, micrométriques. Pour sonder ces échelles, je travaille avec les grands instruments de recherche que sont les sources de rayonnement synchrotron et de neutrons (voir La revue du CEA n° 11). Leurs faisceaux très intenses pénètrent au cœur de la cellule de batterie et permettent d'accéder à la structure et à la chimie des matériaux, à leurs transformations, aux phénomènes indésirables comme les dépôts de lithium ou la formation de gaz, à des échelles spatiotemporelles exceptionnelles. Je peux par exemple recueillir des données structurales toutes les secondes pendant plusieurs heures sur une batterie en fonctionnement et observer ce qui se passe à l'anode, à la cathode, au sein de l'électrolyte, etc.

Cette somme de connaissances, une fois analysée, apporte une cartographie précise des propriétés physicochimiques des éléments dans la cellule, et aussi, potentielle-

ment, des variations de température locale, de pression ou de contraintes mécaniques. Elle permet surtout de comprendre le vieillissement de tous les matériaux au fil des cycles de charge et de décharge, et ses conséquences sur les performances de la batterie, par exemple sur sa capacité de stockage ou sa vitesse de charge.

Nos études aident grandement les concepteurs de BMS, notamment pour mieux cerner les paramètres pertinents à suivre, pour dimensionner et positionner les capteurs de la manière la moins intrusive et la plus représentative possible, ou encore pour concevoir de meilleurs algorithmes.

Plus largement et au-delà du BMS, les concepteurs de batteries bénéficient eux aussi de nos résultats. Nous leur apportons la compréhension fine des mécanismes réactionnels associés au choix de telle ou telle chimie, et contribuons à la découverte de nouveaux matériaux et à l'optimisation des technologies, aux côtés d'industriels et au sein de projets européens, comme le *European Battery Hub* à Grenoble. »

Et si les batteries  
passaient aussi  
des radios ?



# « Avec ce Nobel, tout le quantique est mis en visibilité. »

De passage au CEA, le prix Nobel de physique 2025, **Michel Devoret**, est revenu pour nous sur son parcours. Une histoire transatlantique qu'il raconte avec sensibilité et humilité.



↑ Michel Devoret (2<sup>e</sup> à partir de la gauche) en compagnie des membres du groupe de recherche Quantronique (Emmanuel Flurin, Cristian Urbina, Denis Vion et Daniel Estève, de gauche à droite).

## Qu'avez-vous ressenti à l'annonce de votre prix Nobel ?

**Michel Devoret** — C'était tellement inattendu que j'ai d'abord cru à une plaisanterie avant que cette incroyable nouvelle ne me soit confirmée. En un instant, et parce que le prix Nobel est la seule récompense scientifique qui est très connue en dehors de la seule sphère de la recherche, je suis devenu une personne publique. Cela implique de nouvelles responsabilités mais, bien entendu, je ne m'en plains pas !

## Que représente pour vous ce prix ?

**M. D.** — C'est en réalité tout un domaine de recherche qui est mis en visibilité par ce prix Nobel. Avec mes colauréats, John Clarke et John Martinis, nous en sommes très heureux. Nous avons eu la chance de mener à bien une expérience pionnière qui a ouvert la voie à de nombreuses équipes partout dans le monde, notamment en France au CEA, auquel je dois d'ailleurs ce prix Nobel. Je m'estime doublement honoré, car ce prix intervient pour les 100 ans de la mécanique quantique, ce qui montre l'importance de nos travaux pour les fondements de cette physique.

## Quels souvenirs gardez-vous de vos années passées au CEA ?

**M. D.** — De merveilleux souvenirs ! Avec mes collègues Daniel Estève et Cristian Urbina, nous avons reçu tout le soutien du CEA pour fonder le groupe Quantronique, et démarrer cette incroyable aventure. Et si j'en suis parti après 24 ans de carrière pour rejoindre les États-Unis, c'est par pur esprit d'aventure. Yale m'offrait la possibilité de repartir à zéro, en refondant un laboratoire de recherche. Cela ne m'a pas empêché de revenir régulièrement au CEA, de collaborer avec les chercheurs du groupe Quantronique et de copublier des articles avec eux. Ils étaient déjà des amis et le sont restés après mon départ, qu'ils ont compris et accepté, tout comme le CEA d'ailleurs. Je continue aujourd'hui à suivre de près leurs travaux comme ceux des autres groupes majeurs dans le monde.

## En quoi vos années au CEA puis aux États-Unis ont-elles contribué à ce que vous êtes aujourd'hui ?

**M. D.** — L'avantage au CEA, et plus globalement en France, c'est qu'il est permis d'approfondir un domaine, et j'ai beaucoup d'admiration pour mes collègues français. Aux États-Unis, on explore davantage de pistes, mais sans réellement les creuser. C'est une très grande richesse et une chance pour moi d'avoir vécu dans ces deux systèmes.

## Comment mesurez-vous le chemin parcouru depuis l'écluse à électrons, puis le premier qubit supraconducteur fonctionnel, et demain l'ordinateur quantique ?

**M. D.** — Dès le départ, j'étais convaincu que nous faisons une nouvelle physique atomique puisqu'il s'agissait de brancher des fils sur des atomes artificiels. L'écluse à électrons a été une étape nécessaire pour démontrer qu'il était possible de produire un courant électrique, contrôlé électron par électron dans un circuit électronique. Elle a ouvert la voie à la mise au point de circuits de plus en plus complexes et miniaturisés. Elle nous a aussi permis de travailler avec des jonctions Josephson \* de bien meilleure qualité, car basées sur l'aluminium plutôt que le couple niobium-plomb. Ce long cheminement est loin d'être terminé aujourd'hui. Je suis de ceux qui considèrent que la mécanique quantique n'est pas encore une théorie complète, même si de nombreux principes se sont clarifiés. Pour comprendre les échelles de temps du rythme des découvertes, rappelons-nous l'exemple des philosophes grecs :

Retrouvez ici la conférence de Michel Devoret sur la genèse de ses travaux.



s'ils ont eu l'intuition des atomes, il a fallu deux millénaires pour obtenir les premières preuves de leur existence !

Quant à l'ordinateur quantique, dont on parle énormément aujourd'hui, je dirais que ce qui n'est pas exclu par les lois de la physique est toujours réalisable ! Ma seule interrogation concerne ses applications dans la vie quotidienne, que j'ai du mal à discerner pour l'instant. Mais la prédiction en matière technologique est encore plus difficile que pour la météo !

## Quel regard portez-vous sur les travaux qui sont menés au CEA aujourd'hui ?

**M. D.** — Le CEA a eu un rôle fondateur dans le domaine de la mécanique quantique. Les travaux actuels qui y sont menés restent toujours novateurs et à la pointe, comme la résonance magnétique nucléaire appliquée à un seul noyau atomique, ou encore les avancées réalisées sur les circuits quantiques supraconducteurs. Plus largement, il est indispensable que le CEA continue à faire de la recherche fondamentale qui ne peut que s'envisager sur le temps long. Tout comme les physiciens Anne L'Huillier et Pierre Agostini, prix Nobel de physique 2022 et eux aussi passés par le CEA, je suis un « produit à retardement » de cette recherche ! ●



### JONCTION JOSEPHSON

Apparition d'un courant entre deux matériaux supraconducteurs séparés par une couche faite d'un matériau isolant ou métallique non supraconducteur.

## Bio express

Diplômé de Télécom Paris et docteur en physique du solide, Michel Devoret a effectué la première partie de sa carrière au CEA avant de rejoindre l'université Yale.

**1976** Recrutement au CEA comme boursier de thèse. **1982** Départ en stage postdoctoral à Berkeley dans le groupe de John Clarke où il participe aux expériences fondatrices du Nobel aux côtés de John Martinis. **1985** Retour en France et au CEA où il fonde le groupe Quantronique qu'il dirige jusqu'en 2002. C'est là que sont notamment réalisés l'écluse à électrons puis le premier qubit supraconducteur. **2002** Départ pour l'université Yale où il devient professeur de physique appliquée. **2007** Élu membre de l'Académie française des sciences et nommé professeur de la chaire de physique mésoscopique au Collège de France. **2023** Directeur scientifique chez Google Quantum AI. **2024** Professeur à l'université de Californie à Santa Barbara. **2025** Prix Nobel de physique partagé avec John Clarke et John Martinis.

# Autour du MONDE

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



UE

## NOMINATION

Laurence Petit, directrice déléguée à l'innovation du CEA, a rejoint le board du Conseil européen de l'innovation. Une reconnaissance de son expertise, mais aussi de la politique d'innovation et d'essaimage du CEA.



AUSTRALIE

## PROJET

# Faire avancer la transition énergétique avec **Facet**

**La France et l'Australie ont créé Facet en 2023, le centre franco-australien indopacifique pour la transition énergétique.**

Soutenu par les ministères des Affaires étrangères français et australien et copiloté par le CEA, l'université Grenoble Alpes et l'université Swinburne (Australie), Facet rassemble déjà une vingtaine de partenaires académiques et industriels. Cette initiative est au cœur du pilier « résilience climatique » de la feuille de route franco-australienne signée en décembre 2023.

*« L'Australie, dont le mix électrique reposait à plus de 90 % sur les énergies fossiles il y a une dizaine d'années, a engagé d'importants investissements dans le développement des énergies décarbonées, qui représentent aujourd'hui*

*40 % de ce mix. Les ressources du pays et sa stratégie dans ce domaine nous encouragent à développer conjointement de nouveaux projets pilotes technologiques », explique Stéphane Loubière, de la Direction scientifique des énergies au CEA et coordinateur de Facet pour la France. Plus largement, Facet soutiendra les besoins liés à la transition énergétique dans la région indopacifique, où la France compte plusieurs territoires (Nouvelle-Calédonie, Polynésie française...).*

Six thématiques sont ciblées : réseaux électriques, stockage (hydrogène et batteries), nouveaux carburants, solaire, décarbonation de l'industrie et minerais critiques. L'initiative explore à la fois des projets de recherche en soutien au tissu industriel, mais aussi la formation de personnels qualifiés pour ces nouveaux métiers, et lance un programme d'accélération de start-up françaises en Australie. Douze projets sont en cours, mobilisant plus de 3 millions de dollars australiens d'investissement de la part des partenaires. ●



© Alexander Kirch / Shutterstock



ÉTATS-UNIS

## RENCONTRES AU SOMMET

Clap de fin pour la célébration des 80 ans du CEA ! Exposition, tables rondes et échanges avec les partenaires majeurs du CEA ont ponctué l'événement organisé dans les locaux de la Maison française à Washington.



JAPON

## PORTRAIT

# L'IA contre les cancers du foie

Chaque année, des dizaines de personnes au CEA bénéficient de coopérations avec nos partenaires étrangers. Ces aventures humaines permettent de tisser des liens forts pour faire progresser la science. Rencontre avec **Mélissa Larbi**, doctorante en IA pour la santé à la Maison de la simulation.

À l'écran, des centaines de lignes de codes défilent. À terme, cet algorithme devrait pouvoir prédire les risques de cancer du foie chez les patients diabétiques, selon leur consommation d'alcool et leur trajectoire de santé. Cet outil est l'objet de la thèse menée par Mélissa Larbi au CEA. « Nous le réalisons en partant de zéro, explique la jeune chercheuse, qui bénéficie de temps de calcul sur la machine Jean Zay. Le plus long est de s'assurer que le modèle ne comporte pas de biais. »

Pour ses travaux, Mélissa Larbi peut compter sur l'expertise en IA du Riken, organisme de recherche japonais, grâce à des accords de collaborations (CEA-Riken et projet Hanami). « Le CEA et le Riken entretiennent une longue coopération dans le numérique, et leur équipe m'apporte un soutien précieux et son réseau », retrace-t-elle. Dans ce cadre, la doctorante s'est rendue au Japon, d'abord une semaine à Kobe, puis cinq semaines à Tokyo. Pas de « choc », mais le sentiment que « tout y est plus calme, plus mesuré, alors même que c'est une ville plus grande et plus peuplée que Paris ».

Sur place, l'équipe est internationale. Japonais, Égyptiens, Coréens, Portugais, Américains... Tous se côtoient dans une diversité de cultures et de points de vue. « Nous avons des échanges riches sur l'IA et plus généralement la place du numérique dans nos vies, se souvient-elle. Ce séjour a surtout permis de débloquer rapidement des questions techniques pour ma thèse. »

Au-delà des cancers du foie, Mélissa Larbi espère que « les méthodes développées pourront être adaptées à d'autres maladies ». Pour l'instant, ses recherches exploitent une base de trois millions de dossiers de patients français. Ces données médicales ne sont bien évidemment pas partagées avec le Riken, qui bénéficie uniquement du cadre général de l'algorithme. « Leurs problématiques sont de toute façon différentes, avec un système de santé propre, rappelle celle qui a elle-même envisagé une carrière médicale. Je trouve le métier de soignant très noble et, à défaut d'être médecin, je contribue à ma façon. » ●



Dans le cadre d'un partenariat avec le Riken, Mélissa Larbi s'est rendue à Kobe et à Tokyo.

© M. Larbi / CEA



INDE

## L'IA À L'HONNEUR

À l'occasion de l'India AI Impact Summit 2026 organisé en février à New Delhi, le CEA et Tata Consultancy Services ont officialisé leur partenariat autour de l'IA centrée sur l'humain. Un accord emblématique de la dynamique franco-indienne, dont l'importance a été soulignée par Emmanuel Macron.





**ÉCRANS:**

**vers**

**une**

**nouvelle**



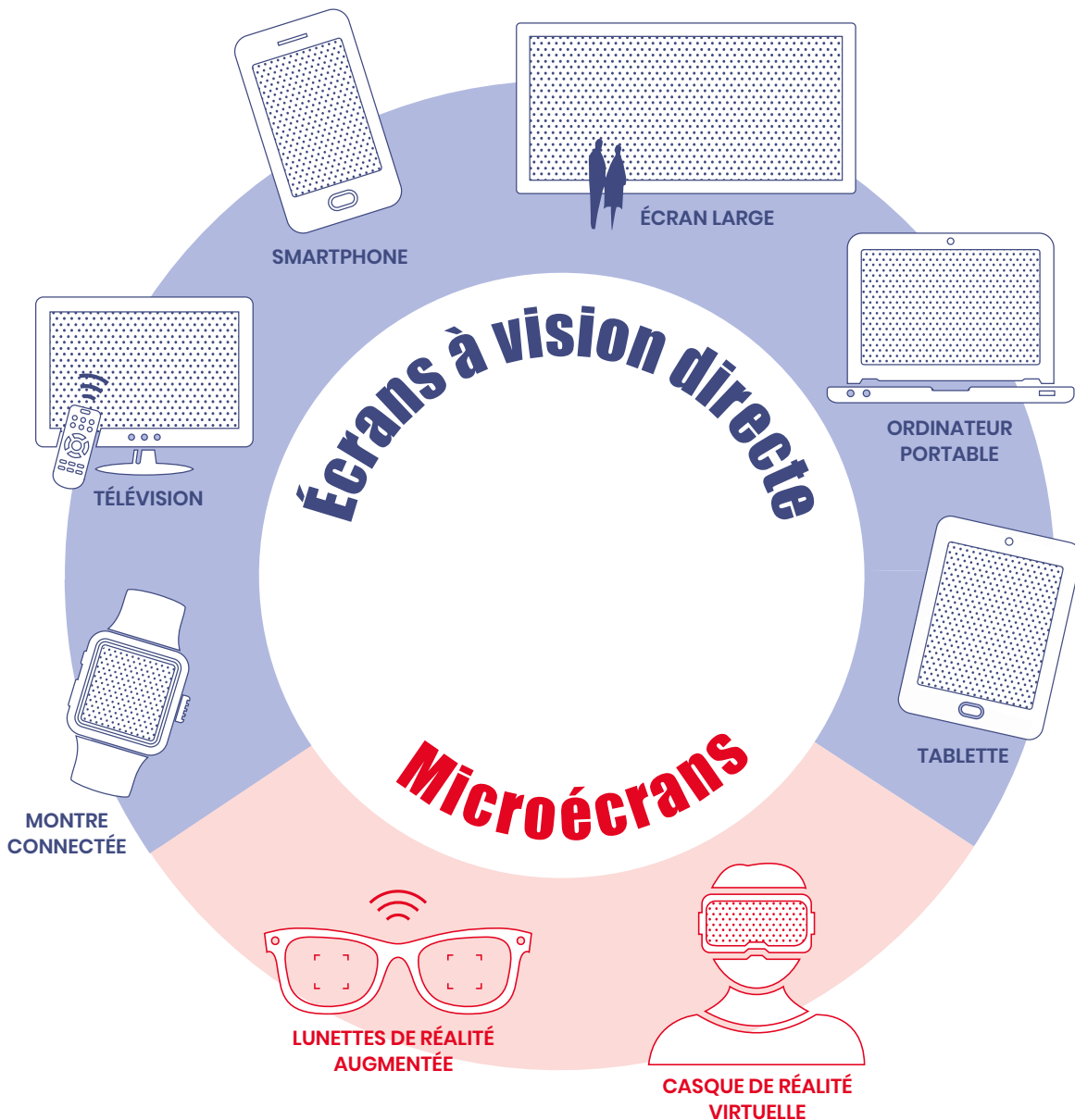
# RÉVOLUTION

Des écrans, il en existe de toutes sortes et on les trouve partout... Sur nos téléviseurs, nos ordinateurs et autres téléphones portables bien sûr, mais également dans le cockpit des avions, sur le tableau de bord des voitures ou encore dans les lunettes et les casques de réalité virtuelle et augmentée. Si les écrans à cristaux liquides (LCD) fabriqués en Asie, et principalement en Chine, dominent un marché estimé entre 150 et 200 milliards de dollars, des révolutions se préparent ailleurs, notamment au CEA. Avec trois objectifs : améliorer leurs performances, les doter de nouvelles fonctions, développer des communications optiques très haut débit. Mais aussi et surtout, disposer de technologies souveraines pour les secteurs de la défense, de l'aéronautique et de la santé, au service des acteurs nationaux et européens, et générer des retombées économiques sur nos territoires à travers cette réindustrialisation.

# Les écrans **EN BREF**

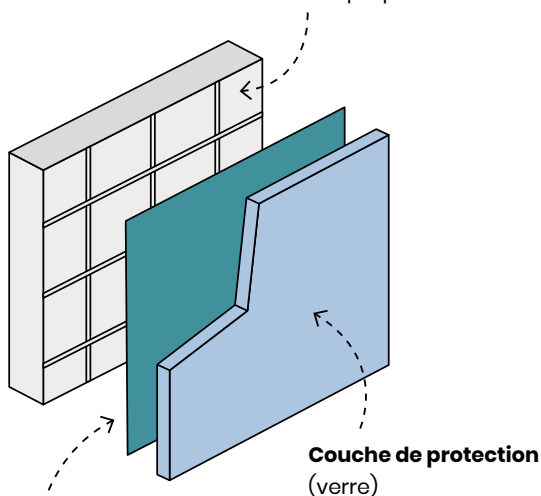
Si les écrans à cristaux liquides (LCD) restent aujourd'hui largement répandus car industriellement matures, les technologies Oled tirent de plus en plus leur épingle du jeu tandis que les microLED s'avèrent encore plus prometteuses. Deux solutions sur lesquelles travaille le CEA. Mais, au fait, comment ça marche, un écran ?

## Deux domaines...



## ... une même architecture

**Matrice TFT ou CMOS** servant de circuit de commande et amenant le bon signal électrique sur chaque pixel pour activer la couche électro-optique.



**Couche électro-optique** à base de cristaux liquides (LCD), d'Oled ou de microLED, convertissant le signal électrique en lumière grâce au mélange de 3 couleurs (rouge, vert et bleu) pour générer l'image.

Chaque pixel de l'écran est constitué de trois sources de lumière de couleur différente qui peuvent s'activer indépendamment les unes des autres pour restituer localement toute la palette de couleurs de l'image à afficher.



## Et des spécificités pour les microécrans



Des écrans si petits (de 0,7 à 2 cm vs de 5 à 200 cm pour les écrans standard) qu'ils nécessitent un **dispositif optique** pour rendre l'image visible à l'œil.



**Matrice CMOS fabriquée sur tranche de silicium** 200 à 300 mm avec les procédés de la microélectronique vs matrice TFT réalisée sur plaque de verre jusqu'à 3x3 m pour les écrans standard.



**Image magnifiée** pour de la projection directe, l'intégration dans des lunettes ou des casques de réalité virtuelle ou augmentée, l'affichage dynamique sur un écran de jeu.

### GLOSSAIRE

**TFT**: *Thin-Film Transistor* ou transistor en couches minces utilisé dans tous les écrans (LCD, Oled, microLED...).

**CMOS**: *Complementary metal oxide semi-conductor*, technique de fabrication de composants électroniques sur tranches de silicium.

**LED**: diodes électroluminescentes émettant directement de la lumière.

**Oled**: LED à base d'organiques.

**MicroLED**: LED à base d'inorganiques, très puissantes et de taille microscopique.

# Quelle place pour la France et l'Europe ?

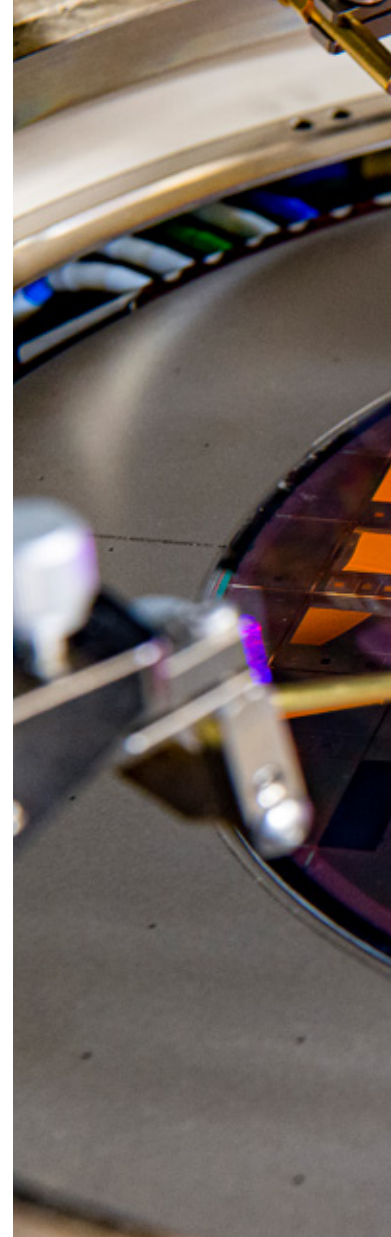
**En investissant dans l'innovation technologique, la France et l'Europe pourraient à nouveau peser sur le marché des écrans. C'est en tout cas le pari que fait le CEA avec les technologies microLED qu'il développe.**

Si l'Europe a longtemps dominé la fabrication des écrans à tube cathodique, le Japon puis ses voisins ont pris le relais, au cours des années 1990, sur les nouveaux écrans plats LCD. C'est désormais l'Asie qui y règne en maître. Trois pays concentrent 95 % des capacités industrielles de production de ces écrans sur matrice TFT : la Corée, Taïwan et la Chine qui, à elle seule, en détiendra 75 % à l'horizon 2028<sup>1</sup>. Cette domination sans partage s'explique notamment par les investissements massifs et soutenus, de l'ordre de 115 milliards de dollars<sup>1</sup>, que ces États ont réalisés ces vingt dernières années et qui ont permis de réduire considérablement les coûts de fabrication.

Si les pénuries consécutives à la pandémie de Covid-19, puis le choc des prix de l'énergie après l'invasion de l'Ukraine par la Russie, ont mis en lumière la dépendance et la vulnérabilité des chaînes d'approvisionnement dans le monde, cette prise de conscience a surtout concerné les semi-conducteurs (voir La Revue du CEA n° 7), les vaccins (voir La Revue du CEA n° 9) ou encore les batteries (p. 28). Or, la dépendance aux importations d'écrans s'avère tout aussi critique. S'il est possible de se passer pendant un an ou deux d'un téléviseur ou d'un smartphone dernier cri,

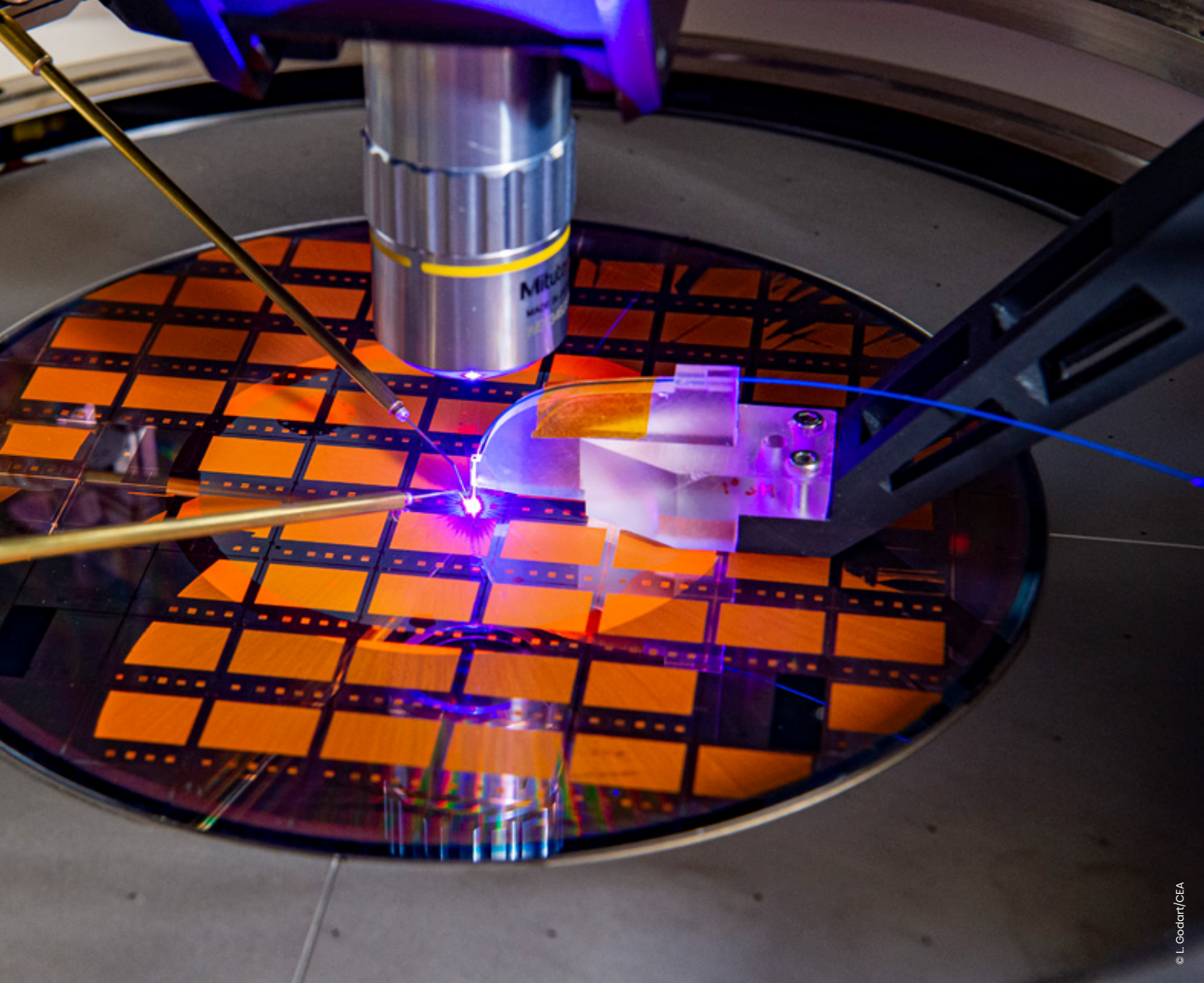
d'autres secteurs pourraient être davantage impactés en cas de crise, comme l'automobile, l'aéronautique, la santé et la défense. Dans ces domaines d'activité, les écrans sont des composants essentiels des équipements et systèmes, et donc un enjeu clé de souveraineté. « Relocaliser en France et en Europe une partie de la production de ces écrans nécessiterait de repartir de zéro en y consacrant d'énormes investissements sur le long terme. Ce n'est pas très réaliste », note Vygintas Jankus, chargé de développement des partenariats industriels dans le domaine des écrans au CEA.

Dès lors, comment rendre à l'Europe une forme d'indépendance ? « En pariant sur des technologies de rupture comme les microLED pour fabriquer des écrans ultraluminescents, en soutenant nos partenaires français, comme Aledia qui dispose d'une nouvelle usine de fabrication de



<sup>(1)</sup> Source : *Effects of policies and disruptive technologies on displays*, Burkhard J. Slischka, [informationdisplay.org](http://informationdisplay.org), novembre/décembre 2025.

**« L'approche du CEA s'appuie d'une part sur la R&D réalisée dans ses labos, d'autre part sur le soutien aux industriels pour concevoir les briques technologiques clés jusqu'à leur préindustrialisation. »**



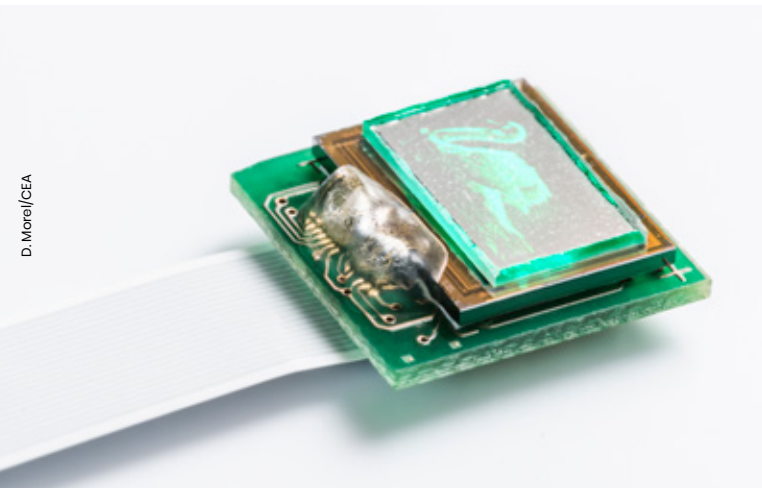
*microLED près de Grenoble, et en s'appuyant sur l'industrie française ou européenne du semi-conducteur pour réaliser des puces LED déjà pilotées et prêtes à être assemblées en écran*», répond François Templier, responsable du programme Écrans au CEA.

De fait, le CEA n'a pas attendu pour travailler sur ce sujet. Dès les années 1970, ses équipes ont exploré les promesses des écrans LCD avant de se focaliser progressivement sur les technologies Oled et microLED. Pionnier dans ce dernier domaine, le CEA y travaille depuis une quinzaine d'années.

Aujourd'hui, sa stratégie se déploie sur trois piliers : *More display*, *More than display* et *Beyond display*. Le *More Display* (voir p. 55) vise à améliorer les écrans actuels, notam-

ment les microécrans de réalité augmentée, en termes de consommation et de luminosité, qui sont des enjeux clés pour l'adoption de ces technologies. Le CEA a aussi développé une approche innovante, couverte par 15 brevets, qui consiste à fabriquer les LED rouges, vertes et bleues directement sur leur circuit de commande CMOS. Ce procédé performant est d'intérêt pour les écrans à vision directe (depuis la montre jusqu'au téléviseur de grande taille) et ouvre la voie au *More than display*. Ce deuxième pilier stratégique vise à ajouter des fonctionnalités à la capacité d'affichage seul de l'écran, comme prendre de l'information supplémentaire dans son environnement grâce à des capteurs ou actuators intégrés sur l'écran. Il est alors possible d'interagir avec ce dernier qui devient multifonction :

↑ Mesure du spectre d'émission de microLED (longueur d'onde et puissance de la lumière émise).



D. Morel/CEA

↑ Microécran à base de nitrure de gallium avec un pas de pixel de 10 micromètres.

capteur de température ou de lumière, mesure du pouls et de la tension artérielle, reconnaissance de gestes, etc. (voir p. 56). Enfin, le *Beyond display* consiste à utiliser des matrices de microLED pour des applications tout autres que l'affichage d'information, comme les communications optiques très haut débit et courte distance (voir p. 57).

Au total, ce programme ambitieux mobilise une soixantaine de chercheurs dans les labos du CEA et s'appuie également sur des partenariats emblématiques comme avec la start-up Aledia, qui industrialise les technologies de microLED nanofils du CEA (p. 58) et l'entreprise Microoled *via*

un laboratoire commun pour concevoir des écrans Oled miniatures à haute densité de pixels (p. 60).

« Notre approche s'appuie d'une part sur la R&D réalisée dans nos labos, d'autre part sur le soutien aux industriels pour concevoir les briques technologiques clés jusqu'à leur préindustrialisation », résume Vyngintas Jankus. Autre atout majeur du CEA : ses infrastructures de haut niveau, notamment les salles blanches 200 mm et 300 mm dans lesquelles sont développés les procédés de fabrication et réalisés les premiers prototypes pour assurer un transfert à l'industrie. Une série de défis reste néanmoins à relever avant d'envisager la production de masse d'écrans de nouvelle génération sur le sol européen, et l'écosystème doit se fédérer.

En attendant, la bataille pour « la souveraineté des écrans » est déjà lancée sur un marché qui devrait atteindre les 300 milliards de dollars d'ici 2030<sup>1</sup>... Coréens, Taïwanais et Chinois ne s'y sont pas trompés et investissent dans les technologies microLED. Le CEA a donc besoin de s'appuyer sur des programmes de financement français et européens tels que l'IPCEI, les IRT, France 2030 et le Chips Act 2 pour porter son ambition. ●



© L. Godart/CEA

← Plateforme de caractérisation des microLED. La station de test sous pointe permet de les mesurer individuellement et d'évaluer leurs performances et leurs propriétés.

# Des microécrans

## PLUS PERFORMANTS

**Pour une expérience visuelle le plus proche possible de la réalité.**

### De quoi parle-t-on ?

De booster la luminance, la directivité, la couleur et la résolution de l'image en faisant le pari d'utiliser des matrices de microLED en nitrure de gallium (GaN), une technologie que le CEA privilégie depuis plusieurs années.

### Où en est-on ?

Fabriquer des microécrans à base de microLED nécessite de relever plusieurs défis: la croissance par épitaxie du matériau émetteur, la microfabrication de microLED avec des méthodes

de la microélectronique, la transformation efficace du courant électrique en lumière par un travail sur les procédés de dépôt de contact et de gravure/encapsulation de chaque microLED, et enfin l'association sur ces matrices de dispositifs optiques, pour extraire et focaliser la lumière émise qui, contrairement aux écrans de télévision ou de smartphones, doit être injectée dans un système optique très compact de projection d'image.

Pour restituer tous les détails des images en très bonne résolution, il faut beaucoup de pixels par degré d'angle de vision de l'œil dans un encombrement contraint. Ici, l'avantage est aux microLED qui peuvent être fortement miniaturisées. Mais des progrès restent à accomplir sur la génération de la couleur: si le nitrure de gallium épitaxié émet très bien dans le bleu et de mieux en mieux dans le vert, il est bien moins performant dans le rouge. Deux voies sont activement explorées pour résoudre cette difficulté: booster l'émission native du rouge par un travail en épitaxie ou convertir la lumière bleue en rouge grâce à l'usage de nanomatériaux. Plusieurs enjeux subsistent, en particulier la durabilité de ces matériaux et l'identification de l'architecture la plus efficace.

Tous ces développements sont menés dans le cadre du modèle privilégié par le CEA: imaginer des solutions qui pourront être produites de manière intégrée sur tranche de silicium comprenant une électronique de pilotage, en utilisant des procédés standard de la microélectronique. Ils comprennent également une dimension d'écoconception qui porte à la fois sur l'optimisation des matériaux utilisés et sur les flux de fabrication.

### Pour quelles applications ?

Principalement les dispositifs de réalité augmentée et mixte (lunettes, casques) proposant aux utilisateurs des expériences immersives ou enrichies *via* des contenus numériques intégrés à leur environnement réel.



# Écran multifonction

## LE FUTUR COUTEAU SUISSE

**Booster les technologies d'affichage des écrans classiques.**

### De quoi parle-t-on ?

D'intégrer des capteurs ou des détecteurs directement sur un futur écran à base de microLED sans compromettre ses performances d'affichage ou de détection. Cette association permet par exemple d'afficher simultanément, sur un même écran, des images et des informations périphériques, selon la nature du capteur, ou encore de distribuer la fonction du capteur sur l'ensemble de la surface de l'écran.

### Où en est-on ?

Le CEA a récemment démontré la faisabilité de co-intégrer des microLED et des photodétecteurs hétérogènes de type organique sur un même écran. Son prochain défi : tester la co-intégration de photodétecteurs inorganiques, par exemple en silicium, qui présente traditionnellement des temps de cycle plus longs. Ses équipes peuvent s'appuyer sur une approche « du système vers la technologie », qui passe par la définition du concept, la mise en œuvre de la technologie microLED jusqu'à la coconception du photodétecteur,

le développement électronique et la validation expérimentale en conditions applicatives réalistes. En mixant développement technologique, modélisation analytique et simulation, cette démarche permet d'aller jusqu'au prototypage et à l'évaluation de performances ouvrant la voie, à terme, à la mise à l'échelle des architectures d'affichage intégrant des capteurs.



### Pour quelles applications ?

Avec l'intégration de capteurs dans les écrans, deux grandes familles d'applications sont envisagées. La première pour améliorer la fonctionnalité actuelle des écrans : d'une part l'affichage des images par la gestion dynamique du contraste, de la luminosité et de la résolution grâce à la perception de leur environnement ; d'autre part l'enrichissement de l'interactivité avec les écrans, par exemple par la reconnaissance de gestes à proximité permettant d'accéder directement à des contenus. La seconde pour greffer de nouvelles fonctions ou étendre à une large surface des écrans celles qui existent déjà : déverrouillage par empreinte digitale, identification directe de l'utilisateur et, encore plus prometteur, suivi de paramètres physiologiques en posant simplement sa main pour mesurer, par exemple, le rythme cardiaque et plus globalement l'état physiologique général de l'utilisateur. Autant d'applications pour lesquelles le CEA développe des briques technologiques clés.

# Communications optiques

## LE PARI DES MICROLED

Rendre les interconnexions plus rapides, plus efficaces et moins énergivores.

### De quoi parle-t-on ?

D'utiliser des matrices de microLED en nitrure de gallium (GaN) dans les interconnexions optiques servant à l'échange de données entre puces au cœur des infrastructures et systèmes numériques. En modulant directement la lumière bleue qu'elles émettent, il est possible de réduire considérablement la consommation énergétique et d'augmenter l'efficacité des échanges, notamment sur de très courtes distances. Il s'agit là d'une autre application possible des microLED, technologie phare pour les écrans de demain.

### Où en est-on ?

Fort de sa maîtrise de l'intégration directe de microLED sur des substrats CMOS, le CEA a fait le pari, depuis quelques années, de développer des matrices de microLED permettant des communications massivement parallèles, à très fort débit agrégé, en s'appuyant sur de nouvelles générations de fibres optiques à très grand nombre de cœurs.

Après avoir démontré des records de débit de transmission pour des applications LiFi<sup>(1)</sup>, il entend désormais proposer un démonstrateur complet de la chaîne d'émission (microLED et drivers qui les commandent) et de réception (microphotodiodes et amplificateurs), en s'appuyant sur les briques d'intégration 3D avancées qu'il a développées et qui lui donnent un avantage technologique différenciant. C'est l'ambition du projet Luciole, lancé en janvier dernier et qui fédère des équipes aux compétences complémentaires (microélectronique, optique...) pour concevoir ces matrices, depuis leur design jusqu'à la caractérisation et la modélisation de leurs performances. Avec en ligne de mire une intégration en 300 mm, et une industrialisation espérée à la fin de la décennie.

### Pour quelles applications ?

Centres de calcul comme centres de données sont les principaux concernés. Avec la multiplication des systèmes d'IA, ces grandes infrastructures ont de plus en plus besoin d'interconnexions à très forte densité de débit par millimètre : leurs performances en calcul comme en gestion et stockage de données ont été multipliées par 100 tous les deux ans depuis 2015, alors que le débit des interconnexions électriques et optiques n'a progressé que d'un facteur 1,3 sur la même période<sup>(2)</sup> et que leur consommation énergétique tend à exploser.

(1) LiFi : *Light Fidelity* ou transmission par LED, technique de communication sans fil reposant sur l'utilisation de la lumière visible.

(2) Source : *Co-packaged Optics for Data Centers*, YOLE report, 2025.

# ALEDIA

## « Transformer la promesse technologique en une réalité industrielle. »

Entretien avec **Félix Marchal**,  
Chief Sales & Marketing Officer d'Aledia,  
sur l'avenir de la technologie microLED  
et sa place sur le marché des écrans  
de demain et d'après-demain.

**Comment l'évolution de l'usage des écrans guide-t-elle vos choix stratégiques ?**

**Félix Marchal** — À la base de notre réflexion, il y a la certitude que les microLED peuvent entrer dans tous les types d'écrans, quelle que soit leur taille. La tendance actuelle est à la dématérialisation des objets et à la fonctionnalisation des écrans, avec l'ajout d'informations contextuelles directement dans l'affichage de l'image. On le voit, par exemple, dans les lunettes de réalité augmentée ou sur les tableaux de bord des voitures. Une autre orientation vise à utiliser les microLED pour remplacer le cuivre dans les communications optiques entre puces et entre racks au cœur des systèmes numériques. Ce sont les deux piliers de notre stratégie.



© Aledia

### Aledia en quelques données

**Date de création :** 2011

**Localisation :** Champagnier (38)

**Offre :** microLED pour écrans de nouvelle génération

**Technologie :** nanofils 3D et silicium

[www.aledia.com](http://www.aledia.com)

### Sur quels axes d'innovation travaillez-vous ?

**F. M.** — Nous travaillons sur deux axes : l'efficacité et la consommation énergétique. Le premier est un peu le nerf de la guerre ! Pour équiper en microLED des écrans toujours plus petits et plus légers avec une résolution maximum, il faut réduire la taille des microLEDs en conservant la meilleure efficacité possible. Le second axe concerne la consommation énergétique : une liaison optique à base de microLED, intégrée sur un CMOS et coencapsulée avec un émetteur/récepteur, offre une consommation d'énergie jusqu'à 50 % inférieure à celle des architectures actuellement utilisées, une fiabilité comparable à celle du cuivre, une portée étendue et une bande passante ultraélevée et évolutive grâce à des voies optiques denses et à haut débit. Tout l'enjeu est de rendre ces sources lumineuses ponctuelles, et d'augmenter leur fréquence d'allumage pour maximiser le débit des échanges de données. Grâce au CEA, nous disposons d'une base technologique différenciante qui nous a permis récemment de proposer un produit aux caractéristiques uniques.

### Un mot justement sur cette annonce ?

**F. M.** — Nous avons lancé, en début d'année, la commercialisation de FlexiNova®, une plateforme microLED haute tension conçue pour être intégrée dans des écrans haute performance, petits comme grands, à l'aide de puces de taille réduite. Cette réalisation a vu le jour grâce au soutien du

**« Nous travaillons sur deux axes : l'efficacité et la consommation énergétique. Le premier est un peu le nerf de la guerre. »**

CEA et du programme France 2030. Elle transforme la promesse technologique des microLED en une réalité industrielle ! Elle est d'ailleurs testée en ce moment chez plusieurs grands acteurs des écrans pour vérifier que les performances annoncées sur le papier sont bien les mêmes en conditions réelles.

### Comment notre vie quotidienne sera-t-elle concrètement changée par ces technologies ?

**F. M.** — Imaginez que vous n'aurez plus d'écran physique devant vous et que tout sera dans vos lunettes ! Ce sont ces lunettes qui vous permettront de travailler, de conduire, de vous divertir ou d'interagir avec votre environnement. Ce pourrait être une réalité d'ici une dizaine d'années, compte tenu de l'accélération de l'innovation technologique qui rendra, grâce à l'intelligence artificielle, vos interactions beaucoup plus fluides. Et dans ce moment de basculement, les microLED seront un point fort du marché.

### Pour finir, quel regard portez-vous sur votre lien avec le CEA ?

**F. M.** — Un regard extrêmement bienveillant ! Le CEA nous aide à explorer et à évaluer de nouveaux concepts en réalisant des essais et des tests. C'est crucial pour enrichir nos connaissances et notre maîtrise des technologies comme le montre la commercialisation de FlexiNova®. ●

# MICROOLED

## « Répondre aux **nouveaux usages** sur un marché en pleine croissance. »

Entretien avec **Thierry Bissuel**, PDG de Microoled, sur l'avenir de la technologie Oled et ses perspectives de développement.

**Comment l'évolution de l'usage des écrans guide-t-elle vos choix stratégiques ?**

**Thierry Bissuel** — Je dirais d'emblée qu'il y a de la place pour différentes technologies sur un marché des microécrans en forte croissance et qui va continuer à grandir. Ce sont les nouveaux usages qui portent cette dynamique avec des systèmes toujours plus légers et moins coûteux. Et de fait, la technologie Oled qui s'appuie sur les standards de la microélectronique y a toute sa place !

Notre stratégie peut être décrite comme une fusée à deux étages. Fort de notre base clients solide, nous privilégions une approche incrémentale qui nous a permis de livrer 100 000 écrans en 2025. Et nous continuons à innover pour améliorer encore leur résolution et leur luminosité. C'est notre feuille de route pour les 3 à 5 ans à venir.

### Microoled en quelques données

**Date de création :** 2007

**Localisation :** Grenoble (38)

**Offre :** écrans et modules d'affichage Oled miniatures

**Technologie :** écrans Oled haute luminosité et très basse consommation ; modules de microaffichage pour la réalité augmentée.

[www.microoled.net](http://www.microoled.net)



Parallèlement, nous avons développé avec la contribution du CEA une nouvelle technologie disruptive dont nous ferons l'annonce à Los Angeles début mai. Nous avons fait le pari de repousser les limites de la technologie Oled avec un beau potentiel pour accélérer le développement des marchés de la réalité virtuelle, de la réalité mixte et de la réalité augmentée, ciblant aussi bien des applications grand public que professionnelles dans les domaines de la logistique ou de la santé.

### Sur quels axes d'innovation travaillez-vous ?

**T. B. —** Nous développons des microécrans de haute performance qui s'intègrent dans des systèmes optiques près de l'œil. Ils garantissent une très bonne qualité d'image, une faible consommation de la batterie associée et la fiabilité du système quel que soit l'environnement (jour, nuit, brouillard, etc.) dans lequel évolue l'utilisateur. Nous travaillons principalement pour le secteur de la défense mais aussi pour le médical, par exemple pour certains actes chirurgicaux délicats, ou encore pour le marché *Sport Optics* qui utilise des viseurs pour le tir sportif sur cible.

Seul acteur occidental indépendant ayant plusieurs dizaines de clients en Europe, aux États-Unis et dans le reste du monde, et réalisant 90 % de notre chiffre d'affaires à l'export, nous sommes très fiers de contribuer aux enjeux de souveraineté. Et c'est aussi une grande responsabilité vis-à-vis de nos clients avec lesquels nous misons sur un accompagnement de proximité.

**« Nous avons fait le pari de repousser les limites de la technologie Oled avec un beau potentiel pour accélérer le développement des marchés de la réalité virtuelle, de la réalité mixte et de la réalité augmentée. »**

### Quels sont vos principaux défis ?

**T. B. —** Le paramètre temps en est un : la vitesse du développement technologique conditionne notre positionnement sur le marché. La « chasse » aux talents en est un autre, tout aussi important, car nous avons besoin de renforcer les équipes et les compétences. Et bien sûr, le financement de nos activités : après avoir réalisé une levée de fonds en octobre dernier, nous en préparons une nouvelle pour soutenir notre déploiement industriel à l'horizon 2028 avec une nouvelle usine et de nouveaux équipements.

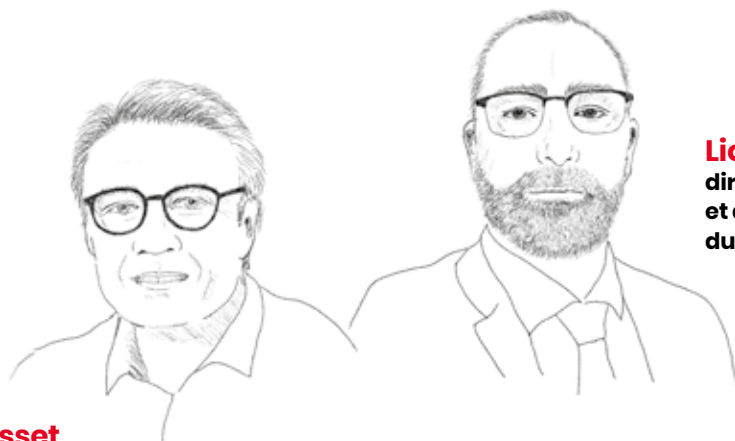
### Comment notre vie quotidienne sera-t-elle concrètement changée par ces technologies ?

**T. B. —** Je ne crois pas que les écrans disparaîtront au profit des lunettes connectées, mais elles créeront de nouveaux usages, par exemple pour la formation aux gestes médicaux en environnement virtuel ou la traduction simultanée, avec une autonomie de 8 à 10 heures contre deux seulement aujourd'hui.

### Pour finir, quel regard portez-vous sur votre lien avec le CEA ?

**T. B. —** Nous sommes tombés dans la marmite tout petits ! Notre projet d'applications près de l'œil a été incubé au CEA en 2006-2007 puis, après avoir créé notre start-up, nous avons continué à travailler ensemble en mutualisant équipements et matière grise. C'est toute l'efficacité de notre modèle de développement : grâce au soutien du CEA, nous avons eu accès très tôt à l'écosystème du domaine et à des équipements de pointe. C'est une belle tranche de vie pour nous et un aboutissement pour le CEA, qui a fait grandir notre entreprise et lui permet de prendre bientôt son envol hors de ses locaux ! ●

# La sécurité, une nécessité dans un monde changeant



**Éric Gosset,**  
officier central de sécurité

**Lionel Darasse,**  
directeur de la sécurité  
et de la sûreté nucléaire  
du CEA (DSSN)

**L**es partenaires d'hier sont-ils toujours fiables aujourd'hui ? Les coopérations peuvent-elles être encore équilibrées, respectueuses et au bénéfice de chacune des parties ? Ces questions se posent avec d'autant plus d'acuité que le rapport de force semble désormais s'imposer comme une grille de lecture des relations internationales. Entre puissances montantes, puissances déstabilisatrices et puissances déclinantes, le gouvernement a tout récemment rappelé que la voie française est celle de la défense de nos intérêts nationaux et européens. Si l'ouverture et le partage sont des valeurs essentielles dans le domaine de la

recherche, il convient de ne pas être naïf. Les ambitions de puissance s'invitent également dans les sphères universitaires et académiques, car la science constitue l'un des leviers majeurs pour soutenir le développement économique et industriel des États, ainsi que pour disposer de capacités de défense et d'avance technologique dans un monde plus hostile. Cette réalité donne lieu à des pratiques prédatrices et déséquilibrées, parfois dissimulées. Certaines s'adosent à des écosystèmes militaires dont les méthodes et les valeurs ne correspondent ni à celles de la recherche scientifique ni à celles de la France.

La protection des activités est donc plus que jamais un sujet au centre des réflexions stratégiques sur les collaborations et partenariats. Cette vision, le CEA

l'incarne depuis sa création en tant qu'organisme public de recherche ouvert sur le monde et au cœur de programmes scientifiques majeurs développés pour la souveraineté française et européenne. Fort de ses 80 ans d'expérience, il a développé un savoir-faire dans ce domaine et une culture de sécurité qui se retrouvent dans chacune de ses missions, avec une approche proportionnée aux enjeux.

La sécurité, le CEA souhaite en faire un argument d'attractivité et de confiance face aux défis actuels. Ainsi s'est-il doté d'un cadre particulier pour obtenir des garanties sur le fait que les collaborations seront menées en confiance et dans un environnement sécurisé.

En étroite collaboration avec les Hauts fonctionnaires de défense et de sécurité (HFDS) de ses ministères de tutelle et les services de l'État, la Direction de la sécurité et de la sûreté nucléaire (DSSN) du CEA porte une politique de sécurité de la recherche. Elle intègre les principes de l'*Open science* européenne, qui prône une évaluation lucide des risques sans remettre en cause le principe d'un partage « *aussi ouvert que possible, mais aussi restreint que nécessaire*<sup>1</sup> ».

Cette politique s'appuie sur plusieurs piliers : la sensibilisation des personnels, la cartographie des partenaires et compétiteurs, le traitement des signaux faibles et événements qui remontent du terrain, la mise en place de mesures de protection des laboratoires, savoirs et informations proportionnées aux enjeux.

Pour anticiper les risques, le CEA, en lien avec l'État, étudie les stratégies de ses compétiteurs internationaux, même lorsqu'elles semblent inoffensives, afin d'identifier les menaces potentielles pour ses programmes. Sur la base de cette veille, le CEA évalue les bénéfices et les risques des collaborations et propose des mesures adaptées pour les protéger tout en favorisant l'ouverture.

Concrètement, la DSSN met en œuvre avec les chercheurs du CEA une politique de



## **La protection des activités est plus que jamais au centre des réflexions stratégiques sur les collaborations et partenariats. Une vision que le CEA incarne depuis sa création. »**

protection de l'information, basée sur un référentiel de sensibilité qui encadre le partage des savoirs du CEA, tant en interne qu'avec ses partenaires. Les échanges de données sensibles sont ainsi rendus possibles dans un strict cadre établi.

Le dispositif de supervision des réseaux informatiques du CEA contribue à ce dispositif général de protection des activités en assurant une surveillance active, tout comme le CERT CEA (*Computer Emergency Response Team*) qui intervient en réponse aux incidents.

Pierre angulaire de cette politique, la sensibilisation de l'ensemble des salariés et la mobilisation des managers sont au cœur du dispositif. En effet, sans vigilance collective, il est difficile de garantir une protection efficace.

Le nombre d'événements traités par la DSSN, en hausse continue, permet d'illustrer la réalité de la menace pour ceux qui en douteraient. Ces événements prennent

des formes diverses : prise de photographies d'expérimentations, candidatures suspectes, campagnes de débauchage, questionnaires contractuels intrusifs, conférences prédatrices, propositions de récompenses au profit de pratiques d'ingérence ou d'influence. En un mot, vigilance partagée pour des collaborations sécurisées, des innovations et des recherches préservées ! ●

<sup>(1)</sup> Directive (UE) 2019/1024 concernant les données ouvertes et la réutilisation des informations du secteur public.

# Notre sélection



**Des cellules dignes d'un musée, les liens entre un réacteur en construction et votre prochaine IRM, ou encore l'avenir de la neuroscience : le CEA abrite quantité de travaux en biologie et en santé pour mieux comprendre, prévenir et soigner. Tour d'horizon non exhaustif.**



## Des capteurs pour les organoïdes

La recherche en santé s'appuie sur les organoïdes sur puce. Mais pour être encore plus utiles, ces derniers doivent être équipés de capteurs permettant de suivre les réponses exprimées. C'est tout l'objet de la thèse d'Axelle Aubert. Grâce à l'approche pluridisciplinaire du CEA, elle travaille au développement d'un dépôt fonctionnalisable et adaptable pour ces biocapteurs, à mi-chemin entre électronique et biologie. Découvrez son témoignage et n'hésitez pas à contacter nos laboratoires pour connaître les offres de thèse !



## Aux interfaces entre le cerveau et les machines

À l'occasion de la Semaine du cerveau, deux experts du CEA, Guillaume Charvet et Philippe Ciuciu, nous plongent dans les méandres du cerveau et au-delà. Implants, intelligence artificielle, dialogue entre le cerveau et la machine : derrière ces notions parfois fantasmées se cachent des avancées scientifiques très concrètes pour mieux comprendre le fonctionnement du cerveau, et, à terme, contribuer à la rééducation de patients paralysés ou victimes d'AVC.

## Un réacteur pour la médecine nucléaire

Il ne produira pas d'énergie, mais beaucoup de radioisotopes pour la santé ! Le CEA a ouvert les portes du chantier du réacteur RJH à Monsieur Bidouille, vidéaste et vulgarisateur technique. Ce réacteur en construction sur le site de Cadarache sera un outil de recherche de pointe pour la filière nucléaire, et assurera une grande partie de la production européenne de radioisotopes pour l'imagerie et la thérapie. Et pour tout connaître à la médecine nucléaire, rendez-vous dans le numéro 10 de votre revue préférée !



## Voir la vie s'étendre au musée d'Orsay

Peut-être avez-vous fait partie des chanceux qui ont assisté au spectacle ? F'in janvier, le CEA et le musée d'Orsay organisaient un spectacle immersif autour des architectures vivantes, en lien avec des travaux menés dans nos laboratoires. Cellules, filaments, membranes se sont dévoilés en musique sous la grande nef du musée. Session de rattrapage avec Léa Collober de @enjoynaturewithme, invitée pour l'occasion.

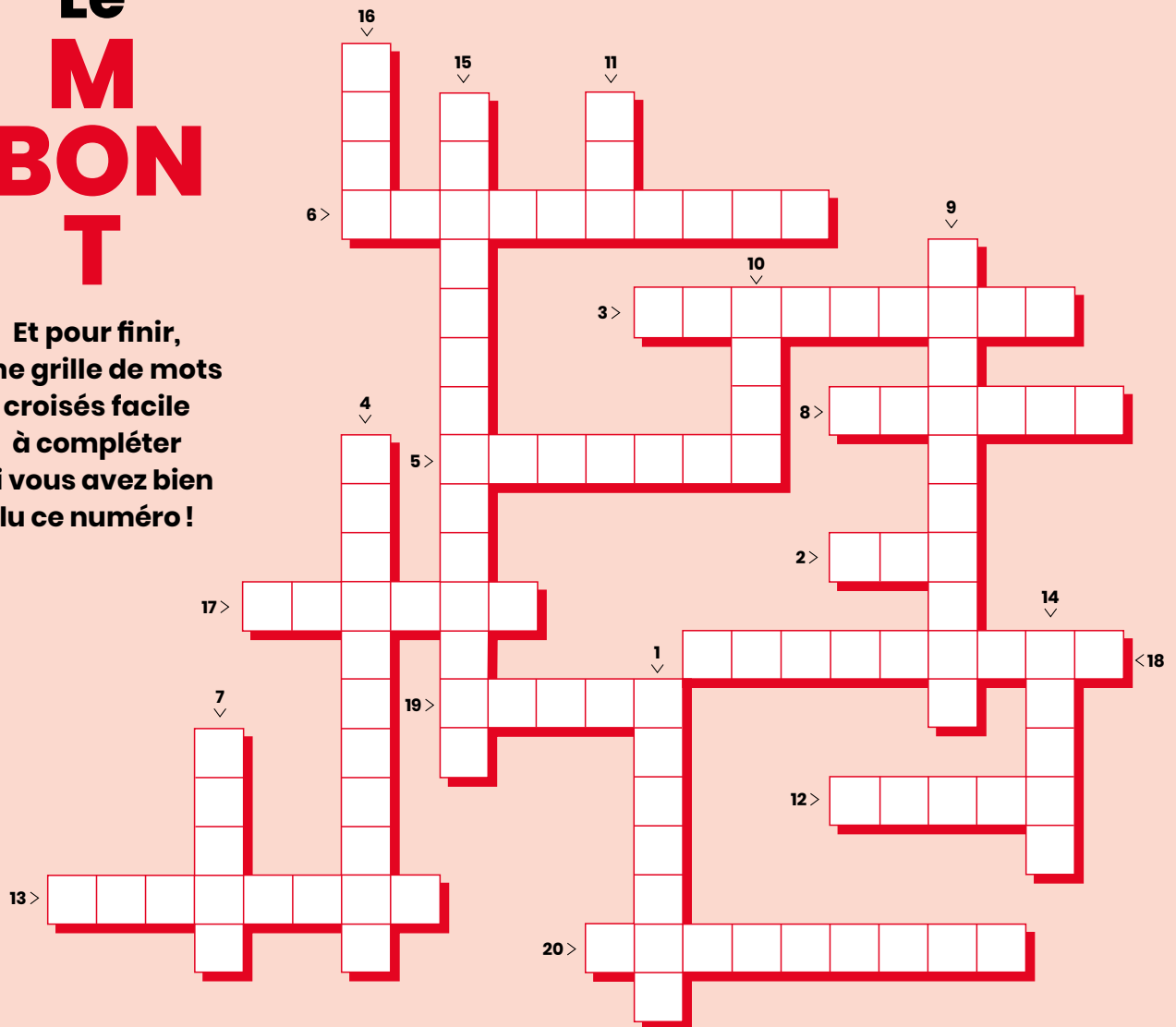


## De nouveaux matériaux pour les radios

Vous avez sans doute déjà passé une radio. Une technologie éprouvée... mais que l'on peut toujours améliorer. Pour obtenir de meilleurs clichés tout en limitant davantage l'exposition des patients aux rayonnements, le CEA développe de nouveaux matériaux pour les appareils de radiographie. Découvrez le prototype et les moyens de test en conditions réelles avec notre visite de labo !

# Le M BON T

Et pour finir,  
une grille de mots  
croisés facile  
à compléter  
si vous avez bien  
lu ce numéro !



## HORIZONTALEMENT

2. Cerveau électronique de la batterie.
3. Élément très abondant sur terre, envisagé pour les générations futures de batteries.
5. Électrode positive de la batterie.
6. Elle est venue remplacer les essais nucléaires.
8. Ils permettent les expériences au sein du LMJ.
12. Centre CEA où se situe le LMJ.
13. Petite, mais lumineuse.
17. Créateur de technologies microLED.
18. Commercialise des microécrans Oled.
19. Norvégien de prix.
20. Une histoire de chat au départ.

## VERTICALEMENT

1. Métal gris et brillant entrant dans la composition des batteries des véhicules électriques.
4. Start-up commercialisant des microbatteries tout-solide.
7. Appareil de radiographie « éclair ».
9. Le programme Simulation la garantit.
10. La France l'a signé en 1996.
11. Les premières têtes nucléaires au monde conçues et garanties par simulation.
14. Bientôt multifonction.
15. Des échanges qui peuvent être numériques.
16. Matrice pour microécrans.

Horizontal : 2. BMS | 3. POTASSIUM | 5. CATHODE | 6. SIMULATION | 8. LASERS | 12. CESTA | 13. MICROLED | 17. ALEDIA | 18. MICROOLED | 19. NOBEL | 20. QUANTIQUE  
Vertical : 1. LITHIUM | 4. INJECTPOWER | 7. EPURE | 9. SIMULATION | 10. TICE | 11. TNA | 14. ÉCRAN | 15. COMMUNICATIONS | 16. CMOS

CONNECT WITH



HALL 7.3 STAND 3G45

AT

**VIVATECH**

17-20 JUNE 2026 / PARIS

10  
YEARS  
VIVATECH

**C'est un anniversaire que l'on ne pouvait pas manquer:  
VivaTech célèbre ses dix ans en 2026, et le CEA y sera !**

Retrouvez-nous du 17 au 20 juin, au parc des expos de la Porte de Versailles, à Paris, pour découvrir toutes nos innovations en faveur de la souveraineté française et européenne, dans les domaines de la santé, de l'IA, du calcul haute performance et de l'énergie. Nos équipes vous attendent pour échanger sur leurs recherches et vous présenter leurs solutions technologiques.

Venez nous voir dans le hall 7.3 sur le stand 3G45!

Renseignements et inscriptions : <https://vivatech.com/>



## Qui sommes-nous ?

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

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



Un format cahier,  
c'est un minimum  
de chutes de papier  
**et un maximum  
de contenus !**



*Rendez-vous ici  
pour découvrir la revue!*