

Les défis du cea



75 AVANCÉES

QUI CHANGENT
NOS VIES

HORS-SÉRIE 2020
SPÉCIAL 75 ANS DU CEA



Depuis 75 ans, le CEA est à l'origine de découvertes & développements qui sont des premières mondiales.



Une excellence reconnue par le Conseil européen de la recherche qui attribue régulièrement aux chercheurs du CEA ses prestigieuses bourses ERC.



Les innovations du CEA donnent lieu à de nombreux transferts industriels, notamment par la création de start-up.

Vous trouverez ces repères au fil des pages, marquant les avancées concernées.

**HORS-SÉRIE 2020
SPÉCIAL 75 ANS DU CEA**

75 AVANCÉES

**QUI CHANGENT
NOS VIES**

ÉDITORIAL

p. 4

ÉNERGIES

Avancées n° 1 à 20

p. 6 – 27

**CLIMAT &
ENVIRONNEMENT**

Avancées n° 21 à 29

p. 28 – 35

SANTÉ

Avancées n° 30 à 45

p. 36 – 53

**DÉFENSE &
SÉCURITÉ**

Avancées n° 46 à 52

p. 54 – 65

NUMÉRIQUE

Avancées n° 53 à 69

p. 66 – 83

**QUESTIONS &
DÉCOUVERTES**

Avancées n° 70 à 75

p. 84 – 97

LEXIQUE

p. 98

ÉDITORIAL



FRANÇOIS JACQ

Administrateur général
du CEA

Le 18 octobre 1945, voici 75 ans, était créé le Commissariat à l'énergie atomique par ordonnance du général de Gaulle. C'était, il faut s'en souvenir, à peine deux mois après la fin de la Seconde Guerre mondiale. Le pays entamait sa reconstruction, une reconstruction rendue nécessaire par « l'étrange défaite » dont parle l'historien Marc Bloch, mais aussi par le bouleversement profond des sciences et des techniques que la guerre a engendré, tant en termes de nouvelles réalisations (bombe, ordinateur, radar, fusée, essor des antibiotiques...) que de nouvelles pratiques (la conjonction entre science, technologie, État et industrie).

Le CEA est donc l'une des réponses à ce défi. Il est doté d'une mission : explorer les propriétés de l'atome et leur utilisation au service de l'industrie, de la santé et de la défense de notre pays. Son statut particulier doit le rendre efficace aussi bien dans l'acquisition de connaissances fondamentales et technologiques

que dans leur transfert, pour la constitution d'une industrie. 75 ans plus tard, il a tenu cette promesse au fil d'une histoire marquée de découvertes scientifiques et d'avancées technologiques. Une histoire riche de nombreuses collaborations avec le monde académique et industriel, en France, en Europe et à l'international. Une histoire ponctuée par le déploiement d'infrastructures de toutes natures.

Cette aventure fut d'abord, on le sait, celle de l'énergie nucléaire et de la dissuasion. Par ses recherches, le CEA a largement contribué, en lien étroit avec ses partenaires, au déploiement de la filière nucléaire française. Très tôt, avant même la création de la Direction des applications militaires en 1958, il fut aussi un acteur au service de la défense et de la sécurité de la France. Au fil des années, le champ d'activité du CEA s'est considérablement élargi, dans le prolongement logique de son projet initial, en se saisissant des nouveaux enjeux

pour lesquels il possédait une valeur ajoutée reconnue.

Au-delà des enjeux initiaux de défense, il s'est orienté ainsi, dans un monde en profonde mutation, vers la lutte contre la prolifération nucléaire et le terrorisme. Les missions de défense nécessitent chaque jour de relever des défis scientifiques et technologiques de premier plan, en physique fondamentale, en sciences des matériaux, dans le domaine des technologies laser, du calcul haute performance, de la cybersécurité, dont les bénéfices contribuent, au-delà des besoins de défense, à l'excellence de la recherche et à la compétitivité de l'industrie française.

Guidé par la volonté de proposer des systèmes énergétiques performants et compétitifs, il s'est aussi progressivement investi dans une vision intégrée du champ énergétique. À cela s'ajoute la contribution aux travaux sur le climat et sa modélisation, permettant de définir des politiques de mitigation et d'adaptation. Autant d'expertises qui lui permettent d'offrir aujourd'hui, en cette date anniversaire, une feuille de route pour les quinze prochaines années, tout en étant relayée par une structure innovante de programmation en interne.

Cette même aventure l'a conduit sur le terrain de la santé avec, dès sa création, des études sur les effets des rayonnements ionisants sur les êtres vivants, à des fins médicales ou pour s'en protéger. Du travail commun des biologistes, physiciens, radiochimistes ont émergé des savoir-faire uniques en matière d'imagerie, pour le diagnostic et la thérapie de maladies neurodégénératives, neuro-inflammatoires, cardiovasculaires, infectieuses, métaboliques ou encore génétiques. Ces compétences éprouvées lui

permettent aujourd'hui de développer des technologies nouvelles pour la médecine et de contribuer à la lutte contre la Covid-19 par des recherches sur le virus et les méthodes diagnostiques, et des essais sur les traitements potentiels.

Parallèlement et pour ses besoins propres, le CEA s'est engagé dès les années 1960 dans la recherche électronique. Il contribua ainsi à l'émergence de la filière microélectronique française, et son champ d'expertise s'étendit aux nanotechnologies, aux systèmes numériques embarqués, aux télécommunications, à l'intelligence artificielle, qui trouvent des applications dans des domaines aussi divers que la santé, les transports, l'énergie. Cette excellence plurielle le conduit à figurer aujourd'hui parmi les acteurs susceptibles de relever les défis du calcul quantique, mais aussi à contribuer au développement des pratiques industrielles de demain. C'est également ce qui en fit un acteur mobilisé au premier chef au service de l'économie et de sa compétitivité. Enfin, cette aventure n'aurait pu prendre cette ampleur sans un large ensemble d'équipes impliquées dans les domaines de la physique, de la chimie et de la biologie, inscrivant leur action dans le concert scientifique international et explorant la physique des hautes énergies, notamment auprès du Cern, l'astrophysique, les phénomènes quantiques ou encore les structures fondamentales du vivant. Ces travaux furent d'autant plus essentiels que le CEA sut tisser l'ensemble de ses compétences en un réseau serré et efficace.

En 75 ans, le contexte a bien sûr beaucoup évolué. Mais les fondamentaux qui ont marqué notre histoire sont toujours là : passion de la recherche et de la connaissance, goût de la technologie, soutien de l'industrie, souci constant de

Le statut du CEA devait le rendre efficace dans l'acquisition de connaissances fondamentales et technologiques, et dans leur transfert pour la constitution d'une industrie. 75 ans plus tard, il a tenu promesse.

la souveraineté et de la défense du pays, besoin viscéral de résoudre des problèmes concrets, en prise avec les enjeux actuels, capacité à s'intégrer dans des écosystèmes ou à les faire émerger. Voilà ce que les fondateurs ont eu à cœur de faire. Voilà ce qui anime encore aujourd'hui les 20 000 femmes et hommes du CEA.

Nos valeurs, la curiosité, la conscience de nos responsabilités et de la nécessité d'une construction collective, seront essentielles pour répondre aux enjeux du XXI^e siècle : les transitions énergétique et numérique, la médecine de demain, la défense, toujours au service de l'État, des citoyens et de l'économie. Nous devons ainsi nouer de nouvelles formes d'interaction avec la société, afin de débattre pleinement des savoirs et technologies que nous développons. C'est un beau projet d'avenir, à la hauteur des ambitions qui ont motivé la création du CEA. ●



AVANCÉES N° 1 À 20

ÉNERGIES

Le déploiement
de la filière
électronucléaire
p. 8

Simuler intégralement
le fonctionnement
d'un réacteur nucléaire
p. 11

Interview
« *Recycler
le combustible
de manière durable* »
p. 12

Les déchets confinés
dans du verre
p. 13

Matériaux et
combustibles
à l'épreuve
p. 14

Simuler la résistance
d'une installation
à un séisme
p. 15

Démantèlement
sur mesure
p. 16

Dompter la fusion
nucléaire
p. 18

Interview
« *Coordonner la filière
française de
l'hydrogène* »
p. 20

Design zéro CO₂
p. 21

Un réservoir
d'hydrogène
pour les voitures
p. 21

Sylfen, l'autonomie
énergétique 3 en 1
p. 21

Électrifier les avions
p. 22

Les premières
batteries à charge
ultrarapide
p. 22

Interview
« *Interconnecter
les réseaux d'énergie* »
p. 23

Des micro-algues
pour produire des
biocarburants
p. 24

Le solaire
à hétérojonction
made in Europe
p. 25

L'invention du solaire
photochromique
p. 25

Produire de l'hydrogène
en s'inspirant
des plantes
p. 26

Interview
« *Convertir le CO₂
en matière première
utile* »
p. 27

LE DÉPLOIEMENT DE LA FILIÈRE ÉLECTRONUCLÉAIRE

PREMIÈRES, REBONDISSEMENTS ET GRANDS ENJEUX

Expérimentations et choix technologiques jalonnent l'histoire du nucléaire français, avec de grands enjeux évoluant au cours des décennies. Celui lié au climat s'ajoute désormais à ceux de l'indépendance de la production énergétique.

«Poursuivre les recherches scientifiques et techniques en vue de l'utilisation de l'énergie atomique dans tous les domaines de la science, de l'industrie et de la défense nationale (...) et réaliser à l'échelle industrielle la production d'énergie nucléaire»: telles sont, lors de sa création en 1945, les missions confiées au CEA. Soixante-quinze ans plus tard, elles guident toujours l'action de l'organisme fondé par le général de Gaulle. Mais les premiers physiciens réunis par Frédéric Joliot dans les laboratoires du Fort de Chatillon seraient fort étonnés de voir comment ces missions ont été accomplies et où elles ont conduit les recherches du CEA!

Un chiffre, un seul, permet de se rendre compte du chemin parcouru. Celui de la puissance maximale atteinte par la «pile Zoé», le premier réacteur nucléaire français, mis en service en 1948 sur le centre CEA de Fontenay-aux-Roses: 150 kW. «C'est entre six à neuf mille fois moins puissant que bon nombre des installations du parc nucléaire actuel d'EDF», illustre Stéphane Sarrade, directeur des programmes énergies (DPE) au CEA. En effet, la technologie a considérablement progressé, donnant naissance à une grande filière industrielle issue de la volonté de la France de se doter de l'arme atomique (voir p. 56-57) et d'assurer son autonomie en matière énergétique.

Une grande saga expérimentale

Cette épopée de 75 ans peut être vue comme une grande saga expérimentale. Les expériences acquises sur la pile Zoé puis sur les prototypes EL2 et EL3 permettent aux ingénieurs et chercheurs du CEA de maîtriser un savoir-faire pour concevoir et construire les premiers réacteurs nucléaires français: la filière des UNGG (uranium naturel graphite

gaz). Développée à partir des années 1950 avec EDF, elle utilise de l'uranium naturel pour compenser l'absence, à cette époque, d'installations d'enrichissement de l'uranium sur le territoire français. Neuf réacteurs de cette catégorie (trois à usage militaire et six à vocation civile) voient le jour, avant que la technologie ne soit abandonnée en 1969, au profit de celle des REP (réacteurs à eau pressurisée) importée des États-Unis; le premier choc pétrolier de 1973 inspirant ensuite le gouvernement de Pierre Mesmer d'accélérer le programme de déploiement du parc nucléaire d'EDF. Ce dernier compte de nos jours 56 réacteurs répartis sur 18 sites.

Indépendance et fermeture du cycle du combustible

Entre-temps, notamment grâce à ses recherches conduites dans le domaine de la défense, la France s'est dotée des capacités techniques pour garantir l'approvisionnement en combustible de ses centrales. Dès 1959, une entreprise située dans la zone de Malvézi (Aude) prend le relais de la poudrerie du Bou-

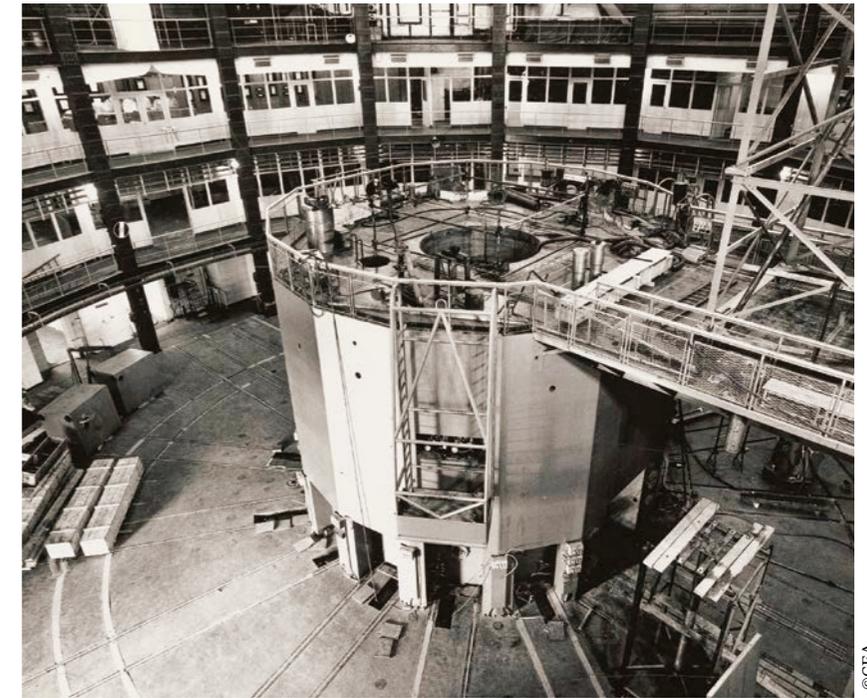
chet (Essonne) pour la partie affinage du minerai d'uranium qui, une fois transformé en *Yellowcake*, est converti en gaz d'hexafluorure d'uranium (UF₆) entrant dans la composition du combustible. En 1978, le CEA confie l'exploitation de sa technologie à «diffusion gazeuse» (mise au point en 1964) à sa filiale, la Cogema (actuel Orano) qui inaugure près du site militaire du CEA de Pierrelatte (Drôme) la première usine civile d'enrichissement de l'uranium, Eurodif. Celle-ci sera remplacée en 2010 par l'usine à centrifugation Georges Besse II d'Orano.

Parallèlement à la gestion «amont» du combustible, les chercheurs du CEA se mobilisent sur la partie «aval du cycle», celle qui consiste à traiter le combustible après son passage en réacteur (voir p. 12). En 1952, ils lancent une chaîne pilote pour valider leur adaptation du procédé Purex, développé en 1945 aux États-Unis pour extraire le plutonium et l'uranium du combustible usé. Ces derniers sont recyclés dans un nouveau combustible, le MOX, lors du démarrage des usines de La Hague (1980), puis de Melox à Marcoule (succédant en 1995 à l'Atelier de technologie du plutonium du CEA à Cadarache). Des usines qui marqueront le décollage de cette filière industrielle.

Programme et équipements de pointe

Ainsi, au fil des années, un cycle du combustible nucléaire a été mis en place. Avec ses spécificités, visionnaires, comme la décision de la France d'aller vers un cycle fermé. C'est-à-dire, réutiliser les matières valorisables non pas une fois, comme actuellement dans le combustible Mox, mais plusieurs fois. Et cela, par leur multirecyclage dans les RNR (réacteurs à neutrons rapides) de quatrième génération, dont les technologies ont commencé à être étudiées dans le cadre des programmes Phénix (1973-2010), Superphénix (1984-1997) et Astrid (2010-2019).

Parallèlement, le CEA a poursuivi ses recherches sur les réacteurs. En soutien aux industriels de la filière, et fort d'une



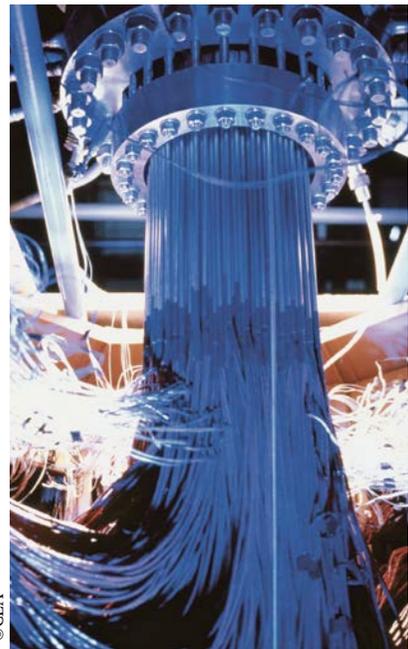
©CEA

expertise historique en modélisation et simulation numérique (voir p. 11), il s'investit désormais dans toutes les étapes de leur existence, depuis leur conception jusqu'à leur démantèlement (voir p. 16-17), en passant par leur sûreté. Longtemps évaluée par les équipes du CEA puis, en 1990, au sein d'un institut dont l'actuel IRSN (Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire) est une émanation, la sûreté est aujourd'hui analysée et optimisée sur de grands équipements dédiés (voir p. 14-15).

Autre grande installation: le réacteur Jules Horowitz (RJH), du nom du physicien français qui créa en 1970 l'Institut de recherche fondamentale du CEA. Ce réacteur en cours de construction sur le centre de Cadarache, prendra le relais d'Osiris (Saclay) pour tester le comportement des matériaux et combustibles sous irradiation. Il contribuera également à la production de radio-isotopes pour la biologie et la médecine, notamment la radiothérapie, qui est l'une des autres spécialités du CEA depuis 1948 (voir p. 41). Autant de compétences que le CEA s'est toujours attaché à transmettre, lui qui →

Le démarrage des usines de La Hague (1980) et de Melox à Marcoule (1995) marquent le décollage de la filière industrielle.

Ci-dessus: Construction de la pile EL3 à Saclay (années 1950).



©CEA



©Lesenechal/CEA

REPÈRES

1945

Création du CEA

1948

Divergence de Zoé, premier réacteur nucléaire français

1952

Lancement d'une chaîne pilote de traitement du combustible usé

1969

Choix de la technologie des réacteurs à eau pressurisée (REP)

1978

Transfert de la technologie à « diffusion gazeuse » d'enrichissement de l'uranium à la Cogema

2012

Ajout de la mention « énergies alternatives » dans le nom du CEA

2020

Début des recherches sur les SMR, petits réacteurs nucléaires modulaires

administre depuis 1956 l'INSTN, établissement d'enseignement supérieur reconnu internationalement qui forme les futurs ingénieurs et chercheurs du nucléaire.

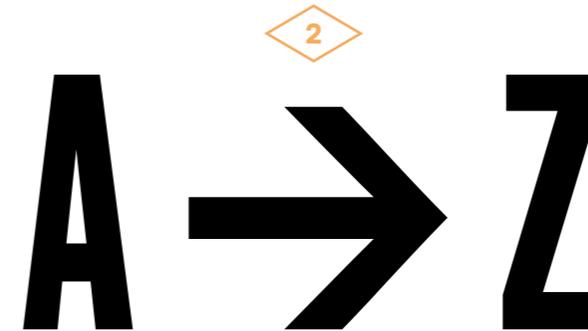
Transition vers un mix énergétique décarboné

Mise en place de la dissuasion nucléaire, maîtrise de sa production énergétique... Les travaux conduits au CEA ont, en 75 ans, contribué à changer nos vies. «Aujourd'hui, avec l'urgence climatique, le défi consiste à décarboner le plus possible la production d'énergie», explique Stéphane Sarrade. Pour atteindre cet objectif, le CEA a consacré dès les années 2000 d'importants efforts pour développer, au côté du nucléaire, les énergies renouvelables. Des investissements qui ont conduit le président de la République à renommer en 2012 le CEA, en lui ajoutant la mention « énergies alternatives ». Ce challenge est aujourd'hui à la portée du CEA qui, outre la maîtrise de certaines technologies comme le solaire (voir p. 25), les batteries ou les piles à combustible (voir p. 20-21), possède une sérieuse expérience en matière d'industrialisation

des procédés. Il consiste également à apprendre à exploiter harmonieusement ces multiples ressources qui, permanentes et centralisées pour les unes et intermittentes et locales pour les autres, devront à terme cohabiter sur le réseau électrique. Cela, en attendant que les progrès réalisés dans le domaine du stockage et de la conversion d'énergie permettent d'interconnecter tous ces réseaux (gaz, chaleur, électricité) (voir p. 23). Le CEA étudie également d'autres équipements qui pourront compléter ce paysage énergétique bas carbone. Il s'agit par exemple des SMR (Small modular reactors), petits réacteurs nucléaires modulaires à même de produire de l'électricité comme de la chaleur mais aussi de l'hydrogène; un vecteur énergétique appelé à jouer un rôle pivot dans le mix énergétique du XXI^e siècle. ●

Ci-dessus, à gauche: Boucle Bethsy destinée à des études thermo-hydrauliques à Grenoble (2000).

Ci-dessus, à droite: Mise en place du bloc cœur dans la cuve du R.J.H, en construction à Cadarache (2019).



SIMULER INTÉGRALEMENT LE FONCTIONNEMENT D'UN RÉACTEUR NUCLÉAIRE

Essentielle à la conception et à la démonstration de sûreté des réacteurs nucléaires, la simulation numérique transcrite l'ensemble des phénomènes physiques à l'œuvre dans ces installations.

Pourquoi utiliser la simulation numérique? Expériences à l'échelle 1 complexes et coûteuses, situations accidentelles: tout ne peut être reproduit

expérimentalement. Le CEA élabore ainsi des codes de calcul, tant pour ses besoins que ceux des industriels, depuis les années 1970 avec les premières versions des codes Apollo et Cathare. Le premier calcul, dans les assemblages de combustible, la distribution des neutrons générant les réactions en chaîne de fission nucléaire, et donc la répartition de la puissance dans le réacteur. Cathare, lui, restitue les écoulements de fluides à l'intérieur du réseau de tuyaux, pompes, vannes et autres composants autour du cœur du réacteur. Validés par des expériences en thermohydraulique (Bethsy)



©CEA

ou sur des maquettes critiques (Eole, Minerve, Masurca), ils permettent alors d'anticiper tous les phénomènes. Car ce ne sont pas les seuls codes du CEA, il y a aussi Tripoli, Castem, etc. Ils sont pour partie intégrés aux chaînes de calcul de Framatome et d'EDF, et Apollo a même reçu en 2013 l'approbation de la commission de réglementation nucléaire des États-Unis (NRC)!

Des « jumeaux numériques » pour les réacteurs

Au fil de leurs versions, ces codes simulent plus finement les phénomènes physiques d'un réacteur. Et l'augmentation des moyens de calcul disponibles rend possible la mise en œuvre de modélisations dites « multiphysiques » et « multi-échelles », permettant d'optimiser l'étape indispensable de validation expérimentale. D'où l'ambition, 50 ans après les premiers codes, de réaliser un véritable « jumeau numérique » de chaque réacteur en activité. «Ce double pourra reproduire en temps réel le fonctionnement d'une installation, piloter ses opérations de maintenance ou prédire son comportement grâce aux données envoyées par des milliers de capteurs», explique Xavier Raepsaet, chef de programme à la Direction des énergies (DES). Tel est le but du projet de réacteur numérique lancé le 1^{er} janvier 2020 et financé par le Programme d'investissement d'avenir. Piloté par EDF et associant le CEA, il aboutira d'ici quatre ans à la naissance du tout premier avatar de centrale nucléaire. ●

CHIFFRE CLÉ

4

millions

de lignes de codes environ développées sur les différents codes de calcul du CEA pour l'énergie nucléaire

Ci-contre: Maillage de calcul neutronique pour le réacteur R.J.H (2016).



3

INTERVIEW

« Recycler le combustible de manière durable »

La valorisation du combustible nucléaire usé s'est vite imposée au CEA. Une particularité de la France que nous raconte Andreas Salvatores, chef adjoint de programme à la Direction des énergies.

Comment a débuté l'aventure du recyclage du combustible usé ?

Dès la construction du parc nucléaire français, le CEA s'est interrogé sur la récupération des matières valorisables du combustible usé. La technique existait déjà, développée outre-Atlantique en 1945 dans le cadre du projet Manhattan (production de la première bombe atomique). Elle repose sur le procédé Purex faisant intervenir la molécule TBP (tributylphosphate) pour extraire du combustible l'uranium et le plutonium. Objectif : séparer ces derniers pour les recycler.

Pour le CEA, il s'agissait d'adapter ce procédé également pour les besoins des industriels et des usages civils. Ces recherches, conduites sur le centre de Fontenay-aux-Roses puis déplacées à Marcoule, ont abouti en 1958 au démarrage de l'atelier UP1 de Marcoule, puis en 1965 à celui d'UP2 de la Hague.

À quelle période ces procédés ont-ils été transférés à l'industrie ?

Cette activité a été transférée à la filiale Cogema (actuel Orano) en 1976. Entre-temps, UP2 s'était agrandie pour former, avec la création d'UP3, l'usine de retraitement de la Hague. De nos jours, Orano y traite chaque année plus de 1 000 tonnes de combustibles usés, avec une efficacité telle que plus de 99,9 % du plutonium est aujourd'hui récupéré. Avec l'uranium appauvri également extrait,

il entre dans la composition du combustible MOX grâce auquel 44 réacteurs dans le monde (Belgique, Chine, États-Unis, Japon, Pays-Bas, Royaume-Uni) produisent de l'énergie, dont 22 en France.

La France a-t-elle une spécificité dans ce domaine du recyclage ?

Certainement. Dès le départ, le CEA a souhaité mettre en œuvre des moyens pour que ce cycle de traitement et du recyclage soit organisé de manière durable. Son objectif n'était pas seulement de récupérer dans le combustible usé sa partie valorisable mais également de traiter les déchets. D'où le développement du procédé de vitrification (voir ci-contre).

Sur quoi portent les recherches actuelles ?

Les activités se poursuivent, notamment à Marcoule au sein de l'installation Atalante (1992) qui est sans équivalent dans le monde. Depuis quelques années, dans le cadre de la réflexion sur les réacteurs à neutrons rapides (RNR) de 4^e génération, nous travaillons à optimiser le procédé Purex. Ce dernier est robuste et bien connu, mais il a été conçu pour traiter les combustibles usés de la génération actuelle. Or, ceux de demain seront peut-être multirecyclés et pourraient contenir une plus forte teneur en plutonium. Cela nécessite des évolutions faisant appel à des procédés de traitement innovants et à d'autres molécules extractantes (voir p. 34). ●



©Le Couster/CEA

Ci-contre : Développement de technologies pour le traitement du combustible usé, dans l'installation Atalante (2015).

4

LES DÉCHETS CONFINÉS DANS DU VERRE

Une fois « usé », le combustible nucléaire d'un réacteur à eau sous pression contient 4 % de matières non valorisables : les produits de fission et les actinides mineurs. Que faire de ces déchets ultimes de haute activité et à durée de vie longue ?

La question se pose très vite au CEA. Les équipes mettent alors au point des techniques pour incorporer ces déchets et les immobiliser dans des matrices de verre, elles-mêmes destinées à être enfermées dans des colis. Pourquoi le verre ? « Le verre assure à la fois la stabilité thermique, la durabilité chimique et la tenue à l'auto-irradiation », indique Cécile Ferry, cheffe adjointe de programme à la DES. Dès 1968, l'installation Piver du CEA réalise ses premières vitrifications, ouvrant la voie à un procédé industriel. Celui-ci est mis en œuvre en 1978, dans l'atelier de vitrification de Marcoule (AVM) de la

Cogema. Là, les déchets récupérés lors des opérations de traitement du combustible, conduites dans l'usine UP1 voisine, sont calcinés puis mélangés à de la frite de verre. Ce procédé est ensuite déployé à grande échelle dans l'usine de la Hague à partir de 1989, où sont installées six chaînes de vitrification. Sans équivalent dans le monde, elles ont déjà fabriqué pas moins de 20 000 colis de déchets actuellement entreposés en puits.

La technique du creuset froid

Les technologies sur lesquelles s'appuient ces installations ont été conçues par le CEA. Si celle des « pots de fusion », dont la licence fut vendue au Royaume-Uni, est la plus connue, il en est une très innovante : la technique du creuset froid. « L'élaboration du verre fondu contenant les déchets s'effectue à plus de 1 000 °C dans des pots de fusion métalliques qui s'endommagent sous l'effet de la corrosion et de la chaleur. Il faut donc régulièrement les remplacer, ce qui constitue autant de déchets à gérer. Les ingénieurs ont alors développé avec succès un système permettant de chauffer directement le matériau à

fondre sans chauffer le creuset. Ce dernier dure ainsi beaucoup plus longtemps et permet l'élaboration de verre à plus haute température », explique la chercheuse. Utilisée entre 2013 et 2020 pour vitrifier les solutions de traitement des combustibles usés des réacteurs UNGG conçus dans les années 1950, cette technique intéresse Orano, qui étudie sa viabilité économique pour la vitrification en continu des déchets issus du parc actuel de centrales. ●



Ci-dessus : Essai de formulation du verre (sans matière radioactive) en four (2015).

©Le Couster/CEA

5

MATÉRIAUX ET COMBUSTIBLES À L'ÉPREUVE

Combustibles, gaines, cuve... Chaque pièce d'un réacteur nucléaire est composée de matériaux longuement sélectionnés. La sûreté impose d'en comprendre le comportement en toute situation et nécessite de perpétuelles adaptations. En 1954, le Laboratoire de haute activité « LHA » est mis en service à Saclay. Sa mission : identifier et caractériser les transformations que subissent les matériaux et combustibles dans un

réacteur. Depuis lors, le CEA s'assure de maîtriser l'intégrité des composantes d'un réacteur, à commencer par celle des premières barrières de confinement (gaine du combustible et cuve) soumises en permanence à des flux de neutrons. La tâche est immense. « Elle nécessite de développer des outils de caractérisation et d'analyse toujours plus performants (comme la récente sonde atomique tomographique), et de se doter de moyens

d'essais pour tester les propriétés mécaniques et de corrosion de ces matériaux », explique Thierry Forgeron, chef-adjoint de programme à la DES.

Le CEA s'est ainsi équipé de moyens à grande échelle, qu'il maintient au meilleur niveau (voir focus), offrant à la France des infrastructures et méthodologies exceptionnelles de démonstration de sûreté des réacteurs nucléaires.

Étudier les situations accidentelles

Ces études comprennent également les situations accidentelles. Par exemple, la maîtrise des conséquences d'une perte de réfrigérant causée par la formation d'une brèche dans le circuit primaire d'un réacteur est une exigence primordiale. « Lors de l'accident de Fukushima en 2011, les gaines n'ont pas résisté à la brusque augmentation de température et l'oxydation de leur alliage en zirconium a libéré de l'hydrogène hautement explosif, entraînant la dégradation du cœur et la formation d'un corium (mélange de combustible et de métal fondus) très difficile à refroidir », indique l'expert. Une dynamique mondiale s'est alors mise en place,

pour concevoir un combustible dit ATF (Accident Tolerant Fuel) beaucoup plus résistant aux situations accidentelles.

Développer la résistance aux très hautes températures

Deux types de solutions sont envisagées par le CEA et Framatome qui les développent depuis 2015.

La première, actuellement à l'essai sur plusieurs réacteurs de puissance, utilise un revêtement de chrome déposé sur les gaines en alliage de zirconium qui décuple la durée d'utilisation sûre à très haute température.

La seconde, révolutionnaire, utilise une nouvelle gaine très résistante à la chaleur selon un concept développé pour les réacteurs de 4^e génération : un composite à base de fibres en carbure de silicium. ●

Page de gauche :

Chaîne de caractérisation des matériaux irradiés du Leci à Saclay et vue sur l'intérieur de l'une de ses cellules blindées (2014).

Ci-dessous :

Réalisation d'un matériau à base de carbure de silicium pour de nouveaux combustibles (2016).

FOCUS

Quelques grandes installations qui font la réputation du CEA

→ **Laboratoires de haute activité :** LHA (1954 – 2008), Lama (1963-2002), Leci (1959), Leca (1964)

→ Réacteurs :

- Irradiation sous neutrons thermiques : Siloe (1963-1997), Osiris (1966-2015), RJH (en construction)
- Irradiation sous neutrons rapides : Rapsodie (1967-1983), Phénix (1973-2009)
- Études de sûreté : Phebus (1978-2009), Cabri (1963)

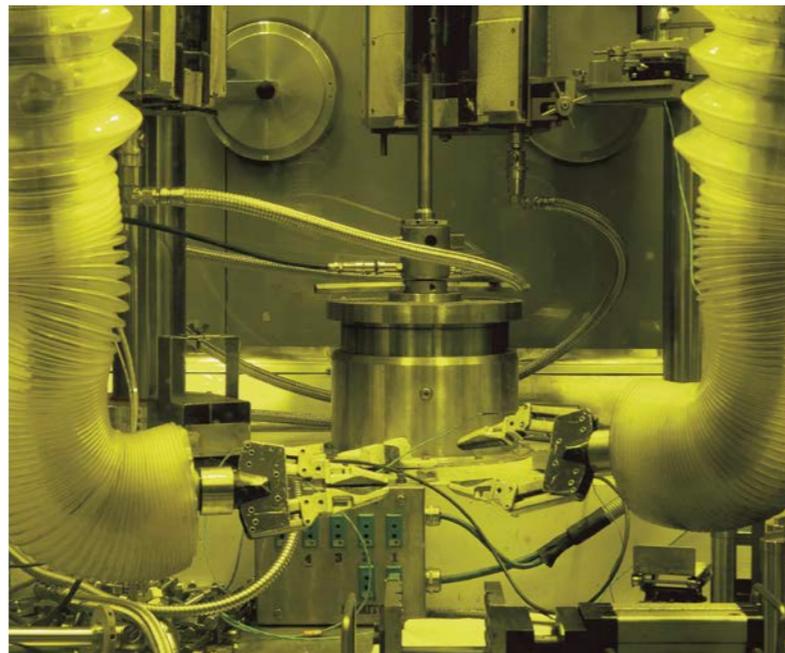
MOT-CLÉ

ATF

Type de combustible beaucoup plus résistant aux situations accidentelles, en cours de développement



©Grosjean/CEA



©Stroppa/CEA

6

SIMULER LA RÉSISTANCE D'UNE INSTALLATION À UN SÉISME

Et soudain, elle se met à trembler, propageant ses vibrations à la structure de plus de 40 tonnes solidement fixée. La table vibrante Azalée, capable « d'exciter » dans six axes des maquettes de bâtiments pesant jusqu'à 100 tonnes, est l'un des moyens d'essais sismiques les plus importants d'Europe. Mise en service en 1990 au sein de la plateforme Tamaris du CEA à Saclay, elle a rejoint Vésuve (1969), Tournesol (1976) et Mimosa (1982). Associées à des codes de calcul très performants, tel que Cast3M, elles permettent d'anticiper le comportement des structures et équipements face à un séisme, et d'en atténuer les conséquences. Forte de cette expertise reconnue, Tamaris est mise à disposition des industriels et des scientifiques nationaux et internationaux. ●

Ci-dessus :

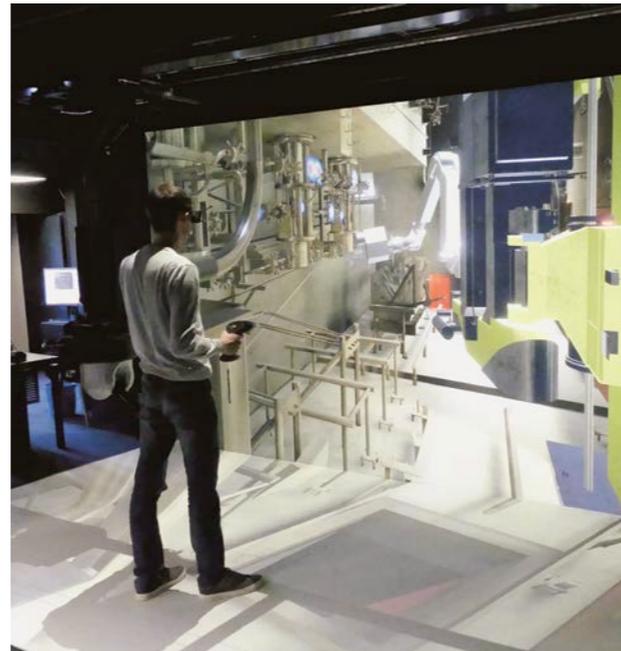
Essais sismiques sur une maquette échelle 1/4 d'un bâtiment, sur la table vibrante Azalée à Saclay (2009).



©Stroppa/CEA



©CEA



©CEA



©E. Stankislas/CEA

7

DÉMANTÈLEMENT SUR MESURE

DES CHANTIERS D'ENVERGURE

Enjeu majeur, l'assainissement-démantèlement concerne actuellement 36 installations au CEA qui mène de front chantiers et R&D depuis les années 1960. Une expertise mondiale qui permet d'optimiser en continu la sûreté et l'efficacité de ces opérations d'envergure.

C'est une opération unique en son genre. Lancé en 1998, le chantier de l'usine UP1 du CEA à Marcoule est le plus gros projet pilote d'assainissement et de démantèlement (A&D) jamais conduit dans le monde. Cette installation, d'une surface équivalente à 20 000 m² de plancher, a permis durant quarante ans de traiter le combustible usé des réacteurs de la

filiale des UNGG (voir p. 9 et 12). Ses trois ateliers recèlent toute une série d'équipements (dissolveurs, cuves, boîtes à gants...) qu'il s'agira de débarrasser des résidus de matières nucléaires, démonter, puis évacuer vers les centres de traitement et d'entreposage adaptés. Objectif: obtenir le déclassement du site par l'ASN, autorité de sûreté nucléaire qui veille à ce que toutes les étapes de l'A&D se déroulent conformément aux autorisations qu'elle délivre.

Une vingtaine d'installations démantelées en 20 ans

Au CEA, de nombreuses structures (allant du petit système expérimental au réacteur de recherche) devenues obsolètes sont à l'arrêt. Toutes seront à terme démantelées. « Le CEA réalise ce type d'opération depuis 1962, raconte Éric Gouhier, expert international du CEA-DDSD. À l'époque, il s'agissait de traiter le site de Fontenay-aux-Roses qui abritait le premier réacteur français, la pile Zoé, l'usine Pu (plutonium) et le bâtiment de radiochimie. » Depuis, cette activité a abouti, rien qu'au cours de ces vingt dernières années, au démantèle-

ment d'une dizaine de réacteurs et d'une douzaine d'usines et de laboratoires. Avec une première en 2014: l'entière dénucléarisation du centre CEA de Grenoble et de ses six installations nucléaires de base à l'issue d'un programme initié en 2001.

De la particularité de chaque chantier

Les chantiers sont longs. Car les installations du CEA ont été conçues à des fins de recherche spécifique et ne peuvent, contrairement aux sites industriels d'Orano ou d'EDF, bénéficier d'un effet de « série »: chaque cas est particulier et nécessite pour le CEA, maître d'ouvrage, une phase de préparation amont qui mobilise de la R&D. « Cette dernière vise à la fois à identifier des solutions techniques innovantes en termes de sûreté et de coût mais aussi à essayer de développer des standards en matière de démantèlement », explique Magali Saluden, cheffe de programme au CEA-DDSD. Que cela concerne la mise au point d'une matrice cimentaire spécifique pour conditionner les déchets de la filière des réacteurs UNGG, ou la définition des conditions de

reprise des fonds d'équipement d'UP1, ces recherches appliquées peuvent aussi être prospectives. Comme lorsqu'il s'agit d'étudier des scénarios de rupture pour la reprise et le conditionnement des déchets ou de nouvelles méthodes de mesures nucléaires pour conforter l'inventaire radiologique de déchets historiques.

Un moteur pour l'innovation

« Le CEA est réputé pour ses innovations », explique Yves Soulabaille, expert-robotique du CEA-DDSD. À commencer par l'emblématique contrôleur TAO (téléopération assistée par ordinateur) du CEA-List qui permet à l'opérateur de ressentir les efforts. Grâce à lui, le bras hydraulique Maestro fut mis en œuvre en 2015 à Marcoule, embarquant un système de découpe laser, autre grande innovation du CEA. « Outre la précision de coupe et les faibles émissions d'aérosols, le laser n'exerce aucune contrainte mécanique sur le bras porteur et son taux de productivité est sans commune mesure avec les outils classiques (disqueuses, cisailles). En 2016, notre procédé a permis de découper une cuve de dissolution de l'usine UP1 de

P. 16, à gauche:

Aspirateur téléopéré Gobie, premier engin permettant d'assainir les zones de travail (2018).

P. 16, à droite:

Préparation en réalité virtuelle d'une intervention (2018).

Ci-contre:

Démantèlement du réacteur Meline à Grenoble (2011).

Marcoule en à peine 50 heures! Ce fut une première mondiale», se souvient l'expert. Par ailleurs, le CEA-List travaille depuis une trentaine d'années sur le développement de systèmes d'imagerie toujours plus performants pour localiser à distance et quantifier des zones de contamination radioactives. Ces travaux ont conduit à des transferts industriels, avec les technologies Cartogram dès les années 1990, puis iPix en 2010, et plus récemment en 2018 avec l'imageur ultra-compact Nanopix compatible avec un embarquement sur robots légers.

Chantiers 4.0

Les avancées reposent notamment sur les technologies de réalités virtuelle et augmentée auxquelles le CEA a dédié en 2018 à Marcoule une salle immersive. Celle-ci a déjà permis d'optimiser de nombreuses opérations. « Employée pour valider la conception des équipements télé-opérés et tester les scénarios de démantèlement en télé-opération et robotique, cet espace permet d'immerger l'opérateur dans un environnement 3D simulant un site d'intervention. Grâce au moteur physique XDE conçu par le List, le dispositif peut mesurer les doses de radiation et rendre compte d'éventuelles collisions, frictions ou forces entre les objets, pour un réalisme optimal », explique Alexandre Douin, chef de laboratoire au CEA-List à Saclay. Avec plusieurs objectifs que précise Caroline Chabal de la DES à Marcoule: « préparer les interventions, former le personnel et, à terme, lui apporter une assistance sur le terrain ». ●

8

DOMPTER LA FUSION NUCLÉAIRE

Recréer sur Terre la réaction de fusion nucléaire à l'œuvre dans les étoiles, pour disposer d'une source d'énergie intarissable.

Le CEA ne pouvait pas passer à côté de ce défi ! Depuis la fin des années 1950, il conçoit, construit et exploite des machines expérimentales aux limites de la science et de la technologie.

Septembre 1958, deuxième conférence de Genève de l'ONU : le nucléaire prend un tournant décisif qui marque les premiers pas de la recherche civile sur la fusion nucléaire par confinement magnétique. « Ces recherches consistent à développer des réacteurs, les tokamaks, dans lesquels on crée un plasma pour permettre à des noyaux de deutérium et de tritium de fusionner et ainsi libérer une grande quantité d'énergie. Dans un tokamak, on vise un plasma à 150 millions de °C, avec une densité de particules de 10^{20} par m^3 , et un temps de confinement de l'énergie supérieur à 1 milliseconde »,

rappelle Jérôme Bucalossi, directeur du CEA-IRFM. En 1973, le CEA met en service son premier réacteur, le Tokamak de Fontenay-aux-Roses (TFR), suivi de Petula à Grenoble en 1977. Pendant plusieurs années, TFR sera le plus puissant au monde détenant un record de température avec un plasma de plus de 20 millions de degrés pendant quelques millisecondes.

Record mondial de durée du plasma

Le challenge de la réalisation de la fusion nucléaire est tel, tant au niveau de la physique des plasmas que de la technologie des machines, qu'il mobilise de concert de nombreuses équipes internationales. En 1984, démarre à Culham (Royaume-Uni) le plus grand tokamak jamais construit, Jet (*Joint European Torus*), que dirigera par ailleurs un ingénieur du CEA. En parallèle, le CEA lance la construction à Cadarache d'un réacteur d'une autre technologie, Tore Supra, qui sera le premier tokamak supraconducteur. Opérationnel en 1988, il fonctionne à l'aide d'aimants supraconducteurs (voir p. 89) et de composants activement refroidis à eau pressurisée. Précurseur dans le domaine et conçu pour produire des plasmas de longue durée, Tore Supra obtient

en 2003 le record mondial en maintenant pendant 6 minutes et 30 secondes un plasma à plus de 50 millions de °C.

Accueillir Iter à Cadarache

Fort de cette expertise, la France se positionne pour accueillir l'étape suivante, à savoir le projet international Iter. En 2006, l'accord est signé entre 35 pays (Chine, Corée du Sud, États-Unis, Inde, Japon, Russie, Suisse et ceux de l'Union européenne).

La première pierre du site est posée en 2007 à Cadarache. Enjeu : démontrer la faisabilité de la production d'énergie grâce à la fusion, source d'énergie à l'impact environnemental faible, tel que l'explique Jérôme Bucalossi : « la réaction de fusion entre un atome de deutérium et un atome de tritium produit un atome d'hélium et un neutron. Le deutérium est abondant dans l'eau de mer, mais le tritium, radioactif, doit être produit. L'un des enjeux d'Iter est de tester comment générer ce dernier in-situ, grâce à certains composants à base de lithium ».

Préparer le terrain avec West

La communauté scientifique vise un premier plasma d'Iter à partir de 2025 (l'assemblage des premiers éléments a débuté en 2020). Pour cela, les tâches se répartissent et le CEA se voit confier la qualification de certains composants clés du futur tokamak.

En 2016, Tore Supra est adapté, devenant « West », pour tester le « divertor » d'Iter. Placé sur le plancher de la chambre à vide, il concentre les flux de particules et de chaleur et assure l'extraction de l'hélium. Il devra résister à des températures de l'ordre d'un tiers voire de la moitié de celles à la surface du Soleil. D'où la nécessité de produire et d'étudier les phénomènes à l'œuvre via des expérimentations et des modélisations numériques très complexes. « L'ADN du CEA ! », conclut le physicien. ●

Page de gauche :

Inspection des composants du « divertor » dans le tokamak West du CEA à Cadarache (2020).





9

INTERVIEW



« Coordonner la filière française de l'hydrogène »

L'État a annoncé en septembre 2020 un plan de 7 milliards d'euros pour développer la filière française de l'hydrogène, coordonné par le CEA. Le point avec Florence Lambert, la spécialiste en la matière.

Pourquoi ce rôle central du CEA dans la filière hydrogène ?

Le CEA a étudié très tôt l'hydrogène et n'a jamais cessé de le faire. Dès les années 1960, ses ingénieurs cherchaient comment stocker les surplus de production électronucléaire. Au début des années 1980, ils se sont orientés vers la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau, plus adaptée aux productions locales d'énergies renouvelables. Puis, en 2002, PSA Peugeot Citroën s'est rapproché de nous pour développer une pile à combustible (PAC) de 80 kW destinée à l'automobile. En janvier 2006, la pile Genepac fut présentée. Une première mondiale !

Malheureusement, la prise de conscience environnementale n'était pas celle d'aujourd'hui, si bien que l'intérêt des industriels pour les PAC est retombé. Le CEA a toutefois poursuivi ses recherches pour différents modes de transport : engins agricoles (avec Massey Ferguson) ; drones (avec le constructeur Inra) ; voiliers, dont le Zéro CO₂, précurseur en 2010 du catamaran *Energy Observer* qui constitue aujourd'hui la vitrine du savoir-faire du CEA en la matière (voir ci-contre). Par ailleurs, le CEA a toujours consacré d'importantes recherches sur la mobilité électrique « classique », basée sur les batteries, car ces deux technologies nous apparaissent complémentaires.

Cette complémentarité est au cœur du partenariat historique avec Symbio...

Cette start-up a pressenti très tôt l'essor de l'hydrogène pour la mobilité du futur. Mais il lui manquait le savoir-faire technologique et la R&D, que nous leur apportons depuis 2010. Leur approche fut visionnaire : plutôt que se positionner sur le marché des véhicules électriques à batteries, ils ont misé sur l'hybridation avec une PAC comme prolongateur d'autonomie pour des véhicules utilitaires et des flottes captives. C'est le cas de leurs premières Renault Kangoo modifiées par l'ajout d'une PAC de 4 kW et d'un réservoir à hydrogène de 350 bars. Ce choix s'est révélé gagnant. Aujourd'hui, Symbio est le principal acteur européen dans le domaine avec plus de 300 véhicules équipés. Joint-venture de Michelin et de Faurecia depuis 2019, elle

passé maintenant au stade industriel afin de produire 200 000 véhicules hydrogène d'ici 2030.

Comment le CEA prépare-t-il le futur de la mobilité hydrogène ?

Notre partenariat avec Symbio se poursuit, et nous continuons à nous intéresser aux secteurs de la mobilité lourde dans lesquels les batteries électriques s'avèrent insuffisamment denses en énergie. Par exemple dans l'aéronautique avec Safran et Airbus, même si la feuille de route est encore longue avant l'avènement des avions électriques, prévus à l'horizon 2040-2050. Nous entretenons également un partenariat sur les trains à hydrogène avec un gros industriel du secteur.

Quid de la production d'hydrogène « vert » ?

L'un des grands enjeux est effectivement de décarboner l'hydrogène industriel, actuellement produit par vaporeformage de gaz naturel fossile. C'est pourquoi sur les 7 milliards alloués à l'hydrogène par le plan de relance du gouvernement, 2,4 milliards le sont à sa production décarbonée. Dans cette perspective, le CEA explore différentes pistes (voir ci-contre et p. 26). Par exemple, le Liten développe depuis 20 ans une technologie d'électrolyse réversible à haute température qui permet d'atteindre de meilleurs rendements (+ 10 à 40 % en théorie) que les procédés classiques. Cela a donné lieu en 2015 à la *spin-off* Sylfen. Nous souhaitons proposer cette solution aux secteurs industriels français car elle devrait atteindre sa maturité industrielle d'ici 2025. À terme, ces électrolyseurs pourraient aussi se coupler à de petits réacteurs nucléaires (SMR), également en gestation au CEA, pour produire localement de l'hydrogène « vert » à partir de sources renouvelables et nucléaires. ●

REPÈRE

2006

Présentation de Génepac, première pile à combustible française

10

DESIGN ZÉRO CO₂

Il vogue depuis trois ans sur les océans de la planète sans la moindre émission de CO₂ et... ce n'est pas un voilier. Le catamaran *Energy Observer* a bénéficié d'une architecture énergétique inédite conçue par le CEA-Liten en 2017 : des panneaux photovoltaïques à hétérojonction (voir p. 25) ; deux éoliennes ; un cerf-volant de traction ; une chaîne de stockage avec production d'hydrogène par électrolyse d'eau de mer désalinisée à bord, un réservoir, une pile à combustible, des batteries lithium-ion ; ainsi qu'un système de supervision énergétique. ●



©Energy Observer

Ci-dessus : Inauguration d'*Energy Observer* par Nicolas Hulot à Paris, en présence de Bertrand Piccard, Anne Hidalgo, Jérôme Delafosse, Florence Lambert (CEA) et le navigateur Victorien Erussard (2017).

11

Un réservoir H₂ pour les voitures

62 litres d'hydrogène stockés à 700 bars dans une coque étanche, formée d'une vessie en polymère sur laquelle s'enroulent 200 000 km de fibres de carbone : voici le réservoir proposé en 2018 par les ingénieurs de la DAM grâce à leurs compétences sur les matériaux composites, développées pour les besoins de la dissuasion nucléaire (voir p. 56-57). Conçu avec la société Raigi, il s'adapte au gabarit des voitures et peut charger 2,5 kg d'hydrogène (le double des réservoirs actuels de 350 bars). Il suffirait d'en embarquer deux pour atteindre une autonomie de 600 km. ●

12

SYLFEN, L'AUTONOMIE ÉNERGÉTIQUE 3 EN 1

2015 : rendement record de niveau mondial en mode électrolyse ! Mais le *Smart Energy Hub* (SEH) de Sylfen est bien plus qu'un électrolyseur produisant de l'hydrogène. Il compile aussi les fonctions de pile à combustible générant de l'électricité et de cogénérateur restituant chaleur et électricité. Objectif : apporter l'autonomie énergétique à des bâtiments pour stocker et gérer leur production de solaire photovoltaïque. Le SEH

s'appuie sur une technologie de rupture du CEA-Liten : l'électrolyse réversible à oxydes solides à haute température qui, contrairement aux autres technologies d'électrolyseurs, n'implique pas de métaux rares. Après un premier essai réussi à Grenoble en 2015 à l'échelle de quelques kilowatts, son mode réversible a été validé sur un démonstrateur fourni à un industriel en 2018. À présent, Sylfen se prépare à produire 3 à 5 unités en 2021. ●

13

Électrifier les avions

Imaginez un taxi venir vous chercher à la gare et vous déposer sur le toit de votre hôtel ! C'est le projet fou d'Airbus, dont le prototype de taxi volant 4 places CityAirbus a été testé avec succès en 2019. À son bord : une architecture de batteries lithium-ion conçue avec des ingénieurs du CEA-Liten qui n'en sont pas à leurs premiers essais. Toujours pour Airbus, ils ont instrumenté le drone de livraison Skyway dont les essais ont débuté en 2019. Auparavant, après 4 ans de R&D commune, l'avion électrique E-Fan parvenait à franchir la Manche en toute autonomie, le 10 juillet 2015. « Nous nous sommes orientés sur la mobilité "aérienne", secteur de niche aux nombreuses contraintes en termes de densité énergétique à fournir. L'enjeu est stimulant car, en plus de décarboner les transports, il autorise de nouveaux usages notamment pour délester la surcharge du trafic urbain », explique Hélène Burlet, directrice adjointe de la DPE à la DES. ●



Ci-dessus : Taxi volant CityAirbus en phase d'essai (2019).



©Nawatechnologies

14



LES PREMIÈRES BATTERIES À CHARGE ULTRARAPIDE

Comment stocker un maximum d'énergie et la restituer en des temps records ? Les supercondensateurs peuvent répondre à cet enjeu, avec leurs électrodes en nanotubes de carbone alignés.

En 1991, le physicien japonais Sumio Iijima révèle la structure des nanotubes de carbone, matière très prometteuse de la famille des fullerènes. Au CEA, cela ne passe pas inaperçu ! Martine Mayne, aujourd'hui responsable adjointe au CEA-Iramis, part se former en 2000 chez le découvreur des fullerènes en personne, H.W. Kroto, prix Nobel de chimie 1996. Et dès son retour au CEA en 2001, elle réussit à faire croître des nanotubes très purs en alignement contrôlé : « cette matière offre une remarquable conductivité électrique, thermique et une très grande résistance mécanique ». En 2007, un chercheur de l'université Cergy-Pontoise la contacte.

Il cherche à valider l'intérêt de ces nanotubes alignés pour élaborer des électrodes de supercondensateur, système hybride entre une batterie qui stocke beaucoup d'énergie et un condensateur au temps de charge-décharge très rapide. Pari réussi après quelques développements communs ! Pascal Boulanger, de l'Iramis, lance alors la start-up Nawatechnologies en 2013, tandis que son collègue Mathieu Pinault travaille à réduire la température du procédé de croissance. Il s'agit de pouvoir l'utiliser sur de l'aluminium, meilleur substrat pour les électrodes de supercondensateurs mais dont la température de fusion est de 660°C. L'équipe y parvient en 2020, permettant à Nawatechnologies de lancer la production préindustrielle de ses batteries à charge ultrarapide. ●

Ci-dessus : Le Nawaracer, concept de moto électrique à batteries et supercondensateurs (2020).



15

INTERVIEW

« Interconnecter les réseaux d'énergie »

Témoins privilégiés des besoins énergétiques de la France depuis 75 ans, les équipes du CEA ont développé une approche intégrée du mix énergétique décarboné que nous relate Patrice Tochon, chef de programme à la DES.

En quoi consiste la vision intégrée des réseaux d'énergie promue par le CEA ?

Elle part du constat que les trois réseaux d'énergie (chaleur, gaz et électricité) sont à la fois centralisés pour la production et déconnectés les uns des autres concernant les usages. Or, cela doit changer. D'une part, les énergies renouvelables, par nature intermittentes et décentralisées, auront demain une part importante dans le mix énergétique. D'autre part, tout le monde pourra produire de l'énergie et donc en injecter dans le réseau. Enfin, si à un moment donné il y a une inadéquation entre la demande et l'offre, il faudra être capable de convertir l'énergie excédentaire (par exemple l'électricité) en un autre vecteur (chaleur, ou gaz hydrogène) pour délester, stocker et *in fine* éviter tout *black-out*. L'enjeu est de découpler ces réseaux et repenser leur pilotage à l'échelle locale, en partant des usages.

Quels exemples préfigurent cette approche ?

Il y a le concept du *power-to-heat* (électricité-chaleur) qui consiste, par exemple, à convertir les surplus d'électricité photovoltaïque sous forme de chaleur utile aux bâtiments *via* des pompes à chaleur, et à recourir à du stockage thermique lorsque ces bâtiments n'en ont pas besoin. C'est ce que nous expérimentons depuis six ans avec la Compagnie de chauffage de Grenoble, au niveau du pilotage « intelligent » du réseau de chaleur local. De même, avec le *power-to-gaz* (électricité-gaz), et dans le cadre du projet Ghryd initié à Dunkerque en 2014, il s'agit de produire de l'hydrogène à partir d'électricité éolienne, et de l'injecter (à hauteur de 20 %) dans un réseau de gaz naturel pour alimenter à la fois des flottes de bus municipaux et des gazinières de bâtiments locaux.

Comment le CEA peut-il se positionner en intégrateur d'énergies ?

Nous sommes le seul organisme français à mener de la recherche appliquée sur les technologies des trois vecteurs énergétiques. Sur l'électricité évidemment, à travers nos recherches sur le nucléaire,

le solaire, les batteries. Au niveau de la chaleur, les développements portent sur des composants tels que échangeurs, pompes à chaleur, dispositifs de stockage thermique. Quant au gaz, nous nous y intéressons à travers la production d'hydrogène décarboné par électrolyse de l'eau (voir p. 20) et à sa combinaison avec du CO₂ pour synthétiser des molécules d'intérêt comme du méthane. Sans compter que nous avons un savoir-faire global en matière de simulation numérique qui nous rend légitimes pour le pilotage de systèmes complexes.

Quels scénarios sont envisagés pour l'interconnexion des réseaux dans le futur ?

Il y aura plusieurs temporalités. À court terme, il s'agit de mettre en place un pilotage plus intelligent des réseaux en adéquation avec la demande. À moyen terme, il faudra généraliser le stockage d'énergie en créant des ponts entre les trois vecteurs. Enfin, à partir de 2035, deux nouveaux éléments s'ajouteront à cette vision : la massification du véhicule électrique, les objectifs nationaux en prévoyant 5 millions d'unités à l'horizon 2028 ; et la production industrielle d'hydrogène décarboné par électrolyse. Les voitures électriques à l'arrêt pourront alors participer au délestage du réseau, *via* leurs batteries, et renvoyer des électrons vers le réseau en cas de besoin, grâce à des bornes bidirectionnelles. Quant au vecteur hydrogène, il permettra non seulement d'absorber les surplus d'électricité mais aussi d'en produire quand elle manque par l'intermédiaire de piles à combustible, selon un processus réversible de *power-to-power* (électricité-électricité). ●

MOTS-CLÉS

Power-to-gas
électricité-gaz

Power-to-heat
électricité-chaleur

Power-to-power
électricité-électricité



© Godart/CEA

16

DES MICRO-ALGUES POUR PRODUIRE DES BIOCARBURANTS

Les biocarburants, on en parle depuis longtemps. Mais leur rentabilité par rapport aux carburants fossiles reste faible, et la concurrence avec l'usage des terres pour la nutrition est insoutenable. Des solutions se profilent.

1973, premier choc pétrolier. À Cadarache, et avec Total, Rhône-Poulenc et le CNRS, le CEA s'intéresse aux bioénergies et aux micro-algues qu'il cultive pour diverses applications, dont les biocarburants de 3^e génération. « Le CEA disposait d'un



© Godart/CEA

savoir-faire sur les micro-algues depuis la fin des années 1950 avec les travaux sur les effets des rayonnements menés par l'académicien Paul Ozenda à Grenoble», rappelle Éric Maréchal, chef de laboratoire au CEA-Irig. À la fin des années 2000, des tentatives d'industrialisation dans le monde révèlent que ces biocarburants sont moins rentables que le pétrole. « La récolte, l'extraction et la conversion des lipides des micro-organismes en biodiesel sont en effet coûteuses et de surcroît énergivores », confirme Younghua Li-Beisson, chercheuse au Biam.

Des souches à forte productivité

En 2008, le CEA explore alors des pistes novatrices. À Cadarache, la toute jeune plateforme Héliobiotec se lance dans le criblage à haut-débit d'une grande « bibliothèque » de micro-algues créée aléatoirement, et parvient à trouver des souches à forte productivité. Sur la même voie, au côté de Total, une équipe de Grenoble se lance en 2013 sur une approche plus ciblée : « nous cherchons à améliorer le rendement et la robustesse de souches déjà exploitées industriellement,

par manipulation génétique. C'est notamment l'objet de la bourse ERC obtenue par Giovanni Finazzi en 2019 », explique Éric Maréchal. Une alternative consiste à identifier des mécanismes cellulaires originaux, pour envisager des technologies de rupture. En 2017, les mêmes chercheurs du Biam, avec ceux des instituts Irig et Joliot du CEA, découvrent une enzyme qu'ils baptisent FAP (Fatty Acid Photodecarboxylase). « Elle a une propriété rare : activée par la lumière naturelle, elle permet aux micro-algues de transformer leurs acides gras directement en hydrocarbures ! », se réjouit Fred Beisson, du Biam. Pour l'heure, les recherches se focalisent sur des stratégies de mutation pour rendre les FAP plus robustes. « Il s'agit également de produire des hydrocarbures à courte chaîne qui, ainsi volatiles, sont plus faciles à extraire du milieu de culture, ce qui améliore la rentabilité du procédé », indique Gilles Peltier, chef de laboratoire au Biam. ●

Ci-dessus :

Analyse de l'ADN et culture de micro-algues sur la plateforme Héliobiotec à Cadarache (2017).

17

LE SOLAIRE À HÉTÉROJONCTION MADE IN EUROPE

En 1990, Panasonic commence à développer une nouvelle technologie photovoltaïque, dite à hétérojonction de silicium. Objectif : atteindre de meilleurs rendements de conversion de l'énergie lumineuse en électricité. Un nouveau challenge pour le CEA !

« En 2005, à l'Ines tout juste créé, nous obtenons une première preuve de concept à 16 % de rendement sur une cellule de 15 cm² », se souvient Charles Roux du CEA-Liten. Les chercheurs poursuivent les innovations, comme la fonctionnalisation des couches déposées en face-avant de la cellule, mais aussi en face-arrière pour capter davantage de photons et augmenter la photogénération de charges électriques. « Puis, en 2013, nous nous dotons d'une chaîne pré-industrielle. À partir de là, les

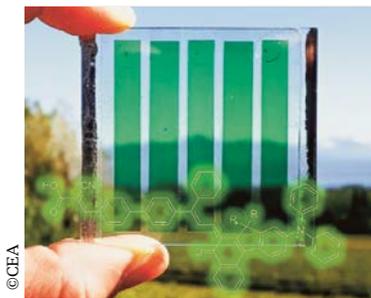
records s'enchaînent jusqu'à atteindre 25 % de rendement sur une surface de 212 cm² en 2020 », indique-t-il. Dépassant la R&D des Japonais et les technologies classiques (22-23 %), ces résultats intéressent les industriels car ils sont reproductibles à haute cadence (2 400 cellules produites par heure). Si bien qu'en 2019, Enel Green Power inaugure la première usine de solaire à hétérojonction d'Europe, en Italie, à partir de la technologie du CEA. Prochaine étape : 30 % de rendement, en associant « en tandem » à l'hétérojonction des matériaux pérovskites prometteurs. Un défi que le CEA cherche à relever, en collaboration avec l'Institut photovoltaïque d'Île-de-France (IPVF) depuis juin 2020. ●

Ci-dessous :

Chaîne pré-industrielle de production de cellules solaires à hétérojonction (2016).



© Avavian/CEA



© CEA

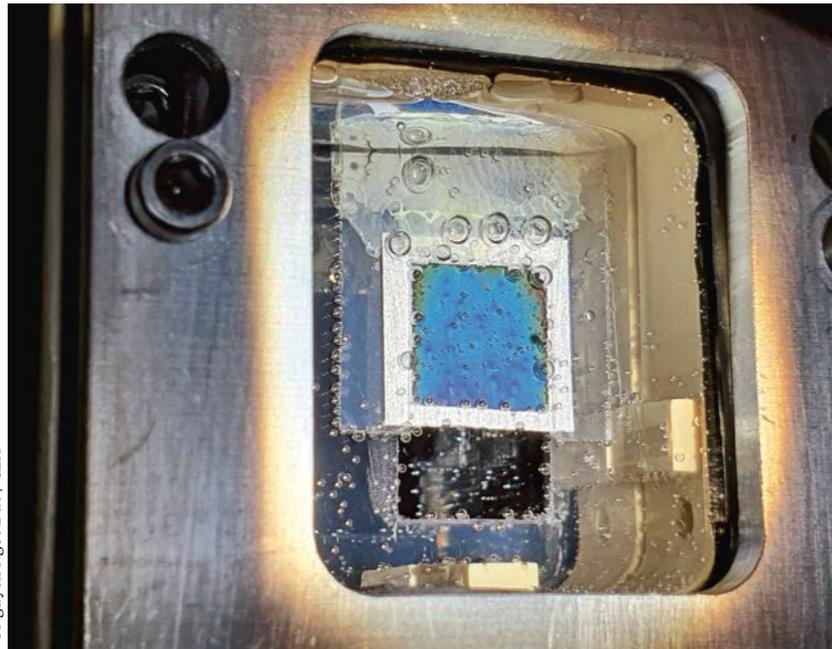
18

L'invention du solaire photochromique

Il a eu une idée de génie, Renaud Demadrille. Depuis 2010, le chercheur du CEA-Irig s'intéresse aux cellules solaires à colorants organiques. Elles présentent de nombreux atouts (efficacité, faible coût, transparence permettant de s'intégrer aux vitrages) et attirent notamment les architectes. En 2015, il innove sur des colorants photochromiques en s'inspirant de ceux des lunettes de soleil. « Leur transparence varie de manière autonome entre 30 % et 60 % en fonction de la luminosité, ils changent aussi de couleur et peuvent produire plus ou moins d'électricité », explique-t-il. Avec la société Solaronix, il valide son concept en 2020 sur une cellule de 14 cm² fournissant 32,5 mW. De quoi envisager équiper les toits ouvrants des voitures, les façades des bâtiments ou des objets connectés. Les recherches se poursuivent grâce à une bourse ERC (2019), pour optimiser les rendements et la stabilité des cellules dans le temps. ●

Ci-dessus :

Cellule changeant de couleur, jusqu'au vert foncé sous forte luminosité, augmentant en même temps son rendement photovoltaïque (2019).



©Nguyen Ngoc Duc / CEA

19 PRODUIRE DU H₂

EN S'INSPIRANT DES PLANTES

En mimant les mécanismes de la photosynthèse, les chercheurs mettent au point des « feuilles artificielles ». Une alternative exploratoire à la production d'hydrogène « vert », vecteur énergétique par excellence.

« L'idée est de concevoir un dispositif qui convertit directement l'énergie lumineuse en énergie chimique, c'est-à-dire qui permet de synthétiser des molécules, dont l'hydrogène, sans production intermédiaire d'électricité », explique Vincent Artero, directeur de recherche au CEA-Irig. Pour ce faire, il s'inspire des algues ! « Chez certaines micro-algues, les photons de lumière captés provoquent des déplacements d'électrons dans leur membrane. Ce « courant » électrique leur sert à oxyder de l'eau pour produire de l'oxygène et à réduire de l'eau pour produire de l'hydrogène. Il s'agit d'une photo-électrolyse de l'eau », résume-t-il. Son équipe et celle de Winfried Leibl du CEA-Joliot se sont ainsi attachées, dès 2002, à mieux comprendre ce mécanisme naturel. En 2008, elles ont été parmi les premières au monde à présenter un système capable de capter des photons et réduire de l'eau, donc produire l'hydrogène !

Catalyseurs bio-inspirés

Spécialisé dans l'étude des enzymes (catalyseurs naturels qui accélèrent les réactions d'oxydation et de réduction

de l'eau au sein de la plante), Winfried Leibl a déterminé que leurs sites actifs n'utilisent que des matériaux abondants comme le fer, le nickel ou le manganèse. « Le coût de nos catalyseurs imitant ces enzymes ne devrait donc pas être un problème majeur », se félicite Vincent Artero dont deux bourses ERC (2012 et 2017) lui ont permis de démontrer le concept de photo-électrodes moléculaires bio-inspirées. Son équipe s'intéresse actuellement, en collaboration avec une université de Hanoï, au développement d'une « feuille artificielle ».

« Aujourd'hui, beaucoup de prototypes ont un rendement de conversion de l'énergie lumineuse en énergie chimique proche de 10%. Cela commence à être suffisant pour envisager d'alimenter une large part des besoins énergétiques d'une maison sur la surface d'un toit », prévoit Winfried Leibl. Reste encore à améliorer leur stabilité pour garantir ces performances sur le long terme. Au final, « la photo-synthèse artificielle devrait atteindre le stade industriel après 2030, soit 10 ans après celui de l'électrolyse (voir p. 20-21) », reconnaît-il. Cette filière pourrait apporter des gains potentiels au rendement global de conversion de l'énergie lumineuse et, comme note Vincent Artero, « au-delà de l'hydrogène, la photosynthèse artificielle permettra à terme de produire des carburants liquides pour la mobilité ». ●

La photosynthèse artificielle devrait atteindre le stade industriel après 2030.

Ci-dessus :

Feuille artificielle composée d'une cellule photovoltaïque sur laquelle sont greffés les catalyseurs bio-inspirés. Sous irradiation, l'eau est décomposée en oxygène (bulles visibles) et en hydrogène (face arrière de la cellule) (2019).



20
INTERVIEW



« Convertir le CO₂ en matière première utile »

Pour lutter contre le réchauffement climatique, il faut drastiquement limiter nos émissions de CO₂ dans l'atmosphère. Depuis une dizaine d'années, des recherches portent également sur la conversion de ce gaz en une source de carbone utile. Une approche d'économie circulaire que nous explique Thibaut Cantat, chercheur au CEA-Iramis.

Qu'est-ce que le cycle du carbone ?

Il y a 4 milliards d'années, les premiers organismes photosynthétiques se sont développés, diminuant et régulant la quantité de CO₂ dans l'atmosphère pour le transformer en molécules organiques. La sédimentation de ces organismes dans les couches géologiques a accumulé d'énormes quantités de carbone sous des formes fossiles (charbon, pétrole, gaz) dont nous exploitons la grande densité énergétique. Mais aujourd'hui, le cycle du carbone est dérégulé par les activités humaines. Imaginez que nous avons consommé ce qui a été produit sur des millions d'années en à peine 200 ans, tout en émettant des milliards de tonnes de carbone dans l'atmosphère !

Quelle est la problématique actuelle ?

D'après les scénarios du Giec¹, la diminution du recours aux énergies fossiles ne suffira pas. En complément, il faudra fort probablement capter le CO₂ qui s'accumule dans l'atmosphère et précipite le réchauffement climatique. Les technologies de captage de nombreux industriels sont matures, avec des projets de stockage durable dans des couches géologiques, mais elles sont énergivores et poursuivent la promotion d'une économie linéaire. C'est pourquoi la communauté scientifique, particulièrement le CEA, mise sur des technologies utilisant le CO₂ comme matière première et des énergies bas-carbone pour fabriquer des molécules d'intérêt chimique ou énergétique, de façon durable et circulaire.

En quoi consiste le recyclage du CO₂ ?

La valorisation du CO₂ nécessite de mettre au point des transformations chimiques ou biologiques capables d'utiliser l'atome de carbone du CO₂ (C) pour créer des liaisons C-H (hydrogène) et C-C fortement énergétiques. Cela est possible en convertissant une énergie bas-carbone (par exemple issue du solaire, du nucléaire ou de l'éolien) en énergie chimique. Cette utilisation du CO₂ permet ainsi de fabriquer des combustibles, carburants, produits chimiques, plastiques, etc.

1. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Cette approche est-elle récente ?

Cette chimie a très peu été développée par le passé. Quand je suis arrivé au CEA en 2009, l'institut Iramis m'a permis de monter une équipe pour l'étudier. En 2012, nous sommes parvenus à développer une réaction chimique simple, non énergivore, permettant de produire à partir de CO₂ des composés formamides, famille de molécules carbonées massivement utilisée dans l'industrie pour fabriquer des colles, solvants et médicaments. Depuis, grâce à plusieurs ERC, nous poursuivons nos recherches pour valoriser également les déchets plastiques ou le monoxyde de carbone des fumées industrielles. Aujourd'hui, ces travaux s'inscrivent dans le cadre plus général de l'économie circulaire du carbone.

Quelles sont les compétences du CEA ?

L'économie circulaire du carbone repose sur la conversion d'énergies bas-carbone. Cette approche est au cœur des missions du CEA, dont les équipes de recherches appliquées et fondamentales ont de solides compétences sur la maîtrise des procédés (biologiques, électrochimiques, thermo-chimiques, photo-électro-catalytiques...) et des matériaux. Il peut ainsi s'investir dans de grands projets collaboratifs, comme par exemple le démonstrateur Jupiter 1000, l'un des plus avancés d'Europe. Il vise à capter le CO₂ produit sur le site industriel de Fos-sur-Mer pour le recombinaire à de l'hydrogène « vert » (voir p. 20) afin d'obtenir du méthane, constituant principal du gaz naturel. Les premiers résultats, attendus en 2021, permettront d'évaluer la viabilité économique de cette chaîne technologique. Et convertir ainsi le CO₂ en source de carbone utile ! ●

REPÈRE

2012

Production de composés formamides à partir de CO₂, utilisables dans l'industrie



AVANCÉES N° 21 À 29

CLIMAT & ENVIRONNEMENT

Interview
« Face aux enjeux climatiques,
nous avons besoin de toutes
les disciplines scientifiques »
p. 30

Modéliser pour prévoir
l'évolution du climat
p. 31

Expert en datation
p. 32

800 000 ans
de climat dans
une carotte de glace
p. 32

Inventorier
le monde marin
p. 33

Icos mesure
les gaz à effet de serre
p. 33

Interview
« Inventer la science
d'un recyclage
écoresponsable »
p. 34

Un air purifié
avec Ethera
p. 35

Recycler les déchets
électroniques
p. 35



« Face aux enjeux climatiques, nous avons besoin de toutes les disciplines scientifiques »

Depuis soixante ans, le CEA s'implique dans les sciences du climat en contribuant aux progrès des connaissances. Du LSCE jusqu'au Giec, dont elle copréside le groupe de travail sur les bases physiques du climat, la paléoclimatologue Valérie Masson-Delmotte en présente les enjeux.

D'où est venu l'intérêt du CEA pour les thématiques liées au climat ?

Le CEA a montré son intérêt pour la question dès les années 1960 : la mesure des faibles radioactivités, l'un de ses domaines d'expertise, ouvrait de nombreuses applications en géosciences, par exemple par la capacité de dater précisément des échantillons environnementaux (voir p. 32). Avec le CNRS, il créa ainsi le Centre des faibles radioactivités (CFR) à Gif-sur-Yvette, suivi dans les années 1970 par la mise en place à Saclay d'un Laboratoire de géochimie isotopique, dont les outils et méthodes ont notamment servi à étudier les variations passées du climat dans les carottes de glace. Dans les années 1980, la prise de conscience du changement climatique du fait des émissions de gaz à effet de serre (GES) dues aux activités humaines commence à s'imposer au sein de la communauté scientifique internationale. Le Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) est créé en 1988 et plusieurs experts du CEA vont y participer. Parallèlement, le CEA se dote de nouvelles capacités de calcul et de simulation. La modélisation du climat, élaborée à partir de la compréhension des mécanismes physiques, est en effet un élément clé pour comprendre les variations des climats passés et établir des évolutions futures physiquement plausibles (voir ci-contre). En 1998, les équipes CEA et le CFR fusionnent pour donner naissance au LSCE.

Qu'ont apporté ces travaux ?

Ils ont contribué à de véritables ruptures de connaissances. La capacité à mesurer les GES dans l'atmosphère dès les années 1970 a notamment permis de suivre la perturbation du climat planétaire par les activités humaines. L'étude des climats passés a montré les couplages étroits entre les variations de température à la surface de la Terre, le niveau des mers et la concentration de l'atmosphère en GES ; ainsi que le rôle clé de l'océan dans le fonctionnement du climat. Plus récemment, les recherches menées au LSCE ont permis de discerner comment des événements extrêmes ponctuels (canicules,

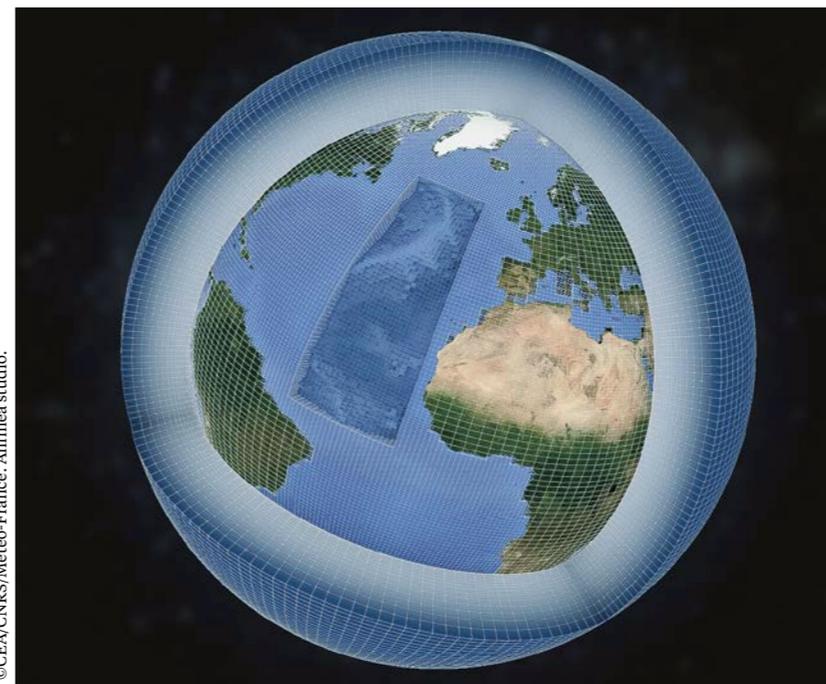
pluies torrentielles, etc.) ont été altérés par le changement climatique d'origine anthropique.

Quels sont les enjeux pour les sciences du climat et du changement climatique ?

Il reste de nombreux défis scientifiques à relever pour comprendre le changement climatique et les évolutions futures plausibles. Des progrès majeurs sont par exemple attendus de la modélisation du climat à une échelle plus fine, pour mieux représenter les processus liés aux nuages et à la convection atmosphérique. Il reste des incertitudes profondes qui demandent des travaux de recherche de longue haleine pour mieux connaître la vulnérabilité de la calotte antarctique et sa contribution à la montée du niveau des mers. De même, quelles sont les implications du dégel des sols de l'Arctique sur les flux de GES vers l'atmosphère ? De nombreux travaux sont aussi en cours pour mieux déterminer les implications régionales d'un climat qui change. Mais nous avons besoin de connaissances mobilisant toutes les disciplines scientifiques, et tout particulièrement les sciences humaines et sociales, les sciences économiques et les sciences de l'ingénieur pour éclairer les réponses possibles.

Quelles sont ces réponses ?

Elles sont liées à la gestion de risque, aux stratégies d'adaptation et aux options permettant d'aller au plus vite vers la neutralité carbone, condition clé de la stabilisation du réchauffement climatique. Les questions sont formidables : comment transformer chaque secteur d'activité vers cette neutralité carbone en construisant un développement résilient, soutenable ? Comment mettre en œuvre des transitions et transformations éthiques, équitables et justes ? À nouveau, toutes les connaissances seront nécessaires, celles des acteurs de terrain et celles du monde académique. Il nous faut coconstruire de nouveaux savoirs et permettre à chacun de se les approprier pour comprendre et agir. À ce titre, la prise de conscience des plus jeunes est spectaculaire, partout dans le monde. ●



©CEA/CNRS/Météo-France - Animéa studio.

22

MODÉLISER

POUR PRÉVOIR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT

La modélisation est un outil essentiel pour la compréhension des climats passés et présents, et pour la prévision de leur évolution. Grâce à ses grandes capacités de calcul, mais aussi à l'expertise de ses chercheurs en paléoclimatologie, le LSCE s'est très tôt positionné dans ce domaine.

« Dès les années 1990, au moment où le CEA a mis à disposition des capacités de calcul pour ses climatologues, une équipe a été constituée pour modéliser les climats du passé pour essayer de les comprendre, aux côtés des experts en reconstruction de ces mêmes climats anciens », explique Masa Kageyama, du LSCE. Depuis, ce laboratoire fait partie des meilleures équipes mondiales en matière de modélisation du climat. Il contribue notamment au développement de l'un des deux modèles fran-

çais de simulation du climat utilisé par le Giec pour la réalisation de ses rapports (pour une trentaine disponible au niveau mondial) : le modèle couplé « Système Terre » de l'Institut Pierre-Simon Laplace¹.

Cet outil associe différentes composantes (atmosphère, océans, glace, continents, etc.). On y trouve notamment le modèle de biosphère continentale Orchidée dans le développement duquel est particulièrement impliqué le LSCE. Ses équipes travaillent à améliorer la représentation des échanges d'énergie et de matière entre la biosphère et l'atmosphère et ont en particulier beaucoup contribué à l'intégration du cycle global du carbone.

Affiner les modèles

« Nous sommes actuellement en train d'inclure les cycles de l'azote et celui du phosphore, ainsi que de nouveaux processus tels que la gestion des prairies et forêts, la modélisation des surfaces d'eau et des feux de végétation, et leurs conséquences sur le climat », indique Catherine Ottlé, du LSCE. Ces processus qui peuvent sembler moins essentiels au niveau global deviennent non négligeables lorsque la résolution spatiale des modèles s'affine. Les équipes du laboratoire travaillent aussi sur d'autres composantes du modèle « Système Terre », telles que la biogéochimie marine (avec le modèle Pisces) ou les calottes glaciaires. Enfin, cette expertise se double de la capacité du LSCE à tester ces modèles de climat en les confrontant directement aux données issues des paléoclimats, ce qui, en les mettant à l'épreuve avec une multitude de conditions chaudes ou froides, les rend plus robustes. Une particularité quasiment unique au niveau mondial. ●

1. L'IPSL rassemble 9 laboratoires publics de recherches en sciences de l'environnement, dont le LSCE.

Ci-dessus :

Modèle Système Terre de l'IPSL. Illustration des grilles des modèles océaniques, atmosphériques et de surfaces continentales.



© F. Rhodés/CEA

23

EXPERT EN DATATION

En climatologie, géologie ou archéologie, la datation des échantillons est une étape incontournable. Elle est réalisée à l'aide de traceurs environnementaux.

Le LSCE s'est forgé une expertise internationale dans ce domaine, née dans les années 1960 avec le Centre des faibles radioactivités (voir p. 30) et la mesure des traceurs environnementaux. Certains éléments chimiques à très faible radioactivité sont en effet des chronomètres précis des temps passés, grâce à leur radioactivité résiduelle ou à l'analyse des désintégrations au sein d'une lignée radioactive. La mesure du carbone 14 (¹⁴C) permet par exemple d'estimer les âges des matériaux organiques jusqu'à quelques dizaines de milliers d'années. L'examen des couples ⁴⁰K/⁴⁰Ar ou ³⁹Ar/⁴⁰Ar dans les roches volcaniques per-

met quant à lui de déterminer des âges allant de centaines de milliers à quelques milliards d'années. Ces méthodes sont notamment utilisées pour la datation d'archives naturelles (glaces polaires, sédiments, cernes d'arbres...), essentielle pour reconstituer les évolutions climatiques passées (voir ci-contre). L'âge de microcoquilles carbonatées (révélé via le ¹⁴C) a par exemple montré que le niveau de la mer était, il y a 21 000 ans, environ 120 m au-dessous du niveau actuel. Et la datation par la méthode uranium-thorium de débris de stalagmites dans la grotte de Bruniquel a montré que des Néandertaliens occupaient et organisaient déjà les grottes européennes il y a 176 500 ans, bien avant l'arrivée d'Homo sapiens... ●

Ci-dessus : Échantillonnage de stalagmite avant datation (oxygène et carbone) (2016).

24

800 000 ans de climat dans une carotte de glace

Vostok, Antarctique, - 55 °C de température moyenne. C'est ici qu'a été extraite une carotte de glace exceptionnelle, témoin de 400 000 ans d'histoire climatique. Un record ! En analysant les bulles de gaz piégées dans la glace, des scientifiques, dont une équipe du CEA, montrent en 1987, et pour la première fois, que le climat est fortement corrélé à la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Vingt ans plus tard, nouveau record avec une carotte de 3,2 km, contenant de la glace vieille de 800 000 ans, extraite par l'équipe du projet européen Epica (associant le CEA). Son étude permet de reconstituer l'évolution de la température sur cette période couvrant neuf cycles glaciaires-interglaciaires, et confirme les résultats de 1987 : depuis 800 000 ans, jamais la concentration en CO₂ atmosphérique n'a été aussi élevée qu'aujourd'hui. En 2019, le projet Beyond Epica prend le relais pour étudier le climat en remontant jusqu'à 1,5 million d'années. ●



© CEA-IPEV

25

INVENTORIER LE MONDE MARIN

Depuis 2006, la goélette de la Fondation Tara Océan sillonne les mers pour comprendre l'impact des changements climatiques et des pressions anthropiques sur les océans. Une aventure à laquelle participe le Genoscope, du CEA-Jacob. Ses équipes effectuent l'analyse génétique de tous les échantillons prélevés par l'équipage : plancton (connu pour produire à lui seul la moitié de notre oxygène) et micro-organismes associés

aux particules plastiques et aux coraux. « Nous avons découvert plus de 100 000 nouvelles espèces marines, dont des bactéries, virus, parasites, micro-algues..., et constitué un catalogue de 150 millions de gènes issus du monde marin », raconte Patrick Wincker, directeur du Genoscope. Des connaissances indispensables pour mieux connaître cette immense biodiversité et suivre sa capacité d'adaptation au changement climatique. ●



© S. Nicaud/CEA/Tara expeditions

Ci-dessus : Mise à l'eau de filets à plancton sur la goélette Tara (2011).



© C. Sardet/Tara oceans/CNRS

Ci-dessus : Petits crustacés planctoniques (*Phronima sp.* et *Sapphirina*).

26

ICOS MESURE LES GAZ À EFFET DE SERRE

Mesurer en continu et en temps réel les concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre (GES) dans toute l'Europe : les stations du réseau Icos s'y emploient depuis 2017.

Enjeux : mieux comprendre les échanges entre atmosphère et écosystèmes (océans, forêts, cultures), et différencier les sources anthropiques des sources naturelles pour améliorer la représentation des GES dans les modèles climatiques. L'idée de la construction d'Icos, à laquelle le LSCE a largement contribué, remonte à 2008, avec le souhait d'homogénéiser les pratiques au niveau des différentes stations de mesure européennes. Ceci pour fournir aux climatologues des données normalisées de haute précision. « Nous avons dès lors coordonné la mise en place des 37 stations atmosphériques du réseau, avec un important travail de standardisation des protocoles d'échantillonnage d'air, d'étalonnage des capteurs et d'analyse des données. Deux autres composantes complètent le dispositif : écosystèmes avec 81 stations, et océans suivis par 21 stations (balises flottantes et sur bateaux) », explique Michel Ramonet, du LSCE. Les premières synthèses de données ont notamment montré l'impact de la sécheresse de 2018 sur toute l'Europe du Nord : le stress hydrique sur les écosystèmes a réduit la capacité d'absorber le CO₂ de l'ordre de 20 %. ●



27

INTERVIEW



« Inventer la science d'un recyclage écoresponsable »

De l'Institut de chimie séparative de Marcoule (ICSM) qu'il a dirigé depuis sa fondation de 2004 à 2015, Thomas Zemb présente une avancée fondamentale, la iénaïque, qui pourrait fortement réduire l'impact environnemental de la chimie du recyclage.

Depuis quand le CEA travaille-t-il sur la chimie du recyclage ?

Depuis toujours ! Je me souviens, en arrivant en 1979, avoir été impressionné par le patrimoine laissé par les pionniers du recyclage du combustible nucléaire (voir p. 12). Ces travaux avaient notamment été initiés par Bertrand Goldschmidt, dernier thésard de Marie Curie il y a 75 ans. Dès les années 1960, que cela soit pour enrichir de l'uranium ou récupérer le plutonium du combustible, les ingénieurs du CEA ont grandement raffiné des méthodes : par exemple, l'extraction par CO₂ supercritique, technique non toxique et préservant les composés actifs utilisée en routine dans de nombreux secteurs (agroalimentaire, pharmaceutique, cosmétique) ; ou encore l'extraction liquide-liquide, qui vise à extraire des métaux en voie soluble, au cœur de l'industrie hydrométallurgique.

Quelle est la problématique actuelle de l'hydrométallurgie ?

Lorsqu'on extrait puis dés extrait sélectivement des métaux, il faut aboutir à une séparation des éléments et à une pureté nécessaire à la réutilisation de ces « déchets ». Cela consiste à transférer un solide vers un liquide, grâce à des acides très forts, puis à raffiner les métaux dissous en un sel métallique à la pureté suffisante pour former un matériau recyclé aux qualités adéquates. Or, les espèces produites sont très toxiques pour l'environnement.

Depuis les années 1960, des efforts importants ont été fournis par la communauté scientifique dans la formulation d'acides et de solvants permettant un recyclage efficace. Dans le cadre du recyclage du combustible nucléaire, les ingénieurs distinguaient jusqu'à 17 classes de recettes de complexes nanométriques intervenant en compétition à l'échelle supramoléculaire !

Qu'avez-vous découvert en 2020 ?

Il se trouve que les fonctionnements des procédés d'extraction étaient bien paramétrés et même reproductibles, mais nous n'avions aucun modèle prédictif de

leur efficacité. Et c'est une problématique que nous venons de résoudre. Grâce à la technique de diffusion de neutrons opérée depuis le réacteur Orphée de Saclay, le CEA a observé en 1998 pour la première fois que les solvants extractants contenaient des « agrégats furtifs ». Nous avons pu alors mesurer les potentiels chimiques (et non plus les concentrations) des solutions extractantes. Dès lors, de nombreuses recherches, notamment dans le cadre d'une bourse ERC, nous ont permis de bâtir une théorie générale baptisée iénaïque, du latin « *ienā* », « je me déplace ». Pour faire simple, la iénaïque traite du transfert d'ions entre des fluides comme l'électronique traite du transfert d'électrons entre des semi-conducteurs. C'est comme de l'électrochimie, mais sans courant électrique !

Quelles perspectives concrètes offre la iénaïque ?

À présent, il ne s'agit plus de développer des molécules-miracles mais d'utiliser des synergies bien connues des pharmaciens pour aboutir à des procédés dix à cent fois plus efficaces que ceux exploités industriellement à ce jour. Les premières applications portent sur l'extraction sans extractant, ou avec des acides organiques moins concentrés, ou encore simplement par extraction douce. Plusieurs pays s'y intéressent, par exemple pour le recyclage des déchets électroniques (voir ci-contre), l'extraction de protéines végétales pour les filières du biogaz, la dépollution des eaux usées, etc. La iénaïque ouvre la voie à une renaissance de l'hydrométallurgie à impact environnemental fortement réduit. ●

MOT-CLÉ

ienaique

du latin *ienā* : « je me déplace »

29

Recycler les déchets électroniques

50 millions de tonnes de déchets électroniques (composants de téléphone, ordinateurs, batteries, cellules solaires, etc.) sont produits chaque année dans le monde.

Seuls 20 % de ces déchets sont recyclés. Or, il s'agit d'une manne riche en « terres rares », ces métaux stratégiques notamment pour l'électronique moderne. L'alliance Scarce, créée en juillet 2018 par le CEA et l'université technologique de Nanyang (Singapour), s'est attelée à cet enjeu crucial d'économie circulaire. « Nous apportons notre savoir-faire en matière de recyclage de matériaux issus du nucléaire, avec des techniques comme l'extraction liquide-liquide. Celle-ci consiste à dissoudre les métaux, puis à les séparer à l'aide de solvants et de molécules extractantes. Nous veillons aussi à diminuer l'empreinte écologique de nos procédés », précise Jean-Christophe Gabriel, co-directeur de Scarce.

Des procédés moins polluants

Pour aller plus vite, les équipes ont imaginé un dispositif de microfluidique qui permet de tester des protocoles d'extraction en quelques jours au lieu de plusieurs mois. Et avancent déjà un premier procédé plus efficace et moins polluant pour le recyclage des terres rares. Pour extraire les métaux contenus dans les batteries au lithium usagées, les chercheurs proposent également un procédé non polluant à base de... poudre de pelures d'orange. ●



©Ethera



28



UN AIR, PURIFIÉ AVEC ETHERA

Vers la fin des années 2000, Thu-Hoa Tran-Thi, chercheuse au sein d'une unité mixte CEA-CNRS, réussit à élaborer des matériaux nanoporeux permettant de détecter et piéger de façon sélective des composés organiques volatils (COV). Ces substances (formaldéhyde, dérivés benzéniques, etc.), émises par les matériaux de construction ou le mobilier (solvant de colle, etc.), sont alors connues pour leur toxicité, provoquant asthme, allergie, irritation...

Très vite, germe l'idée d'exploiter le procédé pour mesurer la qualité de l'air ou le dépolluer, par des dispositifs moins chers

que ceux du marché. C'est ainsi que naît en 2010 la start-up Ethera, lancée avec deux collaborateurs du CEA.

Tout en poursuivant la recherche sur la fonctionnalisation du nanomatériau, la jeune équipe transforme alors l'idée en un capteur commercialisable, avec l'ajout de dispositifs de détection et de lecture de l'information. Les produits Ethera équipent aujourd'hui des piscines collectives et même des purificateurs d'air « grand public ». ●

Ci-dessus : Matériaux nanoporeux développés par Ethera, avant et après piégeage du formaldéhyde.



AVANCÉES N° 30 À 45

SANTÉ

La saga de
l'imagerie médicale
p. 38

Interview
« À l'origine de la
médecine nucléaire
française »
p. 41

L'exploit Iseult
en neuro-imagerie
p. 42

Des tests pour
des diagnostics
ultrarapides
p. 42

Un test pour
détecter la maladie
de la vache folle
p. 43

Maîtriser et optimiser
la dose
p. 44

Le rôle clé de la
molécule HLA-G
dans la réponse
immunitaire
p. 44

Décrypter les effets
des rayonnements
ionisants sur
l'organisme
p. 45

Soigner et guérir
grâce à la
thérapie génique
p. 46

Interview
« Marquer les
molécules pour
les suivre »
p. 48

Un pancréas
artificiel connecté
p. 49

Imageur
pour chirurgie
de la thyroïde
p. 49

Un stent vasculaire
unique sur le marché
p. 49

Sur le front
des pandémies
p. 50

Un exosquelette piloté
par la pensée
p. 51

Une nouvelle ère
de la médecine
p. 52

LA SAGA DE L'IMAGERIE MÉDICALE

LEADERSHIP ET INTÉRÊT PUBLIC

Le CEA a marqué l'histoire de l'imagerie médicale : il a apporté des innovations majeures dans l'instrumentation et a ouvert la voie à de multiples applications, pour la recherche et la santé.

En recevant le prix Nobel de chimie en 1935, Frédéric Joliot, l'un des pères fondateurs du CEA, évoquait déjà l'utilisation des radio-isotopes à vie courte en médecine, pour la recherche et la thérapie. Cette voie allait être explorée dix ans plus tard par le CEA. Elle est intimement liée au développement de l'imagerie médicale.

Dès la divergence de la pile Zoé à Fontenay-aux-Roses en 1948 (voir p. 8-10), l'iode 131 produit est utilisé pour marquer de la thyroxine (une hormone) et étudier la fonction thyroïdienne. Dans les années qui suivent, les radioéléments se diversifient : or 198, mercure 203 ou encore xénon 133 seront fournis par les

réacteurs nucléaires EL2, EL3 et Osiris, mis en service à Saclay entre 1953 et 1966. Des « détecteurs à scintillation », encore peu performants, localisent les traceurs radioactifs émetteurs de rayons gamma injectés au patient, mais ne donnent pas encore d'images des organes.

Un service médical créé dès 1958

En 1958, le CEA crée le Service hospitalier Frédéric Joliot (SHFJ) au sein même de l'hôpital d'Orsay (Essonne), pour développer les applications médicales de ces radio-isotopes (voir p. 41). À la même époque, les Américains inventent la caméra à scintillation, qui conduira à la Tomographie par émission monophotonique (TEMP). En multipliant les détecteurs gamma placés en couronne autour du patient, et grâce à une méthode de reconstruction, il est désormais possible d'obtenir une vraie image. Le SHFJ suit la voie ouverte et acquiert sa première caméra en 1961. La technique donnera naissance à la scintigraphie, examen diagnostique très utilisé en oncologie, en imagerie cardiaque ou pour suivre la fonction thyroïdienne. C'est durant les

années 1970 et 1980, lorsque l'imagerie médicale « explose », que l'expertise du CEA prend toute sa dimension.

Le premier centre européen équipé d'une caméra TEP

En 1975, le SHFJ inaugure le premier cyclotron médical français opérationnel, produisant entre autres du carbone 11 et du fluor 18. Il devient très vite un centre réputé de synthèse de « radiopharmaceutiques ». En 1978, il est le premier centre européen à s'équiper d'une caméra TEP (Tomographie par émission de positons), technologie née au début des années 1970, aujourd'hui couramment utilisée en oncologie. Proche de la TEMP par son principe, la TEP utilise des radio-isotopes différents. Elle donne des images fonctionnelles des organes plus précises, et surtout acquises en quelques secondes au lieu de quelques minutes, ce qui permet de suivre des processus biologiques rapides.

« Le CEA construit aussi des appareils d'imagerie complets. À cette époque (1970-1980), trois laboratoires de Grenoble travaillent sur les détecteurs, l'électronique



©CEA/Pierre Jahan, archives historiques J2387

REPÈRES

1961

Première caméra à scintillation au SHFJ

1975

Premier cyclotron médical français (SHFJ)

1978

Première caméra TEP (SHFJ)

1992

Installation d'un aimant 3T au SHFJ, pour l'IRM fonctionnelle

2007

Création de la plateforme de neuro-imagerie NeuroSpin

Ci-contre :

Installation d'un aimant de 2T au SHFJ (1985).

et la reconstruction d'image», précise Francis Glasser, du CEA-Leti. Les équipes brevètent ainsi en 1984 le principe d'une caméra TEP « à temps de vol », qui donne des images d'une précision spatiale alors inédite. Trois prototypes seront installés en 1990, dont un au SHFJ. Ce principe du temps de vol est aujourd'hui utilisé dans tous les appareils commerciaux. Les équipes conçoivent également une caméra à scintillateurs liquides, qui équipera le SHFJ en 1988 pour la TEMP.

Leader français de l'IRM

Dans les années 1970, émerge un autre type d'imagerie : l'imagerie par résonance magnétique (IRM). Ici, nul besoin de traceur radioactif injecté au patient. Basée sur le phénomène de résonance magnétique nucléaire (RMN), l'IRM utilise des champs magnétiques produits par de puissants aimants et révèle les détails anatomiques des tissus mous : muscles, cerveau et organes. Le CEA dispose alors à Saclay d'une véritable « école de la RMN », dirigée par Anatole Abragam et Maurice Goldman, à l'origine de plu-

sieurs découvertes théoriques majeures dans les années 1960 et 1970. En parallèle, à Grenoble, existe un savoir-faire dans le domaine du magnétisme, apporté par Louis Néel, prix Nobel de physique en 1970 et premier directeur du centre CEA de Grenoble.

Création du Magniscan

En 1985, le SHFJ inaugure ainsi un énorme aimant de 2 teslas – un record pour l'époque –, et s'apprête à devenir un centre pionnier pour l'IRM. Développé par les physiciens du CEA, cet appareil servira entre autres à des études marquantes sur la myopathie. À la même époque, la Compagnie générale de radiologie (rachetée par General Electric en 1987) crée, notamment avec les équipes du CEA-Leti, le premier vrai appareil d'IRM français : le Magniscan de 0,5 T. C'est sur cette machine que Denis Le Bihan, alors interne en radiologie et futur directeur de NeuroSpin, invente l'IRM de diffusion en 1985. Cette innovation majeure est aujourd'hui utilisée dans le monde entier pour détecter en urgence les premiers signes d'AVC,

évitant aux patients de lourds handicaps, et aussi en cancérologie pour visualiser les tumeurs.

NeuroSpin, dédié à l'imagerie cérébrale

Deuxième tournant au début de la décennie suivante : l'IRM devient fonctionnelle. Cette nouvelle modalité, qui repose sur le niveau d'oxygénation du sang, permet de « voir le cerveau travailler »... et commence à concurrencer la TEP. En 1992, le SHFJ acquiert alors un imageur de 3 teslas – encore un record – et se lance dans l'IRM fonctionnelle, étudiant en particulier le cerveau sain ou malade. À la même époque, l'équipe RMN du CEA s'implique très fortement dans la formation des médecins et dans le formalisme quantique, qui permet de bien appréhender la RMN et l'IRM en s'appuyant sur l'essor de l'informatique. Les champs de recherche sont alors immenses, tout comme l'expertise du CEA. Ils déboucheront en 2007 sur la création de NeuroSpin. Ce centre unique en Europe est dédié à l'imagerie cérébrale, en particulier grâce à de puissants imageurs IRM. →



© L. Godart/CEA

« Avec celui du projet Iseult et ses 11,7 teslas, nous allons observer le cerveau à l'échelle de quelques milliers de neurones et pourrons tester des hypothèses totalement nouvelles sur son fonctionnement », s'enthousiasme Denis Le Bihan (voir p. 42). Ces travaux en neurosciences vont de pair avec une R&D constante sur toutes les composantes des appareils (antennes pour la transmission des signaux cérébraux, gradients de champs magnétiques, etc.) et sur les algorithmes de reconstruction d'images.

L'IA ouvre le champ des possibles

Les années 2000 voient aussi l'irruption du *big data* et la naissance de l'intelligence artificielle (IA), des domaines dans lesquels le CEA a, là aussi, développé un savoir-faire reconnu. « Quand on veut découvrir quelque chose avec certitude sur une pathologie cérébrale, il faut rassembler des milliers de cas, d'où une énorme masse de données. De plus, face à un objet aussi complexe, l'IA peut nous aider à dépasser les limites de la perception humaine », affirme Jean-François

Mangin, de NeuroSpin. En témoigne, par exemple, la création du Cati (Centre d'acquisition et de traitement d'images) pour la maladie d'Alzheimer, une plateforme qui coordonne une centaine d'imageurs IRM et TEP répartis sur toute la France, et compte aujourd'hui des images de plus de 10 000 cerveaux de patients. Soixante-quinze ans après sa création, le CEA s'est forgé une place incontestée dans le panorama de l'imagerie médicale. Le SHFJ est devenu un grand centre européen d'exploration fonctionnelle, au service de la recherche et de la clinique, tant pour le diagnostic que pour la thérapie. Ses équipes se concentrent sur les maladies cérébrales et l'oncologie (voir ci-contre). NeuroSpin excelle dans ses travaux sur les maladies neurologiques et neurodégénératives, les mécanismes et troubles cognitifs. Et la recherche continue au Leti, engagé dans plusieurs programmes de R&D et partenariats industriels pour développer la prochaine génération d'imageurs. ●

FOCUS

Le premier scanner français

La tomodensitométrie, qui consiste à recréer des images X en trois dimensions, plus communément appelée « scanner », est aujourd'hui la technique d'imagerie 3D la plus courante dans les hôpitaux. C'est au CEA-Leti que l'on doit le développement du premier appareil français en 1975, installé en 1979 au CHU de Grenoble avec la Compagnie générale de radiologie. À partir des années 1990, le Leti se lance dans les détecteurs en matériau semi-conducteur. En 2011, il transfère sa technologie à Siemens Healthineers, qui a récemment annoncé les performances inédites de ses premiers prototypes.

Ci-dessus :
Examen en imagerie
TEP-IRM au SHFJ (2018).



31

INTERVIEW

« À l'origine de la médecine nucléaire française »

Le Service hospitalier Frédéric Joliot (SHFJ), unité de R&D créée en 1958 au sein de l'hôpital d'Orsay (Essonne), a lancé la médecine nucléaire française. Une aventure que nous raconte Vincent Lebon, chef du service.

Comment se situe le SHFJ dans la médecine nucléaire française ?

Cette discipline s'est en réalité construite au SHFJ. Elle consiste à utiliser des radiopharmaceutiques pour diagnostiquer et traiter diverses maladies, en association avec des moyens d'imagerie dédiés. Aujourd'hui encore, nous sommes un acteur majeur de la R&D française dans ce domaine. Nous développons des radiopharmaceutiques innovants, en accompagnant leur transfert vers les applications cliniques. Nous sommes aussi un service médical, qui dispense des actes d'imagerie pour la population Nord-Essonnoise.

Le CEA est donc aussi pionnier dans la production de radio-isotopes et de radiopharmaceutiques en France ?

Oui, via le SHFJ et le réacteur nucléaire Osiris, exploité à Saclay de 1966 à fin 2015. Osiris a produit des radio-isotopes émetteurs de rayonnements gamma pour la thérapie, mais a surtout été l'un des rares réacteurs au monde fournisseurs de molybdène 99, le précurseur du technétium 99m, utilisé dans 80 % des scintigraphies. Il a couvert à lui seul entre 5 et 12 % de la demande mondiale, selon les années. Le réacteur Jules Horowitz, en cours de construction au CEA de Cadarache, prendra la relève dès sa mise en service. Au SHFJ, nous produisons des radio-isotopes un peu différents. Ce sont des émetteurs de positons pour la TEP, comme le ¹¹C et le ¹⁸F, produits grâce à un cyclotron. Ces isotopes à vie très courte sont ensuite greffés par radiochimie sur des molécules pour devenir des radiopharmaceutiques, injectés aux patients. Le plus emblématique d'entre eux est sans doute le ¹⁸F-DG, glucose marqué au fluor 18, qui a révolutionné le diagnostic des cancers par la TEP. Le SHFJ a assuré pendant 10 ans, de 1998 à 2008, la totalité de la production francilienne de ¹⁸F-DG, laissant aux industriels le temps d'investir dans des cyclotrons pour prendre le relais. Nous avons accompagné cette transition, tout comme la diffusion massive de la TEP (aussi appelée PET scan) à l'hôpital.

Vers quoi s'orientent-on en matière de production de radiopharmaceutiques ?

L'avenir, c'est leur production automatisée et miniaturisée pour la TEP au plus près du patient, en allant jusqu'à la mise en seringue. Nous finissons d'installer actuellement iMiGiNE, le premier prototype de plateforme de production automatisée, conçu en partenariat avec l'industriel PMB. À terme, ce système permettra de fournir un large panel de radiopharmaceutiques personnalisés pour chaque type de maladie, en quelques minutes. Ce type d'équipement préfigure ce que sera l'hôpital de demain.

Pouvez-vous citer quelques exemples de radiopharmaceutiques innovants ?

Je citerai notre travail sur la fludarabine, ce médicament utilisé pour traiter la leucémie lymphoïde. Nos équipes de Caen ont eu l'idée de la marquer au fluor 18 et de l'utiliser pour diagnostiquer la maladie. Le procédé de marquage a été breveté en 2008 et transféré en 2019 à un industriel, qui devrait poursuivre sa mise en œuvre. Autre exemple avec le DPA-714, développé au SHFJ il y a une dizaine d'années. Ce composé se fixe spécifiquement sur les cellules gliales lorsque celles-ci sont dans un mode inflammatoire. Il sert à étudier le rôle très mal connu de l'inflammation cérébrale. Est-elle toxique ou protectrice pour le cerveau ? Des protocoles de recherche clinique sont en cours sur l'épilepsie, la maladie d'Alzheimer et la sclérose en plaques.

Comment voyez-vous l'évolution de l'imagerie en clinique ?

L'avenir de la discipline à l'hôpital, c'est le PET scan, très supérieur à la scintigraphie en résolution d'images et sensibilité de détection, aujourd'hui associé au scanner (tomodensitométrie). La tendance est aussi au couplage de plusieurs types d'imagerie : TEP-IRM ou encore TEP-ultrasons (échographie). Les ultrasons donnent des informations par exemple sur la microvascularisation des tumeurs ou l'élasticité des tissus. L'idée est de multiplier les grilles de lecture, pour améliorer les performances en matière de diagnostic et de pronostic sur la réponse au traitement. ●

L'EXPLOIT ISEULT EN NEURO-IMAGERIE



©P. Dumas/CEA

11,7 teslas, soit 223 000 fois le champ magnétique terrestre : Iseult sera le plus puissant IRM au monde dédié à la recherche médicale.

Ce géant de 132 tonnes, de 5 m de long et 5 m de diamètre, permettra aux équipes de NeuroSpin d'explorer le cerveau avec une précision inégalée. Au cœur du dispositif : l'aimant. Imaginé par les physiciens du CEA-Irfu – reconnus au niveau international pour leur savoir-faire en la matière –, et construit par Alstom (intégré depuis à General Electric), il a été livré en 2017. « Pour obtenir un champ magnétique aussi intense, il faut alimenter l'aimant avec un très fort courant, ici de 1 500 ampères, et le maintenir à une température proche du zéro absolu (0 K, soit - 273,15°C) grâce à 7 500 l d'hélium liquide superfluide. Le matériau conducteur, à base d'un alliage de niobium-titane, fonctionne alors à l'état supraconduc-

teur et transporte le courant sans aucun échauffement », explique Lionel Quetier, du CEA-Irfu. Après 3 mois et demi de descente en froid, l'aimant a atteint pour la première fois en 2019 son champ magnétique nominal de 11,7 T.

« L'installation des équipements nécessaires pour que l'aimant devienne un imageur est en cours, en collaboration avec Siemens. Cette étape inclut l'antenne placée autour de la tête du patient, qui va capter les signaux cérébraux. Elle est le fruit d'un important effort de R&D conduit par les instituts Joliot et Irfu du CEA. En parallèle, de nouveaux produits de contraste spécifiques à ces IRM à très haut champ sont préparés avec l'industriel Guerbet. » Puis, place aux premières images, qui seront réalisées dans un premier temps... sur un kiwi. ●

Ci-dessus :

Arrivée de l'aimant du projet Iseult au CEA Paris-Saclay (2017).



©Magali Vacher/CEA

Des tests pour des diagnostics ultrarapides

Toxines, virus, bactéries... Comment les détecter au plus vite dans un échantillon biologique ? Grâce à des tests de détection rapide que le CEA développe depuis une vingtaine d'années, en partenariat avec des industriels. Ces tests utilisent des anticorps monoclonaux capables de détecter des cibles de natures variées. Après le test prion en 1998 (voir ci-contre), sont venus des dispositifs de type bandelette comme les tests de grossesse, donnant un résultat en moins de 15 min : mallette multitest (ricine, toxines botuliques, anthrax...) pour la lutte contre les menaces NRBC en 2010 (voir p. 64), test du virus Ebola (2014), test détectant les résistances aux antibiotiques (2017), tests sérologique et virologique Covid-19 (2020-2021). Simples à mettre en œuvre, peu chers, stockés à température ambiante, ils sont utilisables sur le terrain et ne nécessitent aucune formation particulière, matériel de laboratoire ou électricité. ●

Ci-dessus : Lecture du test de diagnostic rapide du virus Ebola (2014).

UN TEST POUR DÉCELER LA MALADIE DE LA VACHE FOLLE

La crise de la « vache folle » éclate en mars 1996, avec l'annonce de la probable transmission à l'homme de l'encéphalopathie spongiforme bovine (ESB), une maladie neurodégénérative qui sévit depuis plusieurs années dans les cheptels britanniques. Le responsable ? Le prion, une protéine cérébrale dont l'agrégation sous une forme anormale provoque la destruction des neurones. Transmis via l'alimentation, il induirait chez l'homme une variante de la maladie de Creutzfeldt-Jakob (MCJ), mortelle et sans traitement. Une hypothèse depuis confirmée.

Le gouvernement français se tourne alors vers le CEA, déjà connu pour ses travaux sur la MCJ, dérivés de l'étude des prions et de leur résistance parti-

culièrement élevée à l'action des rayonnements ionisants et UV. Il dispose de plus d'un laboratoire de haute sécurité microbiologique. Dès le mois de juin 1996, ses équipes publient la première démonstration expérimentale de la transmissibilité de l'ESB au primate, après une incubation silencieuse de plusieurs années, avec la même signature que chez l'humain. Deux ans plus tard, elles proposent un test rapide de diagnostic *post-mortem* de l'ESB. Celui-ci repose sur la détection de la forme anormale du prion dans des échantillons de cerveau par des anticorps spécifiques conçus en laboratoire.

Le test le plus sensible

Le test est validé en mai 1999 et reconnu comme étant le plus sensible par une étude internationale menée par la

Commission européenne. Transféré à la société Bio-Rad, il est commercialisé dès 2000, puis employé à grande échelle à partir de 2001 dans les abattoirs européens afin d'écartier les animaux infectés de la chaîne alimentaire. Il sera par la suite vendu dans le monde entier. Les redevances que le brevet amènera au CEA aideront à financer la construction de nouvelles plateformes de recherche comme NeuroPrion (prions et maladies émergentes). Aujourd'hui encore, le test prion reste le plus important succès de transfert industriel en santé du CEA.

Alzheimer, Parkinson et Huntington

Cette réussite scientifique ancre définitivement au CEA la recherche sur les maladies neurodégénératives, dont on pense qu'elles se développent selon un mécanisme « prion-like » : accumulation dans le cerveau de protéines spécifiques, mal repliées et toxiques, puis amplification et propagation de ces agrégats. Les chercheurs se concentrent sur les maladies d'Alzheimer, de Parkinson et de Huntington, trois pathologies à fort enjeu de santé publique. Leurs objectifs ? Comprendre les mécanismes moléculaires sous-jacents, proposer des diagnostics plus précoces et explorer des stratégies thérapeutiques innovantes, comme la thérapie génique (voir p. 47). ●

REPÈRES

1999

Validation (par la CE) du test CEA de diagnostic rapide du prion

2000

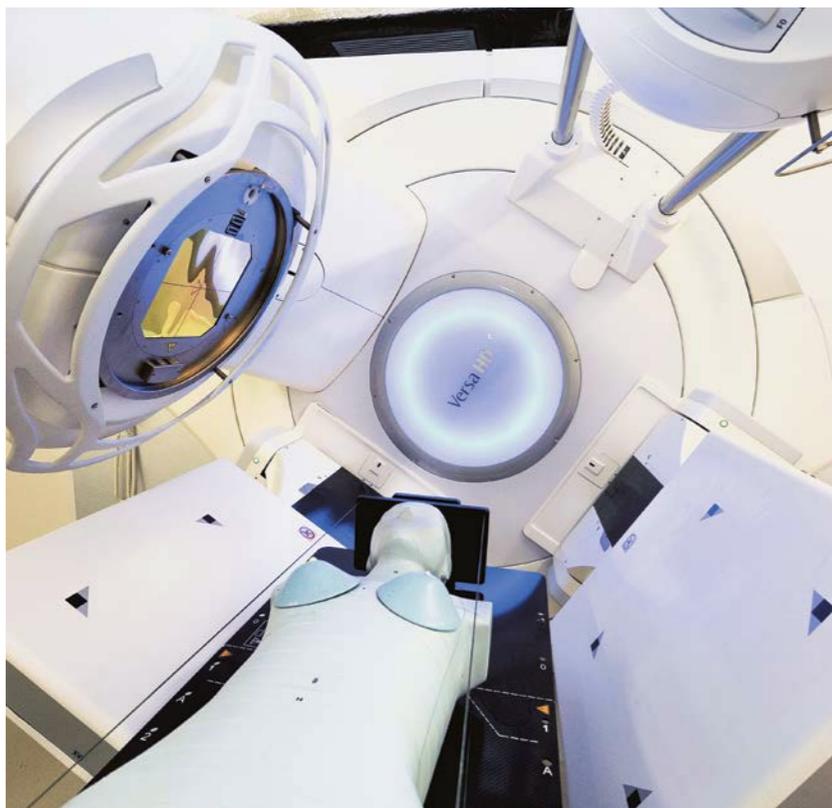
Commercialisation du test par Bio-Rad



©L. Godart/CEA

Ci-contre :

Test de diagnostic rapide du prion (2000).



©L. Godart/CEA

35

MAÎTRISER ET OPTIMISER LA DOSE

Doseo, inaugurée fin 2014, est une plateforme entièrement dédiée aux technologies pour la radiothérapie et l'imagerie médicale.

Objectif : quantifier précisément et optimiser la dose de rayonnements ionisants (RI) reçue par le patient lors des examens et traitements médicaux. La réponse se décline en trois volets : formation des praticiens, étalonnage des détecteurs de RI utilisés en clinique et développement de logiciels de simulation. Comme l'illustre Bénédicte Poumarède du CEA-List, « 140

certificats d'étalonnage pour la radiothérapie sont délivrés chaque année grâce aux faisceaux de référence de Doseo ». Les travaux de modélisation et de simulation numérique accompagnent quant à eux le développement de nouvelles technologies de diagnostic et de traitement. « Nous avons par exemple élaboré un logiciel qui calcule précisément les doses reçues par le patient lors de l'imagerie de positionnement. » Cette étape, indispensable avant chaque radiothérapie, sert à vérifier le bon placement du patient par rapport au faisceau d'irradiation. « Notre outil, en cours de transfert industriel, permet d'optimiser et personnaliser les protocoles pour réduire cette source supplémentaire d'irradiation, et de prendre en compte toutes ces doses additionnelles dans le suivi du patient. » ●

Ci-dessus : Accélérateur médical à Doseo, délivrant des faisceaux de radiothérapie (2006).

36

Le rôle clé de la molécule HLA-G dans la réponse immunitaire

Pourquoi le fœtus n'est-il pas rejeté par le système immunitaire de sa mère, puisqu'il porte des antigènes de son père ? Cette question est longtemps restée une énigme... jusqu'à la découverte en 1997 du Dr Carosella et de son équipe, travaillant alors au CEA à l'hôpital Saint-Louis (aujourd'hui à l'institut CEA-Jacob) : le fœtus est protégé parce qu'il fabrique la molécule HLA-G, un stratagème induisant une très grande tolérance vis-à-vis du système immunitaire maternel.

Des avancées considérables

Très vite, l'équipe s'aperçoit que HLA-G est aussi exprimée par les cellules tumorales, leur permettant d'échapper à la destruction immunitaire. Cette découverte majeure a depuis permis des avancées considérables dans les pathologies de la grossesse ; dans la greffe d'organes, via un traitement induisant l'expression de HLA-G chez le greffon, évitant ainsi son rejet ; et dans le traitement des cancers par immunothérapie. ●

REPÈRE

1997

Le Dr Carosella découvre le rôle clé de la molécule HLA-G dans la tolérance du fœtus par le système immunitaire maternel

37

DÉCRYPTER LES EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS SUR L'ORGANISME

Depuis 75 ans, les chercheurs en radiobiologie du CEA, pionniers en la matière, explorent les effets des rayonnements ionisants sur le vivant.

L'exposition à des rayonnements ionisants (RI) provoque de nombreux dommages dans les cellules, les organes et le corps entier. Bénéfiques lorsqu'ils sont utilisés à des fins diagnostiques (imagerie) ou thérapeutiques (par exemple pour éliminer des cellules cancéreuses), ils peuvent aussi provoquer de graves désordres dans l'organisme. Caractériser les effets de ces expositions est un enjeu médical et sociétal majeur tant ces rayonnements sont omniprésents, même à de faibles doses. Ces travaux ont permis de décrypter de très nombreux mécanismes fondamentaux qui sous-tendent les effets des RI sur le vivant (génomique, fonctionnement de la cellule, résistance au stress...) et de développer de nouvelles approches thérapeutiques et diagnostiques. Trois exemples sont présentés ici.

Reconnaître une tumeur radio-induite

Peut-on distinguer une tumeur de la thyroïde spontanée d'une tumeur consécutive à une exposition à des RI (radiothérapie ou accident nucléaire) ? Oui, grâce à des « signatures moléculaires » identifiées depuis 2013 via une analyse globale des gènes exprimés au sein de ces tumeurs. Cette avancée scientifique capitale, qui doit encore être validée en utilisant un grand nombre d'échantillons, permettra de mieux cerner l'origine de ces cancers.

Examiner les cellules souches touchées

Quels sont les effets des faibles doses de rayons X délivrées par les scanners médicaux sur les cellules vivantes ? Les chercheurs du CEA-Jacob ont regardé du côté des cellules souches somatiques (à l'origine de la formation des différents organes et tissus) et des cellules germinales (notamment les ovocytes de réserve), responsables de la fertilité. Ils montrent en 2017 que les cellules souches, exposées à des doses même faibles, peuvent perdre de nombreuses propriétés spécifiques et

devenir pré-cancéreuses. Chez la souris, l'exposition d'ovocytes de réserve à de faibles doses conduit quant à elle à une perte de la fertilité.

Caractériser les atteintes du génome

Au sein de la cellule, les RI altèrent la molécule d'ADN, qui contient toute l'information génétique permettant le développement, le fonctionnement et la reproduction des êtres vivants. Certains de ces dommages radio-induits peuvent être à l'origine de réarrangements chromosomiques capables d'entraîner la mort cellulaire ou encore de favoriser l'apparition de cancers. Parmi ces chromosomes remaniés, les plus problématiques sont ceux qui subissent une cassure au cours de la division cellulaire.

En 2019 et pour la première fois, les mécanismes moléculaires à l'origine de ces clivages sont caractérisés, ouvrant la voie à une meilleure compréhension de l'instabilité génétique induite par les rayonnements ionisants. ●

38

SOIGNER ET GUÉRIR GRÂCE À LA THÉRAPIE GÉNIQUE

Des patients atteints de bêta-thalassémie majeure peuvent vivre sans transfusion ; d'autres, souffrant de la maladie de Parkinson, voient leur état considérablement s'améliorer... Tous ont en commun d'avoir bénéficié de deux premières mondiales en thérapie génique, conduites en essais cliniques.

« La thérapie génique consiste à introduire un gène normal dans l'organisme pour compenser la présence d'un gène défectueux responsable de maladies », explique Philippe Hantraye, directeur de Mircen. Comment ? En l'insérant dans un « vecteur », en général un virus rendu inoffensif mais toujours capable de pénétrer dans ses cellules cibles et d'y transférer son matériel génétique. Des compétences développées au CEA dans les années 2000 au sein d'unités mixtes de recherche (CNRS, Inserm, CEA). La médecine du futur et ses thérapies innovantes sont alors en plein essor. Depuis une dizaine d'années, les réussites se succèdent, au travers d'essais

cliniques internationaux multipartenaires. Elles concernent deux maladies génétiques du sang parmi les plus fréquentes, la bêta-thalassémie majeure et la drépanocytose, ainsi qu'une maladie neurodégénérative, la maladie de Parkinson.

2010

Pour la première fois, un patient atteint de la forme la plus grave de bêta-thalassémie est guéri sur le long terme. Il est désormais libéré de ses transfusions sanguines mensuelles et des piqûres quotidiennes destinées à pallier les effets délétères des excès de fer provoqués par les transfusions. « Les cellules souches sanguines du patient ont été prélevées, puis corrigées en laboratoire. Nous y avons introduit un vecteur contenant le gène sain de la bêta-globine. Réinjectées au malade, les cellules souches ont alors produit des globules rouges à l'hémoglobine saine et en quantité suffisante », indique le Pr Philippe Leboulch, du CEA-Jacob et concepteur de ce vecteur, un virus désactivé dérivé de celui du sida, capable de transporter de longs segments d'ADN.

2014

Quinze personnes atteintes de la maladie de Parkinson récupèrent en grande partie le contrôle de leurs mouvements.

Cette fois, les gènes de trois enzymes indispensables à la biosynthèse de la dopamine sont insérés dans un lentivirus de cheval (le vecteur), lui-même directement introduit dans la zone cible du cerveau – le striatum – lors d'une opération chirurgicale. Les cellules malades, ciblées par le vecteur et ainsi modifiées *in vivo*, se remettent à produire de la dopamine. « Les essais cliniques de phase 2 sont en cours ; ils devraient à terme inclure 60 patients français et anglais, précise aujourd'hui Philippe Hantraye. Nous travaillons également sur une stratégie personnalisable, qui permettrait de moduler la production de dopamine en fonction de l'état du patient. Elle repose sur l'ajout d'une petite séquence d'ADN supplémentaire dans le vecteur, activable par la simple prise orale d'un médicament. »

2017

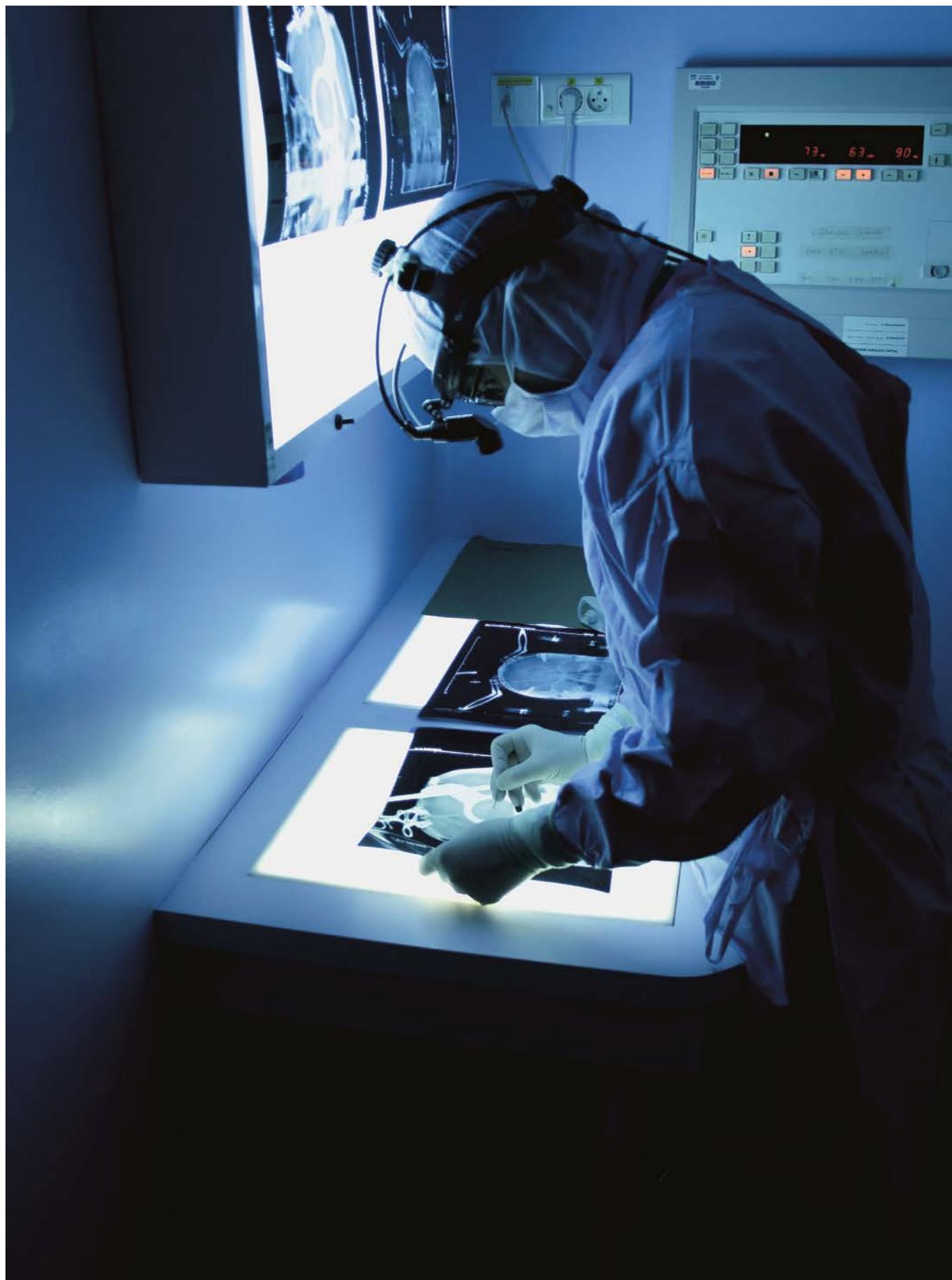
Rémission d'un premier patient atteint de drépanocytose, traité par thérapie génique selon la même méthode que celle utilisée pour la bêta-thalassémie.

2018

Essai transformé pour la thérapie génique traitant la bêta-thalassémie. 22 patients, inclus dans deux essais cliniques utilisant le vecteur mis au point en 2010, sont libérés de toute transfusion sanguine ou réduisent considérablement leurs besoins en transfusion. Plusieurs essais cliniques de phase 3 sont en cours en 2020, ou achevés avec d'excellents résultats ; et une première autorisation de traitement, pour une catégorie précise de malades, a été délivrée par l'Agence européenne du médicament. Le feu vert pour une utilisation en France est désormais imminent. ●

Page de gauche :

Repérage des points d'injection du vecteur viral avant intervention sur un patient atteint de la maladie de Parkinson (2014).





39

INTERVIEW



« Marquer les molécules pour les suivre »

La chimie irrigue bon nombre de disciplines, comme la biologie ou l'innovation thérapeutique, les dotant d'outils et procédés devenus indispensables. Exemple avec les molécules marquées par des isotopes radioactifs à vie longue, une expertise que nous raconte Frédéric Taran, chef de service au CEA-Joliot.

Qu'est-ce que le marquage, et à quoi servent les molécules marquées ?

Le marquage consiste à substituer dans une molécule, comme un médicament, un des atomes qui la constitue par son isotope radioactif (par exemple un carbone naturel ^{12}C ou un hydrogène ^1H remplacé par du ^{14}C ou du tritium ^3H). La molécule devient alors détectable grâce aux rayonnements qu'elle émet et on peut suivre son trajet dans un organisme (par exemple chez l'animal) pour étudier sa distribution et son métabolisme. L'utilisation du marquage a permis des avancées majeures pour la recherche fondamentale en biologie. C'est aussi la technique de référence dans l'industrie pharmaceutique pour établir la biodistribution, la pharmacocinétique et le métabolisme d'un candidat-médicament.

Le CEA a été et reste pionnier dans ce domaine. Racontez-nous...

Oui, le CEA a été pionnier, et à plus d'un titre. En 1966, il réalise le premier marquage d'un peptide au tritium. Vont ensuite suivre des approches originales pour synthétiser des molécules marquées au ^{14}C , ^3H , ^{35}S , ^{125}I . En 2008, il est le premier au monde à obtenir des nanotubes de carbone marqués au ^{14}C , pour l'étude de leur impact sur la santé et l'environnement. Vu la taille de ces nanoparticules (quelques milliers d'atomes), la technique est alors bien plus complexe. À partir de 2010, le CEA innove encore avec de nouveaux concepts chimiques totalement différents de marquage de molécules au tritium et au ^{14}C . L'opération est désormais effectuée en une seule étape et dure un à deux jours, au lieu de nombreuses étapes s'étalant sur plusieurs mois, réduisant de fait le coût de la synthèse et la quantité de déchets radioactifs produits. L'un de nos chercheurs, Davide Audisio, a d'ailleurs reçu en 2019 une bourse ERC pour étendre cette technique de marquage à l'ensemble des molécules pharmaceutiques d'intérêt. Aujourd'hui encore, le CEA est le seul organisme de recherche académique en France à produire des molécules marquées au ^{14}C et ^3H , avec pour mission de les fournir aux biologistes du monde académique et industriel.



©C.Dupont/CEA

L'utilisation des molécules marquées est aujourd'hui largement répandue en recherche...

Oui, et elle a conduit à de nombreuses découvertes significatives. Je ne pourrai, ici, citer que quelques exemples. En 1983, le CEA fait une découverte majeure en identifiant deux nouveaux récepteurs de la sérotonine dans le cerveau grâce à des molécules tritiées. Pour illustrer notre mission d'aide à l'industrie, je retiens notre collaboration dans les années 1990 avec Rhône-Poulenc (devenu Sanofi), pour qui nous avons réalisé le marquage au ^{14}C d'un nouvel antibiotique, depuis mis sur le marché. Nous travaillons aussi sur le marquage du graphène, une nanoparticule carbonée, et sur celui des micro et nanoplastiques, pour étudier leurs impacts sur la santé et l'environnement. ●

REPÈRES

1966

Premier marquage d'un peptide au tritium

2008

Premiers nanotubes de carbone marqués au ^{14}C

Ci-dessus : Dans le laboratoire pour la synthèse de molécules marquées (2006).

40

Un pancréas artificiel connecté

Dès sa création en 2015, la start-up Diabeloop a choisi le CEA-Leti comme partenaire de R&D pour son savoir-faire en algorithmique. Ensemble, ils ont développé un « pancréas artificiel » pour améliorer la vie des diabétiques de type 1. Ce système portable permet la régulation automatique du glucose sanguin lorsque le pancréas est défaillant. Il est constitué d'un capteur de mesure de glycémie et d'une pompe patch miniature de délivrance d'insuline, reliés par Bluetooth à un smartphone dédié. À l'intérieur, des algorithmes complexes calculent la dose d'insuline à injecter en intégrant de nombreux paramètres, information qu'ils transmettent à la pompe. Sécurité supplémentaire, les données sont en parallèle transmises à un service médical de suivi. Cette innovation de rupture, validée par plusieurs essais cliniques, a obtenu le marquage CE en novembre 2018 et devrait être commercialisée prochainement en France et à l'international. ●



©Diabeloop

Ci-dessus : Dispositif DBLG1 de Diabeloop : capteur, pompe et algorithme.

41

IMAGEUR POUR CHIRURGIE DE LA THYROÏDE



Ci-dessus : Utilisation de l'imageur Fluobeam®LX au bloc opératoire.

Fluobeam®LX est un petit imageur portable unique ! Créé par Fluoptics®, une start-up essaimée du CEA-Leti en 2009, il permet d'identifier *in vivo* les glandes parathyroïdes en détectant la fluorescence naturelle des tissus. C'est une aide précieuse pour le chirurgien de la thyroïde, qui peut voir en temps réel et avec une précision inégalée les zones qu'il opère. Les produits Fluobeam® sont aujourd'hui utilisés dans plus de vingt pays et pour différentes indications, comme la chirurgie reconstructrice après cancer du sein ou la détection de ganglions. ●

42

UN STENT VASCULAIRE UNIQUE SUR LE MARCHÉ

Plus de 780 000 patients, répartis dans 7 pays, portent un « stent » vasculaire conçu grâce à une innovation du CEA-Iramis datant des années 1980. Un stent, c'est un petit ressort métallique qu'on place, par microchirurgie, dans une artère pour empêcher qu'elle ne se bouche. Celui-ci est recouvert de deux couches de polymères : la première assure sa biocompatibilité, la seconde est biodégradable et libère un médicament post-opératoire pendant environ 30 jours.

Ceci grâce à la technique CEA d'électro-greffage qui permet un collage « absolu » entre deux matériaux extrêmement différents, mise au point dans le cadre de travaux de recherche fondamentale en physique des surfaces. Le produit, considéré comme le meilleur du marché en matière de sécurité pour les patients, est commercialisé par la société chinoise Sinomed, qui a acheté en 2012 la start-up Alchimedics issue du CEA-Iramis. ●

43

SUR LE FRONT DES PANDÉMIES

La pandémie de Covid-19 nous rappelle notre vulnérabilité face aux maladies infectieuses émergentes. Le CEA, comme d'autres organismes de recherche, est sur le front.

Années 1980. L'épidémie de sida fait rage. La ministre française de la Santé demande la mobilisation de tous les organismes publics de recherche. Le CEA cherche alors à constituer une équipe et accueille celle de Dominique Dormont, spécialiste du VIH et du prion

au Service de santé des armées. C'est ainsi que démarre l'expertise du CEA sur ces sujets (voir p. 43). Elle prendra toute sa dimension en 2012 avec la création d'Idmit. « Au-delà du sida, nous travaillons sur un large panel de maladies infectieuses : chikungunya, grippe, fièvre jaune, Ebola, dengue, Zika, tuberculose, coqueluche, paludisme, Covid-19... », indique Nathalie Bosquet, chef de laboratoire à Idmit. Dans cette infrastructure, les chercheurs développent des modèles animaux qui vont présenter les mêmes symptômes que chez l'être humain, et ce pour chaque pathologie. Ils disposent de laboratoires de haute sécurité de niveau

3 et de moyens d'imagerie *in vivo*. Objectifs : comprendre les mécanismes physiopathologiques des maladies infectieuses et les résistances aux traitements, tester des solutions thérapeutiques et des candidats-vaccins. « D'autres équipes au CEA exploitent des analyses omiques pour mieux connaître ces maladies ou encore développent des outils de diagnostic rapide », ajoute la biologiste (voir p. 42).

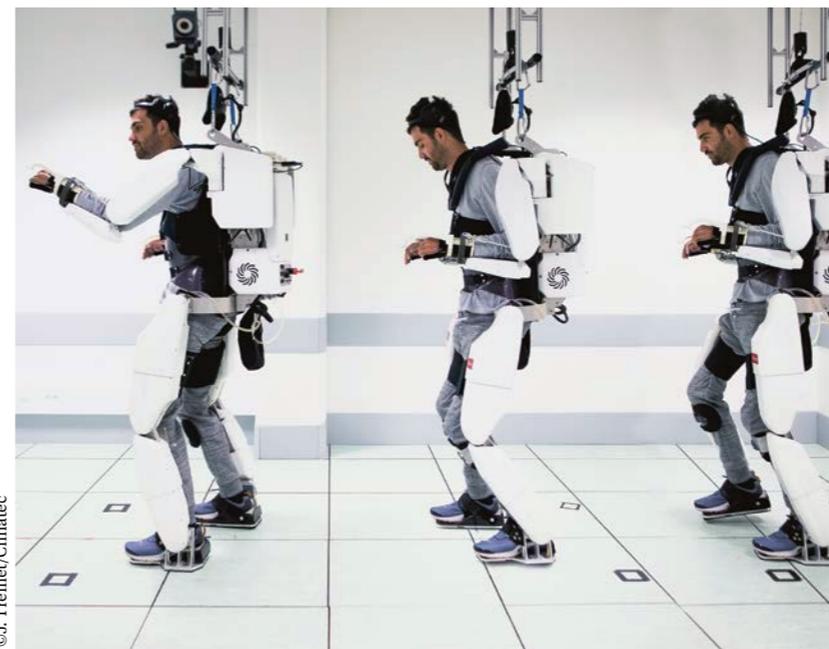
Des vaccins à l'étude

« Nous avons par exemple évalué l'innocuité et l'efficacité de plusieurs candidats-vaccins développés au sein de consortiums européens, contre le chikungunya, le Zika, la coqueluche, le VIH... Certains d'entre eux sont désormais en phase clinique (c'est-à-dire testés chez l'humain) », poursuit Nathalie Bosquet. Sur le sida, les équipes ont aussi contribué à des découvertes majeures, en explorant les réservoirs viraux chez le primate. Il s'agit de tissus où persiste le virus, même lorsqu'il disparaît du sang grâce aux trithérapies. Reste désormais à trouver de nouveaux traitements pour atteindre le virus dans ces poches résiduelles.

Ces compétences se sont révélées très utiles dès l'apparition de la Covid-19, permettant aux chercheurs d'Idmit de mettre en place très vite le modèle d'étude animal. En septembre 2020, ils publiaient dans la revue scientifique *Nature* une étude montrant l'absence d'efficacité de l'hydroxychloroquine chez le primate. Et cela, qu'elle soit administrée seule ou associée à l'azithromycine (un antibiotique), aussi bien avant que juste après l'exposition au virus. D'autres pistes sont à l'étude, comme l'explique Pauline Maisonnasse, chercheuse à Idmit : « nous testons actuellement plusieurs candidats-vaccins européens contre la Covid-19, ainsi que des molécules pour des traitements. » ●

Ci-contre :

Préparation de l'injection d'un radiotracer pour un examen TEP/TDM dans le cadre d'une étude préclinique (2018).



44

UN EXOSQUELETTE PILOTÉ PAR LA PENSÉE

Une première ! C'était en 2019 : un patient tétraplégique a pu se déplacer et contrôler ses bras et poignets grâce un exosquelette piloté par la pensée via un implant cérébral unique au monde. Cet exploit est le fruit du travail de l'équipe de Clinathec.

Tout commence en 2007, lorsque le Pr Alim-Louis Benabid, éminent neurochirurgien au CHU Grenoble Alpes, sollicite le centre CEA voisin pour développer des dispositifs médicaux innovants. Le centre Clinathec naît l'année suivante autour d'un projet très ambitieux (baptisé *Brain Computer Interface*) : permettre à un patient tétraplégique de piloter un exosquelette « quatre membres » par la pensée. En 2019, le pari est relevé ! La preuve de concept est validée dans le

cadre d'une étude clinique impliquant un jeune patient de 28 ans. L'innovation majeure réside dans la neuroprothèse, entièrement conçue par les équipes du CEA-Leti.

Une neuroprothèse implantée

« L'interface cerveau-machine que nous avons développée mesure et numérise les signaux électriques cérébraux engendrés par l'intention de mouvement du patient ; ceci grâce à deux dispositifs implantables Wimage® composés de 64 électrodes. Les signaux sont transmis par une connexion sans fil à un ordinateur. Celui-ci les décode via des algorithmes basés sur des méthodes de *machine learning*, pour les traduire en commandes de pilotage transmises à l'exosquelette, le tout en temps réel », explique Guillaume Charvet, du CEA-Leti. « Les dispositifs Wimage® sont implantés dans la boîte crânienne de manière semi-invasive, à la surface du cortex moteur (droit et gauche), afin de pouvoir contrôler les quatre membres de l'exosquelette. Nous avons également conçu un packaging garantissant leur biocompatibilité et leur sécurité à long terme », ajoute son collègue Abdelmadjid Hihi.

Un espoir pour les tétraplégiques

L'exosquelette a quant à lui été développé par les roboticiens, spécialistes de l'interface homme-machine et experts en sûreté logicielle du CEA-List (voir p. 74). Il pèse environ 60 kg, possède 14 moteurs électriques permettant le contrôle fin des quatre membres et est doté d'une électronique performante pour son pilotage. Cette première étape représente un réel espoir pour les patients tétraplégiques. Mais le chemin est encore long avant d'aboutir à un dispositif totalement opérationnel. À Clinathec, l'essai clinique continue, notamment pour créer des algorithmes plus robustes et précis qui rendront possibles des gestes plus complexes, comme la capacité de saisir un objet avec la main. ●

Ci-dessus :

Pilotage de l'exosquelette par le patient (2019).

UNE NOUVELLE ÈRE DE LA MÉDECINE

PERSONNALISÉE, PRÉVENTIVE, PRÉDICTIONNELLE ET PARTICIPATIVE

La médecine du futur se dessine... Elle promet des diagnostics plus précoces, saura anticiper la survenue de maladies et sera personnalisée, chaque patient disposant d'un traitement adapté à ses propres données biologiques.

Ce nouveau paradigme résultera de la révolution à l'œuvre dans la compréhension du vivant (voir p. 95-97), notamment grâce aux « omiques », et de l'intégration massive de technologies de rupture : séquenceurs d'ADN et ARN, imageries, biocapteurs connectés... le tout savamment orchestré par les *big data* et l'intelligence artificielle (IA), à même de traiter ces données médicales et biologiques collectées à grande échelle.

La carte d'identité omique

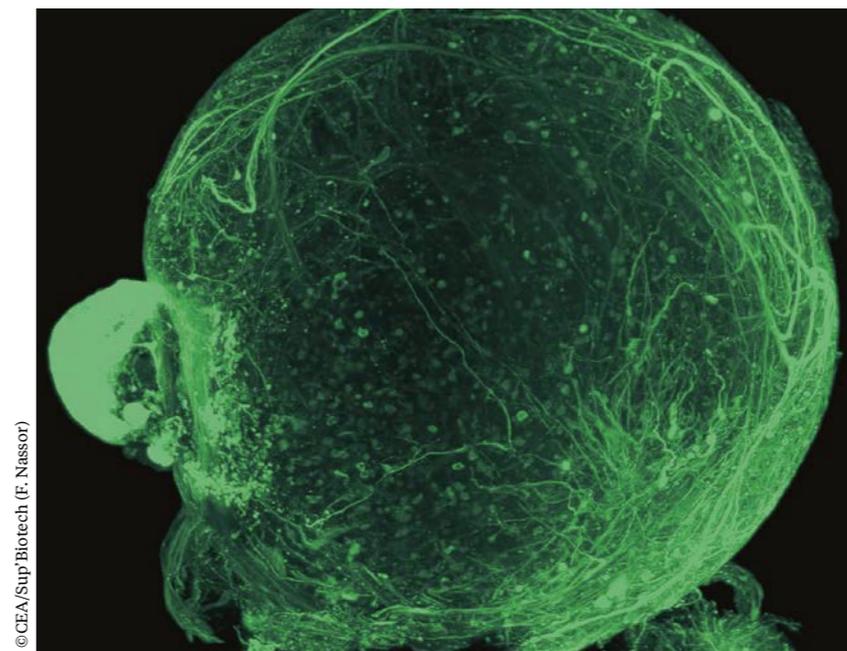
« Le CEA fait partie des pionniers nationaux en matière de sciences omiques, et ce dès les années 1990, annonce d'emblée

Christophe Junot, du CEA-Joliot. *Nous sommes aujourd'hui impliqués dans toutes les grandes infrastructures de recherche omiques nationales.* » Ces disciplines recouvrent la génomique (analyse des gènes), la transcriptomique (celle des ARN produits), la protéomique (protéines produites) et la métabolomique (concerne les métabolites, comme les sucres, les lipides, etc.). L'analyse de toutes ces composantes dans un prélèvement biologique (du sang par exemple) donne une vision globale et très fouillée de l'état d'un patient. Le biochimiste va même plus loin : « *les omiques, c'est l'analyse biologique du futur!* ». Ces « cartes d'identité moléculaire » vont en effet permettre de poser des diagnostics bien plus précis ou même d'améliorer un suivi thérapeutique. L'analyse génomique au service du patient est quant à elle déjà en marche. « *Le plan France médecine génomique 2025, dans lequel nous sommes très impliqués puisque nous pilotons son centre de R&D (le Crefix), tend à développer l'usage du séquençage du génome complet (ADN) et de son expression (ARN) dans l'offre de soin du patient, au sein de l'hôpital. Deux*

plateformes de séquençage à visée diagnostique sont déjà opérationnelles », indique Jean-François Deleuze, du CEA-Jacob.

Puissante imagerie

Dans l'imagerie aussi, la recherche avance à grands pas. Les chercheurs imaginent déjà l'avenir, avec un outil de routine hospitalier capable d'établir des diagnostics de plus en plus précoces de pathologies comme la maladie d'Alzheimer, sur simple analyse d'une IRM cérébrale. Un défi qui exige l'élaboration de puissants algorithmes, construits à grands renforts d'IA et de *machine learning*, sur la base de vastes bibliothèques d'images cérébrales. C'est précisément l'un des champs d'étude de NeuroSpin. Du côté du SHFJ, la recherche s'oriente vers des *radiopharmaceutiques* personnalisés, produits en quelques minutes au lit du patient, à des fins de diagnostic; ou encore vers la combinaison des moyens d'imagerie (TEP-IRM-ultrasons) pour gagner en finesse d'analyse (voir p. 41). Autre domaine aux avancées notables : les dispositifs médicaux miniaturisés, biocapteurs et implants connectés,



© CEA/Sup'Biotech (F. Nassor)

S'il existe un point commun à toutes les voies de recherche, c'est bien l'entrée en force du numérique dans la médecine.

Ci-contre :

Rendu 3D des neurones dans un organoïde cérébral.

grande spécialité du CEA-Leti depuis une vingtaine d'années. Ces mini concentrés de technologie allient biomatériaux, microfluidique, algorithmique, traitement du signal, connexion sans fil et IA. Prothèse de genou connectée, rétine ou pancréas artificiel, comme Diabeloop (voir p. 49), en sont quelques exemples. Et que dire des immenses promesses offertes par les interfaces cerveau-machine ? Ces neuroprothèses permettraient en effet de soulager la vie des personnes à mobilité réduite (voir p. 51).

Vers le compagnon biologique

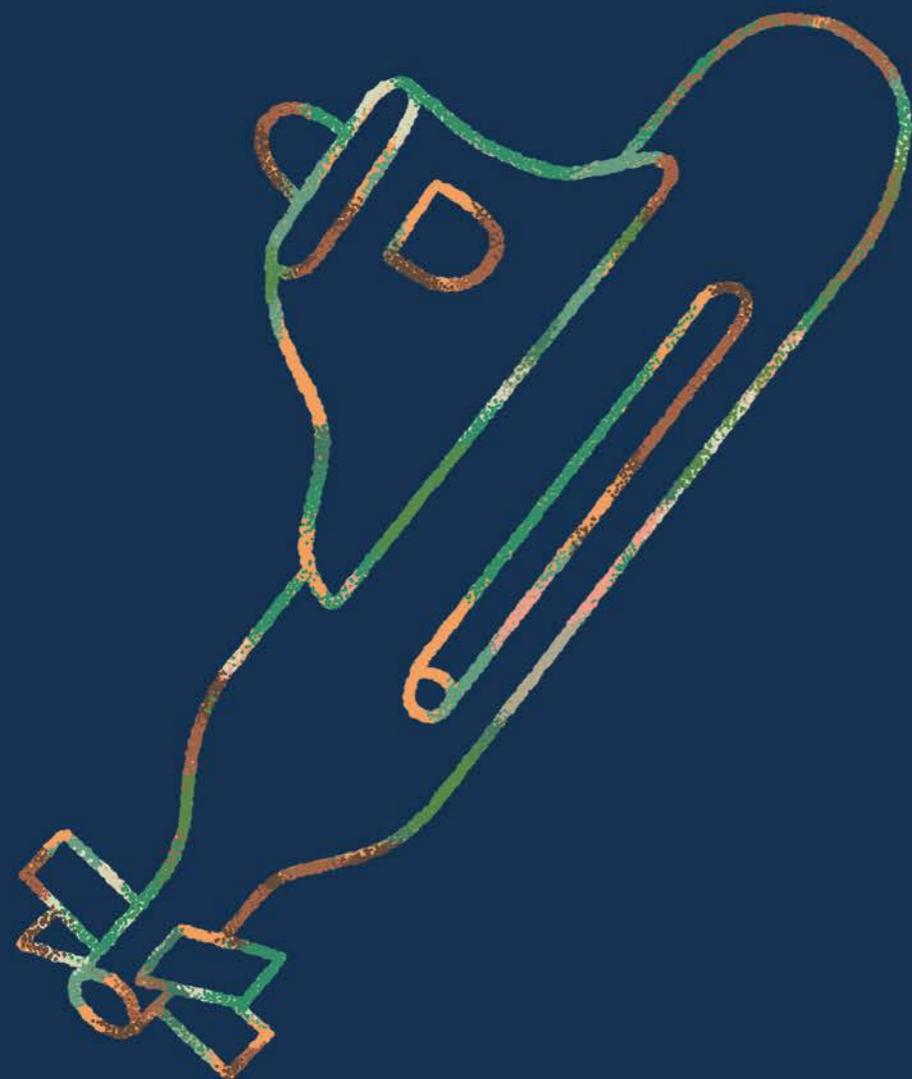
Lancé il y a une dizaine d'années, le concept de « compagnon biologique » fait lui aussi son chemin. Il s'agit de « mini organes » en 3D élaborés en laboratoire à partir de cellules souches ou de « mini tumeurs » issues de cellules malades du patient, ainsi que d'organes sur puce mimant des fonctions physiologiques. Ces « outils » faciliteront l'optimisation de traitements personnalisés, et seraient, à terme, une voie séduisante pour la médecine régénérative. Mini-cerveau, peau ou encore pancréas sont déjà à

l'étude dans plusieurs laboratoires du CEA, à Fontenay-aux-Roses et à Grenoble.

Une médecine de données

S'il existe un point commun à toutes ces voies de recherche, c'est bien l'entrée en force du numérique dans la médecine. « *À l'avenir, on peut imaginer un patient non plus avec une carte vitale, mais avec un cloud de données rassemblant ses examens d'imagerie, bilans omiques et constantes physiologiques, transformés en informations numériques* », estime Christophe Junot. On s'oriente là vers ce que certains nomment « le patient digital », auquel seraient adossés des algorithmes d'IA capables de proposer diagnostics et traitements. Comme l'explique Bénédicte Poumarède, du CEA-List, « *nous développons des logiciels d'IA pour réaliser des fonctions comme la recommandation ou l'aide au médecin dans la prise de décision. Ces outils sont construits sur la base de règles et connaissances fournies par les médecins, avec en entrée les données du patient* ». Mais le chemin avant l'avènement de cette médecine est encore long... Il faudra d'abord

héberger ces gigantesques masses de données de manière optimale et sécurisée, les rendre compatibles entre elles et être capable de les exploiter. « *Il existe au CEA un énorme creuset de compétences, affirme Jean-François Deleuze. Nous hébergeons déjà les données de génomique dans le cadre de France-Génomique, tout comme des données d'imagerie avec le Cati (voir p. 40). Le graal serait, pour Christophe Junot, « d'arriver à croiser ces informations de manière efficace. C'est un axe de recherche exploré à l'aide de la plateforme de R&D de numérique en santé N4HCloud* ». Reste à mettre en œuvre cette nouvelle approche de la médecine au plus près des patients et des cliniciens. C'est tout l'enjeu de Pasrel, centre de recherche dédié au transfert des innovations technologiques à l'hôpital, attendu à Saclay dès 2025. Vincent Lebon, du CEA-Joliot et professeur de médecine à l'université Paris-Saclay, l'affirme : « *au sein de Pasrel, le CEA apportera une contribution majeure à la médecine de demain, en connectant étroitement ses équipes de recherche aux hôpitaux et industriels* ». ●



AVANCÉES N° 46 À 52

DÉFENSE & SÉCURITÉ

Acteur de la dissuasion
nucléaire
p. 56

60 ans de lasers
de puissance
p. 58

L'alerte aux séismes
et aux tsunamis
p. 59

Parer la menace
des drones
p. 59

La propulsion nucléaire,
atout stratégique de la
force de dissuasion
p. 60

Lutter contre
la prolifération
nucléaire
p. 62

Interview
« *Se protéger
des risques terroristes* »
p. 64

ACTEUR DE LA DISSUASION NUCLÉAIRE

Concevoir des armes nucléaires sûres et fiables et garantir leurs performances au profit de la dissuasion française. C'est l'une des missions confiées à la DAM, la Direction des applications militaires du CEA.

13 février 1960 : la réussite du premier essai nucléaire français, conçu et réalisé par la DAM, permet à la France d'entrer dans le cercle restreint des puissances nucléaires. Pour « militariser » cette formule nucléaire à fission pure (à base de plutonium), c'est-à-dire l'intégrer dans une arme opérationnelle, sûre et fiable, des optimisations savantes de masse, de volume, voire de forme de ses constituants, sont nécessaires. C'est chose faite le 8 octobre 1964, avec la première prise d'alerte des Forces aériennes stratégiques sur Mirages IV-A, emportant la première arme nucléaire française. C'est aussi l'acte de naissance de la dissuasion française, qui s'inscrit dans une doctrine strictement défensive : la France se protège contre toute agression d'origine étatique contre ses intérêts vitaux, d'où qu'elle vienne et quelle qu'en soit la forme.

L'accès au thermonucléaire

À dimension d'arme fixée, la fusion thermonucléaire permet d'augmenter significativement le niveau d'énergie.

Dans la course à l'énergie des pays dotés de l'époque, l'accès au thermonucléaire devient un enjeu. La DAM va relever ce défi le 24 août 1968, avec le succès du premier essai thermonucléaire français. Cette formule, militarisée huit ans plus tard, deviendra la première tête thermonucléaire française et équipera le sous-marin nucléaire lanceur d'engins (SNLE) *L'Indomptable*.

Des missiles à têtes multiples

Encore faut-il réussir à franchir les défenses adverses, à même de neutraliser des têtes nucléaires avec des missiles antibalistiques, eux aussi nucléaires. Pour que la dissuasion fonctionne, il suffit de garantir qu'au moins une tête nucléaire atteindra son objectif, produisant à elle seule des dommages inacceptables. La solution consistera à saturer les défenses, en déployant dans un même missile plusieurs têtes (mirvage) de dimensions réduites et plus rapides. C'est un défi complexe qui conduit la DAM à redimensionner les charges nucléaires en développant des outils physico-numériques beaucoup plus performants. Ces têtes multiples équiperont le SNLE *L'Inflexible* dès 1985.

Furtivité et durcissement

Dans le même temps se pose la question de la protection de l'électronique embarquée dans les armes face aux rayonnements émis par l'explosion de missiles

antibalistiques. Pour y remédier, la DAM va développer des composants électroniques « durcis », résistants à tous types de rayonnements ou de perturbations électromagnétiques. Une innovation qui donnera naissance à la technologie SOI (*Silicon-on-insulator*), point de départ d'une nouvelle filière électronique (voir p. 68-70).

Autre maître-mot : la discrétion ; car pour pénétrer les défenses adverses, les armes doivent être indétectables aux radars, autrement dit furtives. Des performances rendues possibles grâce à une optimisation précise de la forme de l'enveloppe de la tête et par la définition de nouveaux matériaux absorbant les ondes électromagnétiques émises par les radars.

Place au programme

Simulation

1992 marque un tournant dans l'histoire de la dissuasion nucléaire française, lorsque François Mitterrand annonce un moratoire sur les essais. Une nouvelle stratégie – le programme Simulation – se dessine alors. Elle permet de garantir la sûreté et la fiabilité des armes en s'affranchissant de tout nouvel essai nucléaire. L'idée a été de concevoir une charge dite « robuste », c'est-à-dire avec des marges de fonctionnement capables de couvrir les incertitudes de l'outil de simulation numérique de l'époque. Pour valider cette formule particulière, une dernière campagne d'essais est encore nécessaire. Elle a lieu en 1996. C'est un plein succès scientifique, qui entérine l'arrêt définitif des essais.

Un ensemble de codes de calcul

La démarche de simulation repose sur la modélisation des phénomènes physiques par des équations mathématiques décrivant le fonctionnement des armes, le tout transcrit dans un ensemble de codes de calcul. Elle exige de plus l'amélioration constante du caractère prédictif des codes, dont la précision doit être compatible avec les exigences des programmes successifs de renouvellement des armes nucléaires. Ceci en

développant des supercalculateurs sur mesure (Tera 1000, capable de réaliser 27 millions de milliards d'opérations par seconde, en est la dernière génération), et en testant les prévisions des simulations sur des expériences élémentaires, caractéristiques de la physique du fonctionnement des armes. Deux installations spécifiques, Epure sur le centre de Valduc et le laser Mégajoule (LMJ) sur le centre du Cesta, sont construites à cet effet.

Les codes de simulation, sans cesse améliorés, sont également confrontés aux résultats de essais nucléaires passés, qu'ils doivent restituer le plus fidèlement possible. 2009 et 2016 scelleront définitivement la réussite du passage à la simulation, avec la mise en service opérationnel des premières têtes nucléaires (aéroportée, puis océanique) conçues et garanties grâce au programme Simulation. ●

Ci-contre :

Avion Rafale et missile ASMPA emportant une maquette de TNA (tête nucléaire aéroportée).

REPÈRES

1960

Premier essai nucléaire français

1964

Naissance de la dissuasion nucléaire française

1976

Première arme thermonucléaire française

1985

Premier missile nucléaire à têtes multiples

1996

Arrêt définitif des essais nucléaires et lancement du programme Simulation

2009

Mise en service opérationnel de la TNA (tête nucléaire aéroportée)

2016

Mise en service opérationnel de la TNO (tête nucléaire océanique)

FOCUS

Deux installations phares

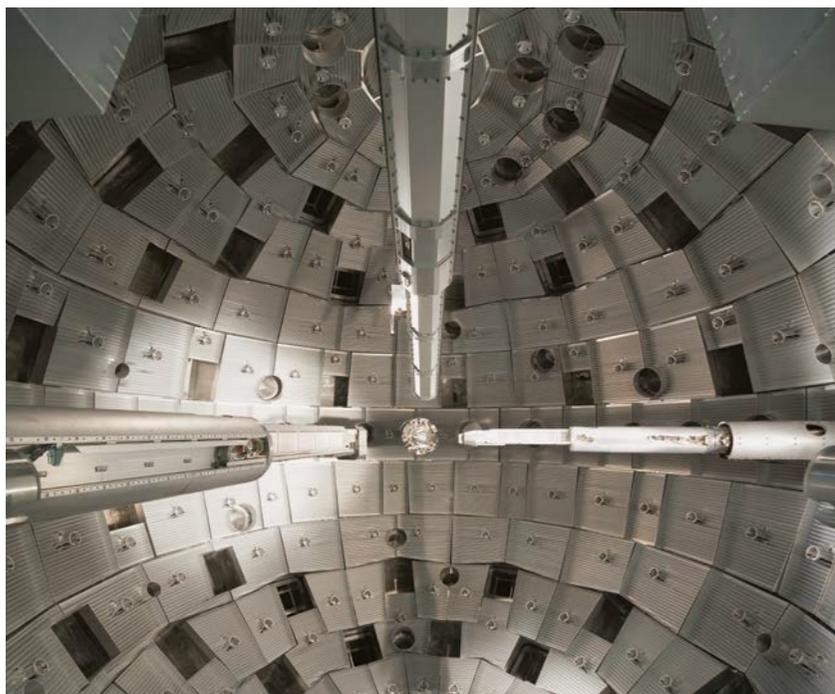
→ L'installation de radiographie Epure

Depuis 2014, Epure permet d'étudier le comportement de matériaux très denses soumis à de très fortes accélérations, grâce à un puissant faisceau de rayons X (dose de plusieurs dizaines de milliers de fois supérieure à celle d'une radiographie médicale, délivrée pendant quelques dizaines de milliardièmes de seconde).

→ Le laser Mégajoule

Mis en service la même année, le LMJ sert à étudier le comportement des matériaux dans des conditions extrêmes de température et de pression, semblables à celles atteintes lors du fonctionnement d'une arme. Cette installation exceptionnelle par ses dimensions, sa complexité et ses exigences de performance, permet de synchroniser 176 faisceaux laser pour viser une microcible de la taille d'une tête d'épingle pendant quelques milliardièmes de seconde. Seuls les États-Unis disposent à ce jour d'un tel équipement.





©CEA-MS 2016

47

60 ANS DE LASERS DE PUISSANCE

Le laser Mégajoule est, avec le NIF américain, le laser de puissance le plus énergétique du monde. Il est un pilier du programme Simulation.

Dès l'invention du premier laser en 1960, la Direction des applications militaires du CEA a pris conscience du grand intérêt qu'il représentait pour sa mission. « On pouvait obtenir sur des temps très brefs des puissances inédites en laboratoire. Focalisées dans un faible volume, elles permettaient de porter la matière solide à des températures et des pressions extrêmes, proches de celles propices à la fusion thermonucléaire dans une arme », raconte Daniel Vanderhaegen, directeur du programme Simulation. Les travaux ont démarré rapidement, sur le volet des technologies laser comme sur l'expérimentation physique. « La voie expérimentale choisie fut celle de la fusion par confinement inertiel (FCI), qui consiste à chauffer et comprimer quelques microgrammes de deutérium-tritium sous l'effet d'un intense rayonnement X, créé par l'impact des faisceaux laser sur une cavité », poursuit le physicien. Cette stratégie scientifique allait voir son couronnement avec le laser Mégajoule (LMJ). Cette installation exceptionnelle est l'une des deux plus grandes au monde. Elle permet de réaliser des expériences de

physique qui servent à valider les modèles de simulation numérique utilisés pour la garantie des armes nucléaires (voir p. 57).

Des lasers précurseurs pour conditionner et sonder la matière

Depuis L1, en 1962, les ingénieurs de la DAM n'ont cessé de développer des lasers de plus en plus performants. L5, le premier laser multifaisceaux produit en 1969, pour la première fois en laboratoire, des neutrons issus d'une réaction de fusion. Viendront ensuite les lasers de haute énergie : Octal (1978), qui permet les premières implosions en cavité, puis Phébus (1985), qui amène des avancées significatives sur les technologies optique et laser. En parallèle, P102 (1991) explore la haute puissance, grâce à la technique de compression d'impulsions laser, objet du prix Nobel de physique 2018. Ces installations seront des sources de collaborations scientifiques avec les Européens et les Américains.

Le LMJ, un laser exceptionnel

Le LMJ, mis en service en 2014, est la dernière génération des lasers de la DAM. « Les défis technologiques relevés pour le LMJ ont contribué à structurer une filière optique et laser nationale au meilleur niveau », ajoute Daniel Vanderhaegen. Avec, à terme, 176 faisceaux pour 1,4 mégajoule, il a déjà produit en 2019 ses premiers neutrons de fusion, « un million de fois plus qu'avec L5 », précise l'expert. Et ce, avec des résultats conformes aux prévisions numériques, un défi relevé dans une géométrie complexe, en trois dimensions. Un 177^e faisceau, d'impulsion mille fois plus courte, complète le LMJ. Il s'agit de Petal, financé par la région Nouvelle-Aquitaine. Ce laser pétawatt (1 PW = 10¹⁵ W) est destiné à la communauté académique, qui peut accéder à l'installation LMJ-Petal à hauteur de 25% du temps disponible. De quoi explorer de nombreux champs de la recherche : astrophysique, énergie, santé... ●

Ci-dessus :

Au centre de la chambre d'expériences du LMJ : la cible vers laquelle vont converger les faisceaux laser (2016).

48

L'ALERTE AUX SÉISMES ET AUX TSUNAMIS

En surveillant les essais nucléaires dans le monde entier, le CEA a développé un savoir-faire unique dans la détection des ondes sismiques (voir p. 63). Si bien que l'État français lui a depuis confié deux importantes missions de sécurité civile. Depuis le milieu des années 1980, il lui revient d'alerter les pouvoirs publics pour tout séisme de magnitude supérieure à 4 situé en France ou dans les régions frontalières. Et ce dans un délai inférieur à deux heures. Une mission qu'elle remplit en exploitant les données transmises en temps réel par les différents réseaux de stations sismiques nationales et internationales couvrant la surface du globe. En 2012, toujours à la demande des autorités françaises, la DAM crée le Cenalt

(Centre national d'alerte aux tsunamis en Méditerranée occidentale et Atlantique nord-est). Dans cette zone, le risque de tsunami, qui reste rare et modéré, vient principalement des séismes sous-marins des côtes nord-africaines. Moins de 15 minutes après le séisme, le Cenalt est en mesure de lancer une alerte afin que soient mises en sécurité les populations exposées. Trois niveaux d'alerte sont prévus : information jaune (séisme important, sans risque de tsunami) ; avertissement orange (vagues de moins de 50 cm pouvant atteindre un mètre de hauteur) ; alerte rouge (vagues de plus de 50 cm pouvant dépasser un mètre de hauteur). ●



©CEA/Cadarn

49

Parer la menace des drones

Attentif à la sécurité de ses installations, le CEA s'est positionné très tôt dans la lutte anti-drones. Fin 2014, sa Direction des applications militaires commence à développer des prototypes de brouilleurs individuels portatifs, qu'elle met à disposition de l'État dès 2015. Ces systèmes participent aujourd'hui à la sécurisation des événements majeurs sur le territoire français.

Neutraliser l'électronique
Mais les drones et leurs technologies évoluent rapidement. À terme, le brouillage devra être complété par un système de neutralisation directe de l'électronique embarquée. Une possibilité serait d'utiliser des armes à énergie dirigée électromagnétique ; ce qui permettrait, grâce à la directivité et l'instantanéité de leurs effets, de limiter les dommages collatéraux sur les dispositifs électroniques avoisinants. Un domaine dans lequel la DAM possède une expertise reconnue et de solides moyens expérimentaux et de simulation numérique. ●

Ci-contre :

Centre d'alerte aux tsunamis, au CEA DAM Île-de-France (Essonne).



© TechnicAtome/Y. Brandt



© C. Hugé/Marine nationale/Défense

50

LA PROPULSION NUCLEAIRE

ATOUT STRATÉGIQUE DE LA FORCE DE DISSUASION

Le porte-avions Charles de Gaulle et les sous-marins français sont propulsés par des chaufferies nucléaires, conçues et fabriquées sous la maîtrise d'ouvrage de la DAM.

En 1953, la France décide de se doter de sous-marins à propulsion nucléaire pour équiper sa flotte de dissuasion (voir focus). Cette source d'énergie offre en effet des avantages opérationnels majeurs : essentiellement l'autonomie (ravitaillement limité aux vivres) et la discrétion (aucun apport d'air frais nécessaire et absence de gaz d'échappement).

Dès 1964, le premier prototype français d'un « moteur atomique » capable de propulser un sous-marin est opérationnel sur le site CEA de Cadarache. Fonctionnant avec de l'uranium enrichi – fourni par les États-Unis –, c'est aussi le premier réacteur à eau pressurisée (REP) d'Europe. Il donnera naissance à la filière des réacteurs électrogènes REP qu'EDF utilise encore aujourd'hui dans ses centrales. Cette chaufferie équipera *Le Redoutable*, premier SNLE français. Le sous-marin entre en service en 1971, dotant ainsi la France de la composante océanique de sa force de dissuasion nucléaire. L'indépendance française en combustible est également assurée, grâce à l'usine d'enrichissement de Pierrelatte du CEA qui, dès 1967, fournit l'uranium enrichi.

Les plus petits sous-marins nucléaires au monde

Un autre challenge auquel sont confrontées les équipes est d'arriver à loger un REP dans la coque d'un SNA (7 m de diamètre), bien plus petite que celle d'un SNLE (10 m). Le défi est relevé dans

les années 1970, par les ingénieurs de la jeune filiale du CEA, TechnicAtome (aujourd'hui TechnicAtome), avec un concept très innovant : la chaufferie compacte. Le générateur de vapeur n'est plus déporté de la cuve qui contient le cœur nucléaire, mais posé dessus, comme un couvercle. Les gains en taille, en discrétion (moins de tuyaux, donc moins de bruit) et en sûreté sont considérables. Cette chaufferie révolutionnaire équipera tous les SNA de première génération, dont le premier bâtiment, *Le Rubis*, entrera en service en 1983. Grâce à cette technologie unique, la France dispose des plus petits sous-marins nucléaires au monde.

Le CEA et TechnicAtome vont perfectionner le concept en utilisant un combustible à base d'uranium faiblement enrichi (comme dans les réacteurs du parc d'EDF) et en améliorant la gestion des régimes transitoires de puissance, la compacité, la radioprotection et la sûreté. Ces innovations majeures vont ainsi répondre aux besoins opérationnels de bâtiments de tailles beaucoup plus importantes.

Elles aboutiront au *design* de la chaufferie K15 qui équipe les quatre SNLE de deuxième génération actuels, du type *Le Triomphant* (mis en service en 1997), ainsi que le porte-avions Charles de Gaulle (opérationnel depuis 2001). À partir de 2000, la DAM se voit confier la responsabilité de la maîtrise d'ouvrage des programmes de propulsion nucléaire.

Des chaufferies de plus en plus performantes

Les performances des chaufferies continuent d'évoluer, notamment en matière de sûreté et de durée de vie du cœur (10 ans au lieu de 8 auparavant). Ces avancées placent le modèle de chaufferie compacte K15 à un niveau comparable à celui des réacteurs électrogènes de troisième génération, les EPR (réacteurs pressurisés européens). Il équipe aujourd'hui le *Suffren*, premier SNA de la série Barracuda destinée à remplacer les six SNA de type Rubis arrivant en fin de vie. Ce bâtiment a été livré à la Marine nationale en novembre 2020, moins d'un an après la *divergence* de sa chaufferie.

À Cadarache, un réacteur pour la R&D

Trois réacteurs à terre, construits sur le site CEA de Cadarache, se sont succédé depuis 1964, et ont servi de prototypes aux chaufferies nucléaires embarquées de la flotte française. Le dernier-né, le RES, qui a divergé en 2018, est équipé d'un modèle K15 déjà en service. Contrairement à ses prédécesseurs, il est conçu avec une instrumentation inédite au cœur du réacteur. C'est un véritable outil de R&D, indispensable pour améliorer la disponibilité des chaufferies en service et réduire les marges de conception des futurs modèles. ●

Ci-dessus, à gauche :

Piscine du RES. Immersion d'un emballage de transport dédié aux éléments combustibles.

Ci-dessus, à droite :

Le *Suffren*, avant sa mise à l'eau (juillet 2019).

FOCUS

La flotte stratégique de Défense

La Marine nationale compte aujourd'hui 11 bâtiments à propulsion nucléaire : 4 sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE), 6 sous-marins nucléaires d'attaque (SNA) et le porte-avions Charles de Gaulle. Les SNLE sont armés de missiles équipés des *têtes nucléaires océaniques* « TNO » et assurent la « permanence à la mer » au profit de la dissuasion nucléaire française. Le porte-avions transporte la Force aéronavale nucléaire, armée des *têtes nucléaires aéroportées* « TNA ». Les SNA sont quant à eux dotés d'armements conventionnels pour assurer la protection des SNLE et du porte-avions.

FOCUS

Un réacteur de propulsion nucléaire, en bref

La chaleur générée par la *fission* de l'uranium sert à produire de la vapeur. Celle-ci met en rotation une turbine, qui entraîne l'hélice du sous-marin ; et un turbo-alternateur qui produit l'électricité nécessaire à bord.

REPÈRES

1971

Le *Redoutable*, premier SNLE

1983

Le *Rubis*, premier SNA

51

LUTTER CONTRE LA PROLIFÉRATION NUCLÉAIRE

Compte-tenu de la nature très particulière de l'arme nucléaire, des négociations internationales ont été lancées au milieu des années 1960 pour enrayer sa prolifération, et trente ans plus tard, pour stopper le recours aux essais nucléaires. Elles ont abouti à deux traités majeurs, le TNP et le Tice.

C'est en 1970, en pleine guerre froide, que le Traité sur la non-prolifération des armes nucléaires (TNP) entre en vigueur. Que dit-il ? Il interdit aux États officiellement dotés de l'arme (États-Unis, Russie, Royaume-Uni, France et Chine) d'en fournir à qui que ce soit ; les autres États signataires consentent à ne pas en acquérir et à placer leurs installations nucléaires éventuelles sous contrôle de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) ; tous s'engagent en faveur d'un désarmement général et complet sous contrôle international ; et une coopération facilitée sur les usages pacifiques de l'énergie nucléaire est prévue. À ce jour, seuls quatre États (Inde, Israël, Pakistan et Soudan du sud) n'ont pas signé le traité et la Corée du Nord a annoncé son retrait.

Ces engagements sont contrôlés par l'AIEA, notamment *via* l'envoi d'inspecteurs dans les installations nucléaires des pays signataires : contrôle des stocks de matière, mesures *in situ*, prélèvements, etc. L'objectif est de détecter toute activité nucléaire à finalité militaire, en recherchant les traces, même infimes, de matériaux entrant dans la composition des armes (uranium très enrichi et plutonium).

Deux laboratoires spécialisés au CEA

Les échantillons collectés sont analysés par une vingtaine de laboratoires hautement spécialisés, dont deux sont au CEA. Le premier est expert dans l'analyse à très haute précision de prélèvements de l'ordre du milligramme ; le second, capable de détecter des attogrammes (milliardièmes de milliardième de gramme), excelle dans la recherche d'ultratraces dans des frottis. Au niveau national, c'est la DAM qui est l'expert technique auprès des autorités françaises sur les questions de prolifération nucléaire : accès à la matière nucléaire de qualité militaire, capacité technique de conception et de fabrication d'armes, de vectorisation (missiles), etc. Le Tice, Traité d'interdiction complète des essais nucléaires, a, quant à lui, été

FOCUS

Une instrumentation française

Plus de 80 % des capteurs infrasons et 40 % des stations de mesure des isotopes radioactifs du xénon du Système de surveillance international du Tice sont de fabrication française, issue du savoir-faire des ingénieurs de la DAM.

ouvert à la signature en 1996. Objectif : interdire tous les essais d'explosion d'armes nucléaires et œuvrer en faveur de la non-prolifération et du désarmement. La France, du fait de son expertise développée à la DAM dans les années 1950 en matière de détection des essais, a été un interlocuteur essentiel lors des discussions à l'origine du Tice et dans la définition de son Système de surveillance international (SSI). Celui-ci s'appuie sur 321 stations de détection couvrant toute la planète (24 sont sous responsabilité française) et 16 laboratoires d'analyse de radionucléides, dont celui de la DAM, à Bruyères-le-Châtel.

Détecter tout essai dans le monde

Grâce à ce réseau global, tout essai nucléaire supérieur à une kilotonne est détecté quasi immédiatement par la signature qu'il génère : ondes sismiques, infrasonores ou hydroacoustiques et radionucléides libérés dans l'atmosphère. En cas d'essai nucléaire, il permet aux experts de la DAM de fournir aux autorités françaises, et ce en moins d'une heure, une première estimation de sa localisation et de son énergie. Contrairement au TNP, le Tice – avec 184 signatures pour 168 ratifications – n'est pas encore entré en vigueur. Son réseau de surveillance est néanmoins opérationnel à 90 % (la contribution française est complète) et a déjà prouvé son efficacité à l'occasion des six essais nucléaires réalisés par la Corée du Nord, dont le dernier, le 3 septembre 2017. ●

Page de gauche :

Analyse d'échantillon par spectroscopie (2005).





52

INTERVIEW

« Se protéger des risques terroristes »

Au début des années 2000, des lettres piégées à l'anthrax, le bacille de la maladie du charbon, font cinq morts aux États-Unis. Partout dans le monde, les courriers suspects à la poudre blanche se multiplient... La prise de conscience d'un fléau nouveau, le bioterrorisme, est planétaire. En 2005, l'État confie ainsi au CEA la responsabilité d'un programme interministériel de R&D contre les risques NRBC-E (nucléaire, radiologique, biologique, chimique et explosif). Neuf ans plus tard, la réalité des cybermenaces conduit le CEA à lancer également un programme de recherche dans ce domaine. Le point avec Laurent Olmedo, directeur du programme Sécurité globale au CEA.

Ci-dessus, à droite : Gamma caméra temps réel Nuuvia.

Quels sont les objectifs des recherches dans ce domaine ?

Nous développons des technologies innovantes pour lutter contre ces menaces terroristes, en allant de la recherche amont jusqu'à des prototypes que nous transférons à des industriels. Ceci pour répondre aux besoins exprimés par les autorités françaises, en matière de détection (du prélèvement d'échantillon jusqu'à son analyse), de protection (tenues, moyens de confinement, masques équipés de cartouches innovantes...), de décontamination et de thérapeutique (du diagnostic au traitement).

Pourquoi le CEA a-t-il été choisi pour conduire ces travaux ?

Parce que nous disposons d'un socle scientifique unique et pluridisciplinaire sur l'ensemble de ces sujets, et pouvons mobiliser un très large panel de compétences : biologistes, mathématiciens, électroniciens... Notre population de chercheurs et d'ingénieurs est aussi une force, nous donnant la capacité de pouvoir traduire des besoins fonctionnels – par exemple fournir à des soldats un moyen de détecter tel agent pathogène dans tel environnement – en projets de recherche, puis en démonstrateurs intégrant les contraintes liées à leurs usages. J'ajouterai enfin que nous entretenons depuis toujours des liens forts avec les pouvoirs publics, notamment la Défense.

À cette mission initiale dans le domaine NRBC-E est venue s'ajouter en 2014 la cybersécurité...

Nous avons en effet au CEA des installations sensibles (nucléaire de recherche ou de défense, supercalculateurs) qu'il est vital de protéger contre les cyber-attaques. Nous sommes également sollicités par les pouvoirs publics et les industriels pour des projets de R&D. Nos recherches portent sur le développement de nouvelles technologies pour protéger les systèmes (objets communicants, automates industriels...) en agissant à la fois sur les composants, les logiciels et les réseaux de connexion, ainsi que sur la conception d'outils pour déceler les vulnérabilités



©Nuuvia

matérielles et logicielles. Nous sommes également engagés au niveau européen. Le CEA coordonne ainsi Sparta, l'un des quatre pilotes « Réseau de compétences en cybersécurité » financés par la Commission européenne (CE), réunissant 44 partenaires académiques et industriels. Il vise à ré-imaginer la manière dont la recherche, l'innovation, et la formation en cybersécurité se pratiquent au sein de l'Union européenne, pour renforcer son autonomie stratégique en la matière. Avec comme premiers résultats la proposition en 2020 à la CE d'une feuille de route ambitieuse en recherche technologique.

Quel est le bilan depuis 2005 ?

Dans le domaine NRBC-E, nous avons déposé une centaine de brevets, conclu 20 transferts de technologie avec des industriels français et portons chaque année 40 à 50 projets de recherche. Je citerai, sans être exhaustif : une gamma caméra portable « temps réel » pour la recherche de sources radioactives, des outils de modélisation de la dispersion atmosphérique d'agents NRBC, des systèmes portables de détection d'explosifs ou de toxiques chimiques, des tests de détection et de diagnostic des agents de la menace biologique (voir p. 42). Et lorsque ces développements trouvent des applications hors Défense, comme le test sérologique de la Covid-19 mis au point en 2020, c'est une satisfaction supplémentaire ! ●

FOCUS

Avancées en série pour la cybersécurité

L'expertise du CEA en cybersécurité est aujourd'hui pleinement reconnue. En témoignent ses travaux sur l'utilisation de l'intelligence artificielle pour générer des schémas d'attaques de composants électroniques, afin de mieux anticiper les menaces ; la mise en open source d'outils logiciels de référence comme Framac (permet de qualifier la sécurité des logiciels en garantissant l'absence de vulnérabilités) ; ou ses travaux en implémentation sécurisée de nouvelles architectures de composants et de cryptographies, un secteur pour lequel la souveraineté nationale est essentielle. L'outil de compilation Cingulata par exemple simplifie la mise en œuvre du chiffrement homomorphe, une technologie de rupture qui permet d'effectuer des calculs directement sur des données chiffrées, limitant le risque de vols d'informations sensibles lors de leur manipulation dans le cloud. ●



©L. Godart/CEA

FOCUS

Le port du Havre supervisé depuis l'Essonne

À la demande des pouvoirs publics, un ensemble de dispositifs de détections nucléaire et radiologique a été déployé pour la première fois en 2016. Elle permet de détecter toute matière radioactive illicite entrant sur le territoire via le port du Havre. Les sorties terrestres du port sont équipées à la fois de balises Dirad développées par la DAM (elles détectent et identifient en temps réel et avec une grande sensibilité tous les radionucléides) et de systèmes de détection concurrents. « Toutes les données sont reportées au Centre national d'expertise radiologique, situé sur le centre CEA DAM Île-de-France (Bruyères-le-Châtel), qui gère 24h/24 les alertes et confirme l'alarme en cas d'incident avéré », précise Laurent Olmedo. ●



©Caroline Gashi/CEA

FOCUS

T-Rex flairer les vapeurs d'explosifs

T-Rex est un système portable de détection de traces d'explosifs sous forme de vapeurs. Conçu par la DAM, avec le List et le Leti, il combine trois technologies de capteurs (ondes acoustiques de surface, fluorescence et microbalance à quartz) à un traitement avancé du signal permettant la détection et l'identification d'un grand nombre d'explosifs en moins de deux minutes, et ce avec une très grande sensibilité. Industrialisé, il est en cours de déploiement sur certains sites du CEA. ●

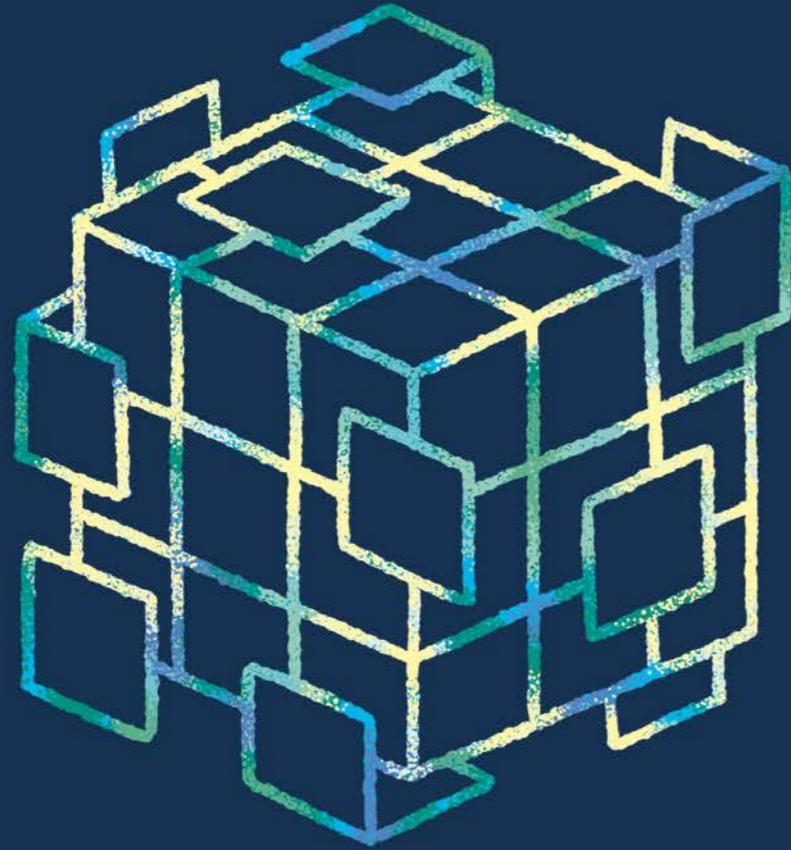


©P. Stroppa/CEA

En haut, à gauche : Mallette de kits de détection de terrain pour la lutte NRBC (2010).

Ci-contre, au centre : T-Rex, système portable de détection de traces d'explosifs.

Ci-dessus : Analyse de code avec l'outil Framac.



AVANCÉES N° 53 À 69

NUMÉRIQUE

Les pionniers de la
microélectronique
française
p. 68

FDSOI, nouveau
standard de la micro
p. 71

Les puces en 3D
p. 71

Chargeurs
de puissance
p. 71

Interview
« *Proposer de
nouvelles
fonctionnalités avec
la spintronique* »
p. 72

Imager l'espace
en Infra-rouge
p. 73

Les microLED 3D
p. 73

À vous les M&NEMS
p. 73

Vers le robot
compagnon
intelligent
p. 74

Interview
« *L'industrie 4.0, agile
et personnalisée* »
p. 75

Contrôle santé des
composants
p. 76

Add Fab
p. 77

Pour une IA
embarquée
p. 77

Sur la voie du véhicule
autonome
p. 78

IA, faire confiance
p. 80

Une industrie
française des
supercalculateurs
p. 81

L'ordinateur
quantique ?
p. 82



LES PIONNIERS DE LA MICROÉLECTRONIQUE FRANÇAISE

Omniprésente dans nos ordinateurs, téléphones, véhicules et objets connectés : la microélectronique est partout, concentrant des innovations au meilleur niveau mondial. Retour sur l'histoire de cette filière industrielle en France.

Diodes, transistors, circuits intégrés : pour concevoir les plus petits des composants électroniques, la France a su mettre en place la plus grande des organisations. Non pas celle d'une usine, d'un institut de recherche ou d'une entreprise, mais tout cela à la fois ! Autrement dit : une filière. Celle de la microélectronique française. « *Le CEA en a été la véritable clé de voûte, à partir de la création de son institut Leti en 1967 à Grenoble* », ouvre Thomas Ernst, son actuel directeur scientifique. Mais déjà pendant la décennie précédente, au Centre d'études nucléaires de Grenoble (Ceng, prononcé « singe »), des dizaines de chercheurs s'affairaient autour des

puces électroniques, poussés par des besoins militaires et spatiaux. Outre-Atlantique en 1958, à l'aube des missions Apollo, l'américain Jack Kilby de Texas Instruments invente le premier circuit intégré. Simultanément, Robert Noyce de Fairchild réitère l'exploit puis crée, avec Gordon Moore et Andrew Grove, Intel en 1968. Côté français, le premier circuit intégré est fabriqué en 1963 au Ceng. « *La technologie a vite été développée à Grenoble. En Europe, on était les premiers* », commente Thomas Ernst. C'est dans ce contexte que l'inauguration du Leti retentit en 1967 comme un coup d'accélérateur pour la microélectronique française. D'autant que l'expertise développée par l'institut grenoblois est vite enrichie par celle du LAAS du CNRS à Toulouse.

L'époque des pionniers

Si les besoins sont initialement militaires, la bascule vers le civil a lieu progressivement. Une start-up naît en 1972 dans les murs du Leti. C'est Efcis qui, après être devenue Thomson-Brandt en 1982, fusionnera en 1987 avec SGS pour devenir

STMicroelectronics. Dans la foulée, le savoir-faire grenoblois essaime vers le reste du territoire, avec Matra Harris à Nantes et Eurotechnique à Aix-Rousset. « *L'un de ses directeurs a été formé au Leti, indique Thomas Ernst. La conjonction de chercheurs brillants et de porteurs visionnaires au sein du CEA fait que la plupart des entreprises du domaine en sont issues* ». Ainsi, pendant les années 1970, une vingtaine d'individus incarne véritablement l'esprit pionnier de la microélectronique. « *Sans eux, ça n'aurait pas pu prospérer, le politique n'aurait pas suffi* », estime l'expert. « *Quand j'arrive en 1981, le Leti vit une époque de transition et de gestation qui autorise tous les enthousiasmes, se souvient François Martin, ingénieur-chercheur au Leti. Beaucoup d'ingénieurs étaient partis chez Efcis, il fallait imaginer la suite* ». Bonne nouvelle, les décideurs politiques ont compris l'importance d'investir dans la microélectronique. À Grenoble, un autre centre est créé au sein du CNET quelques mois avant l'élection de François Mitterrand. Une fois investi de la plus haute fonction

de l'État, le président vient le 23 janvier 1985 inaugurer au CEA un édifice en forme de trèfle à quatre feuilles : le bâtiment 40 et ses 2 000 m² de salles blanches.

Une succession de premières

Fort de ces nouvelles installations, le CEA devient le siège d'une multitude de premières technologiques, lui qui sait depuis 1982 protéger ses puces des radiations gamma grâce à l'électronique durcie. En 1984, on y brevète les micro-acceleromètres, composants que l'on retrouve dans les déclencheurs d'airbags. Côté détection infrarouge, de premiers travaux amènent la création de Sofradir en 1986, puis les avancées autour des bolomètres débouchent sur sa filiale Ulis en 2000, réunies en Lynred depuis 2019, aujourd'hui un des leaders mondiaux en imagerie. Sur sa lancée, le Leti essaime la start-up Soitec en 1992 pour déployer sa technologie Smartcut™, standard de l'industrie électronique pour la fabrication de plaques de silicium sur isolant SOI. L'effort se poursuit et le CEA-Leti devient le premier en Europe à opter pour des interconnexions en cuivre. Puis, en 1999, il s'investit dans la sécurité des technologies de l'information en créant le Cesti. La même année, le premier transistor de 20 nanomètres sort de ses salles blanches. C'est alors le plus petit au monde ! « *Nous étions capables d'anticiper les ruptures technologiques tout en sachant convaincre les industriels de s'adapter à ces évolutions*, commente Thomas Ernst. *Sans ces anticipations vitales, la concurrence serait devenue trop forte* ».

Le soutien de la recherche fondamentale

L'excellence de cette filière microélectronique n'aurait pu se maintenir sans recherche fondamentale. « *On avait besoin des chercheurs, ne serait-ce déjà que pour obtenir un bon vide dans les bâtis de croissance* », illustre Luc Barbier, spécialiste de la croissance cristalline au CEA-Iramis de Saclay. Car, pour



©Artechnique / CEA

étudier la surface des matériaux, tout excès de contamination par le gaz résiduel est proscrit. « *Je me souviens avoir travaillé sur des pompes cryogéniques qui employaient jusqu'à 50 litres d'hélium liquide par jour ! C'est impensable aujourd'hui. Les pompes sont devenues turbomoléculaires et ioniques dans les années 1990-2000. À cette époque, des entreprises comme Riber, bientôt suivie par d'autres, se sont développées et ont pu nous fournir du matériel de pointe* », raconte le chercheur, entré au CEA en 1981. Mais, au-delà d'un bon vide, savoir caractériser la morphologie des surfaces et leurs propriétés électroniques à l'échelle magnétique est rapidement devenu vital. Pour cela, en plus des techniques de diffraction (électrons, rayons X, neutrons ou atomes d'hélium), les chercheurs du CEA ont su rapidement exploiter les nouvelles microscopies à sonde locale. Les techniques de diffraction sont devenues elles-mêmes aussi beaucoup plus puissantes avec l'ouverture en 1994 du synchrotron ESRF. Année après année, pendant que les électrons tournoient dans l'accélérateur, →

« Nous étions capables d'anticiper les ruptures technologiques tout en sachant convaincre les industriels de s'adapter à ces évolutions »

Thomas Ernst,
directeur scientifique du CEA-Leti.

Ci-dessus :
Conception de circuit intégré dans une salle blanche du CEA-Leti (1981).



©Ramain/CEA

la taille des transistors continue de chuter et leur nombre d'augmenter dans les circuits intégrés, selon la fameuse loi de Moore. «Aujourd'hui, la tendance mondiale est davantage à la miniaturisation de ce qu'il y a autour des transistors, ce qu'on appelle le "more than Moore"», décrit Thomas Ernst.

Une approche systémique de la transition numérique

La conception des composants ne peut se faire qu'au prix de logiciels de pointe. «Un circuit électronique est constitué de transistors et d'interconnexions formant un motif complexe propre à ses fonctions. Et, du fait de cette complexité croissante, le niveau d'abstraction a dû être élevé à l'aide de logiciels de conception de plus en plus performants, jusqu'à permettre aujourd'hui de manipuler des ensembles de millions de transistors aussi simplement que l'on manipulait les transistors individuels il y a 30 ans. C'est grâce à cela que l'on réalise des circuits comprenant des milliards de composants», décrit Marc Durantont, arrivé en 2010 au CEA-List. Dès lors, on ne parle plus aujourd'hui

seulement de transistors ou de circuits électroniques mais aussi de systèmes complets. Et les logiciels sont devenus indispensables pour concevoir, simuler et vérifier ces systèmes.

Vers le monde numérique de demain
Pour cela, le List concentre depuis sa création en 2003 les meilleures compétences dans l'intelligence artificielle (voir p. 77 et 80), les systèmes cyber-physiques et le manufacturing avancé (voir p. 75). Ses équipes, réparties entre le plateau de Saclay et Grenoble, sont au cœur d'écosystèmes académiques et industriels à la pointe des technologies et de l'innovation du futur. À l'heure de l'omniprésence de l'apprentissage profond des réseaux de neurones, de l'émergence du véhicule autonome et des robots qui deviennent conscients de leur environnement, le CEA contribue à dessiner les contours du monde numérique de demain, avec une exigence de confiance toujours plus forte, pour une industrie compétitive, durable et responsable. ●

DATES CLÉS

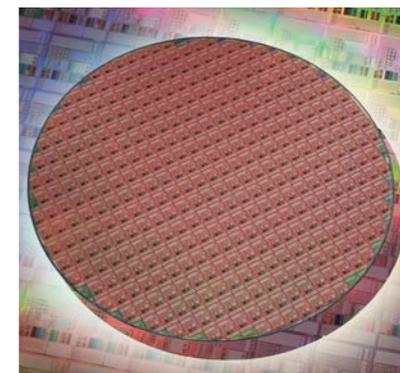
- 1963**
Fabrication du 1^{er} circuit intégré français par le Ceng
- 1972**
Création de la start-up Efcis du CEA-Leti à l'origine de STMicroelectronics
- 1985**
Inauguration des 2 000 m² de salles blanches du CEA
- 1999**
Fabrication du plus petit transistor au monde (20 nm) par le CEA
- 2011**
Premier transistor en technologie FDSOI du Leti (voir ci-contre)

Ci-dessus : Conception et fabrication de circuits intégrés dans les salles blanches de la plateforme Microsystèmes du CEA-Leti (2019).



FDSOI, NOUVEAU STANDARD DE LA MICRO

Samsung ou Global Foundries les proposent dans leur catalogue ! Les transistors en technologie FDSOI mise au point par le Leti en 2017 présentent de nombreux avantages. À commencer par leur rapidité, 25 % plus élevée que celle des transistors équivalents sur silicium massif. Ils sont aussi 30 % moins énergivores et leur tension de service abaissée jusqu'à 0,4 V a une très faible dissipation de puissance. Très fiables, leur taux d'erreur de calcul est 100 à 1 000 fois moins



©CEA

élevé que les technologies sur substrat massif. La FDSOI garantit également une très faible variabilité d'un transistor à l'autre car le substrat de silicium du wafer n'est pas dopé et donc plus homogène. Elle est enfin très compétitive car son architecture autorise sa fabrication sur les lignes de fabrication actuelles des transistors. ●

Ci-dessus : Substrat de transistors réalisés en technologie FDSOI (2012).



CHARGEURS DE PUISSANCE

Depuis 2007, le CEA-Leti s'intéresse à la technologie GaN/Si (nitrure de gallium sur silicium) pour obtenir des composants électroniques de puissance plus petits mais aussi plus efficaces. Objectif : augmenter jusqu'à 98% les performances des alimentations électriques AC/DC (15W à 1kW), afin de réduire les échauffements et, par ricochet, la taille et le coût. Fort de résultats prometteurs, il a essaimé en 2020 la start-up Wise Integration qui a atteint cet objectif avec le premier chargeur USB universel, six fois plus efficace (il peut charger jusqu'à 100 W) et trois fois plus petit que les produits actuels. ●



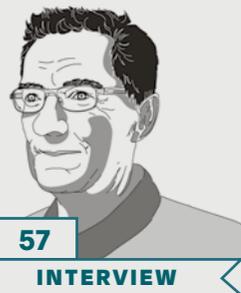
©V.Guilly/CEA

Ci-dessus : Inspection de composants de puissance en technologie GaN/Si (2016).



LES PUCES EN 3D

Dans la course à la miniaturisation des composants électroniques, une piste s'est imposée à la fin des années 2000 : l'intégration 3D, qui consiste à interconnecter des puces en 3 dimensions. En 2010, cette option a connu une avancée majeure avec la technologie CoolCube™ du CEA-Leti. Elle permet d'empiler des transistors FDSOI (voir ci-contre) avec une précision d'alignement lithographique de l'ordre du nanomètre. Résultat : 10 millions de contacts 3D par mm², contre 100 000 pour des solutions classiques, pour des gains de taille, performance et de coût assurés. Le Leti collabore à présent avec des industriels (IBM, STMicroelectronics) pour déployer un écosystème complet, du design à la fabrication, autour de CoolCube™. ●



57

INTERVIEW



« Proposer de nouvelles fonctionnalités avec la spintronique »

Bernard Diény, directeur de recherche au CEA-Irig, présente cette toute jeune discipline associant magnétisme et microélectronique. Il s'agit d'explorer les caractéristiques quantiques des électrons (leur spin) afin de réaliser des composants aux performances et consommations énergétiques améliorées.

À droite : Test électrique de circuits spintroniques (2018).

Quelle est l'implication du CEA dans la spintronique ?

Tout a débuté en 1991, trois ans après la découverte par Albert Fert et Peter Grünberg de la « magnétorésistance géante », phénomène-clé de la spintronique – découverte qui leur valut le prix Nobel de physique 2017. Des recherches expérimentales et théoriques ont commencé dans ce domaine au CEA-Irig, et quelques années plus tard au CEA-Iramis. En parallèle, de premières discussions ont eu lieu avec le CEA-Leti en vue d'utiliser ces phénomènes pour la réalisation de capteurs de champs magnétiques. En 2001, le laboratoire Spintec fut créé avec le CNRS et l'université Grenoble Alpes afin d'intensifier le passage de la recherche fondamentale aux applications en découlant. Plusieurs premières mondiales ont été réalisées depuis. J'en cite deux : la découverte en 2002 de « l'anisotropie perpendiculaire aux interfaces métal magnétique/oxyde », aujourd'hui utilisée de façon universelle dans les mémoires magnétiques de basse consommation (MRAMS) ; et celle d'un nouveau mode d'écriture dans ces MRAMS utilisant le phénomène quantique de « spin-orbite ». Au total, le CEA a déposé plus de 80 brevets en spintronique et créé 5 start-up.

Qu'ont apporté vos travaux ?

Après mon séjour à IBM entre 1989 et 1991, mes travaux ont permis d'intégrer les phénomènes et matériaux spintroniques dans les têtes de lecture des disques durs d'ordinateurs. À partir de 1998, cette technologie a permis d'accroître de 60 % par an leur capacité de stockage. Plus généralement, les capteurs de champs magnétiques à base de spintronique s'avèrent extrêmement utiles dans les secteurs de l'automobile, de la robotique ou encore des biotechnologies et du biomédical. J'ai également bénéficié de deux bourses ERC, en 2009 et 2015, ainsi que de deux ERC *Proof of concept* en 2012 et 2020. Notre équipe Spintec a ainsi pu explorer le potentiel des matériaux spintroniques et développer les outils de conception des circuits associés pour une électronique très

basse consommation et pour l'intégration de différentes fonctionnalités sur une même puce. Par ailleurs, nous avons mené différentes actions pour rapprocher les communautés du magnétisme et de l'électronique et contribuer à combler le fossé culturel qui existait entre elles, notamment via des *workshops* et un cours annuel sur les MRAMS.

Quel futur pour la spintronique ?

L'entrée en production industrielle des MRAMS en 2018 permet à cette jeune discipline de conserver son essor. Elle marque également son acceptation par l'industrie microélectronique. À terme, ses recherches portant sur le développement d'une électronique ultrabasse consommation profiteront à d'autres domaines comme les télécoms, la cybersécurité, l'intelligence artificielle... À l'heure actuelle, la spintronique apporte de réelles opportunités économiques pour l'Europe, et en particulier pour la France dont l'excellence scientifique est internationalement reconnue. Il est alors important de conserver et renforcer notre capacité à monter dans la chaîne de valeur. ●



©Spintec

CHIFFRES CLÉS

80
brevets déposés dans
le domaine de la spintronique

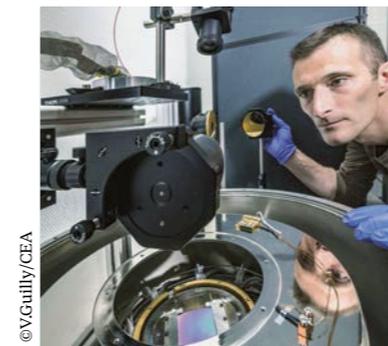
5
start-up créées



LES MICROLED 3D

L'ambition de la start-up Aledia ? Bouleverser le marché mondial des écrans portables ! Ses microLED en 3D, uniques au monde, sont constituées de « forêts » de nanofils de nitrure de gallium alignés sur substrat de silicium. Ces filaments, cent fois plus fins que des cheveux, émettent de la lumière de tous les côtés, par opposition aux classiques LED et OLED en 2D. La technologie née au CEA-Leti à la fin des années 2000 cumule les atouts : minipixels à haute résolution, ultra

brillance, meilleure efficacité énergétique. Élaborée sur plaque de silicium, elle autorise de grands volumes de production, diminuant ainsi les coûts. Aledia, qui bénéficie depuis sa création en 2011 du conseil scientifique d'Hiroshi Amano, colauréat du prix Nobel de physique 2014 pour l'invention de la LED bleue, a déjà levé plus de 160 M€ depuis 2013 et s'apprête à construire son usine près de Grenoble. ●



©V.Guilly/CEA

58

IMAGER L'ESPACE EN I.R.

S'il est une spécialité du CEA-Leti dans l'imagerie, c'est bien l'infrarouge (IR) (voir p. 69). Dès 1978, il s'impose avec une technologie de détecteurs à base de tellurure de mercure-cadmium (MCT). Ces détecteurs refroidis ont été embarqués dans des missions spatiales, comme Cassini-Huygens dont la sonde a parcouru 3,5 milliards de km et mesuré pour la première fois l'épaisseur des anneaux de Saturne en 1997.

À partir de 1990, le CEA-Leti développe des détecteurs sur substrat silicium ne nécessitant pas d'être refroidis. Ce sont les microbolomètres, eux aussi partis dans l'espace par exemple à bord du satellite Herschel en 2009 (voir p. 87). Miniaturisés, ils sont aujourd'hui utilisés pour d'autres applications : contrôle de pertes énergétiques d'un bâtiment, détection du nombre de personnes dans un lieu, etc. ●

Ci-dessous : Test de composants infrarouges destinés aux communications spatiales (2018).

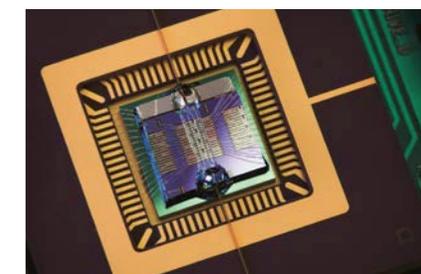
60

À VOUS LES M&NEMS

Ils se nichent dans tant d'objets du quotidien : téléphones portables, airbags, manettes de jeux vidéo. Ce sont les MEMS, microsystèmes électromécaniques qui convertissent un changement physique en signal électrique (ou vice-versa). Le CEA-Leti les maîtrise depuis plus de trente ans et a réussi en 2010 la prouesse de les associer à des nanostructures mécaniques. Sa technologie M&NEMS permet de rassembler sur un même substrat différents types de capteurs : accéléromètre, gyromètre, magnétomètre, capteur de pression et microphone. À la clé : facilité d'intégra-

tion et réduction des coûts, deux atouts qui comptent dans le domaine de l'Internet des objets. ●

Ci-dessous : Système de capteurs de gaz Apix développé avec des MEMS (2012).



©G.Cottet/CEA

61



VERS LE ROBOT COMPAGNON INTELLIGENT

Apprendre à un robot les gestes à effectuer juste en les lui montrant du doigt ? C'est désormais possible. Enjeu : révolutionner la production industrielle vers plus de flexibilité.

Il y eut le MA11 en 1966, premier bras télémanipulateur mécanique français basé sur un brevet du CEA. «*Au même moment naissait la robotique industrielle,*

issue des besoins du nucléaire. Car, dès les années 1950, Américains et Français se penchaient sur le problème de la manipulation sûre de la matière radioactive », expose Gregorio Ameyugo du CEA-List. De par la complexité et la criticité de son environnement, l'industrie nucléaire demeure un moteur d'innovations pour la robotique.

Pour des robots flexibles...

Tant et si bien que le List valorise depuis les années 1980 son expertise auprès d'autres filières (santé, agroalimentaire,

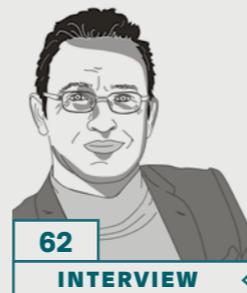
automobile, aéronautique, etc.) pour répondre à leurs problématiques. «*Les robots sont un investissement conséquent pour les entreprises, en termes d'installation, de programmation et de sécurisation de leur environnement. Et dans un monde qui évolue en permanence, l'automatisation traditionnelle ne peut répondre à cet impératif d'adaptation. Depuis les années 1990, le secteur automobile par exemple, cherche cette flexibilité dans l'être humain mais, pour des raisons économiques, il délocalise certaines productions hors de France.* » Ce constat a poussé les équipes du CEA à intégrer la flexibilité au cœur même des robots.

Interactifs et intelligents...

Un pari gagnant, illustré par sa start-up Isybot qui a déjà commercialisé depuis 2018, y compris à l'export, 24 exemplaires de ce nouveau type de robot collaboratif, appelé cobot : «*Il est plus sûr dans son interaction avec l'opérateur et beaucoup plus facilement programmable, donc reconfigurable. Il suffit de le prendre littéralement par la main pour que son système se souvienne des gestes et tâches à effectuer* », détaille Gregorio Ameyugo. L'innovation est telle que les chercheurs travaillent sur une version où l'opérateur pourra apprendre au robot simplement en lui montrant du doigt ! Ces prototypes requièrent des compétences avancées en électronique embarquée et intelligence artificielle (IA) dont dispose le List. Elles ont déjà été mises en œuvre par sa start-up Tridiméo et sa caméra 3D multispectrale au meilleur niveau mondial en IA de vision. Bientôt, l'humain pourra même interagir par la parole avec le robot, véritable compagnon intelligent. En rendant la production plus flexible, ces avancées pourraient contribuer à un nouveau paradigme de production relocalisée et écoresponsable. ●

Ci-contre :

Cobot d'aide au ponçage de pièces, de la start-up Isybot (2019).



62

INTERVIEW

« L'industrie 4.0, agile et personnalisée »

Depuis plus de vingt ans, le CEA-List propose à de nombreuses filières industrielles des briques technologiques pour relever le défi de l'usine du futur. Il y est question de compétitivité, de flexibilité, et de données ! Le point avec son directeur, Alexandre Bounouh.

Qu'est-ce que l'usine du futur ?

Ce concept d'usine du futur ou « industrie 4.0 » est proposé pour la première fois en Allemagne, en 2011. Il s'agit de passer de productions de masse standardisées à des productions adaptées aux besoins des clients, en petites séries mais toujours compétitives. Et ceci, grâce aux technologies numériques dont l'intelligence artificielle (IA) à laquelle s'intéresse le CEA à partir des années 1980 pour proposer aujourd'hui des pistes innovantes (voir p. 77 et 80). L'idée est de rendre les lignes de fabrication flexibles, tout en conservant un haut niveau de qualité avec une traçabilité et une évaluation en temps réel des procédés, par exemple avec des méthodes de contrôle non destructif (voir p. 76). D'autres technologies de contrôle, analyse de données, SHM, aident à la maintenance prédictive pour garantir la performance des machines. L'usine du futur est une chaîne industrielle numérisée et intelligente pour piloter de manière agile et sécurisée les productions. Elle vise également l'impératif d'efficacité énergétique, avec une vision plus globale de l'économie circulaire, par exemple en envisageant une utilisation raisonnée des matières premières grâce au recyclage et à la fabrication additive.

Quelle est la force du CEA ?

Depuis plus de vingt ans, nous développons un large spectre de technologies numériques pour l'usine du futur. Ces recherches sont conduites en partenariat avec des industriels, donnant un accès privilégié à des données représentatives des vrais processus industriels, ce qui nous distingue des laboratoires académiques qui travaillent souvent sur des données simulées. C'est en cela une très grande force car ces données, matière première de l'IA, nous permettent de mettre au point des méthodes d'apprentissage et des algorithmes qui restent robustes une fois déployés sur le terrain.

Comment s'est-il positionné sur ces technologies ?

Historiquement, notre socle de compétences s'est construit à partir de nos activités pour l'industrie nucléaire : électronique durcie ; instrumentation et robotique ;

traitement d'images et de données, etc. Ces développements ont évolué en briques technologiques génériques que nous proposons depuis les années 2000 à de nombreuses filières industrielles : pétrole & raffineries, santé, agro-alimentaire, automobile, aéronautique... Tous ces secteurs sont en train d'opérer leur mutation vers l'usine du futur.

Quels sont les enjeux de l'usine du futur ?

L'enjeu est évidemment la compétitivité de l'économie française, ou comment permettre aux entreprises de rester performantes sur des marchés en mutation. La crise de la Covid-19 a mis l'accent de façon très forte sur le besoin d'adaptation des activités de production pour fournir en urgence des produits stratégiques comme les dispositifs médicaux. Or, quelle usine pouvait le faire sans avoir à tout réinvestir ? Grâce à l'IA, nous développons des outils robotiques reconfigurables qui n'ont plus besoin de programmation complexe pour passer d'un produit à l'autre (voir ci-contre). De même, nous travaillons sur l'élaboration de jumeaux numériques d'usines pour simuler toutes les étapes de la conception d'une usine ainsi que toutes celles des moyens de production. L'objectif est de pouvoir anticiper et adapter la fabrication en fonction des ressources humaines et matérielles.

La flexibilité de la production repose sur les données, et leur sécurisation...

En effet, pour bénéficier d'un maximum de retours d'expériences des industriels, tant au niveau de leurs process que de leurs métiers, il faut avoir accès à leurs données. Or, nous constatons leur réticence à les partager pour des raisons évidentes de confidentialité. C'est pourquoi nous leur proposons des solutions de cybersécurité, par exemple avec la cryptographie homomorphe qui permet de travailler sur les données, y compris avec des algorithmes d'IA, sans avoir à les décrypter. Nous collaborons également avec plusieurs partenaires sur un cloud ultrasécurisé pour agréger et mutualiser ces données, et permettre à tous les industriels de partager cette richesse tout en préservant leur capacité de différenciation. ●

63 

CONTRÔLE SANTÉ DES COMPOSANTS

Le contrôle non destructif (CND) permet d'inspecter un composant et de détecter d'éventuels défauts sans l'endommager. Dès les années 1990, le CEA a déployé sa plateforme logicielle Civa, référence mondiale dans la simulation pour le CND qui a donné naissance en 2009 à la start-up Extende.

Régulièrement mise à jour, Civa propose aux industriels des solutions de simulation du contrôle de leurs matériaux et produits, en utilisant différentes méthodes (ultrasons, courants de Foucault, radiographie et tomographie X, thermographie infrarouge...).

De nouvelles techniques dites SHM (*structural health monitoring*) ont récemment émergé. Elles intègrent des capteurs au cœur même des structures pour suivre en temps réel leur état de santé et anticiper les opérations de maintenance. En 2019, le CEA a validé un nouveau concept à base d'intelligence artificielle (IA) avec Safran : « *Sur une structure aéronautique, nous avons entraîné des algorithmes de réseaux de*

neurones profonds grâce à des données simulées par Civa afin de pouvoir analyser des données réelles et interpréter les résultats », indique Pierre Calmon, directeur de recherche au CEA-List.

Enjeu de sûreté

Cette stratégie de contrôle s'avère particulièrement adaptée aux structures à fort enjeu de sûreté (aéronef, train, centrale nucléaire, éolienne, etc.). C'est pourquoi le CEA a lancé en 2020 la plateforme Sachems, rassemblant six laboratoires académiques et cinq industriels pour accélérer le déploiement des solutions SHM dans l'industrie, en France comme à l'international. ●

Ci-contre, en haut:

Intégration de capteurs SHM dans une structure aéronautique pour y détecter d'éventuels défauts et les classer par IA (2019).

Ci-contre, en bas:

Inspection de flexibles pétroliers, structures très complexes pour lesquelles les chercheurs ont conçu un capteur électromagnétique CND spécifique (2019).



©CEA



©CEA

64

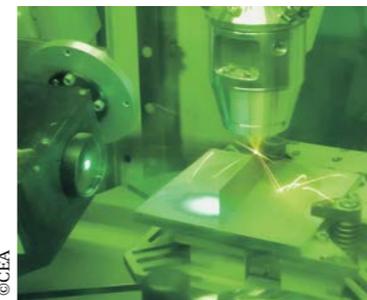
Add Fab

Dans les dix dernières années, la fabrication additive s'est imposée auprès des industriels. L'impression 3D permet de produire rapidement des pièces complexes par rapport à l'usinage conventionnel.

Au CEA, les recherches couvrent toute la chaîne de valeur, de la conception des pièces jusqu'à leur qualification, et s'appuient sur ses plateformes Poudr'Innov 2.0, Samatha, Alfea et, depuis 2019, sur le *Additive Factory Hub* (AFH). Le CEA-Liten accompagne ainsi de nombreux partenaires comme HP, AddUp, Dassault Aviation ou Renault, dans l'optimisation des matériaux (polymères, céramiques, métaux) et des procédés. Cette R&D s'enrichit de celle du CEA-List qui développe depuis 2017 une approche couplant impression 3D/contrôle non destructif/intelligence artificielle. L'objectif est de contrôler en temps réel la fabrication des pièces, ce qui a été validé lors d'essais effectués avec BeAM et VLM Robotics. Dans la perspective d'industrialiser cette technologie, la plateforme AFH fédère des académiques et des industriels (fabricants et utilisateurs de machines) sur ce sujet d'avenir. ●

Ci-dessous:

Fabrication additive, par fusion de poudre métallique par laser, contrôlée en temps réel (2019).



©CEA

65 

POUR UNE I.A. EMBARQUÉE

Et si on rapatriait l'intelligence artificielle au cœur même des systèmes qui l'emploient, ce qui la rendrait aussi moins vulnérable aux cyberattaques ?

« *Un moyen de résoudre des problèmes trop complexes pour être mis en équation* », voici comment l'expert du CEA-List Fabien Clermidy définit l'intelligence artificielle (IA). Ces technologies sont déjà utilisées par nos ordinateurs et assistants personnels quand ils analysent par exemple nos centres d'intérêt afin d'anticiper les réponses les plus pertinentes lors d'une recherche Internet ou d'un achat en ligne. Mais pour ces usages, le traitement numérique des données se fait dans le *cloud*, c'est-à-dire sur des serveurs à distance. Rapatriez ces capacités d'analyse et de calcul au sein des systèmes qui les utilisent, et vous obtenez... l'IA embarquée. Avec un atout de taille: sa capacité de traiter les informations *in situ* la rend moins vulnérable aux cyberattaques.

Transferts vers l'industrie

Cette thématique, le CEA s'y attelle depuis dix ans. « *Les réseaux de neurones et les méthodes d'apprentissage profond* (deep learning), *efficaces pour traiter les problèmes complexes, ont connu un boom vers 2010. On a alors démarré nos recherches pour adapter cette IA directement sur du matériel* », témoigne Fabien Clermidy. Des composants microélectroniques aux algorithmes, en passant par les outils reliant les composants et les logiciels,

les instituts List et Leti du CEA maîtrisent l'entière chaîne de fonctionnement d'une IA embarquée. Et si les systèmes qu'ils développent n'ont pas encore gagné notre quotidien, c'est qu'ils se destinent principalement à l'industrie. « *L'IA grand public n'a rien à voir avec celle qu'utilisent les industriels, commente l'expert. Leurs usages demandent des cycles de développement plus longs (une dizaine d'années), notamment pour satisfaire leurs exigences de fiabilité et sécurité. Aujourd'hui, nos systèmes commencent à entrer dans l'industrie* ».

Vision intelligente pour véhicule autonome

Parmi les succès récents du CEA dans le domaine de la « vision intelligente »: un système précurseur pour le véhicule autonome développé avec Valéo en 2018 permettant à un bus de la RATP de circuler et de se garer de façon autonome (voir p. 78), ou encore les technologies de sa start-up Arcure, créée en 2010, pour prévenir des collisions entre engins et piétons sur les chantiers. Et comme l'IA embarquée requiert des composants spécifiques, performants et économes en énergie, le démonstrateur SamurAI a été développé en 2019 spécifiquement: « *Nous travaillons sur des solutions dites "ultra low power" qui pourraient voir le jour d'ici 1 à 2 ans* », annonce Fabien Clermidy. ●

66 

SUR LA VOIE DU VÉHICULE AUTONOME

Le CEA développe depuis plus de trente ans des technologies clés pour garantir le fonctionnement des systèmes critiques. Originellement utilisées pour l'industrie nucléaire, elles ont trouvé application dans le domaine de l'aviation civile et plus récemment dans celui de l'automobile.

Imaginer un véhicule qui dispense l'utilisateur de conduire et de rester vigilant, tout en réduisant le nombre d'accidents de la route causés par les erreurs humaines : ce sont bien ces enjeux que vise le CEA. « À la fin des années 2000, des projets de véhicules autonomes ont été lancés outre-Atlantique. Et tout s'est accéléré. Nos partenaires nous ont sollicités pour travailler avec eux au développement de technologies d'automatisation sur lesquelles nous disposions déjà d'une expertise », expose Yann Gallais, chercheur au CEA-List.

La perception de l'environnement au cœur de l'automatisation

Le véhicule autonome (VA) est un concentré d'innovations basé sur une architecture qui se résume en quatre mots : perception, planification, décision, exécution. Pour appréhender son environnement en temps réel (signalisations, piétons, accidents, travaux...), le VA doit compiler les données de nombreux capteurs : caméras, lidars (lasers), centrales inertielles, GPS, caméra infrarouge, etc. À cela s'ajoutent des algorithmes intelligents (IA) pour l'analyse de scènes et la génération de cartographies 3D afin d'identifier et décider dans la milliseconde d'une trajectoire, alors exécutée grâce à des dispositifs de contrôle-commande. Toutes ces briques technologiques, le CEA y travaille, depuis le développement de capteurs (CEA-Leti), jusqu'à l'IA de vision notamment avec l'algorithme Deep Manta du CEA-List et de Valeo.

Fiabilité et fusion de données

L'un des enjeux concerne la fusion des données pour assurer la fiabilité des

informations des capteurs et garantir qu'il n'y aura pas d'erreurs de calcul dans la décision. « Faire la fusion des données de perception et réaliser les calculs en temps réel localement, sans avoir le coffre rempli d'ordinateurs, sont des défis majeurs », indique le spécialiste. Le CEA a par exemple réalisé entre 2016 et 2019 avec l'Alliance Renault-Nissan-Mitsubishi une architecture de calcul centralisée et modulaire pour, à terme, réaliser les calculs dans des composants embarqués de haute performance. Ce projet Face a vu essaimer la startup Alkalee en 2020.

IA embarquée et de confiance

De l'avis du chercheur, l'acceptation sociétale des véhicules hautement automatisés ne sera pas possible sans garantir la fiabilité, la sécurité et la certification des IA embarquées. C'est l'enjeu de l'IA de confiance à laquelle le CEA consacre un programme (voir p. 80). ●

Page de gauche :

Démonstration de garage autonome d'un bus RATP dans le cadre d'une collaboration du CEA-List avec Iveco (2018).



67

IA.

FAIRE CONFIANCE

Visionnaire et précurseur, le CEA consacre tout un programme à l'IA de confiance. Enjeu : répondre au mieux aux attentes de la société en la matière.

La confiance dans l'intelligence artificielle (IA) est un verrou qui, s'il n'est pas levé, empêchera son déploiement. Partant de ce constat, le CEA a lancé en 2017 un programme dédié à l'IA de confiance. Critère majeur : être capable de fournir tous les éléments qui en assurent le bon fonctionnement. Cela concerne la sûreté du système en garantissant qu'il fait bien ce pour quoi il a été conçu et uniquement cela, la sécurité, la protection des données ou encore la fiabilité pour se prémunir des pannes. « Cela inclut aussi un volet de l'explicabilité, car donner des clés de compréhension d'une IA à son usager peut améliorer cette confiance », complète François Terrier, responsable de programme au CEA-List.

Précision et protection

Avant, les recherches ne s'intéressaient qu'à cette robustesse et explicabilité de l'IA. Or, son fort développement dans l'industrie pose de nouvelles questions : quels critères pour mesurer la précision

d'une IA ? Quels processus de validation et de certification ? Quels niveaux de protection des données et de robustesse face à des attaques externes ?

En phase avec les besoins industriels

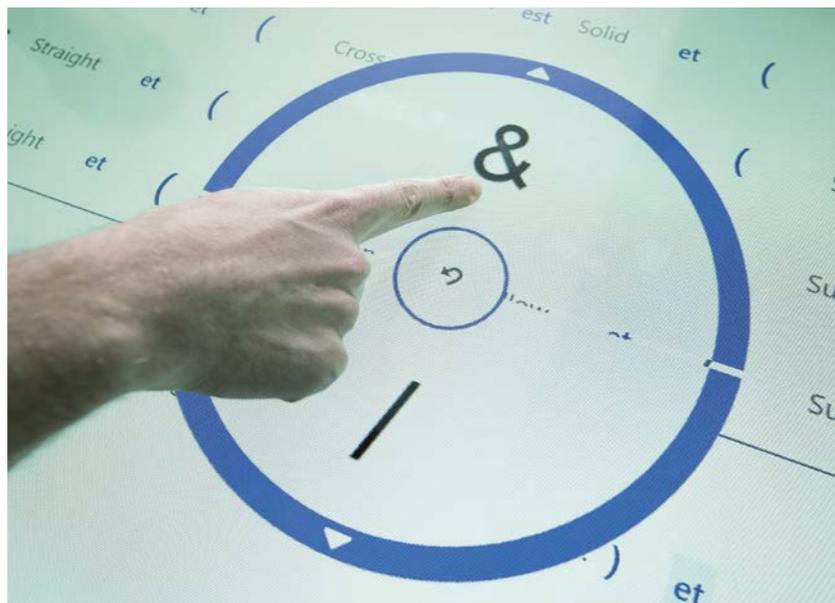
En les structurant en programme en 2017, le CEA est précurseur car le sujet commence tout juste à être pris en compte au niveau mondial. Depuis, il a impulsé trois premiers *workshops* internationaux sur le sujet, et une dizaine de thèses ont d'ores et déjà démarré pour s'attaquer au problème. Ces recherches entrent en résonance avec les besoins des industriels, exprimés dans le cadre de ses nombreuses collaborations. Avec déjà des retombées. « Ce qu'on voit apparaître, c'est que la Commission européenne et la France font passer un certain nombre de recommandations et de propositions de lois sur l'éthique et l'exploitation de l'IA dans les systèmes critiques », observe François Terrier. Une intention européenne plus exigeante que celle d'autres continents, qu'il explique avec l'exemple du véhicule autonome : « certains pourraient privilégier la statistique d'un faible taux d'accidents d'une IA plutôt que d'un conducteur moyen. C'est bien sûr un critère. Mais le comportement d'un

Le CEA est précurseur car le sujet commence tout juste à être pris en compte au niveau mondial.

tel système est beaucoup plus complexe et il n'est pas forcément acceptable qu'il fasse des erreurs que l'humain éviterait facilement. » Pour l'heure, rien ne prédit que l'être humain sera plus exigeant avec l'IA qu'avec lui-même, ni le contraire. Au-delà du dimensionnement de performance des systèmes d'IA, leur développement requerra à terme une étape de certification, seule garantie d'un fonctionnement sans faille et respectueux des normes et de l'éthique nationale et européenne. Ce à quoi s'emploient les équipes du CEA-List. ●

Ci-dessous :

ExpressIF™ du CEA-List est une IA explicative qui propose une nouvelle brique de raisonnement basée sur la déduction et la satisfaction de contraintes (2019).



©CEA



©CEA

68

UNE INDUSTRIE FRANÇAISE DES SUPERCALCULATEURS

Défense, climatologie, santé... tous les secteurs de la recherche et de l'industrie recourent aujourd'hui à la simulation numérique et au calcul intensif. L'arrêt des essais nucléaires a joué un rôle déterminant dans la démocratisation de ces approches et a lancé une industrie française des supercalculateurs.

C'est dans les années 1960 que les premiers grands ordinateurs dédiés au calcul scientifique font leur apparition aux États-Unis, qui domineront le marché pendant des décennies. En Europe, seul le groupe Atos s'est imposé

dans ce secteur ultraconcurrentiel. Un renouveau industriel amorcé au début des années 2000 grâce au programme Simulation de la DAM (voir p. 56-57). Une stratégie de *codesign* est alors mise en place avec la société française Bull (intégrée depuis à Atos). L'objectif est de construire des supercalculateurs suffisamment puissants pour répondre aux besoins souverains et pérennes des programmes de renouvellement des armes nucléaires. Les innovations de Bull, éprouvées par itération sur les codes de simulation, conduiront à une optimisation de l'architecture et de la puissance des supercalculateurs de la série Tera.

En 2005, Tera 10 atteint 60 téraflops (60.10¹² opérations par seconde) puis, en 2018, Tera 1000 accède à 27 pétaflops (27.10¹⁵ flops). Le CEA a plus largement alimenté et structuré tout l'écosystème français du calcul intensif. Ainsi dès 2003, la DAM est à l'initiative de la création de la technopole Teratec, chargée de promouvoir le calcul haute performance (HPC) et de positionner la France parmi les leaders mondiaux. Le CEA ouvre la même année son Centre de calcul recherche et technologie, cofinancé et utilisé majoritairement par des industriels.

Importance stratégique du HPC

En 2007, conscient de l'importance stratégique du HPC, l'État crée Genci (Grand équipement national de calcul intensif), dont le CEA est partenaire. Cette structure va mettre en place une stratégie nationale de calcul intensif pour la recherche et donner aux chercheurs l'accès à trois supercalculateurs, situés au CEA, au CNRS et au Cines¹. Curie (2 pétaflops), de technologie Bull, sera ainsi installé en 2012 dans le Très grand centre de calcul du CEA (TGCC), construit deux ans plus tôt. Son successeur Joliot-Curie (2018) atteint désormais 22 pétaflops.

Optimisation et rupture technologique

Le défi actuel est celui des machines de classe exaflopique, approchant le milliard de milliards d'opérations par seconde. Les équipes de la DAM installeront en 2021 la première tranche d'Exa-1, coconçue avec Atos au prix d'un formidable effort de R&D portant notamment sur l'optimisation de l'énorme consommation électrique de ces machines. En parallèle, d'autres équipes du CEA et des industriels travaillent sur un concept en totale rupture avec les technologies actuelles : l'ordinateur quantique (voir p. 82-83). ●

1. Centre informatique national de l'enseignement supérieur.

Ci-dessus :

Supercalculateur Joliot-Curie, au TGCC (2018).



L'ORDINATEUR QUANTIQUE?

PRÉAMBULE

Bit et qubit

L'ordinateur quantique se distingue de nos ordinateurs, notamment en sa capacité de traiter des informations non pas de façon séquentielle (exemple lors de la comparaison d'un nombre à une suite de nombres que l'on doit prendre un par un) mais de façon simultanée (comparer un nombre avec tout un registre de nombres en une seule étape). Pour réaliser ce type d'opération, l'information doit pouvoir être stockée sous la forme d'un système quantique, dénommé qubit, qui remplace le bit classique dont la valeur est soit 0, soit 1. L'état d'un qubit est une superposition de deux états quantiques $|0\rangle$ et $|1\rangle$; un registre de qubits peut alors se trouver dans une superposition quantique de tous leurs états possibles ($|00\dots0\rangle$, $|10\dots0\rangle$, $|11\dots1\rangle$, $|10\dots1\rangle$).

Le calcul quantique vise à manipuler ces états complexes par des circuits quantiques, avec des algorithmes adaptés pour résoudre des problèmes difficiles qui resteront hors de portée des ordinateurs conventionnels. ●

La capacité du calcul quantique de devenir éventuellement une technologie de rupture dans les moyens de calcul fait que ce domaine est désormais perçu comme stratégique ; en témoignent les plans de financement conséquents que lui accordent les États-Unis, l'Europe et la France. Pour cause, les obstacles à sa réalisation sont tout autant conséquents. Les chercheurs du CEA y travaillent depuis les années 1990.

Les années 1980 voient apparaître l'idée, théorique, qu'un ordinateur exploitant les ressources de la physique quantique pourrait résoudre des problèmes hors de portée des ordinateurs classiques. Cet espoir se matérialise rapidement avec l'apparition des premiers algorithmes quantiques, autant qu'il se heurte à de grandes difficultés. « Maintenir un registre de calcul dans une superposition d'états quantiques demande de se battre avec la décohérence induite par les interactions avec l'environnement extérieur. Ce phénomène transforme une superposition cohérente d'états en un mélange incohérent, aléatoire, brouillant toute l'information à calculer », expose

Daniel Estève, physicien au CEA-Iramis. Acteur historique de la physique quantique, le CEA s'implique dans le domaine dès ses débuts. À Grenoble et Saclay, ses chercheurs s'intéressent au transport électronique dans les conducteurs quantiques (par exemple, nanotubes de carbone) et au comportement quantique des circuits électriques en général.

Le premier bit quantique supraconducteur fonctionnel

En 1997, le CEA-Iramis réalise un premier circuit électrique supraconducteur dit « boîte à paires de Cooper », assez découplé de son environnement. « Une équipe de NEC (Japon) montre alors en 1999 qu'on peut même réaliser une superposition cohérente des deux états quantiques de ce circuit, c'est-à-dire à faire un bit quantique (qubit) », explique le physicien. Ce que parvient à faire en 2002 le CEA, avec le premier véritable qubit supraconducteur fonctionnel, cent fois mieux protégé contre la décohérence.

Décohérence et correction d'erreurs

La version ensuite utilisée pour faire des processeurs, mise au point à Yale (États-Unis) de 2004 à 2006, est celle du « transmon » constitué d'une boîte à paire de Cooper intégré dans un résonateur micro-ondes. En 2012, l'équipe de Saclay réalise un processeur élémentaire à deux transmons (soit quatre états de base) et démontre un algorithme quantique élémentaire. Mais la montée en échelle vers des circuits quantiques de plus en plus complexes et performants s'avère difficile. « Pour vaincre la décohérence, il faut corriger les erreurs du système de façon quantique. Une solution existe, mais elle demande de consacrer un très grand nombre de qubits (> 1 000) à la correction d'un seul... du moins pour la technologie des qubits transmons utilisée », indique Daniel Estève. Google et IBM se lancent sur cette voie et réalisent dès 2018 des processeurs à quelques dizaines de qubits, mais sans correction d'erreur. « Ces processeurs mettent en œuvre des algorithmes quantiques un peu plus avancés, mais ils sont encore

« Pour vaincre la décohérence, il faut corriger les erreurs de façon quantique »

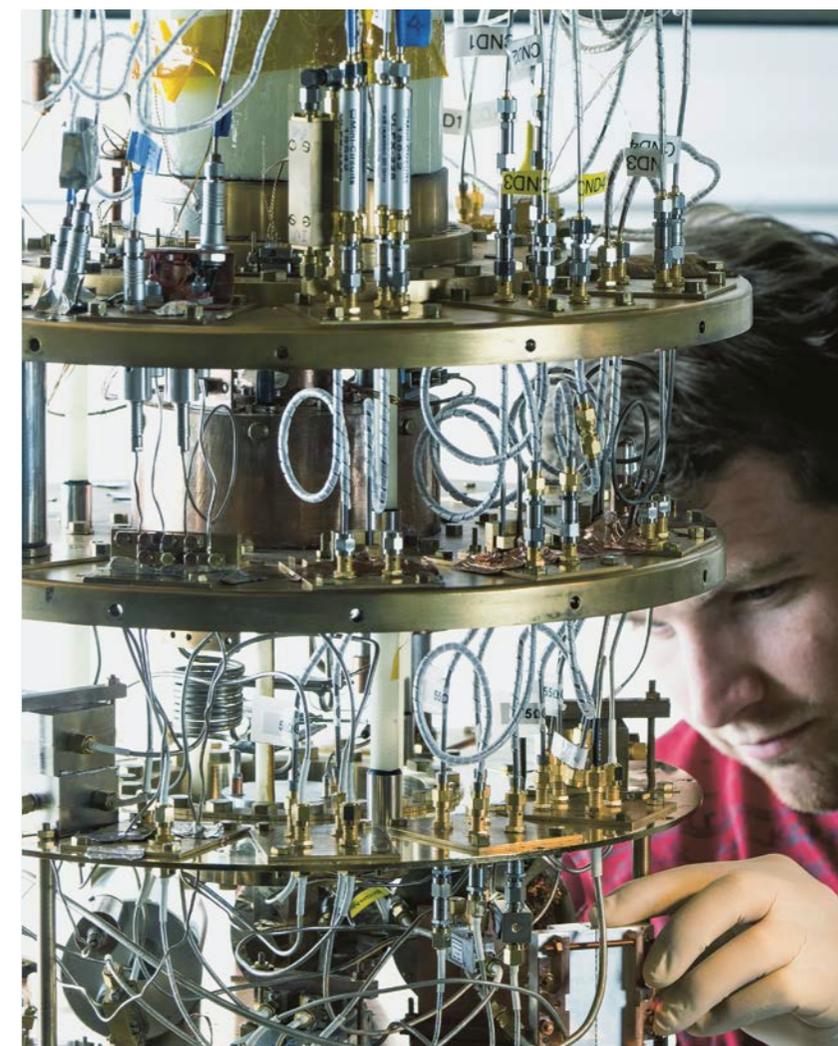
Daniel Estève,
physicien au CEA-Iramis

loin de démontrer leur avantage sur une machine classique pour résoudre un calcul complexe, comme celui de la structure d'une molécule », confirme Nicolas Sangouard, physicien théoricien au CEA-IPhT.

Des bits quantiques sur silicium

Le CEA investit alors d'autres directions. D'un côté, il cherche à obtenir des qubits intrinsèquement plus cohérents, en utilisant notamment les spins d'électrons et de noyaux d'impuretés atomiques dans des isolants couplés à des circuits quantiques supraconducteurs. « Mais ce gain en cohérence se paye par une difficulté bien plus grande à contrôler ces objets quantiques microscopiques », avoue Daniel Estève.

Une autre équipe mise sur le standard CMOS de la microélectronique. « En 2016, nous avons démontré qu'un qubit élémentaire peut-être codé dans le spin d'un seul électron localisé dans un transistor CMOS ultraminiaturisé », expliquent Maud Vinet du CEA-Leti et Silvano De Franceschi du CEA-Irig, qui reçoivent en 2019 une bourse ERC pour poursuivre leurs recherches. Le grand intérêt de cette piste est notamment de disposer de lignes de fabrication industrielles déjà existantes, avec une forte densité de qubits. Cette montée en échelle plus aisée pourrait permettre la correction d'erreur, malgré le manque de fidélité actuel des qubits CMOS (autre critère important qui garantit que le système se comporte tel que souhaité).



© F. Stroppa/CEA

L'information quantique est désormais perçue comme stratégique en matière de souveraineté et figure au plan de relance de la France « Sur la piste silicium, l'Hexagone dispose de tous les acteurs de la chaîne de valeur, industriels et académiques, ce qui en fait une voie potentielle de réussite », indique Maud Vinet. Dans ce contexte, le CEA continue d'explorer toutes les pistes. Et il étoffe ses équipes pour répondre aux questions difficiles que sont les algorithmes et les architectures quantiques, la montée en échelle, et la correction d'erreur quantique. ●

REPÈRES

2002

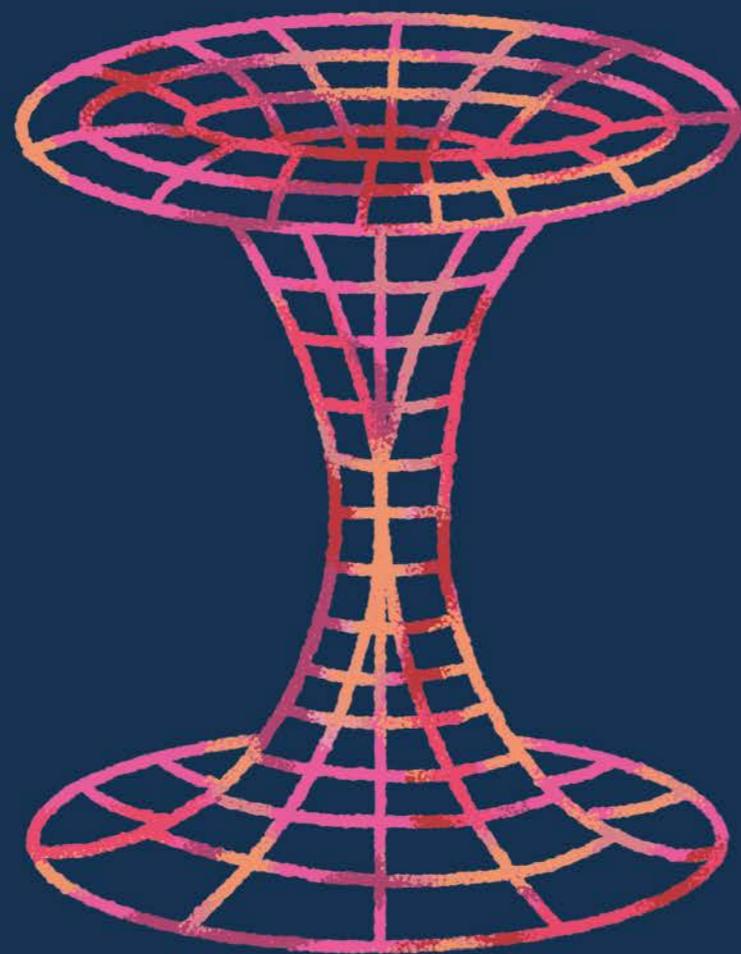
Premier qubit supraconducteur fonctionnel réalisé au CEA-Iramis

2016

Réalisation au CEA-Leti d'un premier qubit en technologie CMOS

Ci-dessus :

Expérience d'électrodynamique quantique (à -273°C) pour des circuits quantiques supraconducteurs (2015).



AVANCÉES N° 70 À 75

QUESTIONS & DÉCOUVERTES

Élucider les étoiles
et leur cortège d'exoplanètes
p. 86

Interview
« Découvrir et décrire
des supraconducteurs »
p. 89

La découverte du Higgs,
pièce manquante
du modèle standard
p. 90

Interview
« De la lumière pour voir vite
et loin dans la matière »
p. 93

L'origine du champ
magnétique terrestre
p. 94

Au cœur de la cellule
p. 95

70 

ÉLUCIDER LES ÉTOILES ET LEUR CORTÈGE D'EXOPLANÈTES

Passer de l'atome aux étoiles. Cette destinée tendait les bras au CEA, sans que ne le soupçonne le général de Gaulle en janvier 1946, lorsqu'il nommait Frédéric Joliot haut-commissaire de l'organisme fondé quelques mois plus tôt. Pourtant, le chimiste et son épouse Irène Curie ont été décorés d'un prix Nobel en 1935 pour la découverte de la radioactivité artificielle. Et c'est bien l'étude de ce rayonnement qui amènera le CEA aux portes du Cosmos.

1959. À la recherche de poussières radioactives dans l'atmosphère suite aux essais nucléaires américains et soviétiques, le CEA installe un compteur Geiger à bord d'un missile. Tiré le 27 janvier et atteignant 100 km d'altitude, l'engin va connaître un point de bascule

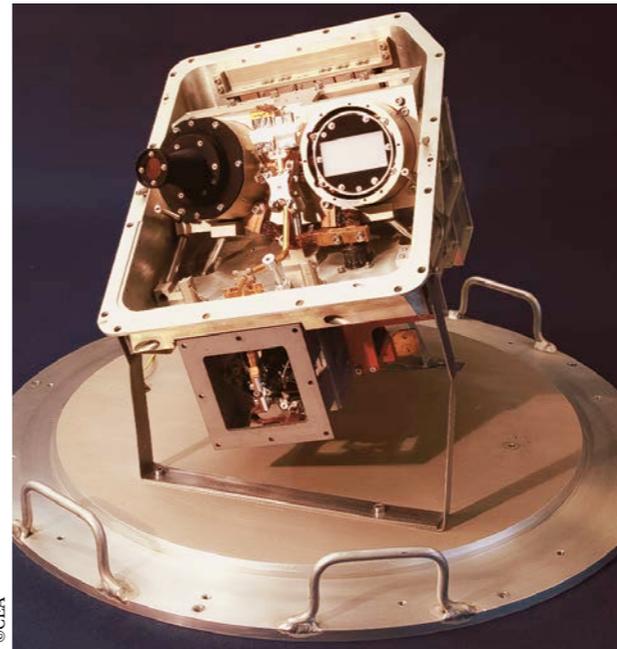
scientifique. Des rayons gamma, forme la plus énergétique de la lumière, sont détectés non pas en-dessous de lui mais au-dessus. Autrement dit, l'Univers en est une source naturelle. Une nouvelle fenêtre électromagnétique vient de s'ouvrir, marquant le coup d'envoi de la recherche astrophysique au CEA. « On dit souvent que ça a commencé en 1965, mais dans les rapports, on trouve des projets d'astrophysique dès le début des années 1960 », commente Pierre-Olivier Lagage, directeur de recherche au CEA-Irfu. Au même moment, en 1961, le CNES est créé, augurant une longue collaboration grâce à laquelle seront élucidés nombre de mystères qui entourent les étoiles, sous toutes leurs formes.

Démarrage à haute énergie

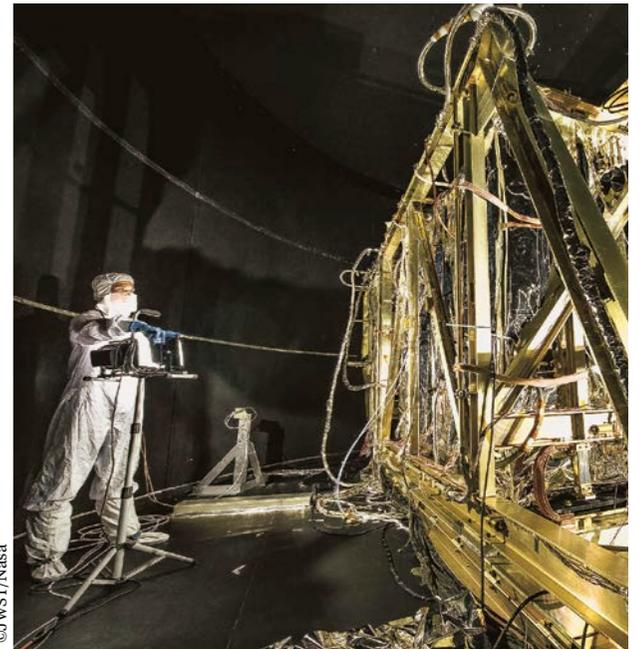
À commencer par les pulsars. Contractions de *pulsating stars*, ces étoiles à neutrons sont en rotation très rapide sur elles-mêmes. L'on découvre en 1968 qu'elles sont sources de rayons X de haute énergie, grâce à des détecteurs fabriqués au CEA et lancés à bord

d'une fusée *Véronique* française. L'année suivante, ces mêmes pulsars s'avèrent émettre des rayons gamma, décelés par un ballon atmosphérique lâché depuis les hauteurs de Gap. Deux découvertes qui n'auraient pu avoir lieu depuis le sol, l'atmosphère bloquant le passage de ces formes énergétiques de lumière. Dès l'arrivée des premiers satellites européens, le CEA ne manque pas de s'inviter à bord. Il contribue au blindage du satellite Cos-B qui, après sept ans de relevés, dressera en 1982 la première carte de notre Voie lactée en rayons gamma. Renforcé par toutes ces collaborations, le CEA prend part aux télescopes Sigma (1989) puis XMM-Newton (1999). Quant à la caméra gamma Isgri de la mission Integral (2002) toujours active, elle incorpore, pour la première fois au monde, des détecteurs en tellurure de cadmium (CdTe). « Pas besoin de refroidir ces détecteurs qui peuvent fonctionner des années. D'ailleurs ici, les chercheurs en infrarouge, contraints à des missions plus courtes, jalourent un peu leurs collègues des hautes énergies ! », plaisante Marc Sauvage, astrophysicien au CEA-Irfu.

©CEA



©JWST/Nasa



Aujourd'hui, les ingénieurs et chercheurs en astrophysique du CEA balayent tout le spectre énergétique.

Des gamma à l'infrarouge

Cette ouverture de la bande de fréquence a été initiée par Catherine Cesarsky, fin des années 1980. D'abord à l'infrarouge, en prenant part à la mission ISO pour laquelle est conçue la première caméra infrarouge spatiale, Isocam. Postée sur une orbite très elliptique, elle scrute le milieu interstellaire de notre galaxie, où gaz et poussières s'effondrent pour créer les étoiles. « Avec pour objectif de mesurer la part de matière accrétée pendant le processus, mais également expulsée au niveau des pôles de ces jeunes étoiles », précise Marc Sauvage, alors responsable de la calibration de l'instrument. Ainsi grandit l'expertise du milieu interstellaire dans les rangs du CEA, jusqu'au décollage du télescope spatial Herschel en 2009. Géant de 3,5 mètres de diamètre, il focalise les lueurs infrarouges de l'Univers vers l'instrument Pacs et ses 8 matrices de 256 bolomètres chacune, réalisées au CEA-Leti (voir p. 73).

La mission débouche sur deux grandes découvertes. D'une part, les nuages interstellaires comportent des filaments, régions les plus denses, qui servent de pouponnières aux étoiles. D'autre part, l'observation de galaxies lointaines (et donc anciennes) indique que le taux de formation d'étoiles décroît naturellement au cours du temps; et non par raréfaction des collisions entre galaxies, phénomènes connus pour déclencher des flambées de jeunes étoiles.

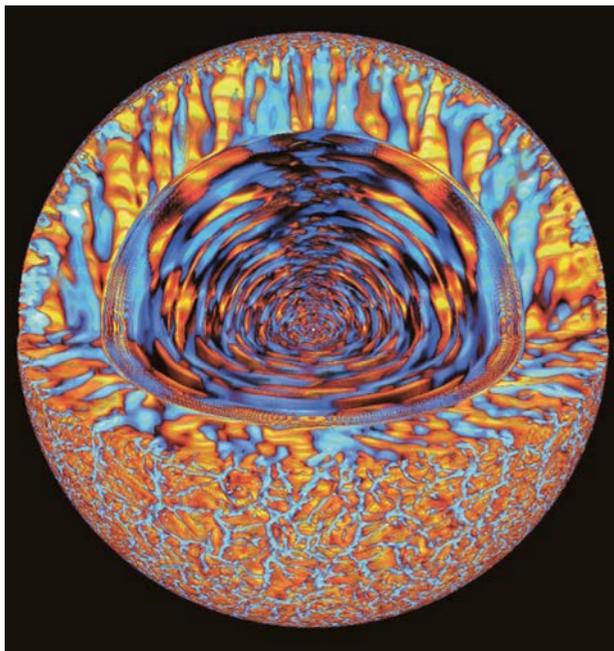
Astrophysique au sol

Non content de travailler depuis l'espace, le CEA développe également des instruments au sol. Installé à La Palma aux Canaries, Camiras décèle avant tout le monde en 1994 l'impact du premier fragment de la comète Shoemaker-Levy sur Jupiter (pourtant côté nuit). La même année, le CEA livre Timmi à l'observatoire européen austral (Eso) juché dans la cordillère des Andes. Elle sera la première caméra infrarouge à devenir *common user*, c'est-à-dire mise à disposition d'autres utilisateurs. C'est avec elle qu'est observé le disque

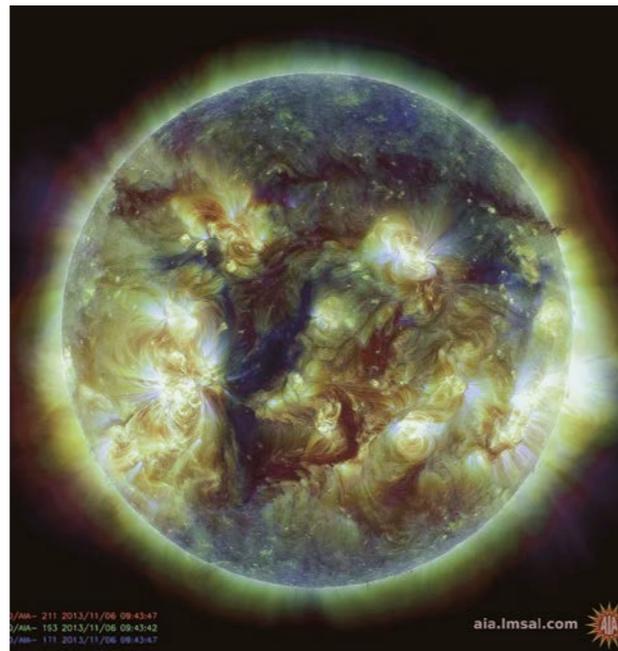
« Quand je me suis consacré à l'infrarouge, mon rêve était de détecter des exoplanètes »

Pierre-Olivier Lagage, directeur de recherche au CEA-Irfu

de poussière qui entoure l'étoile Beta Pictoris. On y découvre, dès 1994, des indices de la présence d'une jeune planète autour d'une autre étoile : une exoplanète, qui sera confirmée par la suite. « Quand je me suis consacré à l'infrarouge, mon rêve était de détecter des exoplanètes. Car c'est dans ce domaine que le contraste est le meilleur », témoigne Pierre-Olivier Lagage, devenu plus tard responsable de Visir, instrument en fonctionnement au *Very Large Telescope* depuis 2004. Sous sa direction, le département d'astrophysique du CEA-Irfu s'engage plus avant dans



©Strugarek et al.



©SDO/AIA

le domaine des exoplanètes. On envisage alors de caractériser leurs atmosphères. Un choix scientifique en passe de se concrétiser, lorsque le télescope JWST s'envolera fin 2021. Son instrument Miri, qui embarque des développements de l'Irfu, se penchera entre autres sur l'atmosphère autour de l'exoplanète Trappist-1b. De même, l'instrument principal de la mission Ariel, dont le CEA a la maîtrise d'œuvre, étudiera de façon statistique la composition d'un millier d'atmosphères, à l'horizon 2029.

Physique stellaire et solaire

Il est un astre bien moins éloigné, que le CEA ausculte depuis près de 40 ans : le Soleil. « *Quand je débute mon doctorat en 1995, nous préparons l'exploitation scientifique de l'instrument Golf de la mission SoHO dont je vois le lancement en direct la même année depuis le siège de l'ESA* », témoigne Sacha Brun, chef de laboratoire au CEA-Irfu. Cette mission solaire multi-instruments poursuit plusieurs objectifs scientifiques, comme l'observation des vibrations acoustiques de notre étoile et les ondes de gravité qui

la traversent. « *C'est d'ailleurs Golf qui met en évidence la signature de ces ondes de gravité, pressenties mais jamais détectées jusqu'alors* », indique l'astrophysicien. Au-delà de l'observation, la recherche solaire se vit aussi en simulation. À une dimension d'abord, afin de décrire les réactions internes du Soleil ; ces modèles permettent notamment de prédire le taux de neutrinos émis en son cœur, contribuant à des questions de physique fondamentale. Mais également en 3D, à partir des années 2000, grâce à la puissance de calcul disponible au CEA (voir p. 81) qui permet aux chercheurs une prouesse saluée par la communauté mondiale. À savoir, parvenir à recréer l'effet dynamo par lequel le Soleil génère son champ magnétique et son cycle d'activité de onze ans, ainsi que la façon dont est soufflé le vent solaire. « *Aujourd'hui, nos modèles font le lien entre l'intérieur du Soleil et son environnement* », développe Sacha Brun. « *Comprendre comment le Soleil contrôle son héliosphère, dans laquelle baignent les planètes du système solaire, c'est aussi tout l'enjeu de Solar Orbiter (Solo), lancée en février 2020* ». À

son bord, les détecteurs de l'instrument Stix réalisés à l'Irfu observent déjà leurs premières éruptions solaires. Et grâce à la bourse ERC accordée à l'astrophysicien et des collègues européens pour leur projet Whole Sun, le CEA se donne les moyens de comprendre notre étoile. Et, par extension, toutes les autres et leur cortège d'exoplanètes. Un effort auquel contribuera la mission Plato, parmi tant d'autres aventures à venir... ●

Ci-dessus :

À gauche : Simulation 3D de la dynamo solaire, avec ses flots convectifs (bleus/froids/descendants-rouges/chauds/montants) et le champ magnétique généré par effet dynamo-fluide par les tubes/lignes gris et bleus (2017).

À droite : Vue à 3 longueurs d'onde dans l'UV de la couronne solaire, avec ses régions actives et leurs boucles magnétiques (zones brillantes), ses trous coronaux (zones sombres) et les filaments de matière (2013).

Page précédente :

À gauche : caméra infrarouge Pacs conçue au CEA et embarquée en 2009 par le satellite Herschel (2005).

À droite : série de tests à froid à la Nasa des instruments du JWST, dont le spectro-imageur Mirim du CEA, placés dans une cage dorée simulant l'environnement thermique spatial (2014). À



71 INTERVIEW

« **Découvrir et décrire des supraconducteurs** »

La supraconductivité est un phénomène quantique induisant une conduction parfaite du courant électrique. Ses implications sont multiples : IRM, accélérateur de particules, ordinateur quantique, etc. En 2001, des chercheurs du CEA la découvraient dans des matériaux improbables. Depuis, de régulières découvertes approchent la communauté de la supraconductivité à température ambiante. Un graal sur lequel travaille Catherine Pépin, physicienne-théoricienne du CEA-IPHT.

Qu'est-ce que la supraconductivité ?

La supraconductivité est un phénomène quantique macroscopique, c'est-à-dire émergeant à notre échelle, qui induit une conduction parfaite du courant électrique. Elle a été mise en évidence en 1911 en plongeant, dans de l'hélium, du mercure qui se mit à « supraconduire » à 4,2 K (- 268,95 °C). Il s'est avéré par la suite que de nombreux métaux sont supraconducteurs à ces températures.

Pourquoi la découverte du CEA en 2001 de ferromagnétiques supraconducteurs est importante ?

La supraconductivité interagit avec la lumière, onde électromagnétique, en repoussant les lignes de champ magnétique. Ce qui revient à dire qu'elle « n'aime » pas le magnétisme. Cela paraissait aberrant de la chercher dans des ferromagnétiques. Mais nos collègues du CEA-Irfu ont découvert en 2001 que les composés de l'uranium UCoGe et URhGe peuvent devenir supraconducteurs. Mieux, la supraconductivité peut être induite par l'application d'un champ magnétique, ce qui est contre-intuitif ! Comprendre l'appariement dans ces matériaux ne fut pas simple. J'explique : la supraconductivité fonctionne avec des appariements d'électrons 2 par 2 appelés paires de Cooper, dont les spins sont orientés de manière antiparallèle. Dans ces supraconducteurs ferromagnétiques, les spins des paires de Cooper deviennent parallèles, ce qui les rend compatibles avec l'état ferromagnétique (dans lequel les spins de chaque atome sont parallèles aux autres). On appelle cela la supraconductivité triplet. C'est ce que nous avons compris du point de vue théorique et c'est fascinant.

En quoi est-ce fascinant ?

La supraconductivité est partout ! Elle peut surgir sous plusieurs conditions : en refroidissant des métaux, dans des ferromagnétiques refroidis, et même à température ambiante par exemple en mettant sous pression des sulfures d'hydrogène. Cette supraconductivité dite à haute température critique (SHTC)

a été découverte en 1986 avec un alliage cuivre-oxygène. Là encore, c'est fascinant car ce matériau est proche d'un anti-ferromagnétique et aussi d'un isolant. Or, l'état supraconducteur est l'exact opposé de l'état d'isolant ! Ce phénomène quantique tellement complexe montre que la nature peut s'adapter. La supraconductivité est plus robuste qu'on ne l'imagine.

L'étude de la supraconductivité consiste à élaborer et tester des matériaux, est-ce votre champ d'étude ?

Je travaille, dans le cadre d'une bourse ERC, sur des modèles théoriques permettant de décrire les supraconducteurs SHTC. Mais je partage de nouvelles idées avec mes collègues qui eux travaillent sur les matériaux. Aux instituts Iramis, Irfu et à la DES, ils disposent de différents moyens pour les élaborer et les caractériser (rayons X, neutrons, irradiation aux électrons ou encore avec des atomes). C'est la grande force du CEA que d'allier expérimentation et théorie. Cela forme des expertises remarquables et des discussions stimulant la créativité. Si on peut aujourd'hui faire des IRM à l'hôpital, c'est grâce à la RMN et aux longs travaux des chercheurs pour étudier le magnétisme des matériaux. De même, les recherches sur l'ordinateur quantique nécessitent de découvrir un maximum de matériaux quantiques pour espérer faire un qubit supraconducteur cohérent suffisamment longtemps (voir p. 82).

Vous dites avoir besoin de nouvelles mathématiques...

La classification des supraconducteurs repose sur une branche des mathématiques appelée « topologie quantique ». Ses modèles fonctionnent très bien pour classer les matériaux quantiques et décrire l'agencement de leurs électrons. Mais dès que l'on considère les interactions entre ces électrons, ils ne fonctionnent plus. On aura besoin de mathématiques beaucoup plus puissantes pour décrire les matériaux quantiques. ●

72



LA DÉCOUVERTE DU HIGGS

PIÈCE MANQUANTE
DU MODÈLE STANDARD

Au terme d'un demi-siècle d'efforts technologiques sans précédent, la communauté scientifique internationale démontre en 2012 la réalité d'une des plus audacieuses idées de la physique. La thèse dite du « boson de Higgs » qui, tout en étant difficilement appréhendable pour le commun des mortels, permet de résoudre le mystère de nos origines les plus lointaines. Depuis le début, au Cern (Centre européen de recherche nucléaire) et dans ses propres laboratoires, le CEA est partie prenante de l'aventure.

Genève, 4 juillet 2012, le Cern annonce la découverte du « boson de Higgs ». Des sentiments qui l'habitaient ce jour-là, Gautier Hamel de Monchenault retient le soulagement, la bouffée d'oxygène après les mois passés avec ses collègues de l'expérience CMS à travailler jour et nuit. Mais surtout, ajoute le directeur de recherche au CEA-Irfu, « une réelle satisfaction ». Celle d'avoir participé à révéler cette particule imaginée en 1964 par François Englert et Robert Brout puis Peter Higgs. Celle d'avoir contribué à une formidable avancée comme en connaît la science, fruit d'une longue aventure

expérimentale qui se poursuit. À la fin des années 1980, les physiciens imaginent le projet du gigantesque accélérateur de particules LHC. On parle alors de remplacer l'ancien collisionneur électron-positron LEP du Cern par une installation ultracomplexe à même de produire des bosons de Higgs. Mais, de la formulation de l'idée à son application, il y avait un pas gigantesque que certains jugeaient à l'époque infranchissable.

La théorie du boson de Higgs

L'objectif des physiciens est de vérifier une hypothèse, extrêmement hardie, concernant la masse des particules élémentaires constitutives de la matière. Selon le « Modèle standard » (*voir focus*), si ces dernières possèdent une masse, c'est parce que depuis un moment reculé de l'histoire de l'Univers, elles interagissent avec un « champ de Higgs ». Celui-ci se serait développé spontanément dans le vide suite à un événement, qualifié par les spécialistes de « brisure de symétrie », survenu 10^{-12} seconde après le big bang lorsque l'Univers présentait une température de l'ordre 10^{17} degrés. Cela concerne des particules comme les électrons et les quarks, mais pas les photons, ces grains de lumière qui, ayant en quelque sorte raté le coche à

l'époque, seraient demeurés sans masse. La théorie prévoit que lorsque l'on excite le vide, comme au LHC, ce champ de Higgs peut se matérialiser sous la forme d'une particule, le boson de Higgs, qui se désintègre aussitôt en d'autres particules avec des probabilités bien définies par la théorie. « Observer le boson de Higgs revient à dévoiler la présence du champ de Higgs dans le vide », résume le physicien.

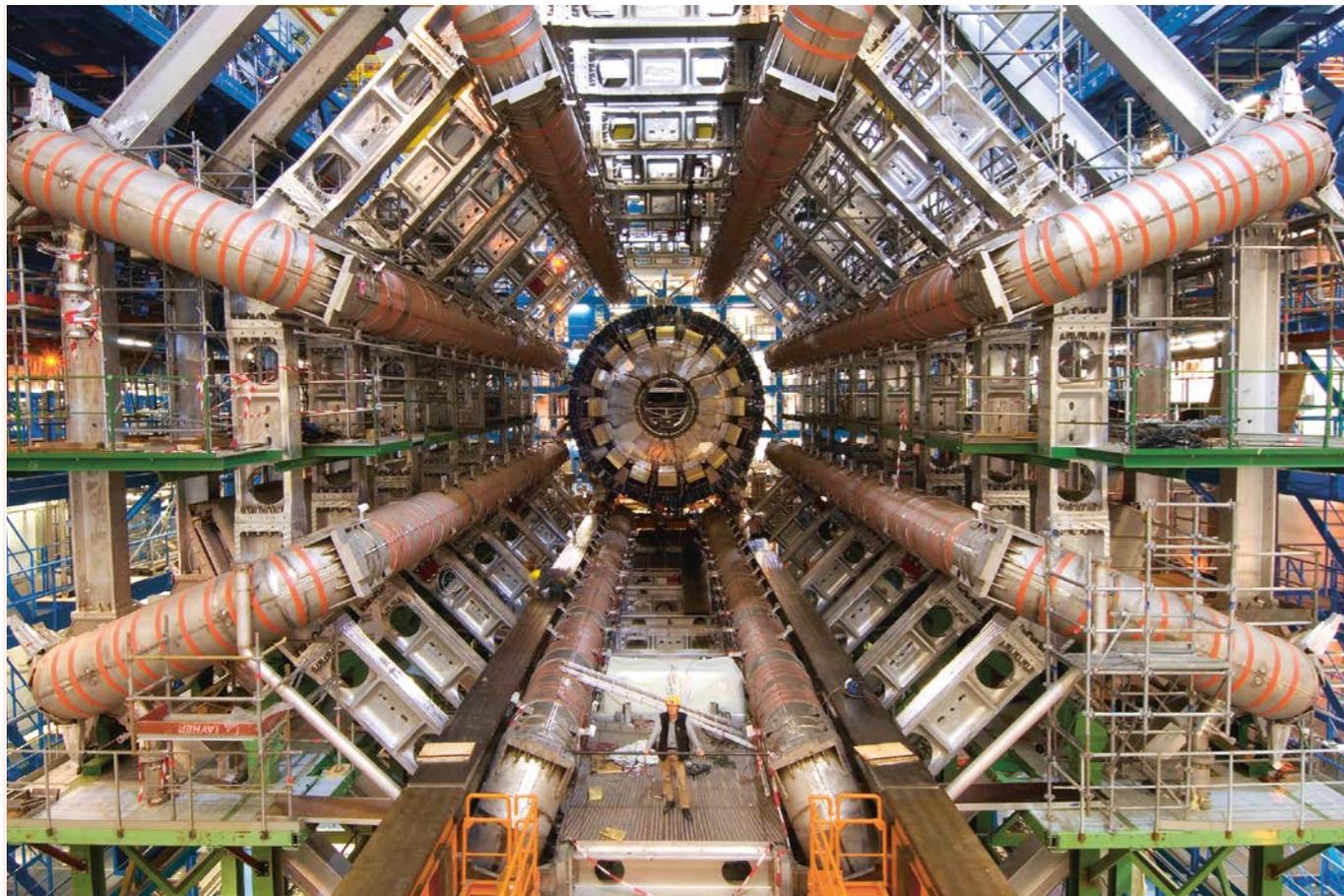
Des aimants supraconducteurs pour guider des milliards de particules

Brandir la preuve de l'existence du fameux boson revient donc à le débusquer dans les « bons » jeux de particules de sa désintégration. Mais avant de parvenir à reconstruire artificiellement ces conditions infernales, bien des obstacles doivent être surmontés. Le grand collisionneur de hadrons LHC doit pouvoir réaliser des collisions entre des paquets de protons lancés à une vitesse proche de celle de la lumière.

Comment atteindre de telles énergies? Les physiciens optent pour un accélérateur de particules circulaire abritant 1 232 aimants dipôles et 386 aimants quadripôles répartis sur les 27 km de circonférence du LHC. Spécialisé depuis les années 1960 dans la technologie des aimants supraconducteurs, dont il a déjà équipé plusieurs installations de recherche, le CEA-Irfu est chargé par le Cern à la fin des années 1980 de concevoir les prototypes des quadripôles en niobium de titane et d'en superviser la production industrielle.

Traquer les moindres traces laissées par les particules

Autre difficulté et non des moindres : repérer la signature du boson de Higgs parmi les milliards de particules générées lors des collisions des paquets de protons. Deux détecteurs, d'une complexité inouïe et inédite dans l'histoire des sciences, sont à concevoir. Atlas, dessiné dans les années 1980, a la taille d'une cathédrale; et CMS fait appel à des technologies qui, quoique plus modernes, sont forcément moins éprouvées et connues. Avant de les voir fonctionner,





©Cern

bien des développements sont nécessaires. Là encore, le CEA se voit confier plusieurs responsabilités. « Il est à l'origine de l'énorme aimant toroïde de 25 m de long et de 20 m de diamètre d'Atlas dont les huit bobines sont conçues sur le modèle d'un de ses prototypes. Et il est chargé de l'étude et du processus de montage du grand solénoïde de 4 teslas de CMS », indique Pierre Védrine, ingénieur au CEA-Irfu.

80 000 circuits intégrés et 135 cartes électroniques

On retrouve aussi le CEA investi dans la conception et la mise au point des calorimètres des expériences, instruments chargés de mesurer l'énergie des particules issues des collisions entre les protons. De technologies différentes, ils fonctionnent dans CMS grâce à une série de 75 848 cristaux scintillants hautement résistants aux radiations ; et, dans Atlas, ce sont des empilements de plomb et d'argon liquide qui permettent de capturer les signatures laissées par les particules. « Le CEA développe le système d'étalonnage laser nécessaire à l'obtention des performances de celui de CMS, et fabrique un tiers des 32 modules de celui d'Atlas dont il fournira aussi une partie de l'électronique : pas moins de 80 000 circuits intégrés et 135 cartes électroniques ! », raconte Éric Delagnes, chef de département au CEA-Irfu. Ses chercheurs jouent également un rôle-clé dans le développement du spectro-

mètre à muons d'Atlas, composé de 650 chambres de détection dont l'alignement est contrôlé par l'un de leurs systèmes. L'institut Irfu est également partie prenante dans le traitement des montagnes de données des expériences ; traitement pour lequel le Cern invente et met en place une grille mondiale de calcul dont l'un des nœuds est hébergé au CEA.

Accumuler les données

Tous ces efforts sont récompensés en 2010, avec le démarrage du LHC. Très rapidement, les chercheurs des collaborations Atlas et CMS accumulent leurs données, indépendamment et sans les partager pour éviter les biais. Jusqu'à découvrir simultanément le boson de Higgs. Tout juste 48 ans après que l'existence de cette particule ait été prédite par les théoriciens. Mais bien à temps pour rendre hommage à la sagacité des ingénieurs et physiciens. ●

p. 90 :

En haut : détecteur Atlas du LHC avec les 8 bobines de son aimant conçues par le CEA-Irfu, entourant le calorimètre (2007).

En bas : célébration de la découverte du Higgs par tous les chercheurs de l'expérience CMS (détecteur en photo en arrière-plan), dont ceux du CEA-Irfu (2012).

Ci-dessus :

Inspection de l'un des 386 aimants quadripôles du LHC réalisé par le CEA-Irfu (2007).

FOCUS

Au-delà de la découverte

L'intérêt des physiciens pour le boson de Higgs ne se limite pas à sa découverte. Son étude est en effet indispensable à la validation définitive du Modèle standard de la physique des particules ainsi qu'à son éventuel prolongement. Ce dernier décrit trois des quatre interactions fondamentales de la Nature : la force électromagnétique, la force nucléaire faible et la force nucléaire forte. Mais, il s'avère impuissant à rendre compte de certaines observations cosmologiques. « Il ne résout pas le mystère de la matière noire et de l'énergie noire, n'explique pas le déficit d'antimatière dans l'Univers, ni la masse de certaines particules élémentaires appelées neutrinos, il néglige la gravité et n'unifie pas, aux hautes énergies, les trois autres forces en une seule », résume Gautier Hamel de Monchenault. D'où l'espoir en 2012 que l'analyse des propriétés du « Higgs » laisseraient apparaître des contradictions avec la théorie, ouvrant ainsi un nouveau champ de la physique pour solutionner ces énigmes.

Huit ans plus tard, force est de constater l'absence de contradictions. Que faire ? « Il est essentiel de continuer à s'intéresser au boson de Higgs, en poussant plus avant l'étude de ses caractéristiques ». Un travail de fourmi qui se poursuivra entre 2021 et 2024, avant de s'interrompre pour reprendre en 2027 sur un LHC entièrement renouvelé : le LHC Haute Luminosité qui sera capable de produire vingt fois plus de bosons de Higgs qu'actuellement. À nouveau, les chercheurs du CEA innoveront sur les l'instrumentation. ●



73

INTERVIEW



« De la lumière pour voir vite et loin dans la matière »

Inventé en 1960, le laser fait partie de notre quotidien : lecture de DVD, métrologie, chirurgie de l'œil, micro-usinage industriel, télécommunications, etc. Il est aussi incontournable pour l'étude fondamentale de la matière. Le point avec Fabien Quéré, physicien au CEA-Iramis, qui contribue à repousser les limites des impulsions lasers d'ultra-haute intensité ou de durée ultrabrève.

Que sont les impulsions lasers pétawatt ou de durée attoseconde ?

Un laser peut émettre de la lumière de façon continue, ou par impulsions où toute l'énergie du milieu émetteur se retrouve concentrée en un temps très court. Depuis 1980, de grandes avancées ont été réalisées pour façonner ces impulsions dans le temps et l'espace.

Avec les impulsions laser ultracourtes, il est possible de « saisir l'instant » à des échelles extrêmes pour, par exemple, observer la dynamique électronique au cours d'une réaction chimique ou le mouvement des électrons dans la matière. Aujourd'hui, il est possible de réduire la durée des impulsions jusque dans le domaine attoseconde (10^{-18} s). La plateforme expérimentale Attolab, récemment ouverte à Saclay, s'y consacre. En amplifiant fortement des impulsions lasers puis en concentrant toute l'énergie sur une durée femtoseconde (10^{-15} s), on atteint aujourd'hui des puissances instantanées de l'ordre du pétawatt (10^{15} W). Ces impulsions de ultrahaute intensité (UHI), comme sur le laser Apollon à Saclay, seront utilisées pour explorer la physique des champs extrêmes ou l'accélération efficace de particules chargées.

Comment se sont développées ces recherches au CEA ?

Les études sur l'ionisation multiphotonique des atomes est à l'origine de cette aventure. Dans les années 1980, Anne L'Huillier du CEA-Iramis s'est aperçue que l'interaction d'impulsions lasers intenses avec des atomes génère des harmoniques d'ordre « n » très élevé ($n \sim 130$!). Dès lors, la discipline s'est développée selon deux voies : réduire les durées d'impulsion dans le domaine sub-femtoseconde ; augmenter leur intensité. Du côté UHI, il a ainsi été possible dès 1994 d'obtenir des puissances instantanées de 80 térawatt ($8 \cdot 10^{13}$ W). Du côté impulsions courtes, Pierre Agostini est parvenu en 2001 à franchir l'échelle de la femtoseconde pour atteindre celle de l'attoseconde.

Au cours des vingt dernières années, on a montré que l'impact de ces impulsions laser à la surface d'une cible solide forme un plasma dense. Ce plasma se comporte

comme un miroir parfait pour la lumière et permet de façonner temporellement l'impulsion réfléchie. On constate également qu'une impulsion ultra-intense est capable d'accélérer violemment les particules chargées, projetant les électrons à pratiquement la vitesse de la lumière.

Vous avez obtenu deux bourses ERC, en 2010 puis 2016, pour faire avancer ce domaine. Qu'en est-il ?

Le premier objectif a été d'obtenir des impulsions attosecondes très intenses, en utilisant les interactions laser-plasma. La seconde bourse a permis d'étudier comment ajuster le profil spatio-temporel des impulsions lumineuses, et ainsi optimiser le transfert d'énergie de la lumière aux particules chargées (ions ou électrons), en vue de réaliser de nouveaux types d'accélérateurs de particules.

Quels sont les défis actuels ?

Nous sommes encore loin d'avoir tout compris sur l'interaction d'impulsions lumineuses ultracourtes ou ultra-intenses avec la matière. Pouvons-nous par exemple atteindre la « limite de Schwinger », densité d'énergie où il est possible de faire émerger de la matière du vide, avec ce simple concentré de lumière ?

Du côté applicatif, les objectifs de ces recherches sont d'obtenir de nouvelles sources de rayons X ou gamma pour la radiographie de produits industriels, d'inventer de nouveaux types d'accélérateurs de particules pour la recherche et l'industrie, permettant par exemple dans le domaine médical de concevoir des équipements légers de thérapies anticancéreuses. ●

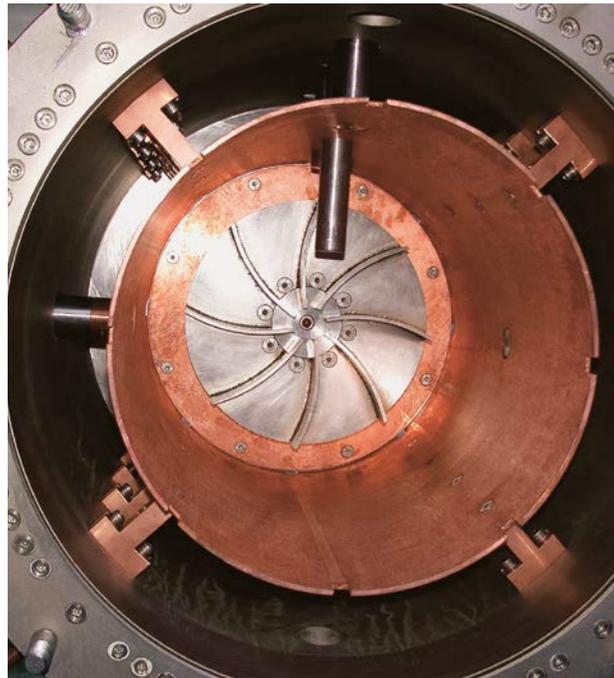
MOTS-CLÉS

Attoseconde

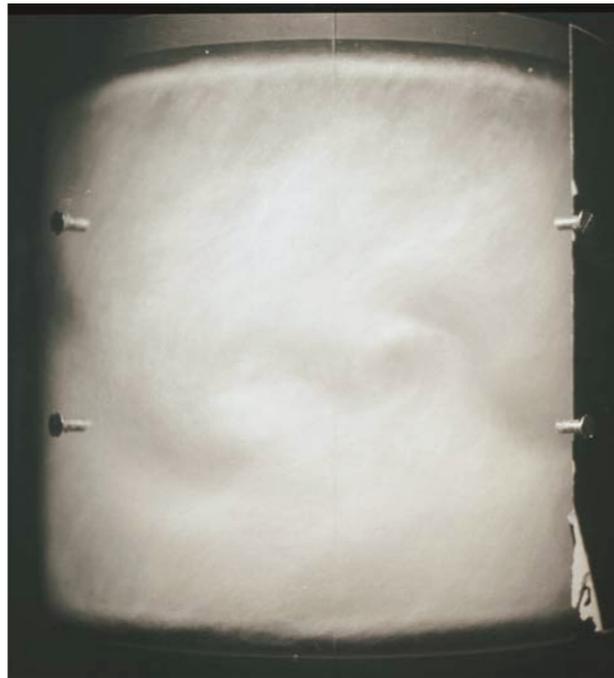
1 as = 10^{-18} s

Pétawatt

1 PW = 10^{15} W



©Gonin/CEA



©Gonin/CEA

74

L'ORIGINE

DU CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE

Quelle est l'origine du champ magnétique terrestre ? Et comment expliquer l'inversion des pôles magnétiques ? Ces questions ont animé la communauté scientifique pendant des décennies. Jusqu'à ce qu'une collaboration y réponde en 2006.

Vieille de plus d'un siècle, la théorie de Larmor n'avait jamais été démontrée. Selon elle, les turbulences produites par des métaux liquides conducteurs peuvent être à l'origine d'un effet dynamo, c'est-à-dire capables de convertir une partie de

leur énergie cinétique en énergie magnétique. « *Pouvait-on alors affirmer que ce sont les turbulences induites au sein du fer liquide du noyau de la Terre qui génèrent son champ magnétique ? C'est ce que nous avons voulu expérimenter, avec le CNRS et les Écoles normales supérieures de Lyon et de Paris* », expose Bérengère Dubrulle, physicienne au CEA-Iramis.

L'inversion des pôles magnétiques

En 1995, commencent les expériences VKS (Von Karman sodium), du nom du dispositif d'écoulement : « *c'est une sorte de boîte de conserve cylindrique contenant le liquide métallique que l'on agite pour générer des turbulences et tenter de voir spontanément émerger des tourbillons un champ magnétique* », image la chercheuse. Le liquide retenu ? Du sodium, car le CEA disposait à Cadarache d'installations dédiées à l'étude de ce fluide pour ses recherches sur les réacteurs à neutrons rapides. Neuf ans plus tard, le verdict tombait : oui, les turbulences au cœur du noyau terrestre produisent son champ magnétique et ses inversions régulières. « *Les pôles du champ magnétique terrestre*

se sont en effet inversés près de 300 fois au cours des derniers 200 millions d'années », note-t-elle.

Une nouvelle question à investiguer

Aujourd'hui, l'équipe poursuit ses investigations à Saclay sur une nouvelle plateforme, Vortex, ouverte à tous les spécialistes de mécanique des fluides du CEA. Là, un nouveau défi les attend. La dynamique des tourbillons est décrite par les équations de Navier-Stokes (XIX^e siècle) ; mais les mathématiciens pensent que leurs solutions peuvent présenter des singularités, à même d'influer sur la dissipation de l'énergie au sein du fluide. Des expériences débuteront en 2021 dans le dispositif GVK (Giant Von Karman) afin de rechercher des indices de ces singularités. Et peut-être clore un autre grand débat ? ●

Ci-dessus :

Étude des turbulences (à droite) dans un écoulement Von Karman (à gauche) (2002).

75

AU CŒUR DE LA CELLULE

IN VITRO, IN VIVO, IN CELLULO

Comprendre le vivant est une quête sans fin, tant les mécanismes qui le gouvernent sont d'une immense complexité et d'une précision d'horloger. Les progrès fulgurants des techniques observationnelles et de la biologie expérimentale permettent toutefois en ce début de XXI^e siècle de découvrir des phénomènes moléculaires et cellulaires inédits. Petit tour d'horizon de la contribution du CEA, impliqué dans de multiples plateformes nationales ultrasophistiquées.

Constituant fondamental de toutes les structures biologiques, la cellule est l'unité de base de tous les êtres vivants. Le corps humain en compte près de 40 000

milliards. Aujourd'hui, alors que la plupart de ses propriétés et fonctions sont bien connues, la science bute encore devant la complexité des mécanismes moléculaires qui la régissent. Pénétrer au cœur de la cellule impose en effet d'observer à des échelles de l'ordre du micromètre voire du nanomètre. Un défi pour les chercheurs.

Dévoiler la structure atomique des protéines

Les prémices de cette révolution commencent en 1958, lorsque la technique de diffraction des rayons X permet pour la première fois d'étudier la structure atomique de protéines, au préalable purifiées et cristallisées. « *En 1992, le CEA et le CNRS créent à Grenoble l'Institut de biologie structurale (IBS), convaincus de l'impact qu'aurait cette discipline* », raconte son directeur Winfried Weissenhorn.

En complément, l'IBS se met à explorer le potentiel de la RMN pour étudier le comportement dynamique des protéines, c'est-à-dire leur changement de conformation spatiale dans le temps,

élément capital pour comprendre leur fonctionnement. À partir des années 2000, le groupe de Martin Blackledge innove en combinant les méthodes de RMN et de simulation de dynamique moléculaire, des travaux significatifs qui se poursuivent grâce à une bourse ERC. L'équipe est par exemple parvenue à caractériser, chez certains virus, la dynamique de régions protéiques « intrinsèquement désordonnées » et à comprendre le rôle essentiel que joue celle-ci dans leur fonction.

Étudier leur structure in cellulo

Actuellement, la technique la plus prometteuse est la cryomicroscopie électronique de haute définition. Distinguée par le prix Nobel de chimie 2017, elle permet l'étude *in cellulo* de complexes protéiques à l'échelle atomique. Le procédé consiste à figer un édifice supramoléculaire directement dans une glace d'eau sans passer par l'étape préalable de cristallisation. Même dans cet état de congélation (200 K = -73,15°C), les protéines continuent à bouger, ce qui permet d'étudier leur dynamique. →

Les résultats sont déjà là. Notamment ceux de l'équipe d'Hugues Nury du CEA-Irig, récompensé d'une bourse ERC, qui a par exemple dévoilé en 2014 et 2018 des structures d'un récepteur à la sérotonine, neurotransmetteur régulant entre autres le sommeil et la douleur.

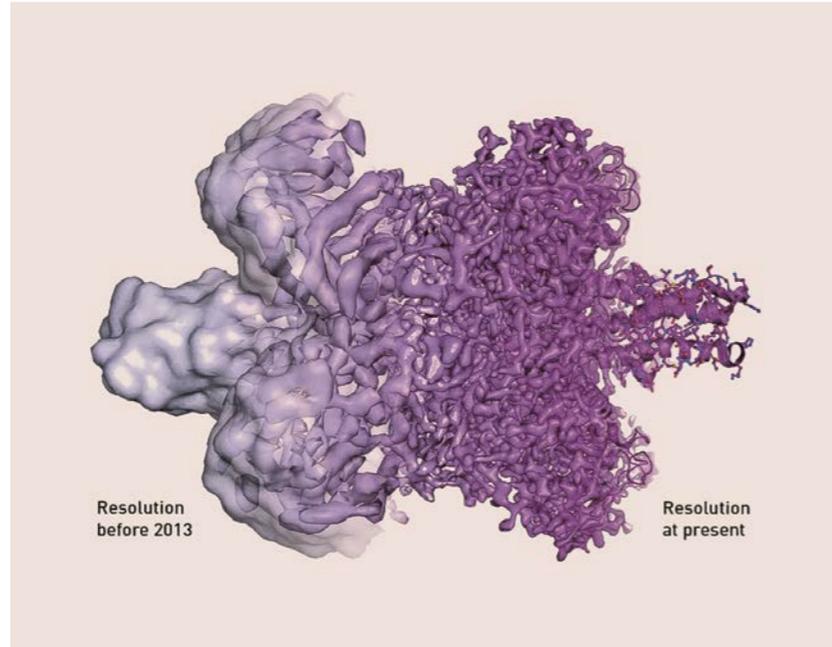
Séquencer et quantifier toutes les biomolécules de la cellule

Dans une approche plus globale des mécanismes intracellulaires, la génomique (séquençage du génome) a contribué à de grandes avancées à partir des années 1980, suivie par la transcriptomique (ARN messagers), la protéomique (protéines) et la métabolomique (métabolites, comme les sucres, les lipides, etc.).

Positionné sur l'ensemble de ces « omiques » (voir p. 52-53), le CEA a su en optimiser les techniques, comme par exemple en protéomique, grâce aux progrès spectaculaires de la spectrométrie de masse, des moyens de calcul et des outils logiciels. Il est ainsi aujourd'hui possible d'identifier et de quantifier dans un même échantillon biologique jusqu'à 10 000 protéines en quelques heures. « Il y a 20 ans, nous ne pouvions en analyser que quelques dizaines, celles les plus abondantes », indique Jérôme Garin, directeur du CEA-Irig.

Découvrir de nouveaux mécanismes de réparation de l'ADN

Fort de la maîtrise de toutes les méthodologies, le CEA s'est orienté vers la démarche multi-omiques. « Jusqu'ici, la recherche tendait à faire de la protéomique, de la génomique ou de la métabolomique de manière cloisonnée. Or, regarder le panorama complet de tous les gènes, protéines et métabolites apporte beaucoup plus que la simple somme de chacun. Notre objectif ici est de dévoiler la complexité du vivant », explique Jean Armengaud, responsable scientifique au CEA-Joliot, dont le groupe est pionnier en « protéogénomique » depuis les années 2010. Il a par exemple contribué à caractériser une bactérie et une archée, toutes deux résistantes aux radiations, en mettant



©Royal swedish academy of science

en évidence des mécanismes jusqu'alors inconnus d'initiation de la traduction et de la réparation de l'ADN.

Peser des échantillons biologiques massifs comme les virus

Si la spectrométrie de masse est un outil important pour les omiques, elle est également à l'origine de nouvelles ruptures. Comme celle de pouvoir désormais mesurer avec précision la masse d'objets biologiques de taille intermédiaire (entre l'atome et un organe), comme les virus. « Nous avons le record du monde », se réjouit Jérôme Garin. Et cela, grâce au nouveau type de spectromètre de masse à base de nanorésonateurs mécaniques conçu en 2018 par Sébastien Hentz du Leti et Christophe Masselon de l'Irig. À la clé, des perspectives complètement nouvelles comme la détection dans des lieux publics de la charge virale.

Contrôler la forme de cellules en culture

La biologie expérimentale propose également depuis une dizaine d'années de remarquables avancées pour

comprendre certains mécanismes intracellulaires. C'est ainsi que des chercheurs savent par exemple contrôler la forme de cellules en culture « Nous avons développé une technique de fabrication de micropuits 3D en hydrogel qui cadrent la croissance de ces cellules. Elle nous permet d'obtenir toujours la même conformation spatiale (le noyau est par exemple toujours à la même place) et facilite leur étude », explique Manuel Théry, chercheur au CEA-Irig. Le groupe Cytomorpholab a ainsi pu mettre en évidence une propriété mécanique fondamentale du vivant : au sein d'un tissu, les cellules adaptent leur organisation interne à la position de leurs voisins.

Disséquer les cellules comme des chirurgiens

Plus fort encore, les technologies laser par lesquelles ils réalisent des nano-ablations au sein de la cellule, tels des chirurgiens du nanomonde. « À titre d'expérimentation, nous avons coupé les attaches entre les cellules évoquées plus haut, et constaté que le cytosquelette (constitué de protéines d'actines) se

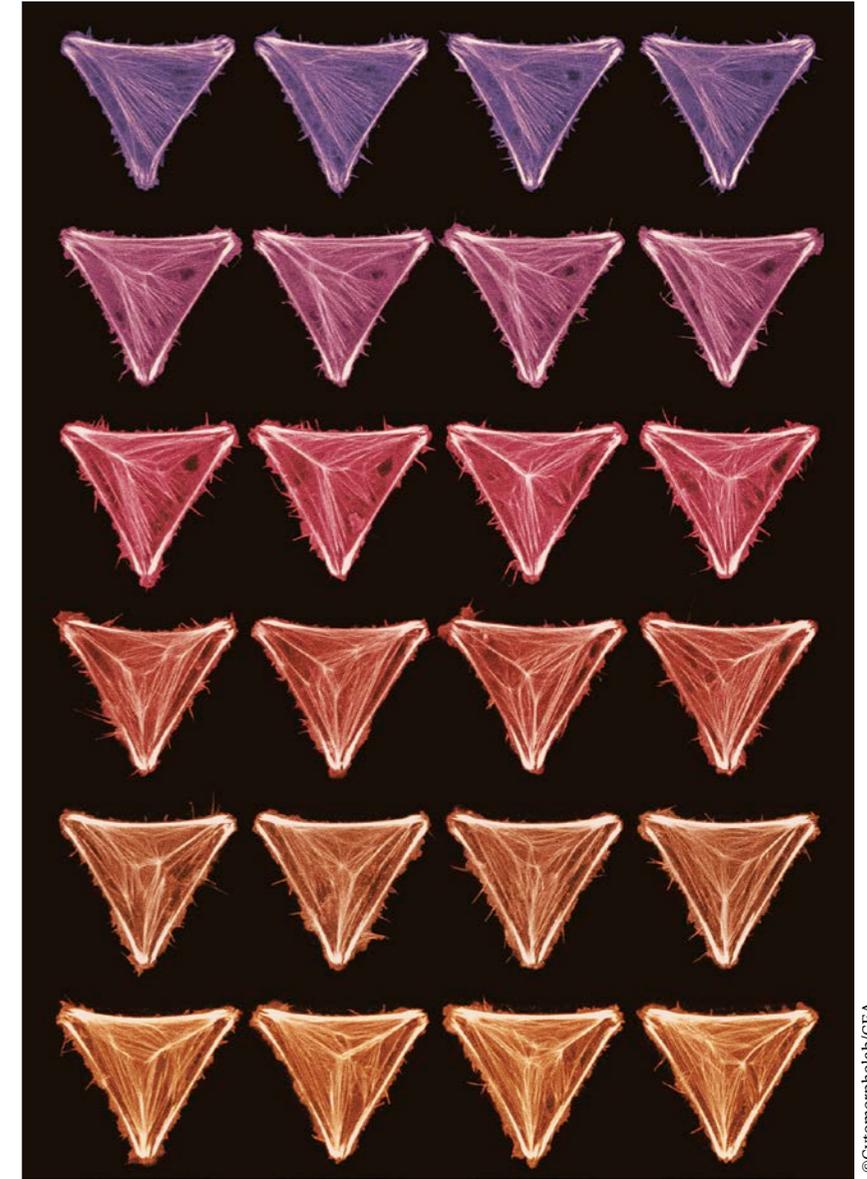
À gauche:

Amélioration de la résolution de la cryomicroscopie électronique (avant 2013 et en 2017) pour étudier les protéines à l'échelle atomique.

réorganise immédiatement pour se répartir la tension nouvelle. Un peu comme si tous les os de notre squelette se renforçaient pour pallier une fracture localisée! », illustre Manuel Théry. L'intérêt de ses découvertes est double. D'abord, elles renseignent sur l'organisation et la morphologie des tissus. Ensuite, au niveau médical, la connaissance de ces lois permet de détecter d'éventuels dysfonctionnements. « Dans le cadre du cancer du sein, nous avons ainsi observé la manière dont les cellules cancéreuses s'échappent de la tumeur pour aller former des métastases en d'autres parties du corps. Nous avons pu montrer que ce processus débute par un assouplissement fort des cellules, comme si elles défaisaient leurs ancrages », détaille le biologiste qui cherche actuellement, grâce au soutien d'une bourse ERC, à identifier des molécules thérapeutiques capables de bloquer cet assouplissement.

Reconstruire une cellule artificielle

Le prochain enjeu est celui de reconstruire depuis zéro une cellule artificielle. « On suit le postulat réductionniste de Feynman qui dit : "ce que je comprends, je peux le construire", un peu comme un horloger construit une montre à partir de ses composants de base. Ici, ce sont des protéines ou d'autres biomolécules », confie Manuel Théry. Pour l'heure, aucune équipe de recherche n'y est parvenue. Dans ce qui est devenu un challenge à l'international, le CEA se positionne bien. Lui dont le groupe Cytomorpholab a déjà pu reconstruire des mécanismes comme, en 2007, celui de la contraction cellulaire grâce au réassemblage des protéines d'actine! Une première mondiale. ●



©Cytomorpholab/CEA

Au sein d'un tissu, les cellules adaptent leur organisation interne à la position de leurs voisines.

Ci-dessus:

Découverte du changement d'organisation du réseau d'actine (protéines du cytosquelette) au cours du temps (différentes couleurs) dans une cellule attachée à un micropatron adhésif en forme de V (2007).

LEXIQUE

Charge nucléaire

Partie de l'arme nucléaire qui produit l'énergie.

Cyclotron

Accélérateur circulaire de particules, qui envoyées sur une cible génèrent la production de radio-isotopes.

Divergence

Démarrage du processus de réaction en chaîne dans un réacteur nucléaire.

Électrolyse de l'eau

Procédé qui décompose, grâce à un courant électrique, l'eau (H₂O) en hydrogène (H₂) et en oxygène (O₂).

Enrichissement

Procédé consistant à augmenter la proportion d'isotope fissile (uranium 235) dans l'uranium.

Fission

Éclatement d'un noyau atomique lourd en noyaux plus légers et particules élémentaires, accompagné d'un dégagement d'énergie.

La fission peut être spontanée (rare) ou induite par l'absorption d'un neutron.

Héliosphère

Cocon magnétique en forme de bulle allongée, formée par le vent solaire magnétisé du Soleil, englobant tout le système solaire et accompagnant son déplacement dans notre galaxie.

Hétérojonction

Mise en contact de matériaux différents (silicium monocristallin et amorphe), contrairement à l'homojonction (silicium monocristallin).

Hydrométallurgie

Ensemble des techniques d'extraction des métaux qui comportent une étape où le métal est solubilisé (voie liquide = hydro) pour permettre sa purification.

Ionisation

Transformation d'un atome en ion en arrachant un ou plusieurs électrons de sa structure électronique.

IRM de diffusion

Technique qui permet d'obtenir des images représentant le coefficient de diffusion de l'eau dans les tissus du corps.

Isotope

Forme d'un même élément chimique (exemple, le carbone) dont le noyau a le même nombre de protons, mais un nombre différent de neutrons.

Laboratoire de haute sécurité

Installation conçue pour recevoir des agents biologiques en fonction de leur groupe : de 1 (ne provoquent pas de maladies) à 4 (maladie mortelle, contagieuse, sans traitement efficace).

Lithographie

Technique utilisée dans la fabrication des semi-conducteurs pour transférer le masque d'un circuit intégré sur un substrat de silicium, à la façon d'un pochoir.

Machine learning

Branche de l'intelligence artificielle, permettant à un algorithme de se construire et de s'améliorer en s'entraînant sur un grand nombre de données.

Paires de Cooper

Nom donné, en physique des matériaux quantiques, aux électrons liés entre eux à basse température et d'une manière spécifique.

Peptide

Molécule formée de quelques acides aminés, qui sont les constituants des protéines.

Positon

Antiparticule de l'électron, porteur d'une charge positive, qui se désintègre en produisant deux rayonnements gamma.

Plasma

Quatrième état de la matière, atteint à partir de 10 000 °C, se présentant sous la forme d'un gaz ionisé.

Produit de contraste

Substance injectable ou ingérable qui améliore la visualisation des organes explorés.

Radiopharmaceutique

Molécule contenant un isotope radioactif à vie courte. Injectée au patient, elle permet d'établir des diagnostics ou de soigner par radiothérapie.

Radiothérapie

Destruction de cellules cancéreuses à l'aide de rayonnements ionisants.

Rayonnement ionisant

Rayonnement électromagnétique (X, gamma) ou faisceau de particules (électron, neutron, proton, alpha...) suffisamment énergétique pour transformer les atomes en ions, au sein de la matière qu'il traverse.

RMN (Résonance magnétique nucléaire)

Phénomène par lequel certains noyaux atomiques ont la capacité de réagir à un rayonnement électromagnétique de fréquence déterminée, lorsqu'ils sont placés dans un champ magnétique.

Spin

Propriété quantique d'une particule (comme la charge électrique ou la masse), sans équivalent dans la physique classique, qui décrit son interaction avec des champs magnétiques.

Tête nucléaire

Arme nucléaire emportée par un missile.



Éditeur

Commissariat
à l'énergie atomique et
aux énergies alternatives,
R. C. S. Paris B77568019

Directrice de la publication

Marie-Ange Folacci

Rédactrice en chef

Aude Ganier

Rédactrice en chef adjointe

Sylvie Rivière

Ont contribué à ce hors-série

Guillaume Langin, Pierre-Yves Lerayer,
Hugo Leroux, Patrick Philippon,
Bérénice Robert, Vahé Ter Minassian

Comité éditorial

Claire Abou, Luc Barbier,
Marion Bard, Mathilde Costes-Majorel,
Élisabeth de Lavergne, Claudine Dubiau,
Sylvie Gibert, Camille Giroud,
Rafika Jarray, Sophie Kerhoas,
Élisabeth Lefèvre-Rémy, Pascal Martinez,
Alain Mazaud, Florence Mousson,
Anne Orliac, Françoise Poggi,
Frédérique Tacnet, Nicolas Tilly

Conception et réalisation

Atelier Marge Design :
Tristan Baldi (relecture),
Maylis Gaillard (coordination
et secrétariat de rédaction),
Vanessa Lalande (réalisation graphique),
Laurianne Mariette (conception
graphique), Marianne Ménager
(fabrication)

Illustrations

Manon Colonna d'Istria (portraits)
Jeremy Perrodeau (couverture
et ouvertures des rubriques)

Iconographie

Micheline Bayard

N° ISSN 1163-619X
Tous droits de reproduction réservés.
Papier Magno Natural
Imprimerie Pollina
Décembre 2020

Unités citées dans ce numéro

DES – Direction des énergies

DPE – Direction des programmes Énergies

DDSD – Direction des projets de démantèlement, de service nucléaire et de la gestion des déchets

DAM – Direction des applications militaires

DRT – Direction de la recherche technologique

CEA-Leti – Institut d'électronique et de technologie de l'information

CEA-List – Institut des systèmes numériques intelligents

CEA-Liten – Institut d'innovation sur les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux

DRF – Direction de la recherche fondamentale

CEA-IPhT – Institut de physique théorique

CEA-Iramis – Institut rayonnement-matière de Saclay

CEA-IRFM – Institut de recherche sur la fusion magnétique

CEA-Irfu – Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers

CEA-Irigr – Institut de recherche interdisciplinaire de Grenoble

CEA-Jacob – Institut de biologie François Jacob

CEA-Joliot – Institut des sciences du vivant Frédéric Joliot

Unités mixtes de recherche

Biam – Institut de biosciences et biotechnologies d'Aix-Marseille (CEA, CNRS, UAM)

Clinatéc – Centre de recherche biomédicale Edmond J. Safra (CEA, CHU Grenoble Alpes, UGA)

Ganil – Grand accélérateur national d'ions lourds (CEA, CNRS)

IBS – Institut de biologie structurale (CEA, CNRS, UGA)

ICSM – Institut de chimie séparative de Marcoule (CEA, CNRS, UM, ENSCM)

Idmit – *Infectious Diseases Models for Innovative Therapies* (CEA, Université Paris-Saclay, Inserm)

Ines – Institut national de l'énergie solaire (CEA, CNRS, Université Savoie Mont Blanc)

LSCE – Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CEA, CNRS, UVSQ)

Mircen – *Molecular Imaging Research Center* (CEA, Inserm)

Pour célébrer les 75 ans du CEA, ses chercheuses et chercheurs reviennent sur 75 avancées scientifiques et technologiques marquantes depuis sa création.

Ces histoires sont celles des pionniers de l'énergie nucléaire, de la dissuasion, de l'imagerie médicale, de la microélectronique ; celles de l'émergence de filières industrielles et de créations de start-up. C'est l'aventure d'une recherche d'excellence, se déployant au sein de vastes écosystèmes académiques et industriels.

Aux pionniers d'hier répondent les précurseurs d'aujourd'hui, engagés sur les grands enjeux du XXI^e siècle, climat, transitions énergétique & numérique, médecine du futur, enjeux de défense ; et qui imaginent les technologies de rupture qui révolutionneront le monde de demain, intelligence artificielle, fermeture du cycle du carbone, sciences omiques, calcul quantique...

Ce regard porté sur l'histoire est aussi un regard tourné vers l'avenir : ces 75 avancées ont changé et continueront de changer nos vies ; la grande saga du CEA se poursuit.