

10 LA REVUE DU CEA

PATRIMOINE

**L'éclairage
de la science**

- Page 14

MÉDECINE NUCLÉAIRE

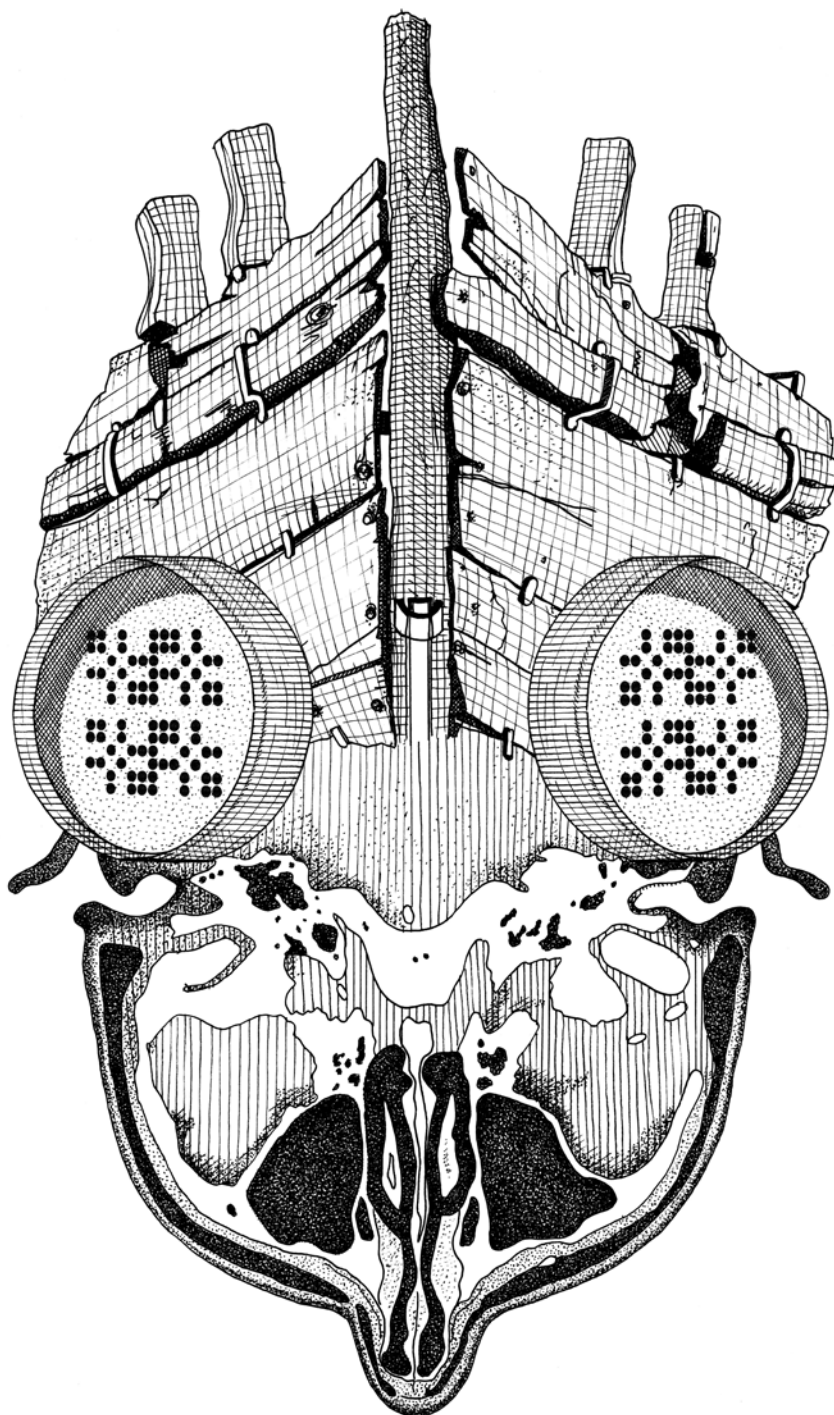
**Diagnostiquer
et soigner**

- Page 32

INSTRUMENTATION

**Au service
du nucléaire**

- Page 48



AUTOMNE 2025

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, Vincent Coronini,
Séverine Paillard, Virginie Silvert.
Avec le concours scientifique de Philippe Chomaz,
Hervé Desvaux, Héroïse Goutte, Étienne Klein,
Yves Samson et Olivier Vacus.

Illustration de couverture

La Hache illustration

Conception graphique

bearideas

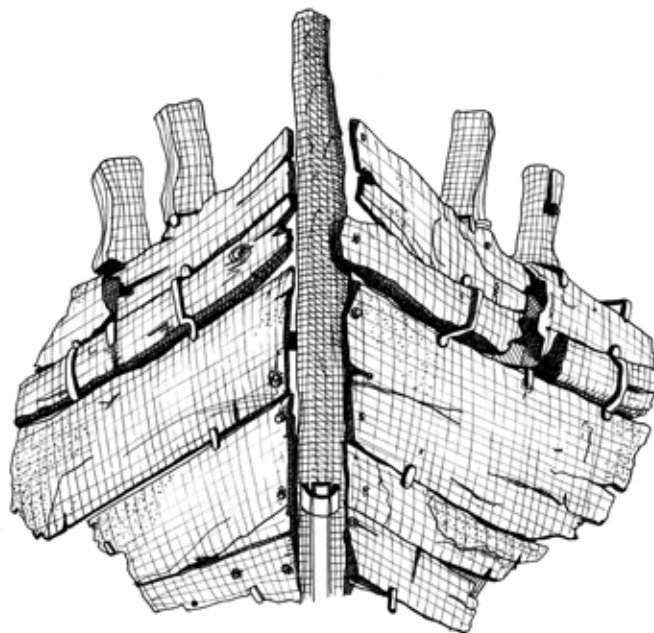
Des remarques, des suggestions ?

Écrivez-nous à revue@cea.fr

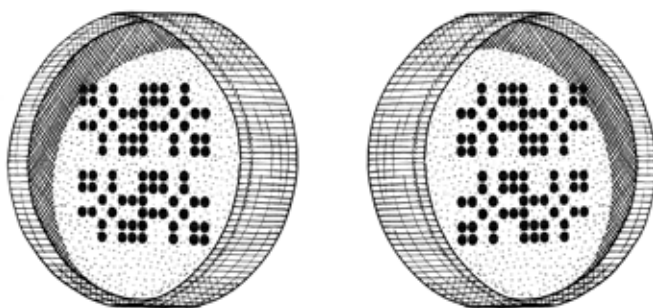
ISSN 2999-926X

La coque d'un navire ?

Un premier dossier, qui met en lumière l'expertise du CEA au service de la recherche en sciences du patrimoine. Au programme : datation, caractérisation, conservation, restauration ou encore protection des œuvres qui ont traversé les époques jusqu'à nous. Le tout grâce aux vertus du nucléaire. Embarquement immédiat.



La couverture déchiffrée

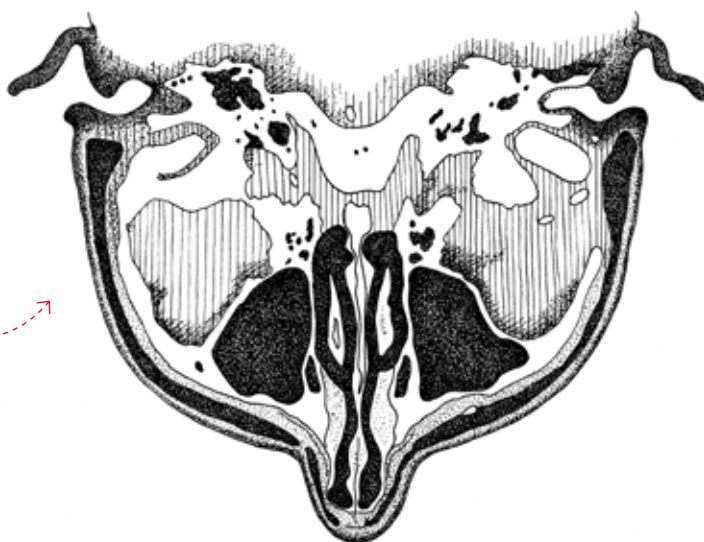


Des yeux aux rétines singulières.

Ces rétines sont des masques codés, l'une des nombreuses innovations développées par le CEA pour les caméras dédiées aux chantiers de démantèlement. Depuis la chimie du combustible jusqu'à l'analyse de la durée de vie des réacteurs, l'instrumentation nucléaire issue de la créativité de nos chercheurs irrigue toute la filière.

Une image qui dévoile tout.

La TEP-Scan, un acte de diagnostic médical aujourd'hui largement répandu auprès des Français. C'est l'une des techniques de la médecine nucléaire. Pionnier en la matière, le CEA a fortement contribué au déploiement de cette discipline dans les hôpitaux et reste un acteur majeur de la filière.



1. Des instruments de mesure pour le nucléaire... et au-delà ! Expert fellow, **Anne-Sophie Lalleman** est directrice du programme transversal en instrumentation et détection au CEA. Elle nous apporte sa vision des mille et une innovations développées par les équipes, à la pointe de la R&D.

© AS. Lalleman/CEA

2. Responsable du Laboratoire de mesure du carbone 14, **Lucile Beck** est spécialiste des méthodes nucléaires appliquées à la caractérisation d'objets archéologiques. Pour elle, il est tout à fait logique et bénéfique que le CEA s'investisse dans les sciences du patrimoine pour documenter et préserver notre passé.

© R.Pouliou/CEA

Les invités de la revue

Et aussi Bertrand Kuhnast, pharmacochimiste, qui dirige le Service hospitalier Frédéric Joliot. Son leitmotiv ? Développer des outils innovants pour améliorer la détection et le traitement de pathologies comme les cancers et les maladies neurologiques par la médecine nucléaire. Une mission que ce service conduit en lien avec des équipes de recherche, hôpitaux et industriels, porteurs d'essais cliniques.

6. Senior fellow et directeur de recherche au Service de physique expérimentale d'essais en sûreté et d'instrumentation, **Abdallah Lyoussi** coordonne le Limmex, Laboratoire d'instrumentation et de mesures en milieux extrêmes, réunissant le CEA, Aix-Marseille université et le CNRS. Il partage sa passion avec ses étudiants de l'INSTN et de l'université d'Aix-Marseille.

© A. Lyoussi/CEA

3. Conservatrice du patrimoine, diplômée de l'École du Louvre et de l'Institut national du patrimoine, **Amy Benadiba** est la directrice scientifique et culturelle d'ARC-Nucléart. Depuis trois ans, elle établit des ponts entre les scientifiques et les conservateurs de musées ou les communes qui confient leurs collections à l'atelier.

© ARC-Nucléart

4. Marion Libessart, chargée de valorisation auprès des industriels à l'institut Iresne du CEA, supervise entre autres les activités prospectives liées à la production des radioisotopes médicaux dans le réacteur Jules Horowitz et travaille au positionnement de cette installation dans le marché européen, voire international, de la médecine nucléaire.

© M. Libessart

5. De la mine à l'aval du cycle, **Hervé Toubon** connaît toute la chaîne du nucléaire et ses instruments. Après des débuts chez Orano Recyclage à La Hague, il a été directeur technique de Canberra, devenu Mirion Technologies. Aujourd'hui directeur R&D et innovation chez Orano Mining, il poursuit ses travaux avec le CEA.

© H. Toubon

Éditorial

Un engagement sans faille, d'hier à aujourd'hui et pour demain... Voilà ce que souligne Anne-Isabelle Etievre, nommée administratrice générale du CEA au début de l'été, dans un entretien au cours duquel elle revient sur les grands chantiers de l'organisme, au service des priorités de l'État et de la société (*voir page suivante*).

C'est dans cet esprit et pour améliorer la prise en charge médicale des patients que le CEA a posé les bases de la médecine nucléaire en France (*p. 32*), en produisant les premiers radioisotopes médicaux français et en développant des techniques d'imagerie fonctionnelle. Côté industrie, c'est au bénéfice de toute la filière que le CEA a développé une expertise rare en instrumentation nucléaire (*p. 48*). Expertises que vous aurez l'occasion de retrouver lors de l'édition 2025 du salon WNE, qui se tiendra à Villepinte début novembre (*p. 46*). Enfin, c'est au service du patrimoine que le CEA contribue à documenter notre passé et à en préserver les vestiges (*p. 14*). Une autre incarnation, peut-être plus inattendue, de sa maîtrise du nucléaire et une preuve que celui-ci irrigue bien des domaines !

Ces histoires et bien d'autres sont mises en valeur par *CEA le Jeu*, dont quelques cartes vous sont dévoilées en avant-première à la fin de ce numéro (*p. 65*). Coconstruit avec ses salariés, il met à l'honneur les grandes avancées scientifiques et technologiques réalisées par le CEA depuis 80 ans.

Bonne lecture !

La rédaction

Merci également à

Karim Boudergui
Sylvain Broussard
Frédéric Carrel
Marie Bourgaud
Stéphane David
Audrey De Santis
Christophe Destouches

Philippe Dillmann
Christophe Domergue
David Emond
Éric Fédérici
Karine Froment
Annelise Gallais-During
Stéphane Gin

Akli Hammadi
Mark Kellett
Vincent Lebon
Maugan Michel
Delphine Neff
Xavier Perrette
Hélène Perrin

Stanislas Pommeret
Estelle Stamm
Caroline Toffolon
Sixtine Verpiot
Jean-François Villard
Et tous ceux qui ont aidé
à réaliser cette revue !



© T. Illies/CEA

Le **CEA**, un collectif à la pointe de la recherche et de l'innovation, engagé **au service de l'État et de la société**

Nommée le 11 juillet dernier en qualité d'administratrice générale du CEA, **Anne-Isabelle Etievre** revient sur la feuille de route programmatique de l'organisme au service des priorités actuelles de l'État et dans la continuité de son identité depuis 80 ans.

Que représente pour vous et selon vous le CEA ?

Le CEA est un acteur très singulier dans le paysage scientifique français et international. Depuis 80 ans, il mène des programmes de recherche au service des priorités de l'État, dans un continuum qui va de la recherche la plus fondamentale jusqu'au transfert de technologie. C'est son ADN. Et grâce à son organisation programmatique, il a su s'adapter au fil du temps à l'évolution des attentes de l'État, et de la société en général, dans les domaines de la défense, de l'énergie, du numérique et de la santé plus particulièrement. Sur un plan plus personnel, je dirais que le CEA est un collectif de travail très engagé, une façon unique de faire de la recherche qui associe tous les métiers de recherche et de support, sans distinction. J'attache énormément d'importance à cette façon de travailler, qui nous permet de mener à bien des projets d'envergure.

Comment envisagez-vous votre mandat à la tête du CEA ?

En tant que scientifique, c'est une très grande fierté pour moi de contribuer au rayonnement du CEA et de ses équipes. J'aborde mon mandat avec beaucoup de plaisir, mais aussi d'humilité et de détermination, car je mesure la responsabilité qui est la mienne dans la période que nous vivons. Le CEA a de nombreux défis à relever en tant qu'opérateur national de recherche, et conseiller de l'État dans les domaines qui lui incombent, mais également envers la société qui a des attentes fortes vis-à-vis de la science et de la technologie. Il nous faut répondre à ces attentes, et continuer à expliquer nos développements scientifiques et technologiques auprès du plus grand nombre.

Quelles sont, justement, vos priorités pour les années à venir ?

En matière de **défense**, le CEA, *via* la Direction des applications militaires, a la responsabilité de mener à bien les programmes que l'État lui confie dans le cadre de la mise en œuvre et du renouvellement de sa dissuasion nucléaire : j'ai toute confiance en la DAM pour les mener à bien. Nous pourrions développer davantage nos recherches duales, en renforçant la fertilisation croisée entre les différentes directions du CEA.

Dans le domaine de l'**énergie**, il est important d'assumer pleinement les missions qui ont été confiées au CEA par le Conseil de politique nucléaire, en coordonnant la stratégie de R&D pour l'ensemble des besoins de la filière industrielle nucléaire, au bénéfice du parc électronucléaire actuel et futur, ainsi que pour la fermeture du cycle. Nous mobiliserons pour cela toutes nos compétences, de la recherche la plus amont jusqu'aux développements préindustriels. Nous poursuivrons également notre R&D sur les autres formes d'énergie décarbonée, dans le cadre de la vision intégrée de l'énergie qui fait notre force. Dans le secteur du **numérique**, notre stratégie sera revisitée dans le cadre de la « mission numérique » qui rendra ses conclusions avant la fin de l'année en prenant en compte l'ensemble de la chaîne de valeur de façon à renforcer l'autonomie stratégique nationale et européenne. Nos enjeux programmatiques portent en particulier sur la microélectronique, l'intelligence artificielle, les systèmes électroniques, la cybersécurité ainsi que sur le calcul intensif avec l'arrivée prochaine du supercalculateur exascale Alice Recoque. Il nous faut aussi déployer notre stratégie en **santé** pour mettre l'imagerie et les dispositifs médicaux que nous concevons, ainsi que notre savoir-faire numérique, au service d'une réponse ciblée sur certains enjeux pathologiques clés. Notre **recherche fondamentale**, dans les disciplines qui sont celles du CEA, est très précieuse et doit rester au meilleur niveau pour irriguer l'ensemble de nos programmes, avec toujours plus de transversalité entre les directions ; à titre d'exemple, les travaux pionniers du quantique à la Direction de la recherche fondamentale se prolongent 25 ans plus tard en mobilisant l'ensemble des directions du CEA à des titres divers. L'**Europe** est également au cœur de nos préoccupations : nous travaillons avec l'ensemble de nos partenaires à ce que nos thématiques de recherche soient bien représentées dans le prochain programme-cadre en cours de préparation pour la recherche et le développement technologique. C'est un enjeu très important pour les équipes. Enfin, nos **partenariats académiques et industriels** doivent être étendus : les agences de programme dont l'État nous a confié la responsabilité – d'une part sur les énergies

Bio express

Diplômée de l'École normale supérieure de Paris-Saclay, agrégée de sciences physiques, Anne-Isabelle Etievre est également titulaire d'un doctorat en physique des particules et d'une habilitation à diriger des recherches. Elle intègre le CEA en 2003.

décarbonées, d'autre part sur les composants, systèmes et infrastructures numériques – sont la reconnaissance de notre capacité à fédérer les compétences. De même que le succès de notre programme de recherche à risque « Audace ! » qui rassemble l'ensemble des domaines scientifiques du CEA et près de 80 partenaires.

Quelles réalisations du CEA vous ont marqué ces dernières années ?

Nous n'avons pas manqué de très beaux résultats dans l'ensemble de nos domaines – c'est donc une question difficile ! Je répondrai par quelques exemples, qui illustrent à la fois notre positionnement stratégique, ainsi que notre capacité à porter des recherches et des développements technologiques à la pointe de l'art. Je citerai l'homologation de la nouvelle tête nucléaire destinée à équiper la composante océanique de la dissuasion, la confirmation par l'État du rôle central que le CEA doit jouer dans la R&D pour l'énergie nucléaire, le nouveau contrat stratégique de la filière nucléaire signé en juin dernier pour la période 2025-2028, le succès de nos travaux en microélectronique avec l'inauguration prochaine de la ligne pilote Fames dédiée aux puces du futur, le record de durée d'un plasma de fusion obtenu sur le tokamak West, ainsi que les premières images cérébrales d'une précision inégalée obtenues sur l'IRM Iseult. Ces quelques exemples illustrent aussi notre rôle d'acteur du lien entre science et société, de la recherche à l'industrie. Plus que jamais, nous devons contribuer à faire aimer la science et redonner confiance dans la parole de ses acteurs ! ●

2012

Coordnatrice du laboratoire d'excellence P2IO (Physique des 2 infinis et des origines)

2014

Cheffe du Service de physique des particules

2016

Directrice de l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'univers (Irfu)
Déléguée scientifique au Conseil du CERN (2019-2022)

2022

Conseillère recherche de la ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche

2023

Directrice de la recherche fondamentale du CEA

2025

Administratrice générale du CEA

01

La science au service du patrimoine 14



Mettre en valeur notre héritage 16

Panorama des compétences du CEA 18

Documenter notre histoire 20

Traitements de choc
pour chefs-d'œuvre en péril 22

Témoignages 24

Objets d'hier pour matériaux de demain 26

Et aussi...

Dans les coulisses du CEA 8

**Portfolio : traquer les agents
pathogènes 28**

**Save the date : découvrez
le programme du WNE 46**

La belle image : la preuve par l'image 60

Ancrage : le CEA à Valduc 62

À vous de jouer 65

02

Diagnostiquer et soigner par la médecine nucléaire 32



Le B.A.BA de la médecine nucléaire 34

Le parcours du radiopharmaceutique 36

SHFJ, de la recherche au patient 37

Le RJH, pilier de la production 40

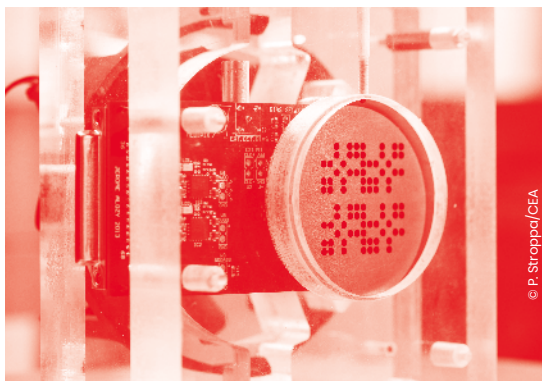
De l'iode 131 aux radioisotopes du futur 42

La bonne dose 44

Former les professionnels 45

03

L'instrumentation nucléaire : 1000 facettes, 1000 usages 48



La symphonie des mesures 50

Focus sur 4 projets innovants 54

3 questions à Hervé Toubon,
directeur R&D et innovations
chez Orano Mining 56

Dans les coulisses du CEA

**De nouvelles îles, de la lumière bleue pour des carburants verts
et un pas vers des biopsies moins invasives...**
Retrouvez notre sélection des dernières actualités à ne pas manquer.

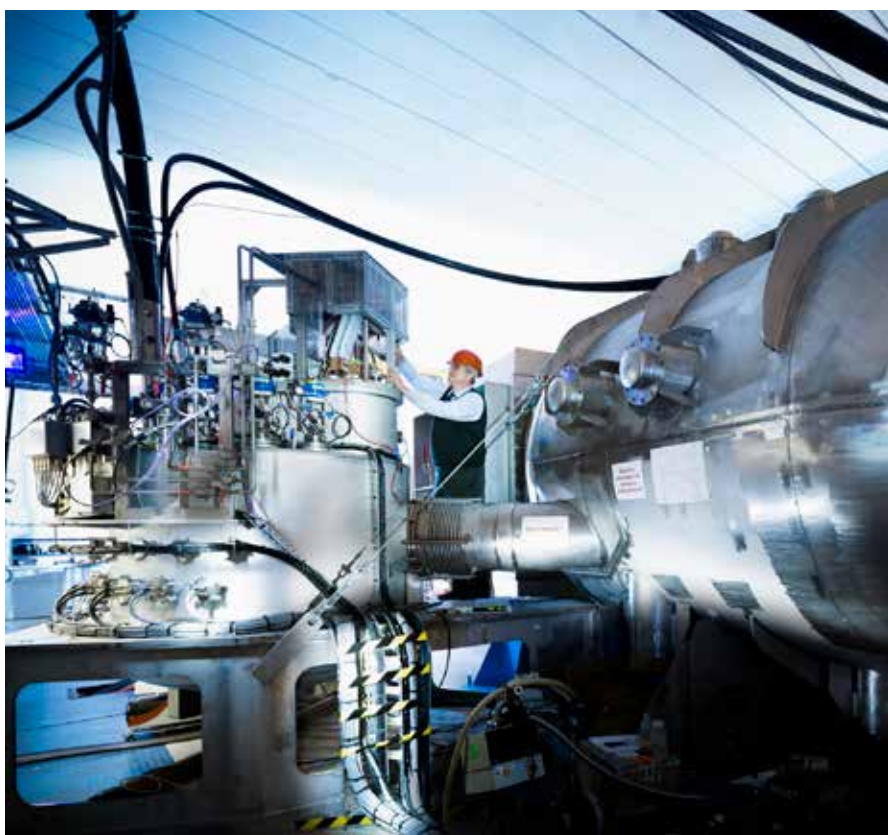
À l'abordage d'une nouvelle île

Pas toujours besoin de prendre la mer pour découvrir des îles ! Dans le cadre d'une collaboration internationale, les équipes CEA ont mis en évidence une nouvelle île de fission. La fission, phénomène lors duquel le noyau d'un élément se divise en deux, est ici asymétrique : certains noyaux ne se divisent pas en deux noyaux égaux, mais de façon très inégale. En accélérant un faisceau d'uranium à 88 % de la vitesse de la lumière et en le projetant sur une cible de plomb, les chercheurs ont ainsi observé plus de 100 noyaux exotiques, dont certains se brisent de façon inattendue. Cette découverte, publiée dans la revue *Nature*, remet en cause les modèles établis, avec de potentielles applications dans le domaine des énergies, de la physique nucléaire et pour la compréhension de l'origine des éléments de notre Univers.

**Pour en savoir plus
sur cette expérience
et ses résultats, c'est ici !**



↓ Cet aimant supraconducteur, construit par le CEA, est un élément clé de l'installation Fair, à Darmstadt en Allemagne, laquelle a mis en évidence une nouvelle île de fission asymétrique.



Des biopsies moins invasives

Tous ceux qui ont expérimenté une biopsie savent que cet examen, invasif et parfois douloureux, n'est jamais bien agréable et l'attente pour l'obtention des résultats peut être longue. Pour s'affranchir de ces désagréments, une équipe du CEA examine une autre voie, utilisant des fibres optiques « fonctionnalisées ». Grâce à des molécules greffées à leur surface (ici, de l'ADN), les fibres peuvent reconnaître une cible biologique, par exemple une molécule signature d'une pathologie, comme un cancer. Même si le procédé doit encore être amélioré, notamment en augmentant sa sensibilité ou encore le nombre de cibles détectées, la voie vers ce nouveau type d'examen semble ouverte.



© A. Buu/Sfen

Une pluie de prix Sfen

Une belle reconnaissance de 80 ans de travaux et d'expertises au plus haut niveau ! Le CEA a remporté de nombreux prix Sfen lors de l'édition 2025, dont le Grand Prix pour l'École du sodium et des caloporteurs avancés. Celle-ci fête ses 50 ans et forme opérateurs, techniciens et ingénieurs afin de répondre aux besoins spécifiques des réacteurs à neutrons rapides au sodium. Le Prix Jacques Gaussens, qui récompense un chercheur de moins de 35 ans, est allé à Tommaso Barani, de l'institut Iresne du CEA pour ses recherches sur la modélisation du combustible nucléaire. Côté thèse, le prix Jean Bourgeois est revenu à Sandra Barhoum et son travail sur la toxicologie nucléaire au sein de l'institut Isas. Plusieurs ouvrages publiés par le CEA ou des chercheurs de l'organisme ont également été distingués.



© J. Hosan, CEA/FAIR

Feu nos ancêtres



© Getty Images

Tournant majeur dans l'évolution de l'humanité, l'origine de la maîtrise du feu reste un sujet hautement débattu. Une étude publiée dans le *Journal of Archaeological Method and Theory*, à laquelle ont participé des chercheurs du LSCE (CEA/CNRS/UVSQ), a établi la présence de feux répétés sur le site archéologique d'Ornac III en Ardèche. Grâce à la datation par la méthode uranium-thorium (p. 18) de dépôts carbonatés contenant des traces de suie, elle suggère que les hominidés du Pléistocène moyen (entre 774 000 et 129 000 ans avant notre ère) pouvaient contrôler le feu, il y a 270 000 ans, avec la capacité de l'allumer ou, au moins, de le maintenir sur le long terme, pendant des périodes sèches et humides.

Le CEA au Japon

Cet été, à l'occasion de l'Expo universelle à Osaka, le CEA a fait rayonner la science française au cœur du Japon. Chaque jour, plus de 25 000 visiteurs sont venus découvrir les portraits de grands scientifiques français et plonger au cœur des laboratoires du CEA et de l'Univers à travers une expérience immersive. Cet événement international a été l'occasion de rappeler les liens qui unissent le CEA et le Japon, à travers plusieurs tables rondes et la signature d'un accord avec l'institut de recherche Riken.



Tu m'aimes ? Un peu, beaucoup...

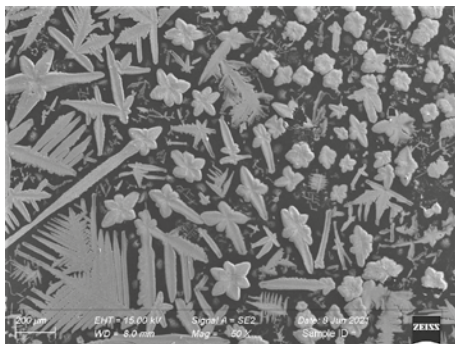
Effeuiller des marguerites pour mesurer son amour ? Et si le jeu était en réalité pipé ? Sur France Inter, François Parcy, directeur de recherches à l'institut Irig du CEA, a répondu à la question d'un jeune auditeur : les marguerites ont-elles toutes le même nombre de pétales ?

Première surprise, les pétales de la marguerite ne sont pas les grandes langues

blanches que l'on arrache par amour. Ça, ce sont des ligules, des fleurs chacune formée de trois pétales blancs collés entre eux. Les vrais pétales de la marguerite sont invisibles à l'œil nu et se retrouvent dans le cœur jaune au milieu. Le nombre de ligules, lui, varie généralement entre 20 et 25. Effeuiller une marguerite ne donne donc pas toujours la même réponse...

**Retrouvez
les explications
de François Parcy
sur France Inter.**





© C. Vallat/CEA

Quelle jungle !

Une luxuriante végétation tropicale ? Non, un échantillon de verre pour des études de conditionnement de déchets et photographié au microscope électronique à balayage ! Ce travail de précision, baptisé *Jungle*, a valu à Charlène Vallat, technicienne microscopie à l'institut Isec du CEA, la première place du concours photo organisé à l'occasion des journées CAZAC 2025, qui réunissent chaque année les utilisateurs des équipements de microscopie Zeiss Group.

Du bleu au vert

Produire de l'heptane — l'un des principaux constituants des carburants — avec seulement des micro-organismes et de la lumière bleue, c'est possible ! La démonstration d'un procédé inédit a été réalisée par des chercheurs du BIAM (Aix-Marseille université).

Aujourd'hui obtenu par distillation du pétrole, l'heptane est essentiel dans les carburants, notamment aéronautiques, et sert aussi de solvant industriel. Pour en produire sans utiliser la moindre goutte de pétrole, l'équipe a combiné biologie synthétique, lumière et coculture microbienne. Une première bactérie fabrique un précurseur, l'acide octanoïque, qu'une seconde transforme en heptane grâce à une enzyme utilisant la lumière bleue comme source d'énergie. Ce résultat ouvre la voie à de nouvelles solutions pour la chimie verte et pour des carburants durables.

Une ligne pilote pour la spintronique

Comparée à l'électronique, la spintronique exploite le spin de l'électron (une propriété quantique) en plus de sa charge. Elle promet des applications plus performantes et économes en énergie, allant du stockage de données ultradenses à l'IA embarquée basse consommation, en passant par les capteurs magnétiques à haute sensibilité. Depuis juin dernier, la France dispose d'une ligne pilote académique : SPINfab, exploitée à Grenoble par le CEA, le CNRS et l'UGA pour développer des matériaux et dispositifs spintroniques. En renforçant les capacités de prototypage sur le sol européen, l'installation permettra d'accélérer la montée en maturité des innovations dans le domaine.



© P. Jayet/CEA



La science



Une Vierge à l'enfant dans un labo ? Voilà qui n'est pas banal ! Le CEA met ses compétences et ses installations au service des sciences du patrimoine. Concept défini il y a une dizaine d'années, celles-ci regroupent l'ensemble des études sur le patrimoine matériel ou non, qu'elles relèvent des sciences de la mesure (physique, chimie, biologie...) ou des sciences humaines (histoire, archéologie, anthropologie, etc.). Le CEA y joue un rôle de premier plan en matière de datation, de caractérisation, de traitements de conservation, de restauration et de protection, grâce à des techniques issues du domaine nucléaire. Une approche scientifique et historique qui sert également à concevoir les matériaux de demain, comme vous allez le découvrir...

au service du patrimoine

Mettre en valeur notre héritage

Le CEA tient une place spécifique dans le paysage national et international des recherches pour le patrimoine, mais également dans le domaine de la conservation-restauration des objets en matériaux organiques et inorganiques issus de fouilles archéologiques ou de collections historiques. Explications.

De toutes les activités du CEA, celles-ci pourraient sembler atypiques, voire anecdotiques, mais les sciences du patrimoine y ont, en réalité, « logiquement » toute leur place grâce aux compétences de ses équipes et à ses plateformes expérimentales uniques, comme le souligne Lucile Beck, responsable du Laboratoire de mesure du carbone 14 (LMC14) au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE). Car, aux côtés des historiens, des archéologues ou des restaurateurs, les physiciens et les chimistes aussi contribuent à la compréhension, la préservation et la valorisation du patrimoine ancien, et le CEA y prend toute sa part.

Depuis des décennies, plusieurs de ses équipes développent et mettent en œuvre un ensemble de techniques et de technolo-

gies innovantes, au service de l'art, de l'histoire et de l'archéologie. Leur contribution permet de documenter notre patrimoine (p. 20), de préserver les vestiges du passé (p. 22), mais aussi de comprendre les processus d'altération des matériaux sur le très long terme (p. 26). Ainsi, « *le LMC14, et d'autres laboratoires du LSCE, sont en partie issus de la maîtrise des propriétés de la radioactivité naturelle et artificielle par le CEA qui, très tôt, l'a appliquée au développement de méthodes de datation basées sur la désintégration des noyaux* », rappelle Lucile Beck. De même, à Grenoble, « *c'est de l'intuition d'un jeune ingénieur que naît ARC-Nucléart en 1970 pour exploiter les propriétés du rayonnement gamma. Nous sommes aujourd'hui les seuls au monde à disposer d'un irradiateur gamma entièrement dédié au patrimoine et cela concourt à la notoriété du CEA* », ajoute Karine Froment, ancienne directrice de l'atelier-laboratoire. Et de même à Saclay, où le CEA dispose de plateformes et de compétences technologiques uniques pour développer des approches analytiques originales sur les objets archéologiques : « *La compréhension des mécanismes d'altération des objets archéologiques sert à conforter celle des matériaux destinés à isoler les déchets nucléaires à vie longue et haute activité en vue de leur stockage profond. Ici, nous travaillons sur le temps long des matériaux et cela concerne à la fois le patrimoine et les missions clés du CEA* », complète Philippe Dillmann, responsable du Laboratoire archéomatériaux et prévision de l'altération (Lapa, UMR Nimbe CEA-CNRS).

UNE COLLABORATION EMBLÉMATIQUE

Depuis plus de vingt ans, ARC-Nucléart travaille avec l'AIEA sur les techniques d'irradiation gamma. Une coopération officialisée en 2023 par sa désignation comme « Centre collaborateur de l'AIEA pour l'utilisation des rayonnements ionisants pour la préservation du patrimoine », tout comme avant lui en 2021, le centre collaborateur « Atoms for Heritage » dont le Lapa et le LSCE font partie. Ces labels visent à renforcer la promotion de l'utilisation de techniques nucléaires pour la préservation du patrimoine, la diffusion des connaissances, la formation et la sensibilisation aux questions liées à la conservation du patrimoine.

Le CEA est un « lieu privilégié » où travaillent ensemble des spécialistes de différentes disciplines (physique, chimie, etc.) pour « *l'analyse, la datation et la conservation* », résument Lucile Beck et Karine Froment. Pour l'analyse, direction le Lapa où l'on mène « *des études physico-chimiques sur des matériaux anciens que ce soit pour*

→
Observations macroscopiques
d'échantillons archéologiques
(scorie de réduction de fer).

des études d'altération, de provenance des objets ou même des savoir-faire anciens et de leur évolution », indique Philippe Dillmann. La datation, c'est le métier du LMC14 qui, avec son spectromètre de masse par accélérateur, « produit des dates pour soutenir les projets de recherche liés à des problématiques historiques et archéologiques et, plus récemment, pour authentifier des œuvres d'art », explique Lucile Beck. Enfin, c'est à ARC-Nucléart qu'une équipe pluridisciplinaire « composée d'ingénieurs en sciences nucléaires, de conservateurs et de restaurateurs, travaille à la préservation des œuvres et artefacts en matériaux organiques », poursuit Karine Froment. « Un lieu unique qui allie innovation et préservation de notre patrimoine », résume Stéphane David, son nouveau directeur.

Cette offre de services, qui bénéficie à l'ensemble de la communauté scientifique et patrimoniale française et européenne, ne va pas sans une activité de recherche soutenue. « Nous faisons de la R&D pour améliorer nos outils de modélisation et nos traitements, pour élaborer des traitements plus verts, plus durables, que nous appliquons aussi à des bois modernes, par exemple pour renforcer leur résistance à l'humidité », témoigne ainsi Karine Froment.

Ces approches se nourrissent mutuellement, comme le montrent les travaux menés sur le chantier scientifique de Notre-Dame (p. 22), mais également les collaborations menées avec d'autres institutions françaises (CNRS, ministère de la Culture...) ou internationales comme l'AIEA (voir encadré). Elles permettent au CEA d'adopter une démarche globale : on n'analyse plus aujourd'hui un objet archéologique, une sculpture, un tableau ou un monument comme on le faisait auparavant et on restaure avec des techniques et une déontologie repensées pour restituer l'œuvre dans

le respect de son contexte et de son histoire. « Les études pour le patrimoine sont aujourd'hui menées de manière holistique », confirme Philippe Dillmann. « Ce sont des systèmes anciens qui font l'objet de recherches et non plus des œuvres isolées, que ce soit pour la datation, l'altération ou la recherche de provenance. Les résultats des analyses physico-chimiques ne prennent de sens que replacés dans leur environnement physico-chimique, mais aussi historique. » Des approches complémentaires qui font la force du CEA. ●

MOBILISATION GÉNÉRALE

D'autres laboratoires du CEA, à Saclay, Cadarache et Marcoule (p. 30) mettent aussi, de façon plus ponctuelle, leurs savoir-faire au service du patrimoine. Par exemple, pour voir à travers des œuvres d'art sans jamais les toucher grâce à la microspectrométrie, pour analyser, avec un scanner à rayons X servant à caractériser les colis de déchets radioactifs, un fragment d'épée datant de l'âge du bronze (revue 8) ou encore pour aider à lever le voile sur certaines énigmes historiques comme les derniers jours de Napoléon à Sainte-Hélène (revue 5) par l'étude de protéines organiques.

Panorama des compétences du CEA

DATATION

Laboratoire de mesure du carbone 14 (LMC14)

MISSIONS

Réaliser des datations pour la communauté scientifique nationale : chercheurs qui étudient les environnements passés et présents, archéologues qui traquent les traces laissées par les sociétés qui nous ont précédés, conservateurs des musées et restaurateurs qui préservent notre patrimoine. Le LMC14* est équipé, depuis 2003, de bancs de préparation et d'un spectromètre de masse couplé à l'accélérateur Artemis. Plus de 77 000 échantillons ont ainsi été datés depuis 22 ans.

* Rattaché au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE – UMR 8212) depuis 2015.

MÉTHODOLOGIES

Le carbone 14 (^{14}C) entre dans la composition de toutes les matières carbonées vivantes et de tous les précipités de carbonate de calcium. À la mort de l'organisme, les échanges s'arrêtent et le ^{14}C absorbé tout au long de la vie commence à décroître selon une période de 5 730 ans. Cette méthode permet de dater la mort d'un être vivant ou la formation de carbonate de calcium. Sa limite actuelle est aux alentours de 50 000 ans.

↓ Spectromètre de masse couplé à l'accélérateur ARTEMIS utilisé pour la datation au carbone 14.

La datation par le carbone 14 est aussi pratiquée par l'équipe Geotrac du **Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE)** en complément d'autres méthodologies, pour replacer les événements marquants de l'histoire de la Terre et de l'évolution de l'homme dans un cadre chronologique absolu.

- La mesure de la **désintégration de l'uranium 238 en thorium 230** selon une période de 75 200 ans permet d'étudier les roches (zircons et apatites), les carbonates marins (coraux, coquilles) et continentaux (stalagmites, planchers stalagmitiques, travertins) ou encore les minéraux en contact avec l'eau, comme l'hydroxyapatite des dents et les ossements fossiles. La limite de cette méthode est aux alentours de 650 000 ans.
- La mesure de la **désintégration du potassium 40 en argon 40** sur une période de 1,25 milliard d'années permet de dater des minéraux et des roches magmatiques de tout âge (de 1 000 ans à 4 556 milliards d'années).
- Étude de l'enregistrement du champ magnétique terrestre dans certains minéraux lors de leur formation ou de leur chauffe, le **paléomagnétisme** est utilisé par l'équipe Climag du LSCE pour dater des produits archéologiques et sédimentaires ou ignés.



CONSERVATION & RESTAURATION

ARC-Nucléart

MISSIONS

Assurer la conservation et la restauration de biens culturels en matériaux organiques grâce à des installations de traitement de très grande dimension, à un irradiateur gamma et d'ateliers de restauration.

TECHNIQUES

IRRADIATION GAMMA : désinfecter et désinsectiser

Spécialité d'ARC-Nucléart[†], cette technique consiste à exposer des objets attaqués par des champignons, des insectes ou des bactéries, responsables de leur dégradation, au rayonnement gamma émis par des sources de cobalt 60. En traversant les objets, ce rayonnement a une action biocide sur les ravageurs, sans traces de produits chimiques. Des dizaines de milliers de mètres cube d'objets de notre patrimoine ont déjà bénéficié de ce traitement.

PROCÉDÉ NUCLÉART : consolider les œuvres très fragiles

Le procédé Nucléart, autre spécialité d'ARC-Nucléart, est aujourd'hui encore un traitement unique au monde pour la conservation des bois très dégradés. Il consiste à imprégner d'abord, sous vide-pression, une résine styrène-polyester dans ces objets, puis à la polymériser par exposition au rayonnement gamma. C'est une opération irréversible, donc utilisée comme « technique de la dernière chance ».

PROCÉDÉ PEG-LYO : consolider puis sécher les éléments gorgés d'eau

Utilisé pour traiter les matériaux organiques gorgés d'eau, susceptibles de se déformer, voire de se détruire, si un séchage sans précaution est appliqué, il consiste à les immerger durant plusieurs mois dans des bains contenant un mélange d'eau et de polyéthylène glycol (PEG). Une fois l'imprégnation terminée, le matériau est séché par lyophilisation.

(1) Groupement d'intérêt public (GIP) associant le CEA, le ministère de la Culture, la Ville de Grenoble et l'association proNucléart.

↓ Contrôle des bains d'imprégnation au polyéthylène glycol dans lesquels sont immergés les bois gorgés d'eau avant d'être séchés par lyophilisation.



ANALYSE

Laboratoire archéomatériaux et prévision de l'altération (Lapa)



© A. Aubert/CEA

MISSIONS

Étudier des systèmes composites constitués notamment de matériaux métalliques pour documenter les processus de fabrication et les savoir-faire anciens, utiliser les objets archéologiques comme des analogues dont la compréhension des mécanismes d'altération viendra conforter celle des matériaux du stockage.

MÉTHODOLOGIES

Analyses physico-chimiques, métallographiques micro-sondes et nanochimie.

Le Lapa est formé de la mise en commun d'équipements et de personnels du Nimbe (Nanosciences et innovation pour les matériaux, la biomédecine et l'énergie, UMR 3685 - CEA/CNRS) et de l'Institut de recherche sur les archéomatériaux (Iramat, UMR 5060) du CNRS.



Microsondes X pour l'analyse élémentaire et structurale de matériaux à l'échelle de quelques dizaines de microns jusqu'à la centaine de micromètres.

→
Cible de graphite pour la datation au carbone 14 par
spectrométrie de masse par accélérateur.

© A. Aubert/CEA

Documenter notre histoire

CARBONE 14 Le vrai du faux

Parce que Pierre Soulages (1919-2022) donnait pour titre à chacun de ses tableaux le jour de leur achèvement, son œuvre prolifique constitue une référence idéale en matière de datation. C'est donc sur cette base que les équipes du LMC14 ont daté les matériaux utilisés par l'artiste pour réaliser 25 de ses œuvres : le lin des toiles et les composants de la peinture (liant à huile de lin et pigment au blanc de plomb). Elles ont ainsi établi le temps écoulé entre le moment où le lin a été récolté et celui où le tableau a été achevé, et montré que ce délai était de trois à cinq ans dans les années cinquante et soixante avant de passer, à partir de la décennie suivante, à 10 voire 15 ans, du fait de la mutation du marché du lin. En accord avec une étude britannique sur des peintres norvégiens, cette « base de connaissances » permettra de dater plus précisément des œuvres d'époque similaire, mais à la chronologie inconnue ou contrefaite.

MULTITECHNIQUES

Les secrets de Notre-Dame

Le chantier scientifique organisé autour de la restauration de Notre-Dame de Paris (revue 7) a mobilisé au CEA des spécialistes des archéomatériaux (qualité et provenance des fers de la cathédrale) et des experts de la datation par le carbone 14 (fer, bois et blanc de plomb). Leurs travaux ont permis de repréciser les techniques de construction employées, de reconstituer les routes d'approvisionnement en matériaux, mais aussi de démontrer que certains métaux, notamment les renforts en fer, avaient déjà été utilisés une première fois. Bien avant nous, le Moyen Âge pratiquait donc le réemploi et le recyclage des matériaux !



Pour aller plus loin,
retrouvez ici la conférence
« Ce que la science révèle
de Notre-Dame de Paris ».

RAYONNEMENT X

Des alliages modèles

Comment les armures de la Renaissance ont-elles été fabriquées ? Et de quels alliages sont-elles constituées ? Les approches de l'archéologie et de l'histoire, notamment sur les sources écrites, livrent peu d'informations sur ces questions. Mais des techniques non invasives d'analyse permettent d'en savoir davantage sur la composition et la microstructure des matériaux utilisés, leur provenance et l'histoire des techniques, tout en évitant le prélèvement d'échantillons. C'est ce qu'une équipe du CEA en collaboration avec le CNRS, l'université Paris-Saclay et le musée de l'Armée a mis en œuvre sur l'installation du synchrotron Soleil¹. Les chercheurs ont étudié des éléments d'armures fabriqués au XVI^e siècle dans un même atelier de Nuremberg, ainsi que des alliages modèles, spécialement élaborés, de même composition et présentant différentes microstructures. Grâce aux rayons X produits par le synchrotron, ils ont identifié la microstructure des alliages ferreux utilisés, mais aussi mis en évidence leur hétérogénéité, suggérant l'application de traitements thermomécaniques variés sur les différents éléments d'une même armure.

(1) À la fois grand instrument pluridisciplinaire et laboratoire de recherche sous la tutelle conjointe du CNRS et du CEA, Soleil est un accélérateur d'électrons. Il produit un rayonnement synchrotron sur une large gamme de longueurs d'onde qui permet de radiographier et d'explorer la matière inerte ou vivante.

ÉTUDES DE POLYCHROMIE

Plongeon au cœur d'une œuvre

L'étude de la polychromie¹ d'une œuvre permet de documenter son histoire (foyer de production artistique ou datation) et d'orienter les choix de restauration : traitements, méthodes de nettoyage et dégagement... Elle débute par une première esquisse de stratigraphie qui peut être complétée par des analyses physico-chimiques non invasives, voire par des microprélèvements généralement pas plus grands qu'un grain de sucre. L'étude de ces écailles, enrobées dans un bloc de résine polyester, permet de distinguer l'empilement des différentes couches de polychromie appliquées, comme dans un mille-feuille. Leur analyse au microscope électronique couplé à un détecteur de rayons X vient déterminer les éléments chimiques qu'elles contiennent. Enfin, les substances organiques — comme les liants et vernis, et certains pigments —, peuvent être caractérisées par spectrométrie infrarouge.

(1) Ensemble des éléments appliqués pour orner la surface d'une œuvre : feuilles métalliques, couches de peinture et décors.

→
Statue équestre de la Charité de saint Martin avant (en haut) et après (en bas) dégagement de polychromie et restauration.



Traitements de choc pour chefs-d'œuvre en péril

IRRADIATION GAMMA

Tables centrales du plan-relief de Douai (XVIII^e siècle)

70 heures d'irradiation gamma à des doses comprises entre 4 kGy et 10 kGy... C'est le traitement appliqué par ARC-Nucléart aux deux tables centrales du plan-relief de Douai pour les débarrasser des moisissures qui s'y étaient développées après plusieurs années d'exposition dans des conditions non optimales (humidité, mauvaise isolation, climat régional peu clément). Commandé par Louis XIV et conservé au musée de la Chartreuse de Douai, ce plan-relief représente la ville avec des maquettes d'édifices réalisées en carton et papier, des arbres en bois et des surfaces végétalisées grâce à un flocage en fibres de soie (peinture à l'huile, gouache, lavis, teinture, etc.). Une prouesse pour ARC-Nucléart : les deux tables sont, à ce jour, les plus grands objets passés, sans être démontés, dans son irradiateur, pour y bénéficier du traitement le plus homogène possible, sans surexposer les parties les plus sensibles comprenant de la soie et du papier. Ce même traitement avait été appliqué à la momie de Ramsès II en 1977 (*revue*!).



© ARC-Nucléart

PEG-LYOPHILISATION

Éléments de décor de plafond, Saint-Martin-au-Val (I^{er} siècle après J.-C.)

Découverts lors de fouilles sur le site de Saint-Martin-au-Val, près de Chartres, connu comme l'un des plus grands sanctuaires de la Gaule romaine, ces éléments en bois composaient à l'origine un plafond à caissons avec un décor de formes géométriques complexe. Calcinés à des degrés plus ou moins élevés et gorgés d'eau, ils ont été consolidés par un traitement au PEG, séchés par lyophilisation à ARC-Nucléart, puis restaurés avec la plus grande précaution. Les plafonds romains et leurs décors sont, en effet, très rarement retrouvés en contexte archéologique. D'autres collections avaient déjà bénéficié du même traitement : les pirogues découvertes sur le site de Bercy à Paris, les vestiges prélevés sur des épaves corsaires échouées au large de Saint-Malo, ainsi que plusieurs objets remontés de l'épave du Titanic (valises en cuir, clarinettes, décors en linoléum...).

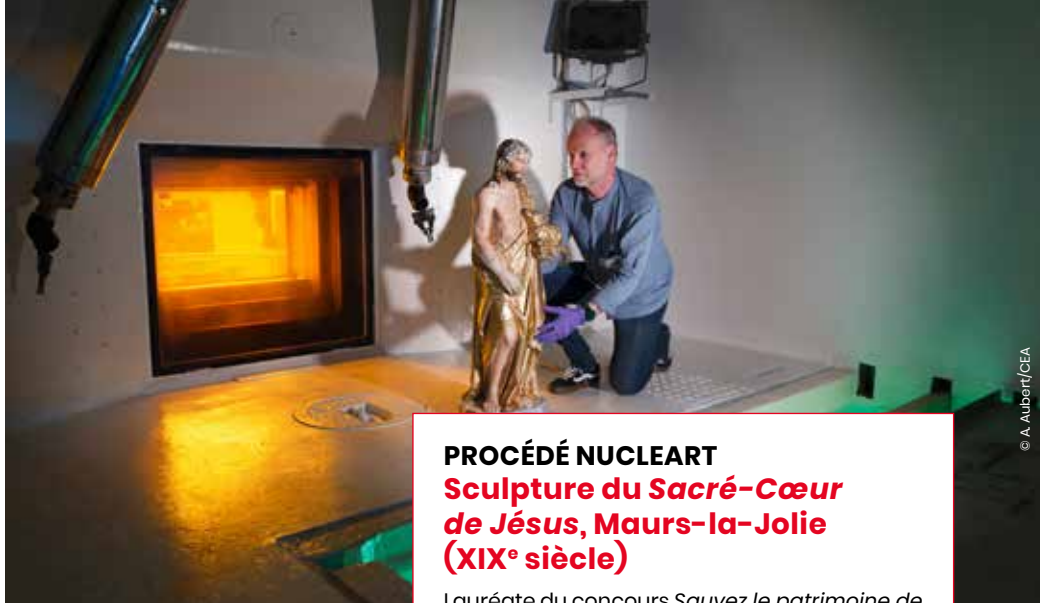


Après imprégnation, les bois archéologiques gorgés d'eau sont séchés par lyophilisation pour préserver au mieux leur forme et leur volume.



© A. Aubert/CEA

Intérieur de la cellule d'irradiation où sont positionnés les objets à désinfecter ou à désinsectiser par irradiation gamma.



© A. Aubert / CEA

PROCÉDÉ SOL-GEL

Régime innovant pour objets malades

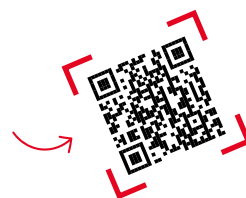
Comment protéger les cuivres anciens très corrodés sans altérer leur morphologie et leur esthétique ? Si des traitements classiques existent comme le nettoyage par micro-sablage puis l'application d'une cire hydrophobe, une alternative est explorée au CEA : l'utilisation d'un procédé sol-gel, à l'image de ceux qui sont employés dans l'industrie par exemple pour le traitement de surface du verre (films anti-UV ou antirayures). Il s'agit ici de faire pénétrer, dans la porosité de la couche corrodée de l'objet, une solution à base de silice et d'acides carboxyliques qui, en se solidifiant peu à peu, forme un film de protection. Des tests ont été menés sur des échantillons de la toiture de l'église Saint-Martin de Metz ; d'autres le seront bientôt sur le buste du député français Émile Barrault (1799-1869) au cimetière parisien du Père-Lachaise. Couplés à l'analyse des interactions entre les éléments de corrosion et le produit appliqué, ceux-ci permettront d'affiner la formulation du sol-gel, donc le traitement.

PROCÉDÉ NUCLEART

Sculpture du *Sacré-Cœur de Jésus*, Maurs-la-Jolie (XIX^e siècle)

Lauréate du concours *Sauvez le patrimoine de votre commune* organisé tous les ans par le CEA et ARC-Nucléart en partenariat avec l'AMF, cette sculpture, ravagée par des insectes xylophages, a été désinsectisée par exposition au rayonnement gamma. Puis, sur la base des observations réalisées sur l'œuvre (technique de taille, localisation et inventaire des assemblages, identification des interventions anciennes), le *Sacré-Cœur de Jésus* a été consolidé avec le procédé Nucléart, qui utilise l'effet radiochimique du rayonnement gamma. Objectif : permettre la présentation de la sculpture dans de bonnes conditions, sans aucun risque pour l'œuvre ou le public.

Pour en savoir plus
sur le concours
Sauvez le patrimoine
de votre commune.



PEG-LYOPHILISATION

Collections du musée départemental de l'Arles antique (I^{er} siècle après J.-C.)

Différents objets issus de fouilles menées à Arles, et aujourd'hui présentés au musée départemental de l'Arles antique, ont été traités par ARC-Nucléart. Parmi les plus emblématiques, l'épave du chaland gallo-romain *Arles Rhône 3*, aujourd'hui classée « trésor national ». Longue de 31 mètres et découpée en dix tronçons, elle a bénéficié du procédé PEG-lyophilisation pour être stabilisée avant sa restauration, son réassemblage et sa mise sur support en situation de navigation. Une opération rendue possible par l'un des points forts d'ARC-Nucléart : ses installations, dont les dimensions permettent d'effectuer des traitements d'ensembles ou d'objets de grand format, notamment des bassins d'imprégnation de tailles variées et trois lyophilisateurs, dont deux de grande capacité, pour le séchage d'objets de tous types.



© ARC-Nucléart

Croiser les savoirs



© ARC-Nucléart

Le CEA et le ministère de la Culture cultivent des liens étroits au sein d'ARC-Nucléart, structure unique en France pour la recherche et la conservation du patrimoine. Les explications d'Amy Benadiba, conservatrice du patrimoine et directrice scientifique et culturelle d'ARC-Nucléart.

Quels sont les liens entre le ministère de la Culture et ARC-Nucléart ?

Amy Benadiba — Les liens entre les acteurs du patrimoine et ARC-Nucléart se sont tissés dès sa création. Tout a commencé par la rénovation du parquet de l'hôtel du connétable de Lesdiguières à Grenoble, auquel a été appliqué le premier traitement Nucléart à vocation patrimoniale, avec le soutien des pouvoirs publics. Ces liens se sont renforcés au fil du temps, à mesure du développement de l'activité d'ARC-Nucléart, et ont été formalisés en 2002 à la faveur des évolutions de la loi sur les collections et la restauration dans le code du patrimoine. Le ministère de la Culture siège au conseil d'administration du GIP ARC-Nucléart et met deux salariés à disposition – un conservateur et un biologiste. Il soutient également l'activité par l'attribution de subventions.

Quel est précisément votre rôle à ARC-Nucléart ?

A. B. — Comme des collections publiques y sont prises en charge, le contrôle scientifique et technique de l'État est nécessaire, et c'est ma mission principale. Je travaille aussi à faciliter les échanges entre les scientifiques et les conservateurs de musées ou les communes qui nous confient leurs collections. Il s'agit de rassurer, d'explicitier les traitements pour que les uns comprennent les attendus des autres et que le travail soit effectué en confiance, dans l'intérêt de chaque objet.

Quels apports et bénéfices en tirez-vous ?

A. B. — Grâce à ARC-Nucléart, le patrimoine bénéficie de la mise à disposition d'une expertise et d'installations uniques pour œuvrer à sa conservation ! Les œuvres qui y sont « soignées » ne pourraient pas l'être sans ses technologies et ses traitements. C'est aussi une manière de montrer l'excellence française dans le domaine, grâce au croisement entre sciences et patrimoine depuis plus de 50 ans.

Quels sont les enjeux à venir ?

A. B. — Le principal concerne le traitement des archives infestées. Lorsqu'elles ont été conservées dans des conditions peu adaptées ou subi de lourds sinistres, comme à Fontainebleau en 2014 avec l'inondation de plus d'un millier de mètres cubes de documents publics, l'irradiation s'avère une solution très efficace, pouvant aujourd'hui représenter la seule alternative de traitement envisageable. Mais il reste du chemin à parcourir pour faire mieux connaître ces techniques auprès des professionnels du patrimoine et montrer que l'exposition au rayonnement gamma est une solution adaptée à une grande diversité de collections. ●

Enquête de science

Les enquêteurs de l'Office central de lutte contre le trafic des biens culturels (OCBC), de la police judiciaire, traquent sans relâche voleurs, faussaires et autres pillards ou criminels. Une de leurs enquêtes les a conduits à solliciter l'expertise du CEA. Le récit d'Estelle Stamm**, cheffe adjointe de l'OCBC.**

Que pouvez-vous nous dire de l'affaire pour laquelle le CEA vous a apporté son aide ?

Estelle Stamm — Il s'agit d'une affaire de grande ampleur, qui n'a pas encore été jugée. Tout commence en 2019 par un dépôt de plainte consécutif à l'achat d'un faux tableau. L'enquête va mener jusqu'à un entrepôt où sont stockés quelque 2 500 tableaux signés de différents peintres, connus ou moins connus.

Comment procédez-vous habituellement pour authentifier un faux ?

E. S. — Une analyse artistique, avec des experts ou des comités d'experts quand ils existent, est d'abord réalisée pour déterminer si le style et la composition de l'œuvre, tableau ou objet, correspondent bien à ceux de l'artiste. Elle est complétée par une analyse technique, cette fois avec des conservateurs ou des ébénistes par exemple, pour vérifier la compatibilité des méthodes et des matériaux utilisés avec l'époque de sa réalisation.

Et dans le cas qui nous occupe ?

E. S. — Les analyses, artistique et technique, avaient mis en évidence des anomalies, mais sans les étayer complè-

tement. Il fallait donc aller plus loin pour établir objectivement que ces tableaux étaient des faux.

C'est donc ici qu'intervient le CEA ?

E. S. — L'OCBC a effectivement fait appel à l'expertise en datation du CEA. Les équipes de son laboratoire de mesure du carbone 14 ont prélevé des échantillons de châssis, de toiles et de pigments sur plusieurs tableaux censés avoir été peints au début du XX^e siècle. Leurs conclusions ont été sans appel : le lin des toiles ayant été fabriqué bien après la Seconde Guerre mondiale, il était impossible que ces tableaux datent d'avant 1940 ! Ce résultat a définitivement validé nos constatations artistiques et techniques.

Quels enseignements en tirez-vous ?

E. S. — Dans un contexte où faux et contrefaçons envahissent de plus en plus le marché de l'art, il semble désormais indispensable, dans les affaires très ardues, de recourir à une analyse scientifique des œuvres sur lesquelles pèsent de fortes suspicions. De même, il est important que les enquêteurs continuent à se former aux techniques les plus poussées. ●



© DNF/J/OCBC

L'OCBC travaille sur des biens culturels très variés qui nécessitent pour certains le recours à des technologies de pointe dans le cadre d'expertises scientifiques. La collaboration avec des laboratoires d'analyse tels que le CEA est donc précieuse. »

Estelle Stamm

Au service du patrimoine

Créé en 1975, l'OCBC est l'un des rares offices de police spécialisés dans la lutte contre le trafic de biens culturels dans le monde. Ses équipes se composent d'enquêteurs, issus en nombre égal de la police et de la gendarmerie nationales, et de personnels administratifs et contractuels. Leurs missions concernent le vol et le recel de biens culturels, les faux et contrefaçons, le pillage sur le territoire national et à l'international, mais également le blanchiment d'œuvres et d'argent. L'OCBC est organisé en deux pôles, l'un opérationnel avec trois groupes d'enquête et l'autre stratégique pour le renseignement criminel et les relations extérieures. Il compte également plus de 80 correspondants en région qu'il contribue à former régulièrement, de même que les professionnels du marché de l'art et les magistrats. Enfin, l'OCBC représente la France dans les grandes institutions européennes et internationales du domaine.

Objets d'**hier** pour matériaux de **demain**

Si l'étude des matériaux archéologiques permet de mieux comprendre les sociétés du passé, le CEA est leader d'un courant de recherche qui vise à se servir de ces objets pour comprendre le comportement des matériaux dans le futur, notamment prévoir de manière fiable leur altération.

La conception de matériaux dont on doit garantir les propriétés sur de grandes échelles de temps, dépassant parfois largement plusieurs générations humaines, est un des défis actuels de l'ingénierie et de la science. Que ce soit pour les ouvrages d'art ou les bâtiments industriels (ponts, centrales nucléaires) en acier ou en béton armé, dont on désire allonger la durée de vie, ou pour le stockage ultime des déchets nucléaires en couches géologiques profondes, dont la sûreté doit être garantie sur plusieurs dizaines de milliers d'années, les ingénieurs doivent dimensionner les ouvrages et les chercheurs prédire le comportement des matériaux sous certaines contraintes (mécaniques, chimiques, radiologiques) sur des durées inaccessibles à l'expérimentation en conditions réelles.

Il s'agit d'un défi majeur qu'un regard vers le passé peut aider à relever. C'est l'approche mise en place au CEA, en collaboration avec l'Andra et le CNRS : l'observation de verres et de métaux produits par l'homme il y a plusieurs centaines ou milliers d'années, afin d'y trouver des éléments de comparaison, voire de validation. « *C'est une méthodologie comparable à celle des climatologues* », souligne Stéphane Gin, chercheur au Laboratoire d'étude des matériaux en environnement complexe (institut Isec du CEA). « *Nous rassemblons le meilleur de la connaissance dans nos modèles, les confrontons aux objets du passé pour être à même de prévoir l'avenir avec la meilleure précision possible. C'est une étape indispensable pour orienter les choix techniques et les décisions politiques.* »

↓ Verre de l'époque romaine retrouvé près de l'île des Embiez en méditerranée.

Des passerelles avec les verres nucléaires

Ainsi, des blocs de verre antique provenant d'une épave vieille de 1 800 ans découverte près de l'île des Embiez (Var) en méditerranée ont fait l'objet de travaux détaillés en raison de leur analogie morphologique avec les verres nucléaires et de leur environnement connu et stable, permettant de limiter les sources d'incertitudes dans la modélisation. L'analyse des mécanismes d'altération de ces verres durant leur séjour dans l'eau de mer a permis d'établir des passerelles avec les verres nucléaires en stockage géologique. D'autres analo-



© CEA

gues sont également utilisés pour renforcer la robustesse des modèles. Par exemple, les verres basaltiques dont on retrouve des échantillons datant de plusieurs millions d'années, ou encore les vitraux de cathédrale dont on mesure la vitesse d'altération pour développer ensuite des modèles transposables aux verres nucléaires.

Proposer des modèles fiables

Mais ces mécanismes d'altération peuvent aussi être étudiés dans un environnement plus proche de celui attendu pour les verres nucléaires. Site archéologique datant du XVI^e siècle, Glinet est un ancien lieu de production sidérurgique. Du fait de la présence d'une retenue d'eau liée à la présence d'installations hydrauliques, les objets ferreux enfouis après l'abandon de la fabrique se sont corrodés dans un milieu constamment saturé en eau et appauvri en oxygène. L'analyse de prélèvements d'eau au niveau des zones d'enfouissement des objets a révélé des compositions très proches des conditions anoxiques (sans oxygène) prévalant après la fermeture des alvéoles de stockage des déchets nucléaires en site géologique profond. L'étude approfondie des matériaux extraits de ce site, de l'échelle nanométrique à celle de l'objet macroscopique, permet de proposer des modèles phénoménologiques fiables pour prévoir les comportements sur la longue durée.

→ Fouilles de la forge du site de Glinet.



© D. Arribet-Deroin CNRS



Nous confrontons nos modèles aux objets du passé pour être à même de prévoir l'avenir avec la meilleure précision possible. »

Stéphane Gin, chercheur au Laboratoire d'étude des matériaux en environnement complexe (institut Isec du CEA).

De même, un certain nombre de paramètres physiques utilisés dans les modèles descriptifs (porosité, coefficient de diffusion, conductivité locale, perméabilité, etc.) peuvent être déterminés sur les analogues et réinjectés dans les modèles. Il est également possible de remettre les objets archéologiques en corrosion, mais cette fois en laboratoire et dans des milieux contrôlés. Ceci permet, par exemple, de tracer isotopiquement les réactions de la corrosion (en remplaçant les agents à l'origine de la corrosion, soit l'oxygène 16 par de l'oxygène 18 et l'hydrogène de l'eau par du deutérium) pour suivre avec précision le processus de corrosion. Un lien entre passé et futur qui mobilise les savoir-faire nucléaires du CEA. ●

Traquer les AGENTS PATHOGÈNES

Implanté à Marcoule, le Laboratoire innovations technologiques pour la détection et le diagnostic (Li2D) développe des dispositifs de caractérisation des microbiotes ainsi que de détection d'agents pathogènes et de marqueurs, en réponse aux enjeux posés par les pathologies infectieuses. Une expertise qu'il met aussi au service de l'Histoire.

Reportage © A. Aubert/CEA



1

Améliorer la détection des agents pathogènes. Les travaux menés dans ce laboratoire, de niveau de biosécurité 3, ont permis de développer des tests immunologiques ou immuno-enzymatiques, par exemple pour le diagnostic rapide sur le terrain de la maladie à virus Ebola.



2

Préparer des échantillons biologiques en conditions stériles. Dans la hotte, un automate robotisé permet d'ajouter des volumes précis de milieu de culture et de multiplier les conditions à tester, tout en assurant une reproductibilité optimale.

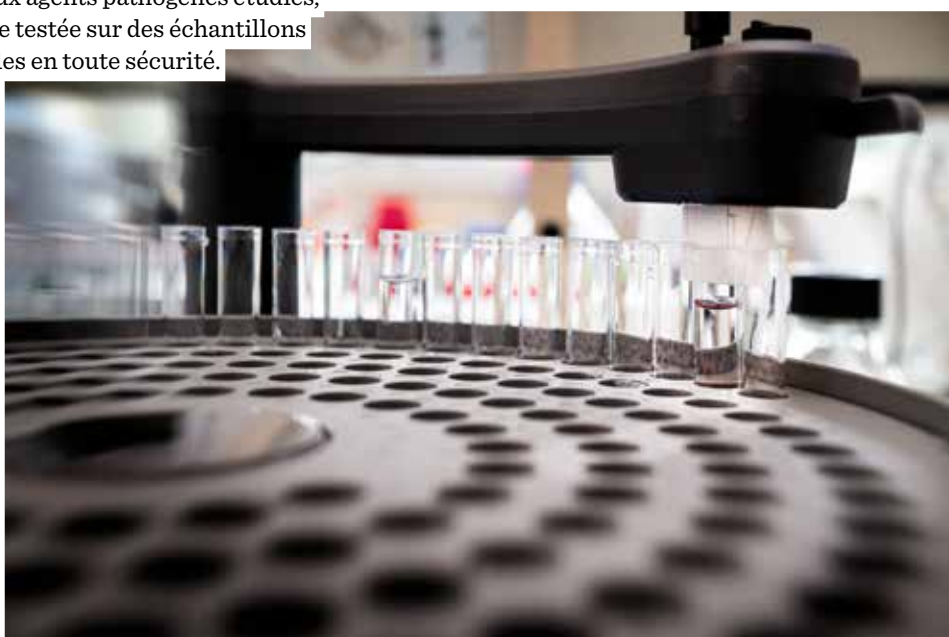


3

Déterminer la présence et le nombre d'agents pathogènes dans un échantillon biologique, par PCR quantitative ciblée. Grâce à cette méthode moléculaire, des tests de détection de très hautes sensibilité et spécificité sont développés jusqu'au stade préindustriel.

4

Purification d'anticorps par chromatographie liquide. L'efficacité de ces anticorps, spécifiquement adaptés aux agents pathogènes étudiés, est ensuite testée sur des échantillons de contrôles en toute sécurité.





5

Spectrométrie de masse de dernière génération.

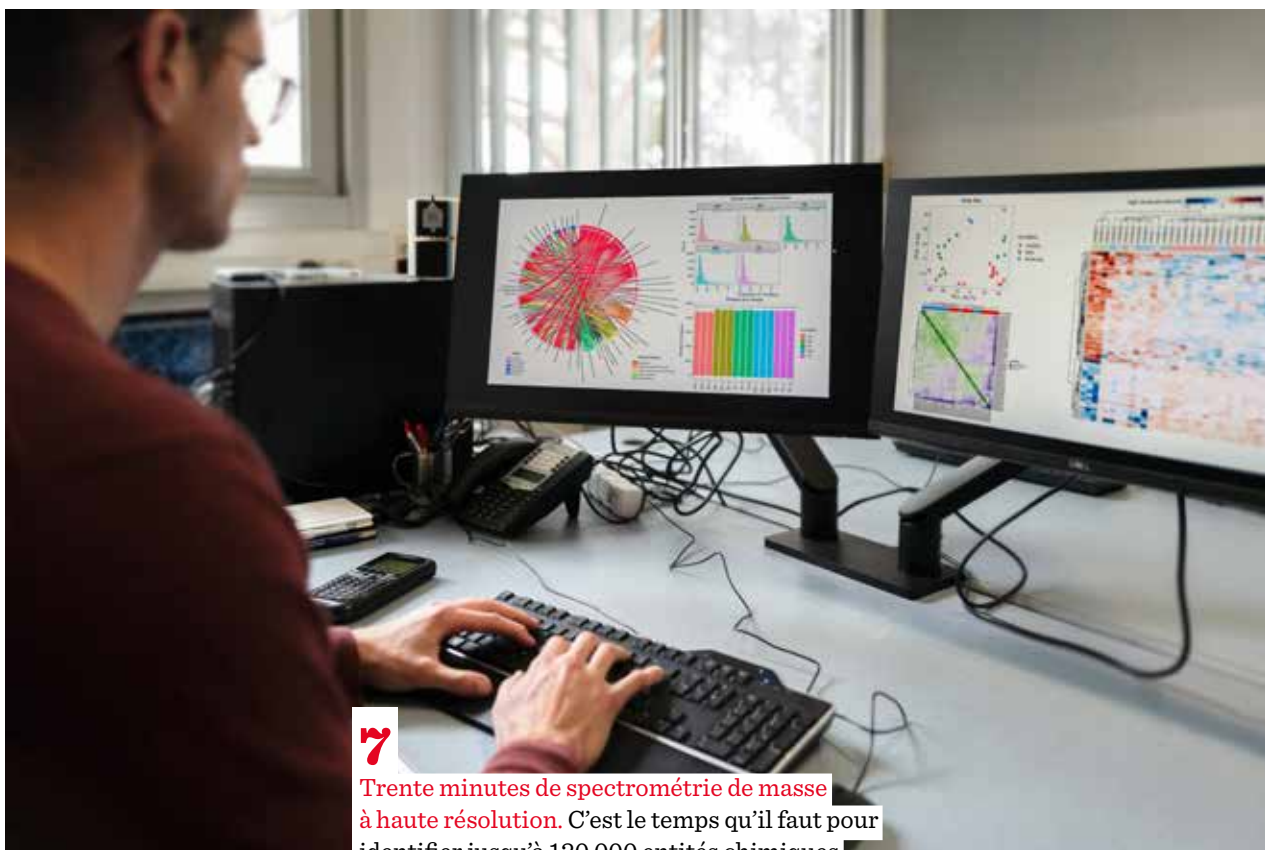
Dans cette salle, les opérateurs utilisent une instrumentation ultrapuissante pour l'analyse de protéines. Objectif : mieux comprendre le fonctionnement des systèmes biologiques, découvrir de nouveaux biomarqueurs de pathologies et cartographier les composants d'agents pathogènes.



6

Couplage entre chromatographie haute performance et spectrométrie de masse haute résolution.

La combinaison des deux techniques permet d'obtenir une sensibilité optimale pour l'identification et la quantification de protéines.



7

Trente minutes de spectrométrie de masse à haute résolution. C'est le temps qu'il faut pour identifier jusqu'à 120 000 entités chimiques et 38 000 protéines différentes. Pour comparer ces importants jeux de données obtenus sur des cohortes d'échantillons, l'IA est devenue incontournable.

8

Contribuer à l'Histoire. C'est cette science des protéines (ou protéomique) qui conduit le Li2D à réaliser des analyses sur des échantillons anciens, notamment pour le compte du médecin légiste et archéo-anthropologue Philippe Charlier (à gauche). Ici sur la composition du dernier repas de Napoléon à Sainte-Hélène.



5

© CAPA / Matcha Prod / France Télévisions / Histoire TV



© L. Godart/CEA

Diagnostiquer et soigner par la médecine nucléaire

DOSSIER

02

Plus d'un million de TEP-Scan ont été réalisés en France en 2024, soit deux fois plus qu'il y a seulement cinq ans. Les scintigraphies dépassent elles aussi le million par an. C'est dire si ces examens sont devenus courants dans la prise en charge médicale des Français. Car ils ont révolutionné la précocité et la précision du dépistage de maladies comme les cancers.

Ces techniques sont au cœur de la médecine nucléaire, utilisée aussi bien pour le diagnostic qu'en thérapie. Le CEA, acteur historique à l'origine de cette discipline en France, a largement accompagné sa diffusion dans les hôpitaux. Il reste encore aujourd'hui un partenaire stratégique pour la filière, tant pour la production de radioisotopes qu'en recherche clinique. Des activités concentrées autour de deux lieux emblématiques : à Orsay, au Service hospitalier Frédéric Joliot, et sur le centre CEA de Cadarache, où se construit le réacteur Jules Horowitz.

← Réalisation d'un examen d'imagerie TEP/IRM au Service hospitalier Frédéric Joliot.

Le B.A.BA de la médecine nucléaire

La médecine nucléaire ?

Spécialité médicale utilisant la radioactivité à des fins diagnostiques (par l'imagerie) ou thérapeutiques (par exemple contre les cancers), voire théranostiques (couplant les deux aspects), *via* des médicaments **radiopharmaceutiques** injectés, que nous appellerons par la suite « radiopharmaceutiques » pour faciliter la lecture.

Un radiopharmaceutique ?

Biomolécule sur laquelle un élément radioactif (un radioisotope, aussi appelé radionucléide) à vie courte a été greffé. Elle est choisie pour sa capacité à se fixer sur une cible que l'on cherche à observer ou à traiter, comme un organe (par exemple, le cerveau) ou un tissu particulier du corps humain. Parfois, le radioisotope seul fait office de radiopharmaceutique, comme l'iode 123, 131 ou encore le radium 223.

Comment ça marche ?

Guidé par sa biomolécule, le radiopharmaceutique atteint la zone à examiner et se concentre dans les zones d'activité métabolique accrue, souvent synonymes de tumeur ou de tissu malade.

Diagnostic : les doses administrées au patient sont très faibles afin de l'exposer le moins possible à la radioactivité. Les rayonnements émis à l'extérieur du corps sont détectés par des appareils qui restituent des images de la distribution du traceur dans l'organisme et renseignent sur le fonctionnement des organes, permettant ainsi de déceler des maladies.

Thérapie : les doses administrées sont plus élevées. Les rayonnements émis, ici plus énergétiques et de courte portée, sont utilisés comme une arme, irradiant les cellules ciblées (par exemple cancéreuses) pour altérer leur ADN, les empêcher de se multiplier et finalement les détruire, tout en limitant les dommages aux tissus sains environnants.

Quels sont les moyens d'imagerie les plus utilisés ?

Les radioisotopes utilisés en diagnostic émettent, selon leur nature, des rayonnements gamma ou des positons¹. Pour les détecter, il existe deux voies principales.

La scintigraphie, également appelée tomographie par émission monophotonique (TEMP), qui utilise des caméras capables de détecter les rayonnements gamma.

La tomographie par émission de positons (TEP) adaptée à la détection des positons. En hôpital, le standard de base est aujourd'hui le TEP-Scan, qui couple caméra TEP et scanner à rayons X, offrant une résolution des images et une sensibilité de détection très supérieures à la scintigraphie.

(1) Antiparticule de l'électron, porteuse d'une charge positive, qui se désintègre en produisant deux rayonnements gamma.

Quelles maladies ?

Diagnostic : les techniques de médecine nucléaire sont des examens courants pour le diagnostic de nombreuses maladies (cancers, maladies infectieuses, inflammatoires, cardiaques, etc.) affectant la plupart des organes.

Thérapie : elles sont plus rares mais en plein essor pour combattre les maladies. Certains cancers (thyroïde, prostate, tumeurs neuroendocrines) ou encore l'hyperthyroïdie en bénéficient déjà.

↓ Vue aérienne du réacteur Jules Horowitz, qui produira des radioisotopes médicaux d'ici une dizaine d'années.

Quels sont les radioisotopes les plus utilisés ?

Le technétium 99m est le radioélément le plus utilisé pour le diagnostic. Représentant à lui seul 80 % à 90 % des scintigraphies, il permet de réaliser des examens de pratiquement tous les organes du corps grâce à la possibilité de le greffer sur de très nombreuses biomolécules.

Le fluor 18, associé à un analogue du glucose, est utilisé dans 95 % des examens TEP-Scan. Sa fixation dans l'organisme, proportionnelle au taux de consommation du glucose, est un excellent marqueur pour le diagnostic des cancers.

L'iode 131 est prescrit à la fois pour du diagnostic en scintigraphie et pour traiter l'hyperactivité et le cancer de la thyroïde, depuis les années 1940.

La gamme des radioisotopes utilisés ou testés en essais cliniques est en réalité très vaste, pour les diagnostics comme pour les thérapies.

- Diagnostic : carbone 11, gallium 68, cuivre 64, iode 123, etc.
- Thérapie : radium 223, actinium 225, lutétium 177, plomb 212, yttrium 90, holmium 166, etc.

Comment les fabrique-t-on ?

Deux méthodes sont principalement utilisées. Complémentaires, elles ne produisent pas les mêmes radioisotopes.

Le cyclotron médical est un accélérateur circulaire. Il permet notamment de produire des radioisotopes émetteurs de positons. Il en existe environ 1 200 dans le monde, dont une trentaine en France exploités par des industriels de la radiopharmacie (pour les 3/4 d'entre eux) et quelques groupements, associant centres de recherche (dont le CEA) ou universités, et hôpitaux.

Le réacteur nucléaire produit des radioisotopes émetteurs de rayonnements gamma pour les scintigraphies – il s'agit pour l'essentiel du molybdène 99 qui donne naissance, par décroissance naturelle, au technétium 99m – et d'autres, émetteurs de rayonnements bêta ou alpha, pour les thérapies. On en compte une poignée dans le monde, dont 4 en Europe.



Le parcours du radiopharmaceutique

**Des étapes, il en faut pour fabriquer un radiopharmaceutique !
Et aussi des installations complexes : réacteur nucléaire
ou cyclotron, enceintes blindées, laboratoires de radiochimie.
Autant d'équipements que l'on retrouve au CEA.
Suivez le guide !**

1. Produire

Fabrication du radioisotope artificiel en cyclotron ou en réacteur nucléaire, par l'envoi de rayonnements (respectivement des protons ou des neutrons) sur une cible (uranium, radium, etc.).



2. Purifier

Extraction et purification pour obtenir un radioisotope à usage médical, pur à 99%. Ces étapes de radiochimie se déroulent en enceintes blindées pour protéger l'opérateur de tout risque d'irradiation.



3. Greffer

Association du radioisotope à une molécule de ciblage pour former le radiopharmaceutique, également en enceinte blindée.



4. Qualifier et tester

Essais précliniques, puis cliniques, pour valider la pertinence et l'usage de chaque radiopharmaceutique.



5. Diagnostiquer et soigner

Utilisation du radiopharmaceutique en milieu hospitalier pour le **diagnostic** ou le **traitement de maladies**, après l'obtention de l'AMM (autorisation de mise sur le marché).

UNE COURSE CONTRE LA MONTRE



Les radioisotopes à usage médical partagent un point commun : ils sont tous choisis pour leur très courte durée de vie, afin de réduire la dose de rayonnement délivrée au patient. Le technétium 99m, par exemple, a une demi-vie de six heures, le fluor 18, 2 heures, et le carbone 11, 20 minutes ! Toute la chaîne de fabrication, depuis la production du radioisotope jusqu'au patient, est donc une course contre la montre !



© P. Stroppa/CEA



SHFJ

De la recherche au patient

↑ L'un des deux cyclotrons médicaux du SHFJ.

Les équipes du SHFJ, le Service hospitalier Frédéric Joliot, développent depuis près de 70 ans des radiopharmaceutiques innovants et les outils d'imagerie associés. Objectif : améliorer les diagnostics et traitements, notamment des cancers et des maladies neurologiques.

Dans le hall d'accueil, brancardiers, ambulanciers et patients côtoient les chercheurs se faufilant pour rejoindre leurs bureaux. Le SHFJ est un lieu original : il est à la fois le service de médecine nucléaire du groupe hospitalier Nord-Essonne, totalisant plus de 3 500 examens par an, TEP et scintigraphies confondues, et un centre de R&D¹. Ici, la recherche se conçoit au contact quotidien des médecins et au service des patients depuis sa création en 1958. « *La médecine nucléaire française s'est construite au SHFJ*, relate Vincent Lebon, directeur de BioMaps. *C'est ici, dans les années 1960 et*

1970, que les premières techniques françaises d'imagerie fonctionnelle ont été développées et mises au point. D'abord la scintigraphie, avec l'iode et le technétium, puis la TEP avec l'utilisation de radiopharmaceutiques émetteurs de positons. La diffusion vers la médecine et l'hôpital a été massive, et nous l'avons accompagnée. » C'est également en ces lieux que la totalité de la production francilienne de ¹⁸FDG, un analogue du glucose marqué au fluor 18 qui a révolutionné le diagnostic des cancers par la TEP, a été réalisée, de 1998 à 2008, laissant aux industriels le temps d'investir dans des cyclotrons et de prendre le relais. « *Ce fut notre seule exception industrielle*, sourit Bertrand Kuhnast, directeur du SHFJ, *car notre cœur de métier, c'est bien la R&D. Ici, nous inventons des radiopharmaceutiques innovants pour l'imagerie diagnostique et plus récemment, pour la thérapie. Nous travaillons sur toute la chaîne, depuis leur mise au point jusqu'au transfert industriel, en passant par la recherche préclinique et les essais cliniques que nous alimentons. C'est une infrastructure unique en France.* »

⁽¹⁾ La R&D au SHFJ est conduite par les chercheurs de l'unité mixte de recherche BioMaps, dont les tutelles sont le CEA, l'université Paris-Saclay, le CNRS et l'Inserm.

Un portfolio d'une quinzaine de radiopharmaceutiques

Telles de grosses bonbonnes, deux cyclotrons produisent les radioisotopes demandés par les équipes, le plus souvent du fluor 18 et du carbone 11 pour l'imagerie TEP. « *Même s'il nous arrive d'en acheter à l'extérieur, par exemple du zirconium 89 et du cuivre 64 pour l'imagerie, et du lutétium 177 pour la thérapie* », confie Bertrand Kuhnast. Non loin de là se trouvent les enceintes blindées pour la radiochimie. C'est là que les opérateurs fabriquent les radiopharmaceutiques qui seront utilisés en études précliniques ou cliniques (chez l'humain) selon l'état d'avancement des projets. « *Au total, nous disposons d'un portfolio d'une quinzaine de molécules marquées au fluor 18 ou au carbone 11, validées pour les essais cliniques en imagerie TEP, affirme l'expert. Et nous travaillons à flux tendu. Le fluor 18, c'est 2 heures de demi-vie², et le carbone 11, 20 minutes !* » Autrement dit, le patient n'est jamais loin, dans une pièce attenante.

Pour les diagnostics de soins courants, les praticiens hospitaliers recourent à des molécules et protocoles déjà bien rodés, comme le ¹⁸F-DG devenu la référence pour localiser les tumeurs, ou encore la ¹⁸F-fluorodopa (Dopa marquée au fluor 18) pour la maladie de Parkinson. Pour autant, les chercheurs imaginent et préparent des solutions plus rapides ou plus précises, grâce à de nouveaux radiopharmaceutiques qui iront cibler telle molécule ou tel récepteur particulier dans l'organisme. Ainsi en est-il du LBT-999, une molécule marquée au fluor 18 pressentie pour le diagnostic de la maladie de Parkinson, qui propose une voie alternative à celle apportée par la ¹⁸F-fluorodopa. « *Nous en avons produit une centaine de doses, entre 2022 et 2024, dans le cadre d'un essai clinique de phase III mené par Zionexa (GE HealthCare), avec la perspective de déposer une AMM³* », chiffre Bertrand Kuhnast. Avantage par rapport à

son autre concurrent le Datscan (marqué à l'iode 123) : un examen plus rapide, et donc plus confortable pour le patient. « *Et, précise-t-il, nous sommes copropriétaires du brevet.* »

Aller vers la radiothérapie interne vectorisée

L'autre voie de recherche est celle de la « radiothérapie interne vectorisée », en plein essor depuis 10 à 15 ans. Le CEA est certes moins identifié dans ce domaine que sur l'imagerie, mais l'activité monte en puissance, à la fois au SHFJ et du côté du futur réacteur Jules Horowitz, qui envisage de produire pour la communauté européenne des radioisotopes pour cet usage (voir p. 40). Jusque-là, les thérapies s'appuyaient essentiellement sur des radioisotopes seuls, tels l'iode 131 ou le radium 223 qui se fixent respectivement sur la thyroïde ou les os. Désormais, et de plus en plus, ces radioisotopes sont greffés sur une molécule « de guidage » afin d'atteindre une cible précise au niveau de la tumeur, pour y délivrer la radioactivité sans abîmer les tissus environnants (voir p. 34). Aujourd'hui, seuls deux médicaments sont sur le marché, utilisant le lutétium 177 pour les tumeurs



© L. Godard/CEA

↑ Laboratoire de radiochimie du SHFJ, avec ses enceintes blindées.

- (2) Demi-vie : temps mis par une substance radioactive pour perdre la moitié de sa radioactivité.
- (3) Autorisation de mise sur le marché.
- (4) La spécificité des anticorps réside dans leur capacité à atteindre une ou plusieurs cibles avec une très grande précision, ce qui les classe parmi les outils les plus puissants de la médecine moderne.
- (5) Seule la TEP fait partie des moyens d'imagerie dite nucléaire.



Et demain, Pasrel

Après l'injection du radiopharmaceutique au patient, direction la caméra TEP pour l'acquisition de l'image de sa distribution dans l'organisme, en lien avec le fonctionnement des organes. Expert en imagerie, le SHFJ s'appuie pour ses recherches sur un parc ultramoderne : TEP, mais aussi IRM, scanner à rayons X et échographique (ultrasons)⁵. « Notre but est de constamment améliorer la sensibilité de la détection de la radioactivité pour limiter les doses injectées aux patients, tout en garantissant des images optimales », affirme Bertrand Kuhnast. À cette fin, deux pistes de R&D sont privilégiées. D'une part, le développement de nouveaux capteurs pour les photons émis par les émetteurs de positons, en jouant à la fois sur les matériaux et sur l'intégration d'IA. D'autre part, une recherche aval sur le développement des algorithmes pour l'interprétation et la quantification des images, là aussi grâce à l'IA. Avec à terme et dans l'idéal, des transferts industriels vers les grands noms du secteur, comme Philips, GE HealthCare ou Siemens Healthineers.

Enfin, la grande tendance, c'est le couplage de plusieurs modalités d'imagerie, pour obtenir des avantages diagnostiques supplémentaires et de meilleurs pronostics sur les réponses aux traitements. Si la TEP-scanner X est aujourd'hui le standard dans les hôpitaux, la TEP-IRM et la TEP-ultrasons sont encore en phase de recherche et ici explorées.

Pour l'avenir, les équipes s'apprêtent à migrer à quelques kilomètres de là, sur le plateau de Saclay, pour s'adosser au tout nouvel hôpital Paris-Saclay, ouvert depuis la mi-2024. Un changement d'échelle programmé vers 2029 et porté par le projet Pasrel, que pilote Vincent Lebon : « L'idée sous-jacente est d'inclure davantage les industriels, en synergie avec la recherche et l'hôpital, pour que les innovations thérapeutiques sur l'imagerie et la radiothérapie interne vectorisée puissent être déployées plus rapidement auprès du patient. Pasrel, c'est un SHFJ enrichi pour répondre aux attentes sociétales dans le domaine de la médecine de précision. » ●

neuroendocrines et de la prostate. De nombreux essais cliniques sont en cours dans le monde, testant d'autres isotopes, comme l'actinium 225 ou le plomb 212. « Au SHFJ, nous travaillons essentiellement sur des anticorps⁴ marqués au lutétium 177, et nous envisageons d'utiliser l'actinium 225 », indique Bertrand Kuhnast.

En parallèle à cette recherche thérapeutique, il existe un autre usage des radiopharmaceutiques, celui de la compréhension des mécanismes biologiques. « Il s'agit alors de comprendre la pathologie », explique Bertrand Kuhnast. Démarche que le DPA-714 illustre parfaitement. Ce nom de code désigne une molécule marquée au fluor 18 fabriquée par le SHFJ pour étudier le rôle, encore très mal connu, de l'inflammation du tissu cérébral dans un grand nombre de pathologies neurologiques et neurodégénératives (Alzheimer, Parkinson, épilepsie, sclérose en plaques, etc.). « Avec nos partenaires, nous avons construit toute la chaîne de valeur du DPA-714, détaille-t-il, de l'élaboration du radiopharmaceutique à sa production, jusqu'à sa livraison à la dizaine d'hôpitaux partenaires des essais cliniques, en passant par sa validation en essais pré-cliniques. Entre 600 et 800 doses ont été fabriquées ici. » Au total, entre les études en recherche fondamentale pour la compréhension de pathologies et celles à visée diagnostique, le SHFJ est impliqué dans une quinzaine d'essais cliniques.



Pour en savoir plus sur la médecine nucléaire, rendez-vous au WNE (voir p. 46).

Suivez Tanguy Leroux, pharmacien, biologiste et Youtubeur, en balade au SHFJ !



LE RJH, PILIER DE LA PRODUCTION

→ Bâtiment réacteur du RJH, enceinte dans laquelle se situe la piscine contenant le cœur du réacteur, ainsi que les dispositifs expérimentaux.



S'il est un radioisotope incontournable pour la médecine nucléaire, c'est bien le technétium 99m, utilisé dans 80 % des scintigraphies et issu du molybdène 99 (^{99}Mo), produit en réacteur. Pendant près de 50 ans, de 1966 à 2015, c'est Osiris, installé sur le centre CEA de Saclay, qui a fourni entre 5 et 12 % de la demande mondiale. D'ici une dizaine d'années, le RJH devrait prendre la relève et assurer entre 25 et 50 % des besoins européens, soit l'équivalent de 15 000 examens par jour. « *Il s'agit d'un engagement de capacité de production, nuance Jean-François Villard, en charge de la maîtrise d'ouvrage des expérimentations sur le RJH. C'est le marché qui dictera notre vitesse de croisière.* »

Un marché qui connaît une évolution notable, portée par la forte croissance de la demande en radioisotopes à des fins thérapeutiques, dont la plupart sont produits en réacteur. « *Un grand nombre d'essais cliniques en phase II, voire III, sont en cours dans le monde. Des études longues et coûteuses, qu'il est essentiel d'alimenter en radioisotopes dans la durée* », analyse Marion Libessart, responsable du développement d'affaires à l'institut Iresne du CEA. « *Dès lors qu'un essai entre en phase III, le porteur de projet doit en effet apporter la démonstration que la chaîne de production sur laquelle il s'appuie est*

La production de radioisotopes en réacteur nucléaire au CEA, c'est une longue histoire... Elle commence dans les années 1960 avec les réacteurs Siloé, puis Osiris, et se poursuivra avec le RJH, le réacteur de recherche Jules Horowitz, en phase finale de construction sur le site de Cadarache.

capable de l'alimenter en radiopharmaceutique jusqu'au terme son étude », explique-t-elle. On devine là tout l'enjeu pour le secteur : garantir la continuité de production au niveau européen pour les essais cliniques, mais aussi pour les thérapies déjà commercialisées et les examens courants. Le RJH sera l'un des piliers de ce réseau.

Une filière à flux tendu

L'Europe, échaudée par la pénurie subie en 2009 et 2010 due aux arrêts cumulés et non programmés de deux réacteurs canadien et néerlandais (sur les 5 mondiaux alors en activité), veille au grain. L'association *Nuclear Medicine Europe* suit la production de ^{99}Mo en temps quasi réel. « *Celle-ci est en flux tendu et se répartit, pour l'Europe, entre 4 réacteurs : Pays-Bas, Pologne, République tchèque et Belgique* », commente l'experte. Il faut en effet jongler avec leurs arrêts pour maintenance et ceux non programmés, qui peuvent obliger à s'adresser à d'autres producteurs, par exemple en Australie ou en Afrique du Sud.

D'ici 5 à 10 ans, le paysage se sera complètement transformé. Ces installations arrivées en fin de vie cesseront leurs activités, tandis que leurs successeurs seront mis en route : Pallas aux Pays-Bas, quasi entièrement dédié à la médecine nucléaire, et le RJH en France. « *Le RJH est un réacteur d'irradiation, présente David Emond, le directeur du projet. Il ne fabrique pas d'électricité, mais des flux de neutrons afin d'y plonger des cibles, par exemple des échantillons de matériaux et de combustibles de réacteurs pour des études de R&D en soutien à la filière électronucléaire. C'est son objectif premier.* » L'idée est de profiter de ce flux de neutrons pour y plonger d'autres cibles, transmises par des clients du secteur de la radiopharmacie, et générer ainsi les radioéléments artificiels pour la médecine. Cibles qu'il irradiera, puis retournera au client. Charge à ce dernier d'assurer la postproduction : extraction, purification et fabrication du radiopharmaceutique, pour aller livrer les hôpitaux et les équipes de recherche (voir infographie p. 36).

Un écosystème complet

Outre les réacteurs d'irradiation, l'Europe peut compter sur tout un écosystème : des fabricants de cibles, dont Cerca en France (une division de Framatome), des unités d'extraction et de purification de radioisotopes à partir des cibles irradiées, voire de fabrication de radiopharmaceutiques (en Belgique et aux Pays-Bas notamment, via l'IRE¹ et Curium), ainsi que des systèmes de transport conçus en Europe. « *Les réacteurs belges et néerlandais, BR2 et HFR, se sont entourés de laboratoires de postproduction, appartenant à l'IRE et Curium,* note David

Emond. *Une proximité qui a du sens, leur conférant un avantage concurrentiel.* »

Un tel écosystème serait-il envisageable autour du RJH ? « *Il impliquerait nécessairement des partenaires industriels. Mais nous disposons déjà de formidables installations, comme Atalante ou Chicade (respectivement sur les centres CEA de Marcoule et Cadarache), disposant de cellules blindées en capacité de réaliser les étapes de radiochimie ou encore d'équipements pour fabriquer des cibles.* » Cette piste, bien que prématurée, est en tout cas à l'étude, non pas pour concurrencer l'écosystème déjà bien établi du ⁹⁹Mo, mais pour ceux en devenir, liés aux demandes croissantes de radiopharmaceutiques pour les thérapies.

(1) Institut des radioéléments.

(2) Réacteur à eau lourde utilisant comme combustible de l'uranium naturel. Les réacteurs canadiens appartiennent à cette filière, qui a été exportée notamment en Inde et au Pakistan.

Le molybdène... et les autres

Si le marché du ⁹⁹Mo semble pérenne et bien structuré, celui des autres radioisotopes est marqué par des évolutions permanentes, au gré des avancées scientifiques, mais aussi des mouvements de rachats-ventes parmi ses nombreux acteurs. Le lutétium 177, qui focalise le plus grand nombre d'essais cliniques, est à ce titre illustratif. Les Canadiens ont récemment apporté la démonstration que sa production en continu était possible dans un réacteur électrogène de type Candu², moyennant l'ajout d'un dispositif. Ce qui bouleverse l'écosystème, les coûts de production en Candu étant bien plus faibles et le risque de pénurie sur le produit, écarté. L'Europe ne dispose que d'un seul réacteur de ce type, en Roumanie, et examine la possibilité d'exploiter cette filière.

Le RJH, quant à lui, se doit d'être présent ; question de souveraineté. « *Notre mission est de répondre aux besoins de l'industrie et du public, notamment à travers notre contribution au système de santé français,* justifie Jean-François Villard. *Nous devons être en capacité de produire si besoin ce radioisotope, comme bien d'autres, plus prospectifs, en soutien à la recherche médicale, tout en essayant d'anticiper ce que sera le marché d'ici le milieu de la prochaine décennie, date de nos premières productions.* » Ce qui n'a rien d'évident ! ●

PRISMAP, UN PROGRAMME EUROPÉEN SUR LES RADIONUCLÉIDES MÉDICAUX

Pour faciliter les innovations en matière de radioisotopes et de radiopharmaceutiques, l'Europe a lancé Prismap en 2021, un consortium visant à mettre les moyens de production européens à disposition des acteurs de la recherche, comprenant des réacteurs nucléaires, des accélérateurs à moyenne et haute énergie et des laboratoires de radiochimie. Il compte 23 partenaires, dont le CEA. Objectif : devenir le point d'entrée commun pour les chercheurs et les médecins travaillant dans ce domaine.

80
ANS

DE L'IODE 131 AUX RADIOISOTOPES DU FUTUR

Les grandes dates

1948

Production des premiers lots d'iode 131 par **Zoé, la première pile atomique française**, au CEA de Fontenay-aux-Roses. L'iode 131 sera utilisé pour marquer la thyroxine (une hormone) et étudier la fonction thyroïdienne.



1975

Premier cyclotron médical français au SHFJ, produisant entre autres du carbone 11 et du fluor 18, permettant de produire sur place les radioéléments indispensables à une imagerie en devenir, la tomographie par émission de positons (TEP).

1961

Acquisition par le SHFJ de sa **première gamma caméra**, qui donnera naissance à la scintigraphie, examen très utilisé pour le diagnostic des cancers, des pathologies cardiaques et de la thyroïde.

1966

Démarrage du **réacteur nucléaire de recherche Osiris** sur le centre CEA de Saclay. Il produit lui aussi du molybdène 99.

1958

Création du **SHFJ, le Service hospitalier Frédéric Joliot**, au sein de l'hôpital d'Orsay, pour développer les applications médicales des radioisotopes.

1963

Démarrage du **réacteur nucléaire de recherche Siloé** sur le centre CEA de Grenoble, dont une part de l'activité est dévolue à la production de molybdène 99, le précurseur du technétium 99m utilisé pour les scintigraphies.



© L. Zylberman/IRSN/CEA

2015

Arrêt du réacteur Osiris.

L'installation a couvert entre 5 et 12% de la demande mondiale en molybdène 99.

Première caméra hybride TEP-IRM installée au SHFJ.

2024

Mise en service d'une **plateforme de radiochimie et de son cyclotron** sur le site de Fontenay-aux-Roses, pour la fabrication de radiopharmaceutiques pour la recherche préclinique.

1997

Arrêt du réacteur Siloé.

Osiris reprend la totalité de la production de molybdène 99.

1978

Première caméra TEP européenne opérationnelle au SHFJ.

1984

Principe d'une **caméra TEP «à temps de vol»** donnant des images d'une résolution spatiale inédite, brevetée par le CEA et aujourd'hui utilisée dans tous les appareils commerciaux.

1998

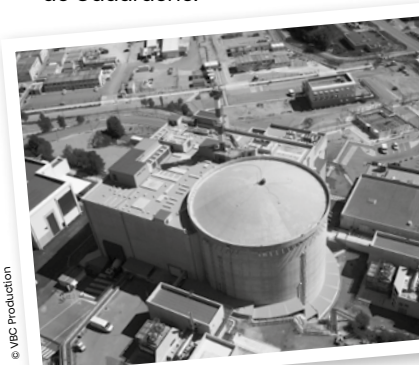
Première autorisation de mise sur le marché (AMM) en France d'un **radiopharmaceutique marqué au fluor 18**, déposée par le CEA et Cisbio, le ^{18}F FDG, qui révolutionnera le diagnostic des cancers par la TEP. Le SHFJ a assuré la totalité de la production francilienne jusqu'en 2008.

2032

Démarrage du **RJH, le réacteur Jules Horowitz**, sur le centre CEA de Cadarache.



Archives historiques CEA © CEA/Pierre JAHAN - J2377



© VBC Production

LA BONNE DOSE

Injecter un radiopharmaceutique à un patient, pour un diagnostic ou un traitement, implique de garantir la dose de radioactivité à laquelle il sera soumis, pour sa sécurité comme celle des soignants. Une garantie à laquelle contribue le Laboratoire de métrologie de l'activité situé au CEA Paris-Saclay et que dirige Mark Kellett.



Quel est le rôle du Laboratoire de métrologie de l'activité dans le parcours d'un radiopharmaceutique ?

Mark Kellett — Notre unité est l'un des laboratoires fédérés par le Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), l'instance référente pour la mesure. Ici, nous sommes en charge de la métrologie de la radioactivité⁽¹⁾, un rôle que le CEA détient depuis 1969. Lorsqu'un patient reçoit un radiopharmaceutique, l'hôpital doit s'assurer de la quantité de radioactivité injectée en utilisant un appareil appelé activimètre. Garantir cette valeur repose sur une chaîne métrologique qui commence par l'étalonnage de cet appareil. C'est là que nous intervenons en tant que laboratoire primaire.

Comment ?

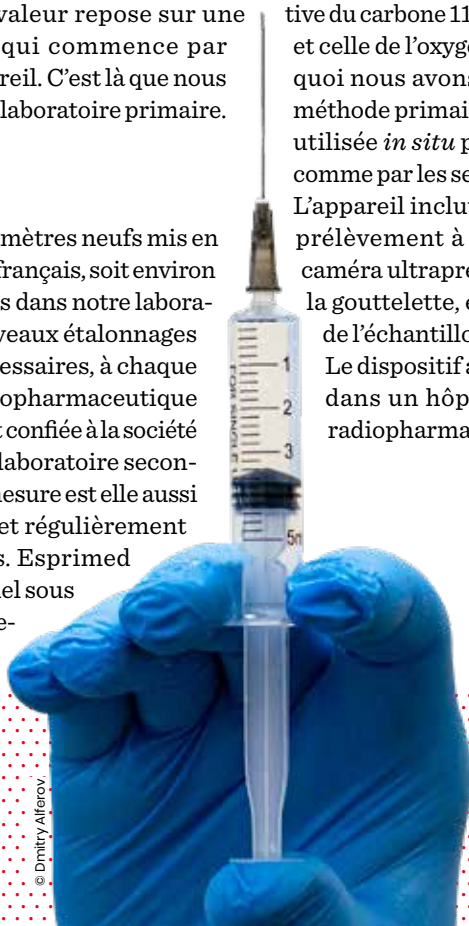
M.K. — Tous les activimètres neufs mis en place dans les hôpitaux français, soit environ 40 par an, sont étalonnés dans notre laboratoire. Sur place, de nouveaux étalonnages sont régulièrement nécessaires, à chaque fois qu'un nouveau radiopharmaceutique est utilisé. Cette étape est confiée à la société Esprimed, accréditée « laboratoire secondaire ». Leur chaîne de mesure est elle aussi caractérisée, qualifiée et régulièrement contrôlée par nos soins. Esprimed utilise en outre un logiciel sous licence CEA, et donc développé chez nous, qui per-

met de convertir la mesure réalisée en une valeur de radioactivité, en lien avec une base de données de radiopharmaceutiques. Cisbio International, le site français de fabrication de radiopharmaceutiques de Curium, valide également la qualité de ses mesures auprès de nos équipes.

Quels sont vos derniers développements en R&D ?

M.K. — L'étalonnage des activimètres dédiés aux radiopharmaceutiques de durée de vie très courte est toujours un défi. La période radioactive du carbone 11, c'est par exemple 20 minutes, et celle de l'oxygène 15, 2 minutes ! C'est pourquoi nous avons récemment développé une méthode primaire transportable pouvant être utilisée *in situ* par les centres de production comme par les services de médecine nucléaire. L'appareil inclut un système automatique de prélèvement à l'aide d'un capillaire et une caméra ultraprécise qui mesure le volume de la gouttelette, évitant ainsi la manipulation de l'échantillon radioactif par un opérateur. Le dispositif a été testé et validé au SHFJ et dans un hôpital suédois, producteur de radiopharmaceutiques. ●

⁽¹⁾ Le Laboratoire de métrologie de l'activité est l'une des deux unités du LNHB, le Laboratoire national Henri Becquerel, administré par le CEA.



Former les professionnels

Près de 3 000 praticiens hospitaliers en médecine nucléaire exerçant en France sont passés sur les bancs de l'INSTN¹, l'école de formation du CEA. Trois parcours diplômants et obligatoires y sont dispensés.

DES médecine nucléaire

- Jusqu'à 50 étudiants par an.
- Environ 1 400 professionnels formés depuis 1981.

DES radiopharmacie hospitalière, option radiopharmacie

- Jusqu'à 35 étudiants par an.
- Environ 550 professionnels formés depuis 1988.

DQPRM

- Jusqu'à 50 étudiants par an.
- Environ 1 000 professionnels formés depuis 1997.

1. Le médecin nucléaire

Il prescrit l'acte de diagnostic ou le traitement, incluant le recours à un médicament radiopharmaceutique. 400 heures de cours sont dispensées par l'INSTN dans le cadre de l'internat de médecine, auxquelles s'ajoutent 8 semestres de stage en établissement hospitalier, pour l'obtention d'un Diplôme d'enseignement spécialisé (DES).

Quelles formations pour quels métiers ?

2. Le radiopharmacien

Il prépare, contrôle et dispense les médicaments radiopharmaceutiques, assure l'étalonnage et le contrôle-qualité des équipements, ainsi que la radioprotection du personnel et du patient. 200 heures de cours à l'INSTN et 4 semestres de stage en établissement hospitalier sont requis dans le cadre de l'internat pour l'obtention du DES.

3. Le physicien médical

Il valide la prescription du médecin nucléaire, garantit la qualité et la sécurité de l'utilisation médicale des rayonnements ionisants. Formation sur 3 ans après un master de physique pour l'obtention du Diplôme de qualification en physique radiologique et médicale (DQPRM).

PERSPECTIVES

- Une demande de formation en forte croissance, liée entre autres à la montée en puissance des protocoles de radiothérapie interne vectorisée.
- Des formations qui évoluent pour prendre en compte ces technologies émergentes, ainsi que l'intégration de l'IA au service des praticiens (exemples : lecture d'imageries et prédiagnostics, calculs de doses de radiopharmaceutiques prescrits, etc.).

À L'INTERNATIONAL

Forte demande des pays en développement pour se doter de capacités de diagnostic et de traitement du cancer, des actions pilotées par l'AIEA² avec le soutien de la France et du CEA. L'INSTN participe notamment à la mise en place de formations et de solutions locales d'enseignement en Afrique francophone (Algérie, Bénin, Côte d'Ivoire, Maroc, Sénégal, Tunisie).

- (1) Institut national des sciences et techniques nucléaires.
(2) Agence internationale de l'énergie atomique.



Demandez le programme !



Le CEA est partenaire et sponsor du WNE, le plus grand salon international dédié au nucléaire civil.

Tous les deux ans, ce sont plus de 20 000 professionnels du secteur venus du monde entier qui se réunissent pour découvrir et partager les dernières innovations, et assister à des conférences et des ateliers de haut niveau. Gouvernements, entreprises, start-up et organismes de recherche se donnent rendez-vous durant trois jours, au parc des expositions de Villepinte, au nord de Paris.

Retrouvez-nous sur le stand CEA au cœur du Hall 6

- ▶ **Enfilez un casque de réalité virtuelle** pour explorer nos installations.
- ▶ **Glissez votre œil par un hublot** pour voir une torche à plasma qui fonctionne... sous l'eau.
- ▶ **Vibrez devant la maquette** de notre plateforme dédiée aux risques sismiques.
- ▶ Et bien d'autres surprises !

Autour de quatre thématiques (expérimenter, modéliser, démanteler et former), les innovations issues de nos laboratoires s'inscrivent dans les enjeux du nucléaire pour les années à venir. Nos équipes de spécialistes seront présentes pour répondre à toutes vos questions.

Et aussi

- ▶ **BEE - « Beyond Electricity Expo »** : Une zone d'exposition immersive, conçue avec le concours des experts du CEA, de l'AIEA, du Gifex et de RX France, et entièrement dédiée aux usages du nucléaire pour la société, au-delà de la seule production d'électricité : médecine, agriculture, spatial, hydrogène, etc. L'occasion de comprendre pourquoi le CEA est un acteur de la médecine ou comment nous réfléchissons à des générateurs nucléaires pour repousser les frontières de l'exploration spatiale !
- ▶ **Des keynotes** de tous les grands acteurs du nucléaire et de l'énergie.
- ▶ **Des ateliers avec les experts du CEA** sur les enjeux du démantèlement, des réacteurs de 4^e génération et de la fabrication additive pour le nucléaire.



© AUBERT / CAYZAC / CEA

QUAND ?

Du 4 au 6 novembre

NOUS RENCONTRER ?

Sur le stand H064
et dans la zone BEE Hall 6,
au parc des expositions
de Paris Nord Villepinte

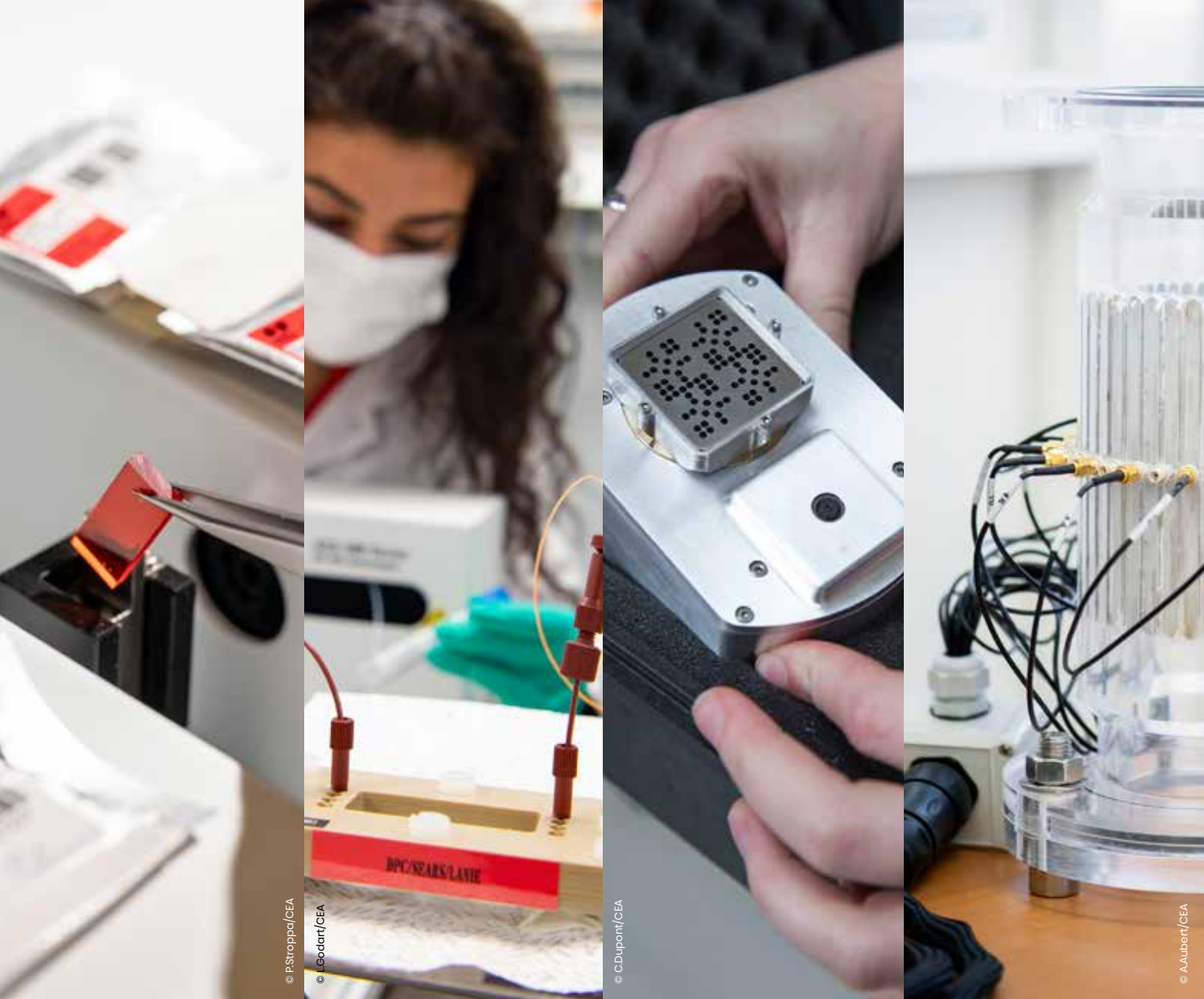
COMMENT Y ALLER ?

Avec le RER B - Station
Parc des expositions
Villepinte



L'instrumentation nucléaire

1000
FACETTES
USAGES



1948. La première pile atomique française, Zoé, est mise en route sur le centre CEA de Fontenay-aux-Roses. Depuis, le nucléaire a connu bien des développements et assure aujourd'hui à la France une source d'énergie bas carbone. Ces succès passés, mais aussi l'avenir de la filière nucléaire, reposent sur des instruments et des moyens de mesure bien particuliers.

Qu'il s'agisse de mesurer des flux neutroniques à l'aide de capteurs ou de connaître une température dans un environnement irradié, chercheurs et ingénieurs développent des solutions adaptées pour des applications variées, de l'extraction d'uranium jusqu'au démantèlement des installations en passant par la sécurité des personnes. Un domaine de recherche en pleine expansion et riche de créativité !

LA SYMPHONIE DES *mesures*



← Contrôle radiologique mains-pieds en sortie d'installation nucléaire. La radioprotection est un domaine où la bonne mesure est essentielle.

Fruits de décennies de savoir-faire au CEA, l'instrumentation et la mesure nucléaires servent à bien des applications, depuis l'extraction du combustible jusqu'à la sûreté-sécurité des personnes, en passant par le pilotage des réacteurs. Un domaine scientifique et technologique riche, mêlant fortes contraintes et créativité.

Imaginez une balance électronique de cuisine, un instrument facile à concevoir et à utiliser. Maintenant, imaginez devoir placer cette balance dans un caisson blindé au sein d'une installation nucléaire, où des rayonnements ionisants risquent de faire « rôtir » l'électronique et où l'espace est restreint. Ajoutez le besoin de réaliser une mesure non pas au gramme près, mais au microgramme. Et pour corser le tout, les éléments à peser sont à manipuler *via* une pince métallique, elle-même située au bout d'un bras téléopéré.

Voilà le genre de difficultés auxquelles sont confrontés ingénieurs et chercheurs du nucléaire au quotidien. « *Le milieu nucléaire est un environnement contraint*, débute Abdallah Lyoussi, responsable CEA du Laboratoire d'instrumentation et de mesures en milieux extrêmes, laboratoire commun entre le CEA, Aix-Marseille université et le CNRS. *Outre les rayonnements, il y règne de hautes températures, de fortes pressions, l'espace est très réduit, la corro-*



Modélisation et instrumentation-mesure vont de pair. Chacun enrichit l'autre en permanence. »

Abdallah Lyoussi, responsable CEA du laboratoire commun d'instrumentation et de mesures en milieux extrêmes.

sion se répand, les interventions se font par robots interposés, certaines expériences ne peuvent pas être renouvelées... Et malgré tout, nous y réalisons des mesures précises et pertinentes ! » À ce titre, l'instrumentation nucléaire partage bien des points communs avec celle pour le spatial : un environnement rude et de grandes exigences scientifiques pour une contribution essentielle à l'approfondissement de nos connaissances fondamentales et des débouchés qui irriguent l'industrie.

Dans le domaine nucléaire, les outils développés par le CEA constituent et alimentent des innovations indispensables à l'ensemble de la filière. « Surtout que l'on en demande toujours plus : plus de précision, plus de compacité, plus d'informations, abonde Anne-Sophie Lalleman, directrice du programme transversal CEA en instrumentation et détection. Les supports ont aussi grandement évolué, avec des outils embarqués sur des drones par exemple. La tendance est à la miniaturisation, avec des capteurs à des endroits jusqu'ici inaccessibles. »

Au-delà de la conception, le nombre des capteurs et leur positionnement sont des éléments clés, afin d'optimiser les mesures avec un minimum d'instrumentation tout en tenant compte des nouvelles exigences fonctionnelles et réglementaires. « C'est un peu comme dans l'automobile : nous savons produire des voitures depuis plus d'un siècle, mais nous continuons à les améliorer en intégrant des capteurs de sécurité (par ex. pression des pneus) ou d'assistance et en s'adaptant aux nouveaux moteurs », poursuit-elle.

Des usages très variés

Pour le parc nucléaire existant, l'instrumentation sert notamment à garantir aux industriels et aux autorités de sûreté le bon comportement de chaque élément, en le suivant au plus près. De quoi permettre la prolongation de la durée d'exploitation (voir focus p. 61) et vérifier les simulations de

vieillesse. « Modélisation et instrumentation-mesure vont de pair, explique Abdallah Lyoussi, également senior fellow et directeur de recherche au service de physique expérimentale d'essais en sûreté et d'instrumentation du CEA. Les expériences permettent de valider les simulations et les simulations permettent de concevoir les instruments en amont et d'interpréter les résultats en aval. Chacun enrichit l'autre en permanence. » La simulation permet aussi une première approche précautionneuse, notamment dans l'assainissement-démantèlement, pour adapter ensuite les outils et les opérations sans compromettre la sécurité.

De fait, si l'instrumentation s'avère nécessaire pour les réacteurs existants, elle se retrouve bien au-delà : optimiser le cycle du combustible, gérer les déchets radioactifs, sécuriser les opérations de démantèlement, imaginer les nouvelles technologies de réacteurs, surveiller l'environnement, garantir la production de radioisotopes (voir dossier p. 33) et bien d'autres activités ! « Sans oublier la radioprotection et la sécurité des personnes, rappelle Anne-Sophie Lalleman. Le CEA possède des compétences uniques et certifiées en dosimétrie, pour le nucléaire mais aussi la médecine. »

Ajoutons à cette complexité la multitude de formes, du petit dosimètre porté par l'opérateur en zone à l'immense banc d'essai de plusieurs mètres de long dans un réacteur de recherche (voir focus p. 62). « En somme, l'instrumentation nucléaire couvre deux aspects : les mesures de rayonnement nucléaire, par exemple sur les combustibles irradiés ou auprès d'un réacteur, et les

mesures conventionnelles mais réalisées en environnement nucléaire», simplifie Abdallah Lyoussi. Souvent, les deux se combinent !

Adapter l'existant et inventer des solutions

L'environnement extrême soulève de nombreuses contraintes et les chercheurs font face à deux cas de figure : soit l'instrument de mesure existe déjà mais il faut le « nucléariser », c'est-à-dire l'adapter au milieu ; soit il n'existe pas et il faut le créer. Dans le premier cas, les modifications sont propres à chaque utilisation (présence de rayonnements gamma ou non, besoin de mesures neutroniques, etc.) et à chaque instrument (systèmes électroniques durcis, protections en plomb, etc.). « Mais nous devons être attentifs à ne pas trop alourdir le dispositif ni les coûts ! », met en garde Abdallah Lyoussi.

Parfois, les contraintes rendent l'évolution irréaliste. L'instrument existant sur étagère ne peut tout simplement pas être adapté car il deviendrait trop gros, trop compliqué, trop imprécis. On bascule alors dans le deuxième cas de figure : tout est à (ré)inventer. Les chercheurs partent de la grandeur souhaitée et imaginent comment la mesurer, avec quel dispositif, pour quels résultats. « *L'instrumentation nucléaire est un domaine riche en créativité*, reconnaît Anne-Sophie Lalleman. *C'est de la belle science : on se retrouve face à un problème émergent, pour lequel il n'existe aucune solution actée. La concevoir et la déployer apporte une satisfaction tant intellectuelle qu'opérationnelle.* »

Côté métiers, « *l'instrumentation nucléaire mobilise tout un ensemble de compétences : en théorie avec les phénomènes physiques mis en jeu, en expérimentation avec les matériaux à tester, en ingénierie avec la chaîne d'acquisition, en mathématiques et informatique avec les traitements des données, jusqu'à l'intégration du système de mesure dans son environnement final* », estime-t-elle. « *Toutes les recherches menées au CEA seraient impossibles à réaliser sans les nombreuses personnes mobilisées pour développer des outils indispensables à nos travaux* », rappelle Sylvain Broussard, ingénieur projets au sein de la direction du démantèlement du CEA et lui-même concepteur d'instruments (voir focus p. 60).



L'instrumentation nucléaire est un domaine riche en créativité. On se retrouve face à un problème émergent, pour lequel il n'existe aucune solution actée. »

Anne-Sophie Lalleman, experte fellow au CEA et directrice du programme transversal en instrumentation et en détection au CEA.



Mesure de la tension électrique sur les équipements embarqués d'un robot dédié à l'assainissement-démantèlement.



↑ Les premières versions d'un masque codé pour une caméra gamma hybride, instrument aujourd'hui déployé chez un industriel.

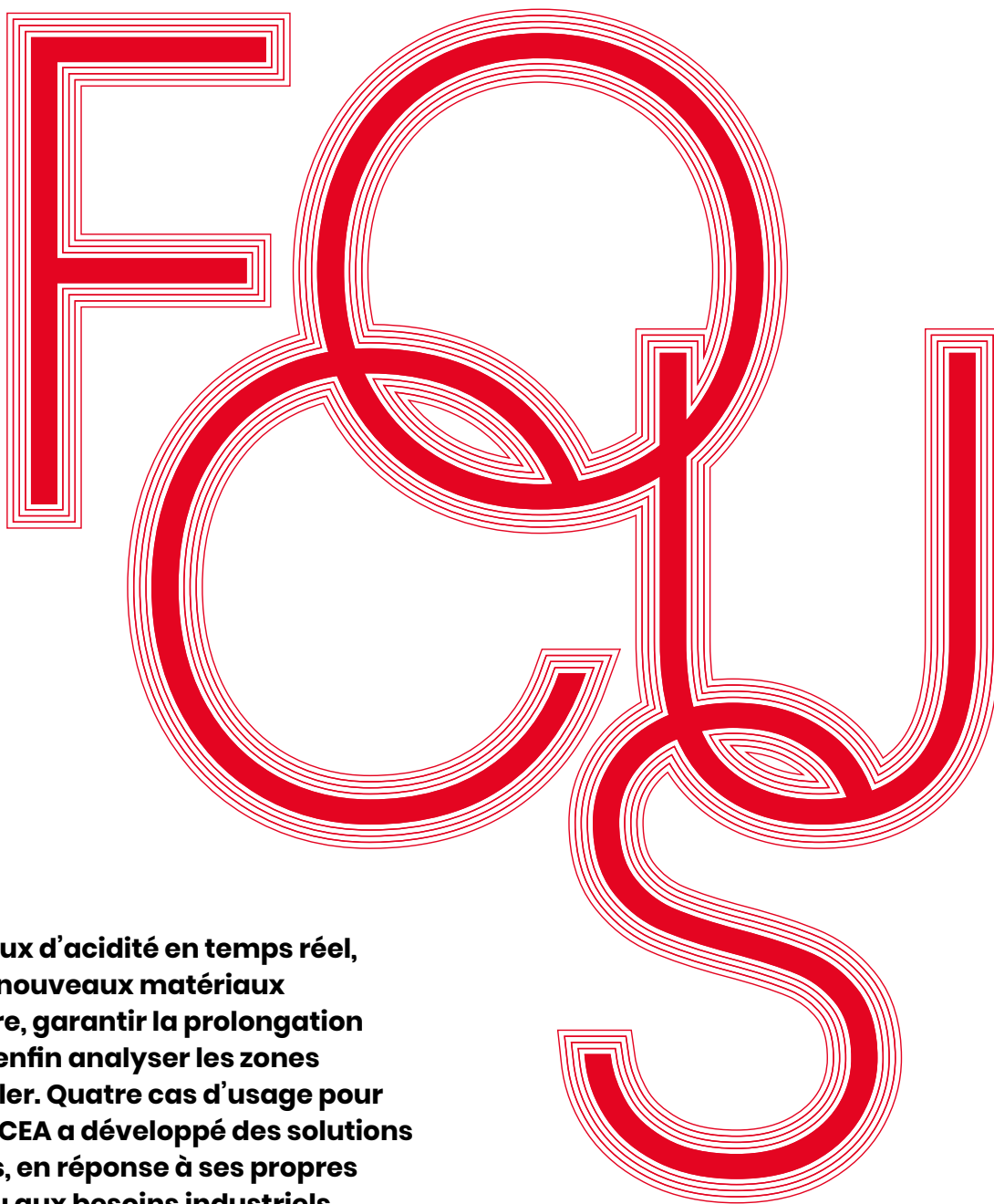
Valorisation et partenariats industriels

« Il s'écoule au moins 3 ans, et parfois jusqu'à 15, entre l'identification du besoin et le déploiement de l'instrument correspondant, durée pendant laquelle il faut maintenir les compétences, chiffre Abdallah Lyoussi, qui est aussi professeur à l'INSTN et Aix-Marseille université. Les instruments pour le nucléaire du futur doivent donc se concevoir dès maintenant. » Les nouvelles technologies de réacteurs, les nouveaux assemblages combustibles et les nouveaux matériaux vont demander une fine maîtrise des phénomènes physiques et physico-chimiques et ne pourraient se passer d'une instrumentation dédiée.

Que ce soit pour le futur ou l'existant, le CEA travaille en lien étroit avec l'ensemble de la filière nucléaire. « Deux approches coexistent : soit, de notre côté, nous répondons à un besoin précis exprimé par un partenaire en développant des instruments et méthodes dédiés, soit nous proposons des réalisations issues de domaines connexes (IA, fibres optiques, mesures acoustiques) que nous adaptons aux contraintes nucléaires », indique Anne-Sophie Lalleman. Le CEA est

aussi impliqué dans plusieurs partenariats, comme pour l'imagerie médicale avec Thales, et dans de grands projets, tels que les usines de demain avec Orano ou encore avec EDF et Framatome pour les réacteurs nucléaires actuels et à venir.

Pour les innovations *made in CEA*, si l'intérêt et le marché existent, des brevets sont déposés et transférés aux fabricants, dans une démarche de valorisation. « Mais industrialiser un prototype s'avère bien plus difficile que de le développer, juge Sylvain Broussard. C'est passer d'une équipe de collègues qui échangent dans leur labo à une usine, avec ses normes et ses contraintes. » Sans compter qu'il existe peu d'entreprises intermédiaires pour fabriquer et commercialiser les instruments et faire le pont entre, d'un côté, des laboratoires de recherche qui les mettent au point et, de l'autre, des grands industriels qui les utilisent, souligne Abdallah Lyoussi. En complément, le CEA accompagne les ingénieurs et chercheurs pour le montage de start-up, notamment via son programme Magellan. Start-up qui viennent irriguer la filière nucléaire et bien au-delà. Car s'il est possible d'adapter un instrument classique au milieu nucléaire, l'inverse est tout aussi vrai ! ●



Suivre le taux d'acidité en temps réel, valider les nouveaux matériaux du nucléaire, garantir la prolongation du parc et enfin analyser les zones à démanteler. Quatre cas d'usage pour lesquels le CEA a développé des solutions innovantes, en réponse à ses propres activités ou aux besoins industriels. Depuis la problématique initiale jusqu'à sa résolution technique, retrouvez le récit de ces succès par leurs artisans.



Venez découvrir le drone Elios et toutes nos innovations pour le démantèlement au WNE.

XS-Ability

Un projet pour cartographier l'invisible



L'OBJECTIF

Assurer des opérations de démantèlement en toute sécurité en identifiant et localisant la radioactivité des installations



L'INSTRUMENT

Un drone, Elios 3, auquel sont intégrés plusieurs capteurs dont la caméra Nanopix et un capteur OmniTracker



LA VALEUR AJOUTÉE CEA

La réalisation des capteurs de A à Z et des systèmes d'analyse des résultats

Entre les rayonnements et l'étroitesse de certains passages, les installations nucléaires à démanteler ne sont pas franchement accueillantes. Pour n'envoyer des opérateurs qu'en cas de nécessité et garantir au mieux leur sécurité, le CEA est engagé dans le projet européen XS-Ability. Réunissant 7 partenaires et financé par le programme Euratom, il vise à mettre au point des technologies pour le démantèlement reposant sur des systèmes multirobots autonomes embarquant des capteurs radiologiques.

Des robots terrestres, mais aussi des drones, tel Elios 3. Cette version, dotée d'une plus grande autonomie, comprend un capteur OmniTracker et le système Nanopix, dont le développement a été cofinancé par Orano. « *Le premier renseigne sur le débit de dose dans la zone, tandis que le second localise et identifie les sources* », explique Karim Boudergui, chef du service « instrumentation et métrologie des rayonnements ionisants » au CEA. Le duo haute technologie indique, avec une grande précision, la localisation des points chauds, le

niveau et le type de danger. « *Les résultats permettent de réaliser un jumeau numérique de l'installation avant intervention* », abonde Maugan Michel, coordinateur du projet XS-Ability. De quoi programmer ensuite une opération robotique ou former des opérateurs humains à la perfection.

L'institut List du CEA travaille sur les imageurs gamma comme Nanopix depuis plus de 20 ans. Le premier système, Aladin, pesait plus de 35 kg. Aujourd'hui, Nanopix fait moins de 500 grammes et embarque bien plus de technologies. « *Grâce aux derniers développements algorithmiques et matériels du laboratoire, nous pouvons localiser et identifier le type de radionucléide* », précise Maugan Michel. Deux exemplaires de cette caméra gamma sont déjà déployés à La Hague, sur le site d'Orano. Concernant OmniTracker, l'appareil développé par le CEA pèse moins de 2 kg, là où les solutions commerciales existantes en font plus de 6. Pour des opérateurs en combinaison étanche, plongés dans un environnement extrême, ces quelques kilos font la différence ! Un transfert technologique vers un industriel est, là encore, prévu.

Outre les opérations de démantèlement nucléaire, de tels instruments peuvent être utilisés dans la gestion de crise. C'est l'objet du projet européen Guardians, coordonné par le CEA et qui démarrera en octobre prochain. Il vise à développer une plateforme intégrant des outils autonomes de détection rapide face aux risques nucléaires. ●



CYCLE DU COMBUSTIBLE

Emma-Calis

Une analyse continue pour la chimie du nucléaire



L'OBJECTIF

Faciliter le suivi de l'acidité et de la concentration lors de procédés chimiques en chaîne blindée



L'INSTRUMENT

Emma, l'appareil, et Calis, la méthode analytique

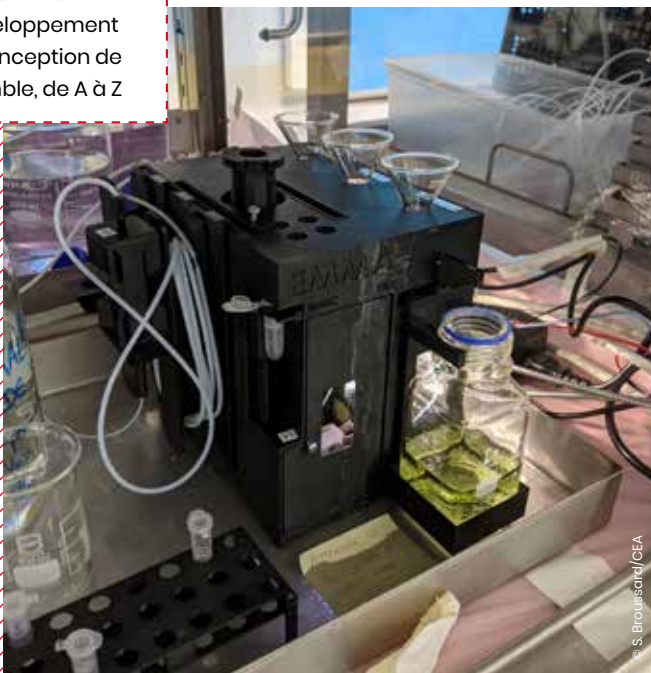


LA VALEUR AJOUTÉE CEA

Le développement et la conception de l'ensemble, de A à Z

Le cycle du combustible nucléaire, en amont et en aval, fait intervenir différents procédés chimiques pour la séparation et l'extraction de composés. « *Suivre leur bon déroulé passe par une caractérisation de l'acidité des solutions chimiques, laquelle influence l'action des molécules extractantes* », débute Sylvain Broussard, ingénieur projets au sein de la direction du démantèlement du CEA. Ces opérations ont lieu en chaînes blindées. Pour vérifier que tout se passe comme prévu, il faut effectuer un prélèvement *via* la pince d'un bras téléopéré, puis le transporter en toute sécurité vers un laboratoire d'analyse. Comptez au minimum deux heures avant le résultat. Impossible de réaliser l'opération à l'envi, et encore moins d'assurer un suivi en temps réel !

↓ Le système d'analyse Emma-Calis peut être intégré directement au plus près des procédés.



Face à ce casse-tête pour les opérateurs de la plateforme Atalante, sur le centre CEA de Marcoule, l'ingénieur et ses collègues ont eu l'idée d'un outil automatisé et d'une méthode analytique unique, intégrés directement au plus près du procédé. Emma et son protocole analytique Calis voient le jour en 2017. Entièrement développé par le CEA, l'instrument comprend des composants électroniques mis au point par les équipes et des pièces sur mesure réalisées par impression 3D. « *Cela permet des coûts de production réduits et des pièces que l'on ne pourrait pas fabriquer autrement* », détaille son créateur.

Caisson noir de la taille d'un pack de lait, l'ensemble est déployé dans Atalante depuis 2019, où il vient fluidifier les processus. Aujourd'hui dans sa huitième version, cette technologie développée en partenariat avec Orano est protégée par plusieurs brevets. « *Dans la chimie du nucléaire, le suivi en ligne est très important, rappelle l'ingénieur. Les industriels ont besoin de savoir ce qu'il se passe en temps réel afin de piloter le procédé.* » Au sein du caisson blindé, le dispositif effectue un prélèvement et une analyse automatique à intervalles réguliers pour mesurer l'acidité libre et la concentration des composés dans les solutions. « *Plus besoin de limiter les analyses : en plus d'un temps raccourci d'un facteur 20, les volumes prélevés et les effluents générés sont réduits d'un facteur 50 !* », se félicite Sylvain Broussard. Emma-Calis peut effectuer jusqu'à 60 analyses sans recharger les réactifs. L'instrument et son protocole d'analyse pouvant être utilisés séparément, les travaux intéressent désormais d'autres laboratoires et des industriels de la chimie, au-delà du nucléaire. ●

Pour découvrir Atalante, suivez la visite !



PROLONGATION DU PARC

Madere

La fine fleur de la dosimétrie en réacteur



La plateforme Madere réalise des mesures fines de spectrométrie gamma et X pour caractériser le vieillissement des aciers sous irradiation.



L'OBJECTIF

Contribuer aux mesures de vieillissement pour la prolongation du parc nucléaire



L'INSTRUMENT

La plateforme Madere, avec ses 8 chaînes de spectrométrie photonique



LA VALEUR AJOUTÉE CEA

L'accréditation Cofrac sur les mesures par spectrométrie gamma et X sur des échantillons solides, l'étalonnage fin et l'analyse des résultats via des codes et applications informatiques propres



© A. Aubert/CEA

Prolonger l'exploitation du parc nucléaire nécessite une connaissance et une surveillance fines des cuves des réacteurs, qui ne peuvent pas être remplacées. Si les modélisations numériques, réalisées en amont, renseignent sur leur durée de vie, l'expérimentation reste vitale. Pour cela, des échantillons d'acier de la même coulée que la cuve, et des dosimètres, échantillons métalliques ultrapurs de la taille d'un grain de riz, sont placés dans le réacteur à sa construction. Les premiers servent à observer l'évolution des propriétés mécaniques, les seconds renseignent sur le niveau d'irradiation – on parle de mesure de la fluence.

« EDF extrait ces échantillons tous les dix ans et nous les transmet », débute Christophe Domergue, chef du Laboratoire dosimétrie, capteurs et instrumentation et responsable technique de Madere. La plateforme, avec six chaînes de spectrométrie dédiées aux rayons gamma et deux aux rayons X, étudie alors le vieillissement subi en fonction de l'irradiation. De quoi comparer la réalité avec les simulations. « Ces travaux sont menés dans le cadre du programme de surveillance

des effets de l'irradiation, pour chaque réacteur EDF et conformément à la réglementation », indique le responsable. Avec 56 cuves de REP à contrôler, l'énergéticien est le principal client de la plateforme, qui fait partie du pôle de compétences en dosimétrie. À compter de 2030, Madere devrait également analyser les premières capsules issues des cuves des EPR.

Les analyses des échantillons prennent une quinzaine de jours. « Avant cela, l'étalonnage des chaînes de spectrométrie nécessite entre deux et trois mois, poursuit-il. C'est long, mais cela garantit un très faible niveau d'incertitude. » Si les appareils proviennent du commerce, les équipes CEA possèdent en effet des compétences rares afin de fournir des résultats précis et maîtrisés. Cette expertise est issue de décennies d'activités : la plateforme est née du Laboratoire de dosimétrie en réacteur, mis en place en soutien au réacteur Siloé (1963-1997) à Grenoble. Aujourd'hui, Madere poursuit ses collaborations en Europe et à l'international, notamment pour les réacteurs de recherche, et sera la plateforme de mesure pour le futur réacteur RJH. ●

NUCLÉAIRE DU FUTUR

RJH

Des instruments de haute précision pour des expériences uniques

Le développement de nouvelles technologies de réacteurs nucléaires implique d'explorer et valider différentes pistes, chacune avec ses spécificités techniques. Attendu pour la prochaine décennie, le réacteur de recherche Jules Horowitz (RJH) permettra de tester ces technologies en conditions représentatives (radiations, température, pression, chimie...). « Pour cela, chaque dispositif expérimental nécessite de l'instrumentation, indique Annelise Gallais-During, ingénieure-chercheuse au laboratoire de mesures nucléaires. Tout d'abord au plus proche de l'expérience, à la fois pour la piloter et obtenir des résultats en temps quasi réel. Puis postirradiation, pour caractériser l'état final de l'échantillon. »

Prenons un échantillon de matériau d'un futur réacteur par exemple, dont on veut tester les propriétés sous radiation. Un premier volet d'instrumentation va caractériser l'environnement de l'expérience (température, flux neutronique, pression...), afin d'agir sur certains paramètres si besoin. « Dix emplacements expérimentaux seront disponibles dans le cœur du réacteur, et dix autres dans le réflecteur autour du cœur, chiffre Annelise Gallais-During. Le réacteur fonctionnera à puissance nominale pour toutes les expériences, mais jouer sur la durée d'irradiation et la distance au cœur permet de varier la dose reçue. » Une fois l'irradiation finie, d'autres instruments vont mesurer la déformation du matériau, les éventuelles modifications physico-chimiques, la corrosion, etc.

« Le RJH abritera des expériences hors normes de plusieurs mètres de haut mais où chaque millimètre compte, décrit l'ingénieure. La réalisation de ces programmes dure 5 à 10 ans et implique plusieurs dizaines de contributeurs, depuis la conception des échantillons jusqu'à la caractérisation postirradiation et l'intégration des résultats dans les modélisations. » Un temps long qui s'explique par la spécificité de ces travaux, où aucune expérience n'est identique. « Sans compter que la plupart de ces expériences ne seront faites qu'une seule fois, mais les résultats eux seront exploités pendant des décennies par toute la filière nucléaire, en France et à l'étranger, rappelle Christophe Des-touches, architecte instrumentation au sein du projet RJH. Les instruments se doivent donc d'être extrêmement fiables et précis, à l'instar de ceux développés pour le spatial. Nous devons en tirer le maximum. » ●



→ La boucle thermohydraulique Thelia est utilisée pour tester les composants du dispositif d'irradiation Madison, lequel sera placé dans le RJH.



L'OBJECTIF

Tester et valider les propriétés sous irradiation des matériaux et des combustibles pour les réacteurs



L'INSTRUMENT

20 emplacements à la demande

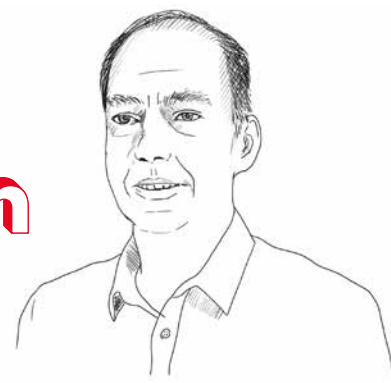


LA VALEUR AJOUTÉE CEA

La maîtrise de toute la chaîne de valeur expérimentale au service de la communauté internationale, depuis la préparation jusqu'à l'analyse postirradiation des échantillons

3 questions à... Hervé Toubon

**Expert en mesures nucléaires
pour le groupe Orano et directeur
R&D et innovation chez Orano Mining**



**Sur quel type d'instrumentation
travaillez-vous avec le CEA ?**

Hervé Toubon — Depuis une dizaine d'années, nous travaillons avec le CEA sur des mesures nucléaires en forage, notamment la diagraphie. L'environnement est très contraint : nous devons intervenir à des centaines de mètres de profondeur, et la géologie est très variable. Nous utilisons des instruments développés depuis de nombreuses années mais, avec le CEA, nous les adaptons pour nos mesures en diagraphie, tout comme les algorithmes d'interprétation de ces mesures. Nous avons déposé plusieurs brevets, dont dernièrement dans le cadre du projet Sabre au Canada pour un système d'extraction par abattage hydraulique.

Au-delà de l'algorithmie, travaillez-vous à des capteurs ?

H. T. — Dans mes fonctions précédentes, aussi bien chez Orano Recyclage pour le site de La Hague que chez Canberra (depuis devenu Mirion Technologies, NDLR), j'ai effectivement eu l'occasion de travailler avec le CEA sur différents types de capteurs. Chez Canberra, par exemple, nous avons développé des imageurs gamma à partir des puces Medipix développées par le CEA et le CERN.

Pourquoi faire appel au CEA ?

H. T. — En partie car ces compétences seraient trop pointues à maintenir en interne chez Orano Mining. Mais je viens surtout chercher de nouveaux concepts auprès de vos chercheurs. Nous, industriels, avons parfois des problématiques qui émergent et sur lesquelles nous avons un début d'idée. Les équipes du CEA offrent alors l'approfondissement nécessaire, voire d'autres idées de résolution. Ce sont des échanges et des confrontations d'idées très enrichissants !

Et, au-delà des innovations, le CEA m'apporte un label. Face à des problématiques complexes qui impliquent de nombreux acteurs et parfois des gouvernements, une étude validée par le CEA génère de la confiance et assure la crédibilité. C'est un gage de qualité, basé sur une vraie expertise mondialement reconnue. Nous allons d'ailleurs faire visiter le site de Cadarache à nos collègues de Kazatomprom en octobre. ●

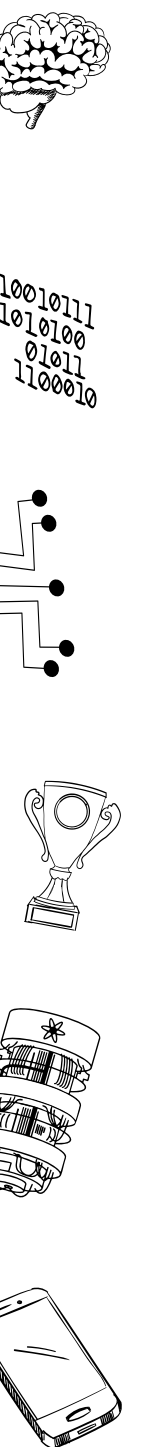


Travailler avec le CEA permet de confronter les idées pour résoudre nos problèmes industriels. »

Nous finançons aussi des thèses, sur la mesure neutronique ou plus récemment sur l'intelligence artificielle pour la spectrométrie gamma, au CEA Cadarache. Attention, il ne s'agit pas d'utiliser l'IA simplement parce que c'est à la mode ! Nous comptons sur ces travaux pour résoudre des problèmes que nos algorithmes déterministes classiques n'arrivent pas à résoudre.



80 ANS



LA PREUVE PAR L'IMAGE

Alors que le CEA célèbre cette année ses 80 ans, retour en images sur quelques-unes de ses réalisations emblématiques, d'hier à aujourd'hui. Troisième étape de ce voyage spatio-temporel : les études sur le climat.

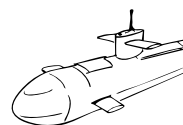
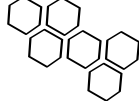
Les recherches du CEA sur le climat et l'environnement s'appuient sur son expertise et sa maîtrise des méthodes d'analyse isotopique et de traceurs radioactifs et nucléaires. Dès 1961, le Centre des faibles radioactivités (CFR, CEA/CNRS) est créé à Gif-sur-Yvette dans l'objectif d'appliquer ces méthodes pour des études environnementales, de datation et, très vite, de reconstruction des climats passés. La création du GIEC en 1988 impulse celle du Laboratoire de modélisation du climat et de l'environnement (LMCE) en 1991 au CEA, qui fusionne ensuite avec le CFR en 1998 pour donner naissance au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE). Depuis 2006, le LSCE fait partie de la fédération de recherche francilienne Institut Pierre-Simon Laplace.



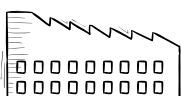
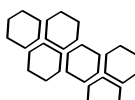
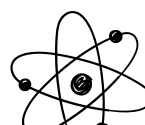
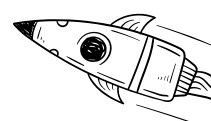
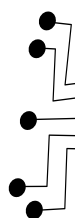
1961



01011
1100010



01100101
0101010
0101
11000



Aujourd'hui, Le LSCE s'attache à mieux comprendre le fonctionnement du système climatique (notamment sa variabilité) et les impacts des activités humaines sur l'environnement global. Son approche est fondée d'une part sur la collecte et l'analyse d'échantillons naturels, grâce à une large palette d'outils instrumentaux : mesure de la concentration en gaz à effet de serre dans l'atmosphère ; caractérisation des gaz réactifs, aérosols et nuages ; analyse de glaces polaires et de sédiments océaniques ou lacustres, ainsi que de données issues d'instruments satellitaires. Le LSCE développe et utilise d'autre part une grande variété de modèles numériques de complexité variée, en collaboration avec d'autres partenaires. Il est l'un des plus importants laboratoires de recherche français dans le domaine des sciences du climat et figure parmi les plus renommés au niveau mondial.

2024



© P. Charlot/CEA

Le CEA... à Valduc

Le CEA compte neuf centres répartis dans toute la France, de l'Aquitaine à la Bourgogne. Ces ancrages territoriaux en font un moteur pour l'innovation et l'économie au plus proche des acteurs locaux. Nouvelle étape à Valduc, en Côte-d'Or, au cœur des enjeux de la dissuasion nucléaire et de la défense.



1100
salariés CEA

25
brevets
actifs

+ de 100
étudiants en
formation

Dijon
30 km

1^{er}
employeur
industriel
du département
de la Côte-d'Or

1
start-up

Activités et compétences

Valduc est un pôle de compétences en métallurgie et chimie des matériaux nucléaires, de la recherche amont jusqu'aux procédés de fabrication.

Ses missions essentielles sont:

- assurer la conception technologique et la fabrication des sous-ensembles nucléaires des armes;
- garantir le démantèlement des armes retirées du service ;
- assurer le développement et la fabrication des objets expérimentaux du Programme Simulation ;
- réaliser des expérimentations hydrodynamiques avec l'installation franco-britannique Epure.

Partenariats scientifiques

Le centre de Valduc collabore avec de nombreux acteurs académiques (Centrale Supélec, universités de Paris-Saclay, de Lorraine, Marie et Louis Pasteur, de Bourgogne Europe, de Toulon, de Paris Est...), et mène des partenariats avec des écoles d'ingénieurs (Polytech Dijon, Mines Nancy, SUPMICROTECH Besançon, Ensam Cluny). Il contribue à plusieurs laboratoires de recherche conventionnés:

- Limpe: interactions matériau-procédé-environnement (avec l'université Bourgogne Europe de Dijon) ;
- Electra: études sur les matériaux céramiques, sous pilotage du centre du Ripault (avec l'Ircer, Université de Limoges) ;
- Sage: sciences appliquées au génie électrique, sous pilotage du centre de Gramat (avec l'université de Pau).

Les thèses et postdoctorats en cours sont orientés vers l'IA, l'étude structurale de matériaux métalliques ou céramiques, la chimie des actinides, la synthèse et le vieillissement de matériaux, l'étude des phénomènes de séparation et de purification de gaz...

À l'international, le centre entretient des collaborations avec l'AWE britannique, de grands laboratoires américains (*Los Alamos National Laboratory, Lawrence Livermore National Laboratory*), les JRC, et l'AIEA.

Actions pédagogiques

Afin de faire connaître ses activités et ses métiers auprès du grand public et d'attirer les jeunes talents, le centre tisse des relations avec les écoles (visites de lycéens, étudiants), et s'implique dans de nombreux événements pédagogiques (Fête de la science, Journée des doctorants, Scientifique toi aussi...). Il participe également à de nombreux forums et salons industriels.

Développement économique

Valduc est membre fondateur de Nuclear Valley, pôle de compétitivité dédié au nucléaire civil et à la défense. Depuis plus de 20 ans, le Pôle anime une communauté forte de plus de 440 membres (start-up, PME, grands groupes, laboratoires de recherches et organismes de formation) et accompagne les organismes et les entreprises dans leurs enjeux de R&D, de croissance, de financement, d'emploi et de formation, en France et à l'international.

Engagement en faveur de l'environnement

Le centre s'inscrit dans une stratégie de décarbonation, incluant la sobriété énergétique (rénovation thermique des bâtiments, maîtrise de la consommation électrique, exploitation d'une nouvelle chaufferie biomasse...) ainsi que l'impact environnemental et la gestion durable de la biodiversité et des ressources (optimisation du transport du personnel, gestion durable du restaurant d'entreprise...).

Valduc poursuit son accord avec l'Office national des forêts pour la gestion durable des forêts du centre, la prise en compte des enjeux climatiques et de l'évolution du risque d'incendies.

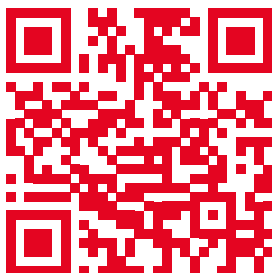


Notre sélection

La physique quantique, vous n'y comprenez rien mais ça a l'air bien ? Ces contenus sont faits pour vous ! Pour percer les secrets de l'Univers qui nous entoure, construire des ordinateurs surpuissants ou mettre au point de futurs procédés cryptographiques, les travaux dans ce domaine progressent partout au CEA. Parfois même là où on ne s'y attend pas...

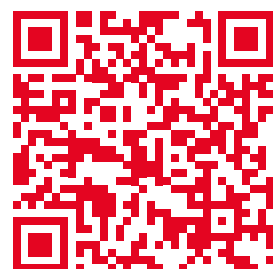
Le featuring scientifique

La curiosité, c'est l'une des trois valeurs du CEA. Et ça tombe bien, car c'est aussi une caractéristique de l'artiste Durden, figure montante du rap français et passionné de sciences. Dans une volonté de dialogue entre sciences et société, il était l'invité de la conférence sur la physique quantique sur la chaîne YouTube du CEA. Qu'il s'agisse d'expliquer le principe d'incertitude de Heisenberg ou de s'interroger sur la dualité onde-particule, ces échanges prouvent que le quantique fascine au-delà du petit monde des chercheurs !



Découvrez nos doctorants

Le CEA accueille plus de 1 500 doctorants sur des sujets très variés, dont le quantique ! Si les futurs ordinateurs quantiques promettent bien des avancées, le chemin est encore long. À la croisée entre physique, mathématiques et informatique, une plongée dans les travaux sur les codes correcteurs d'erreur, en moins de 60 secondes chrono.



Écouter le doux bruit d'un ordinateur quantique

Autant vous prévenir : le grésillement d'une nuée de photons qui vient frapper un détecteur n'est pas des plus agréables. C'est pourtant un doux son aux oreilles des physiciens qui développent des capteurs ultrasensibles pour les ordinateurs quantiques, car c'est la preuve d'une expérience réussie. Venez découvrir leurs travaux, avec des réfrigérateurs plus froids que le fin fond de l'espace...

Le quantique appliqué

Au-delà de l'approfondissement des connaissances, l'exploration de la physique quantique a permis des innovations dans des domaines allant jusqu'à la santé. En comparant le signal obtenu par résonance magnétique nucléaire lors de l'analyse de tissus sains à celui de tissus cancéreux, des chercheurs américains ont ainsi posé les bases de l'IRM dans les années 1970. Une révolution médicale qui n'aurait pas vu le jour sans la compréhension des spins quantiques !



CEA *le Jeu*

**Saurez-vous répondre
aux 3 questions ci-dessous,
toutes en lien avec des sujets
abordés dans ce numéro ?**

Ces cartes au look rétrofuturiste sont tirées du jeu de plateau conçu autour des missions et des recherches du CEA. Coconstruit avec ses salariés, il met à l'honneur les grandes avancées scientifiques et technologiques réalisées depuis 80 ans.

Les trois premiers lecteurs à trouver les bonnes réponses gagneront une boîte de *CEA le Jeu* et un patch collector « 80 ans ».

Écrivez-nous à revue@cea.fr !



© CEA

1991

Spin

Choix multiple

Quelle discipline utilise le « spin » des électrons pour les manipuler dans les circuits ?

La magnétospin

La spinphysique

La spintronique

 Cette discipline permet de créer des technologies plus rapides et économes en énergie

2008

Analyser le passé

Choix multiple

Un ADN ancien prélevé dans la grotte Chauvet a été séquencé par le CEA. De quel animal provenait-il ?

Un caribou

Un ours

Un mammoth

 Cet animal aurait vécu il y a 35 000 ans

1959

Inauguration du LECI

Choix multiple

Comment appelle-t-on un laboratoire dans lequel on manipule des matériaux fortement radioactifs ?

Gamma

Rayonnant

Chaud

 Un tel laboratoire peut réaliser l'expertise de matériaux irradiés provenant d'installations nucléaires

Le 10^e, ça se fête !

Si vous avez manqué nos débuts, retour en images sur les numéros parus depuis juin 2023.





Qui sommes-nous ?

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

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

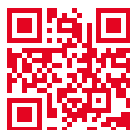


Le CEA fête ses



en 2025.

Notre recherche
prépare les
technologies
de demain.



*Découvrez notre histoire
et le programme
des événements ici.*