

13 LA REVUE DU CEA

ROBOTIQUE

La nouvelle vague

- Page 12

MALADIES INFECTIEUSES

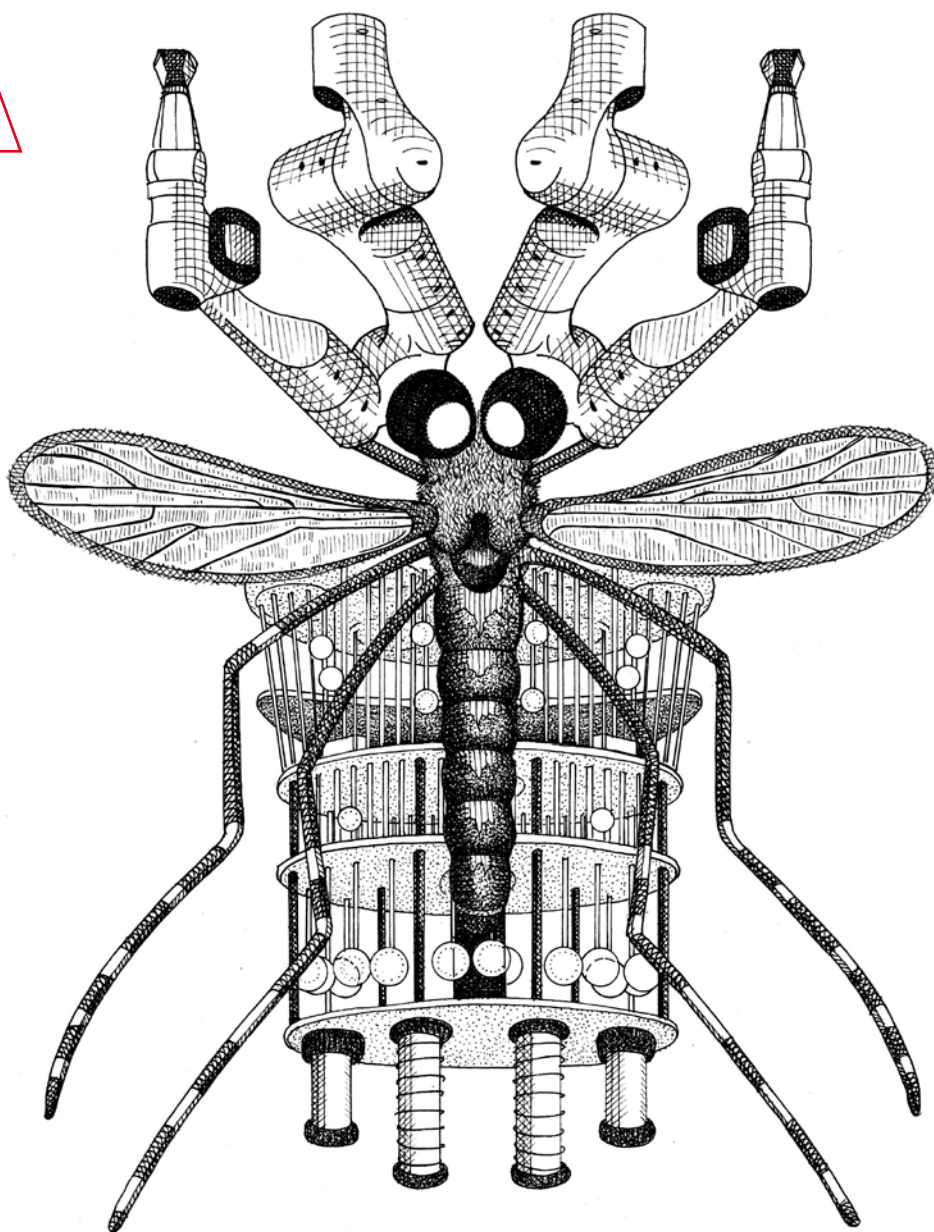
Enjeu majeur de santé publique

- Page 32

CRYOGÉNIE

Le frisson de la science

- Page 48



Revue éditée par le CEA

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

Directeur de la publication

Anne-Isabelle Etienvre

Rédaction en chef

Laetitia Baudin

Rédaction

Laetitia Baudin, Audrey Dufour, Sylvie Rivière

Iconographie

Christelle Comoy

Comité éditorial

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

Illustration de couverture

La Hache illustration

Conception graphique

bearideas

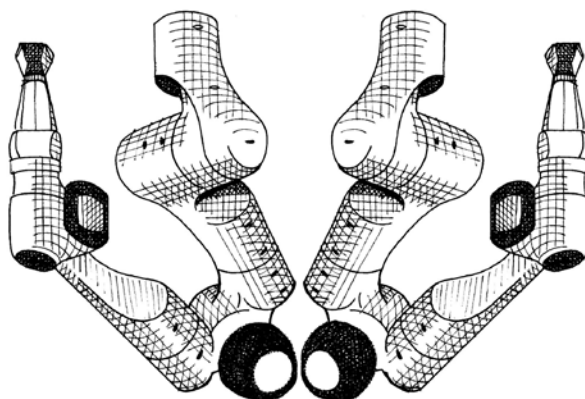
Des remarques, des suggestions ?

Écrivez-nous à revue@cea.fr

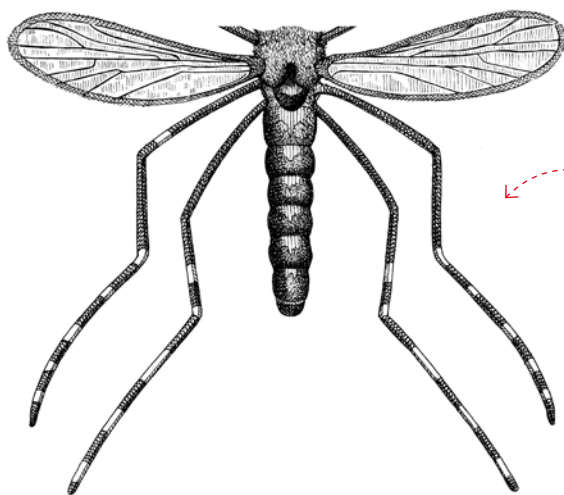
ISSN 2999-926X

Virtuose de métal

*La robotique déploie ses bras au CEA...
De l'autonomie mais contrôlée,
de la puissance mais avec précision,
de l'innovation mais toujours alliée
à la sûreté et à la robustesse...
La conception de chaque système répond
aux équilibres indispensables à son
déploiement dans les environnements
industriels les plus exigeants.*



La couverture déchiffrée

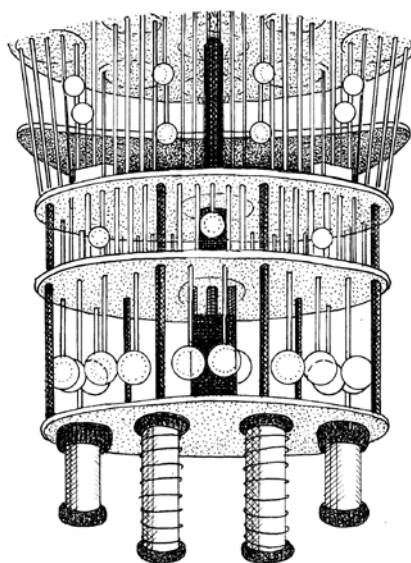


Un battement d'ailes...

*... suffit parfois à rappeler l'interconnexion
des événements et des risques. Derrière le
développement des maladies infectieuses se jouent
des dynamiques complexes où se mêlent biologie,
mobilité et environnement. C'est pourquoi au
CEA, biologistes, médecins et ingénieurs tentent
de mieux en disséquer les mécanismes pour nous
protéger des crises sanitaires.*

Le froid ultime

*Pour révéler les secrets de la matière et
exploiter certaines propriétés exceptionnelles,
il faut plonger dans les températures
abyssales, à quelques fractions de degré du
zéro absolu, plus froid que l'espace lui-même.
Au CEA, la maîtrise de la cryogénie ouvre
la voie aux technologies de demain pour
le quantique, la fusion nucléaire ou encore
la compréhension de l'Univers.*



1. Stéphanie Simon, directrice de recherches en biologie, est à la tête du Département médicaments et technologies pour la santé de l'institut Joliot du CEA. Son domaine d'expertise ? La conception de tests immunologiques de diagnostic rapide des maladies infectieuses, outils essentiels dans la stratégie de lutte contre les épidémies et les risques NRBC.

© C. Comoy

2. Xavier Traversac est vice-président d'Air Liquide Advanced Technologies, filiale spécialisée dans la conception et la fabrication de solutions de cryogénie extrême pour la *deeptech* et la transition énergétique. Pour *La Revue du CEA*, il revient sur l'implication d'Air Liquide dans le programme Cryonext et l'importance de rapprocher recherche et industrie.

© Air Liquide



Les invités de la revue

6. Docteur en ingénierie logicielle pour la robotique et responsable du programme « Machines intelligentes », **Selma Kchir** travaille depuis plus de quinze ans à l'intersection de la robotique, de l'intelligence artificielle et de l'ingénierie des systèmes. Selon elle, l'enjeu de la robotique n'est pas d'ajouter de « l'intelligence » à un système, mais de l'intégrer dans des architectures complètes combinant différentes capacités.

© CEA

3. Roger Le Grand a dirigé Idmit, l'infrastructure nationale en biologie-santé consacrée à la recherche préclinique et clinique sur les maladies infectieuses humaines, de sa création en 2012 jusqu'en février 2026. Avec ses équipes, il a contribué à mettre au point et à optimiser des vaccins et des traitements contre ces maladies, qu'elles soient endémiques, comme le sida, ou émergentes, comme ce fut le cas pour la Covid-19.

© Isabelle Mangeot / CEA

4. Directeur adjoint scientifique et des programmes à la Direction de la recherche fondamentale du CEA, **Marc Delpech** copilote le programme Cryonext. Financé par l'Agence nationale de la recherche dans le cadre de France 2030, ce programme s'inscrit dans la stratégie nationale pour le quantique. Le grand froid est en effet une condition *sine qua non* aux technologies quantiques !

© Marc Delpech

5. Diplômé de l'École nationale supérieure d'arts et métiers, **Yann Perrot** est responsable du Service de robotique interactive. Un domaine qu'il connaît depuis plus de vingt ans et qui vit, dit-il, une grande vague technologique, portée et accélérée par les progrès de l'IA et des modèles génératifs transformant la manière de concevoir, de programmer et de superviser les systèmes robotiques.

© CEA

Éditorial

Envie d'échapper aux températures trop chaudes de l'été ? Plongez dans ce numéro rafraîchissant de *La Revue du CEA* ! D'abord au cœur des gros « frigos » qui fabriquent les températures extrêmement basses dont ont besoin les IRM, les instruments d'observation de l'Univers et, demain, les calculateurs quantiques ou encore les installations de fusion nucléaire. Un froid vital pour la science et dont le CEA s'est fait une spécialité (p. 48).

Partez ensuite à la découverte des dernières avancées de la robotique, dont le CEA est un acteur clé depuis plus de 50 ans, et qui sont notamment tirées par les promesses de l'intelligence artificielle (p. 12). Sa singularité : une approche ancrée sur des cas d'usage opérationnels pour assurer performance, robustesse et sûreté de fonctionnement, depuis le développement de briques technologiques jusqu'à l'intégration et au transfert de systèmes pour répondre aux besoins de l'industrie.

Enfin, apprenez comment le CEA contribue à anticiper et préparer d'éventuelles crises sanitaires dues aux maladies infectieuses (p. 32). Face à cet enjeu majeur de santé publique, il conjugue recherche fondamentale, études précliniques et cliniques, et développements technologiques, depuis les dispositifs de diagnostic jusqu'aux stratégies thérapeutiques et vaccinales, en lien avec le monde industriel.

Et s'il vous reste un peu d'énergie, baladez-vous à Saclay au cœur du Laboratoire des technologies d'assemblage (p. 28) qui développe des procédés de soudage, de fabrication additive et de découpe laser pour le nucléaire et le démantèlement. Et terminez par un colorIAge inédit (p. 65) en attendant l'éclipse du 12 août (p. 66)...

Bonne lecture !

Merci également à

Chrystel Ambard
Claude Andriot
Anthony Attard
Bertrand Baudouy
Laurent Bellanger
Martin Blackledge
François Bonne

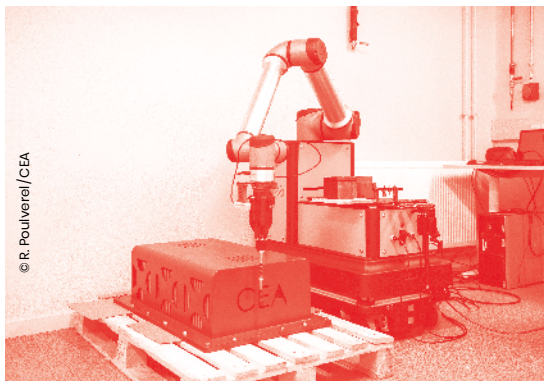
Rémi Boullon
Martin Courchesne
Raphaël Couturier
Davide Duri
Jean-Marc Duval
Baptiste Gradoussoff
Mathieu Grossard

Thibaut Holtzapffel
Ivan Charles
Elisabeth Lefèvre-Rémy
Jean Manzagol
Pierre Marcoux
Laurent Pain
Gerold Schröpfer

Jean-Nicolas Tournier
Caroline Vienne
Régis Vinciguerra
Hervé Volland
Vincent Weistroffer
Et tous ceux qui ont aidé
à réaliser cette revue !

01

La nouvelle vague de la robotique **12**



Entretien : de la recherche technologique à l'application industrielle **14**

Qu'est-ce qu'une « approche système » ? **17**

Cinq capacités clés **18**

L'innovation à l'épreuve du réel **24**

Vers plus d'interactivité, d'autonomie et d'intelligence **25**

Et aussi...

Dans les coulisses du CEA 8

Carte blanche : Renforcer la recherche et l'innovation dans le domaine des énergies 26

Portfolio : Assembler et désassembler, l'avenir pluriel du nucléaire 28

Autour du monde 46

Save the date 63

Playlist 64

À vous de jouer 65

La belle image 66

02

Les maladies infectieuses, enjeu de santé publique 32



Les données du problème 34

Bâtir un écosystème coordonné pour mieux gérer les épidémies 36

Des tests pour détecter les malades 39

Vers des traitements et des vaccins 42

Acquérir des connaissances 44

Diminuer les bactériémies dans le monde 45

03

Les cryotechnologies au service de la science 48



Plongez la tête dans le frigo 50

Cryonext, le froid vital au quantique 52

Entretien avec Xavier Traversac, vice-président d'Air Liquide Advanced Technologies 56

Les thermomètres du grand froid 57

La cryogénie pour étudier l'Univers... 58

... et atteindre la supraconductivité 60

Des glaçons pour la fusion 62

Dans les coulisses du CEA

De la surveillance des volcans à l'imagerie cérébrale, en passant par des panneaux photovoltaïques moins gourmands en argent, tour d'horizon de l'actualité qu'il ne fallait pas manquer !



↑ Capteurs en fonctionnement près du sommet du volcan de la Soufrière.

← Intérieur de la mallette du projet Mugs.

Surveiller les volcans

Comprendre et prédire l'activité d'un volcan est complexe. Le projet Mugs, porté par l'institut Leti et l'Observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand, mise sur un capteur multigaz, portable, miniature, de la taille d'un mug et adapté aux environnements volcaniques extrêmes. Basé sur la spectroscopie photoacoustique, il détecte plusieurs gaz indicateurs précoces des éruptions et a déjà été testé sur le volcan de la Soufrière, en Guadeloupe, où il a prouvé sa grande fiabilité. L'équipe continue d'améliorer le système pour un déploiement à long terme et pour réaliser des cartographies de gaz par drone.

Le meilleur nez électronique



Si les nez électroniques sont déjà utilisés dans l'industrie, par exemple pour contrôler la qualité des aliments, détecter des fuites de gaz, de drogues, d'explosifs ou encore de polluants environnementaux, ils sont bien loin d'égaler les prouesses du nez humain. Pour y remédier, des chercheurs du CEA ont développé un dispositif de nouvelle génération. Conçu en associant sur une même puce des récepteurs biomimétiques généralistes et spécialisés, ce nouveau nez arrive à détecter et discriminer avec précision des composés organiques volatils issus de différentes familles chimiques, seuls ou dans des mélanges complexes, et même à différentes concentrations. Des performances jusqu'ici inégalées !



Une plongée au cœur de la Voie lactée

ESA/Euclid/Euclid Consortium/NASA, CHTI,
image processing by J.-C. Cuillandre and E. Bertin
(CEA Paris-Saclay)

Connaissez-vous le bulbe galactique ? C'est la région centrale de notre galaxie, où se bousculent étoiles, nébuleuses et poussières sur une ligne de visée de plusieurs dizaines de milliers d'années-lumière. Dévoilée par l'Agence spatiale européenne et réalisée à partir des observations de la mission Euclid, cette image inédite, par sa résolution et sa précision, ouvre la voie à l'identification de nouvelles exoplanètes et à une meilleure compréhension des systèmes planétaires déjà connus. Un cliché exceptionnel qui a nécessité plusieurs centaines d'heures de traitement sous la supervision de Jean-Charles Cuillandre, astronome au CEA.



Avec Orange et Mistral, de beaux partenariats !

À l'occasion du salon VivaTech, le CEA a signé deux partenariats structurants sur l'IA. Le premier, avec Orange, acte la création d'un laboratoire commun. Nommé AI-Native Communications, il permettra le développement des communications sémantiques, une technologie prometteuse pour de futurs réseaux de communication plus efficaces et plus durables. Le second, avec Mistral, porte sur le déploiement de Maia, la plateforme expérimentale d'IA générative souveraine au service des 22 000 collaborateurs du CEA.

47 millions

C'est le nombre de galaxies identifiées par les chercheurs de la collaboration **Desi**, impliquant

le CEA, qui ont terminé, en avance, leur grand relevé. Leurs premiers résultats suggèrent que l'accélération de l'expansion de l'Univers pourrait ne pas être gouvernée par une constante cosmologique, mais par une « énergie noire » dépendant du temps. Hypothèse qui suscite un fort intérêt scientifique et pourrait modifier notre compréhension du cosmos !

Des **batteries** plus sûres

Montée brutale en température, libération de particules incandescentes et de gaz chauds, voire départ de feu... Voilà ce que peut provoquer l'emballement thermique d'une cellule de batterie, un phénomène que les constructeurs cherchent à tout prix à éviter. Le CEA, dans le cadre du projet européen Versaprint, propose une solution pour limiter ces impacts et réduire la probabilité de flammes à l'extérieur du module batterie, en jouant sur deux leviers : la canalisation des gaz vers l'extérieur

et l'abaissement de leur température. Le prototype a passé les tests avec succès, sans aucun embrasement. L'équipe recherche désormais un partenaire industriel pour monter le projet en maturité.



© kasto - Fotolia



FORÊTS à sauver

Les forêts européennes connaissent un déclin alarmant ! Conséquence : leur rôle naturel de capteur de CO₂ se dégrade considérablement. C'est ce que montre une étude réalisée à partir d'observations satellitaires et d'inventaires nationaux à laquelle le CEA a contribué. Celle-ci projette une diminution de 39 % du puits de carbone de ces forêts d'ici 2030. La raison ? Des effets combinés des perturbations d'origine humaine (coupes de bois) et naturelle (tempêtes, incendies, attaques d'insectes), amplifiées par le changement climatique. Un constat qui plaide pour la nécessité absolue de préserver nos forêts.

Ça chauffe... **TROP !**



© petra-nest/Pexels

Les indicateurs clés du changement climatique et de l'influence humaine, à l'échelle planétaire, fournis par un consortium international auquel participe le CEA, ont récemment été publiés. Les chiffres sont sans appel. Ils indiquent que la planète accumule de la chaleur à un rythme qui accélère.

56,8

milliards de tonnes
en équivalent CO₂ :
niveau record en 2024
des émissions mondiales
de gaz à effet de serre.

1,37 °C

Réchauffement climatique
dû aux activités humaines
en 2025, en hausse rapide.
Il devrait dépasser 1,5 °C
d'ici 2030 environ.

3^e année

la plus chaude jamais
enregistrée pour 2025,
avec une température
observée de 1,39 °C
au-dessus de la
moyenne 1850-1900.

23 cm

 (depuis 1901)

Nouveau record de l'élévation
du niveau mondial de la mer
en 2025. Le rythme de montée
du niveau de la mer atteint
maintenant 3,7 mm par an
(en moyenne sur 2006-2025).

65 jours

Nombre de vagues de chaleur
marines pour l'année 2025.

Des chiffres qui rappellent l'urgence d'agir et le besoin d'intensifier massivement les efforts au cours de cette décennie critique pour freiner le réchauffement planétaire et en limiter les risques et les impacts.



Des IRM renouvelées

Le CEA a inauguré courant mai de nouveaux équipements d'imagerie pour son infrastructure de recherche NeuroSpin, plateforme de pointe dédiée à l'étude du cerveau. Avec cette nouvelle génération d'équipements, NeuroSpin confirme sa position parmi les infrastructures de référence pour l'exploitation du cerveau et le développement des neurotechnologies de demain.

7 mg

C'est la consommation totale d'argent par watt-crête des derniers panneaux photovoltaïques mis au point par le CEA à l'Ines. Aujourd'hui, 20 % de la production mondiale d'argent est dédiée au photovoltaïque. Réduire son utilisation est un enjeu à la fois environnemental et de souveraineté, et la communauté du PV s'est fixé l'objectif d'une cellule photovoltaïque à 5 mg par watt-crête (mg/Wc) d'ici à 2035. En travaillant sur différentes combinaisons de métallisations à base de cuivre, de colle conductrice (ECA) et de rubans d'interconnexion, le CEA démontre la faisabilité industrielle sans sacrifier les performances.

Le quantique change d'échelle

Le 22 mai dernier, le Très grand centre de calcul du CEA (TGCC) a accueilli le Forum européen sur les technologies de calcul, du quantique et des semi-conducteurs, en présence du président de la République, Emmanuel Macron, du Premier ministre, de plusieurs ministres et partenaires du CEA. Le chef de l'État y a appelé à « *changer d'échelle* » face à l'accélération des États-Unis et de la Chine et plaidé pour une Europe investissant « *beaucoup plus massivement* » dans les technologies critiques, soulignant que « *ce site du CEA démontre notre capacité à œuvrer entre la recherche fondamentale, la recherche appliquée et le monde industriel* ».



DOSSIER
01





La nouvelle vague de la robotique

Si les robots humanoïdes des films d'anticipation disposent de capacités encore imaginaires, la robotique d'aujourd'hui a considérablement progressé, dopée par les technologies de perception et l'intelligence artificielle.

Dans ce domaine comme dans bien d'autres, la compétition fait rage. Si Américains et asiatiques sont en position de dominer un marché évalué cette année à un peu plus de 88 milliards de dollars selon le dernier rapport de Mordor Intelligence, l'Europe et la France ne sont pas en reste. Acteur clé de l'innovation française en robotique depuis plus de 50 ans, le CEA parie sur une approche qui fait sa singularité : s'ancrer sur des cas d'usage opérationnels avec les plus hautes exigences techniques pour assurer performance, robustesse et sûreté de fonctionnement, depuis le développement de briques technologiques jusqu'à l'intégration et au transfert de systèmes pour répondre aux besoins de l'industrie.

De la recherche technologique à l'application industrielle



Interview croisée de **Selma Kchir**, responsable du programme Machines intelligentes, et de **Yann Perrot**, chef du Service de robotique interactive.

Que penser des annonces spectaculaires faites par des acteurs américains comme Boston Dynamics et Agility Robotics ou des start-up asiatiques très capitalisées ?

Dans quel contexte s'inscrivent aujourd'hui les recherches en robotique ? Assiste-t-on, comme on le dit, au « moment ChatGPT » de la robotique ?

Yann Perrot — Il est indéniable que le domaine bénéficie actuellement d'une grande vague technologique, portée et accélérée par les progrès de l'IA et des modèles génératifs qui transforment la manière de concevoir, de programmer et de superviser les systèmes robotiques. Au-delà des secteurs de l'automobile et du nucléaire qui en sont des utilisateurs de longue date, on voit leurs usages potentiels se démultiplier dans de nombreux domaines, comme le BTP ou l'agriculture et, bien sûr, la défense, avec le recours croissant aux drones de combat.

Selma Kchir — Ces systèmes sont appelés à intervenir dans des environnements de plus en plus complexes, contraints, variés et évolutifs ou difficilement accessibles. Or, la robotique doit agir dans le monde physique et cela nécessite des temps de développement et de validation longs.

Y. P. — On nous montre des robots humanoïdes exécutant des tâches de façon spectaculaire. Des démonstrations parfois motivées par un besoin de communication, dont la projection sur une production de masse, fiable et à coûts maîtrisés requiert encore des progrès très significatifs.

S. K. — Nous ne gagnerons pas par le volume d'investissements ou avec des démonstrations impressionnantes, mais en pariant sur l'accélération du développement, la robustesse, la sûreté, la répétabilité et l'acceptabilité.

Justement, comment l'Europe et la France s'organisent-elles face à cette concurrence ?

S. K. — Différentes initiatives existent à l'échelle européenne et nationale pour structurer un écosystème associant l'ensemble des acteurs de la robotique, scientifiques comme industriels. En Europe, par exemple, euRobotics réunit 250 membres et l'AI, *Data and Robotics*

Association fédère plus de 200 organisations — établissements de recherche, start-up, PME et grands groupes — pour déployer une robotique fiable, sûre et robuste. Du fait de son expertise reconnue, le CEA est un membre historique de cette association et contribue à son comité de direction. En France, le développement de la robotique est soutenu par différentes initiatives portées par le Comité Robotique France ainsi que par des programmes nationaux de recherche tels que le PEPR O2R, que le CEA copilote avec le CNRS et Inria. Europe et France représentent deux niveaux très actifs et complémentaires dont l'objectif est de fluidifier le passage de la recherche à l'industrie.

Quelle place le CEA occupe-t-il dans cet écosystème ?

Y. P. — Le CEA occupe une place spécifique dans l'écosystème français et européen. Du fait de son positionnement au carrefour de la recherche, du transfert technologique et des exigences industrielles, il couvre l'ensemble de la chaîne de valeur, depuis la recherche sur les briques clés jusqu'à l'intégration de systèmes robustes et leur déploiement dans des environnements industriels réels. C'est pour répondre aux besoins de l'industrie nucléaire que le CEA a initialement investi, dès les années 60, le champ de la téléopération pour concevoir des « bras » capables de manipuler des matières dangereuses. Historiquement, son approche scientifique était singulière, basée sur la robotique pilotée en effort pour des systèmes capables d'agir finement dans le monde réel et/ou en interaction avec l'humain. D'abord mécaniques, ces systèmes intègrent désormais des briques logicielles permettant un meilleur

contrôle pour augmenter l'efficacité des tâches opérées à distance. Nous avons beaucoup travaillé sur l'interface homme-machine pour que l'opérateur soit capable de ressentir et mesurer avec finesse l'effort exercé. Et aujourd'hui, nous explorons toutes les modalités d'usage de l'IA, notamment les grands modèles de langage, pour interagir encore plus efficacement avec les robots, mais aussi pour les doter de nouvelles fonctions de perception, de décision et d'autonomie.

S. K. — J'ajouterais qu'un système robotique ne peut plus se penser comme une brique isolée. L'enjeu n'est pas seulement de lui ajouter de « l'intelligence » mais de l'intégrer dans des architectures complètes, capables d'articuler perception, compréhension du monde, décision et action. Privilégier ces axes de recherche, c'est ce qui fait la force du CEA.



L'enjeu n'est pas seulement d'ajouter de « l'intelligence » au robot, mais de l'intégrer dans des architectures complètes, capables d'articuler perception, compréhension du monde, décision et action. »

Selma Kchir, responsable du programme Machines intelligentes.



Peut-on dire que c'est la « marque de fabrique » du CEA ?

Y. P. — Absolument. Cette « approche système » développée par le CEA repose sur sa capacité à intégrer des briques technologiques, depuis le composant jusqu'au processus, dans des systèmes robotiques. Notre modèle repose sur la convergence entre robotique, IA, simulation et ingénierie système pour accélérer le déploiement de systèmes autonomes, fiables et robustes dans des environnements industriels critiques.

Vous parlez d'embarquer de l'intelligence dans le robot. Comment le faire sans dépendre de fournisseurs américains ou asiatiques ?

S. K. — La souveraineté est effectivement un enjeu pour la robotique, au même titre d'ailleurs que les questions de cybersécurité. Un robot n'est pas seulement une machine mécanique : il repose sur des composants électroniques, des logiciels, des données, des modèles d'IA et parfois des infrastructures cloud. L'idée n'est pas de tout faire tout seul, mais de maîtriser ce qui est sensible, notamment les composants, les logiciels et les données. Nous nous attachons donc à trouver le bon équilibre entre intelligence embarquée et ressources distantes, en conservant localement les fonctions les plus critiques pour la sûreté, la latence et la maîtrise opérationnelle.

Un autre enjeu n'est-il pas celui de l'acceptabilité sociale du robot ?

Y. P. — Cela ne se résume pas au remplacement de l'humain par la machine : la robotique permet des gains de productivité et cela transforme les emplois, en diminuant la pénibilité du travail au profit de tâches à valeur ajoutée. Cela a notamment été le cas dans l'industrie automobile.

Notre modèle repose sur la convergence entre robotique, IA, simulation et ingénierie système pour accélérer le déploiement de systèmes autonomes, fiables et robustes. »

Yann Perrot, chef du Service de Robotique Interactive.

S. K. — Ces questions sont abordées dès la conception. Notre démarche consiste à concevoir des systèmes qui s'intègrent dans l'environnement de travail des humains, qui doivent rester centraux, et à comprendre comment ils interagissent avec les utilisateurs, comment ils sont perçus, supervisés et acceptés.

Finalement, le « compagnon robot » de tous les jours est-il pour demain ?

S. K. — Nous sommes encore très loin du compagnon robot « généraliste » capable d'agir en environnement ouvert et dynamique ! Aujourd'hui, des robots opèrent dans le monde physique, mais ils y effectuent seulement les tâches très spécifiques pour lesquelles ils ont été conçus ou entraînés. Et il reste beaucoup de questions à résoudre, par exemple, la gestion des situations imprévues.

Y. P. — C'est aussi une question économique et d'usage. Autrement dit, quel prix suis-je prêt à payer et pour quelle fonction ? Les débuts difficiles du robot-aspirateur en sont une bonne illustration... En réalité, pour l'instant, c'est dans le monde industriel que la robotique a des cartes à jouer ! ●

Qu'est-ce qu'une « approche système » ?

Du développement de briques technologiques jusqu'à leur intégration dans un système complet, illustration de cette approche spécifique au CEA au travers de sa collaboration avec SADE, filiale du groupe NGE spécialisée dans le cycle de l'eau.

1. Expression du besoin industriel

Rénover plutôt que remplacer des conduites défectueuses de distribution d'eau potable en fonte de petit diamètre, via des chantiers de courte durée, peu invasifs, sans tranchée et à coûts maîtrisés, et surtout peu impactants en termes de nuisances.

2. Analyse du besoin

En lien avec l'expertise métier de SADE, conception par le CEA de la solution robotique en fonction de l'objectif visé. Ici, la réhabilitation de conduites en fonte de 100 à 150 mm de diamètre, en limitant les terrassements et avec une reprise des branchements par l'intérieur, de façon entièrement autonome.

3. Prototypage

Développement et intégration des différents composants nécessaires à la réalisation du système : miniaturisation mécatronique par l'intégration dans un gabarit réduit d'outils de perçage, de réalésage et de pose ; ajout de capteurs avancés de vision stéréoscopique ; mise au point d'une chaîne opératoire complète permettant l'inspection, le repérage, le nettoyage et la pose de patches d'étanchéité.

4. Validation in-situ

Une fois mis au point en laboratoire, le procédé a été testé sur la plateforme d'essais de SADE à Melun. Résultat : une réduction de 70 % de l'emprise des chantiers, 40 % de leur durée et 70 % de leurs émissions de gaz à effet de serre.

5. Industrialisation et transfert

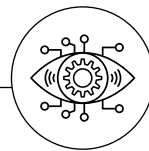
Lancement, fin 2025, de la solution TUBOCONTACT SD (acronyme de *Tubocontact small diameters*).

« La réussite de ce projet repose sur une démarche de coconception avec le CEA-List, qui a su nous écouter attentivement et intégrer nos besoins. Leurs équipes ont transformé les contraintes opérationnelles du terrain en solutions robotiques innovantes, en apportant leur expertise en robotique mobile autonome, mécatronique, perception embarquée... La solution intégrée mise en œuvre démontre qu'il est possible de détecter les branchements, de les localiser précisément et de rouvrir les branchements après chemisage. Le robot n'est pas seulement capable d'inspecter, il peut aussi usiner tout en se déplaçant dans des conduites d'eau de petit diamètre. Cette complémentarité entre savoir-faire scientifique et expertise métier a permis de développer une solution performante, directement adaptée aux enjeux des réseaux d'eau potable. » **Max Bodaud**, directeur de projets Innovation - SADE

CINQ CAPACITÉS CLÉS

Panorama des différents axes de recherche explorés au CEA pour mettre au point des systèmes robotiques intelligents et de confiance. Combinées au sein d'architectures robotiques, ces capacités permettent aux systèmes de percevoir, comprendre, décider et agir dans leur environnement.

LA PERCEPTION VISUELLE



Ce que le robot « voit »

Le principe

Permettre au robot de recueillir des informations, notamment visuelles, pour bien comprendre son environnement.

Les technologies

Des caméras ou des capteurs 3D (tels que les lidars) pour deux principaux types d'opération: la manipulation d'un objet qui nécessite au préalable d'en reconnaître la forme et la position; l'intervention mobile demandant la géolocalisation précise du robot à tout instant. Cette géolocalisation peut être renforcée par la fusion de plusieurs capteurs de nature différente, par exemple une centrale inertielle associée à une caméra pour pallier le rendu flou de la caméra lors d'un mouvement rapide.

Des méthodes d'IA, comme les modèles vision-langage (VLM) peuvent également enrichir ces données visuelles par des informations sémantiques, par exemple la nature et le nom de l'objet ou la présence d'humains ou d'autres robots. Le robot peut alors décider de franchir ou de contourner un obstacle en

fonction de sa nature, ou d'effectuer un geste précis, par exemple ouvrir une porte.

Les applications

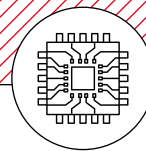
- Tri de déchets: analyse de la nature, de la forme et de la position du déchet pour en permettre la saisie et le dépôt à l'endroit approprié pour le tri.
- Mesures radiométriques: cartographie complète des mesures d'un site nucléaire ou d'une zone d'accident.
- Détection d'anomalies sur des pièces industrielles et/ou dans les tâches d'assemblage robotisé.

Les perspectives

Plusieurs défis restent à relever: la recherche de la perception optimale à moindre coût par la fusion de capteurs, l'enrichissement des données sémantiques avec les vocabulaires spécifiques aux différents domaines industriels, le renforcement des capacités de précision et de robustesse en fonction des contraintes d'environnement, et enfin l'amélioration de la représentation des informations utiles aux robots mobiles, par exemple pour leur permettre de mieux gérer la mémoire des éléments cartographiés précédemment.



LA PROGRAMMATION INTUITIVE



Transmettre des instructions au robot

Le principe

Doter les systèmes robotiques de la capacité à générer automatiquement le séquençement d'actions à partir des instructions fournies par l'humain, *via* une interface graphique ou une description en langage naturel, en s'appuyant sur des approches d'IA symbolique et générative.

Les technologies

Des modèles de langage (LLM) et de VLM pour interpréter des instructions orientées objectif, un jumeau numérique du système robotique utilisé comme interface graphique de programmation, des planificateurs pour décomposer ces objectifs en séquences d'actions élémentaires et des orchestrateurs agentiques pour superviser leur exécution.

L'application

La programmation intuitive permet à des opérateurs non spécialistes de définir des objectifs de haut niveau sans avoir à pro-

grammer directement les mouvements ou les trajectoires du robot.

FOCUS



Démonstrateur de robotique intelligente pour le démontage de batteries de véhicules électriques. L'opérateur peut demander, *via* un prompt textuel, de retirer un module ou de démonter un capot, et le système génère et exécute la séquence d'actions correspondante.

Les perspectives

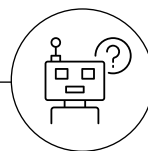
Il s'agit de déployer sur des cas d'usages industriels des architectures hybrides combinant un LLM pour l'interprétation des instructions et des compétences robotiques modulaires pour l'exécution, jusqu'à des approches bout-en-bout de type VLA (*Vision-Language-Action*) permettant de générer directement des actions à partir d'images et de consignes en langage naturel.



© R. Poulvère/CEA

LES MODÈLES DE MONDES

Aider le robot à comprendre le monde et l'humain avec lesquels il interagit



Le principe

Construire une représentation exploitable du monde permettant le raisonnement, la planification et la simulation.

Les technologies utilisées

L'intégration de briques technologiques du CEA couvrant la compréhension du langage naturel, la perception, la représentation du monde, la simulation physique, la planification et le contrôle robotique. Ces technologies s'appuient sur OpenUSD, un format ouvert de description de scènes 3D développé initialement par Pixar et aujourd'hui au cœur de l'écosystème NVIDIA Omniverse. Ce socle permet aux différentes briques d'échanger des données et de partager une représentation commune de l'environnement. Il facilite également la génération de données synthétiques et l'entraînement de modèles d'IA avancés, notamment de type VLA, capables de relier la perception visuelle, les instructions en langage naturel et les actions robotiques.

L'application

Création d'une plateforme de représentation et de simulation du monde intégrant les différentes capacités robotiques dans un environnement numérique partagé. Elle facilite la préparation et la validation de missions robotiques, la génération

de données synthétiques, l'entraînement de modèles d'intelligence artificielle ainsi que l'évaluation de stratégies avant leur déploiement sur des systèmes réels. L'un des enjeux est de permettre au système de comprendre les consignes de l'opérateur tout en tenant compte automatiquement des contraintes géométriques et physiques de l'environnement afin de planifier des actions réalisables.

FOCUS



À partir d'un jeu de données décrivant l'objet et des consignes fournies par un opérateur, la plateforme construit une représentation virtuelle de la scène, identifie les pièces à manipuler, détermine les stratégies de préhension adaptées et génère un plan d'assemblage pour le système robotique. La simulation permet ensuite d'en vérifier la faisabilité et d'évaluer différentes séquences d'assemblage avant leur exécution sur le système réel.

Les perspectives

Après la phase d'intégration des briques logicielles de la plateforme, l'étape suivante sera son déploiement sur des cas d'usage industriels.

LE JUMEAU NUMÉRIQUE

Le principe

Contrôler à distance des systèmes mobiles pour leur faire effectuer des tâches complexes.

Les technologies utilisées

Un jumeau numérique est une représentation virtuelle d'un système robotique et de son environnement, synchronisée avec le système réel grâce aux données issues des capteurs et des modèles physiques. Il permet de visualiser, simuler et analyser le comportement du robot avant, pendant ou après son exécution. Initialement conçu pour répondre aux besoins de formation des opérateurs, ce jumeau numérique est aujourd'hui utilisé pour valider directement les missions du robot et d'éventuelles opérations à effectuer en urgence, ou encore pour suivre en temps réel l'usure prématurée d'une de ses pièces ainsi que sa consommation énergétique et l'utilisation de la batterie.

Les applications

Elles concernent les opérations de téléopération, de supervision et de maintenance de systèmes robotiques en environnements complexes. Par exemple, l'assainissement de sites nucléaires : des robots mobiles, assistés par des jumeaux numériques qui reproduisent fidèlement la configuration dans laquelle ils évoluent (accès difficiles ou encombrés, empilements de fûts en hauteur près des plafonds, etc.).

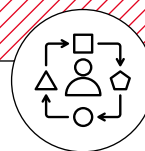
Les perspectives

L'effort sera porté sur l'utilisation des jumeaux numériques en parallèle des machines réelles afin de fournir une vision situationnelle plus précise et des indicateurs supplémentaires, par exemple pour la maintenance prédictive.



LA SUPERVISION

Adapter le robot à l'humain et à son environnement

**Le principe**

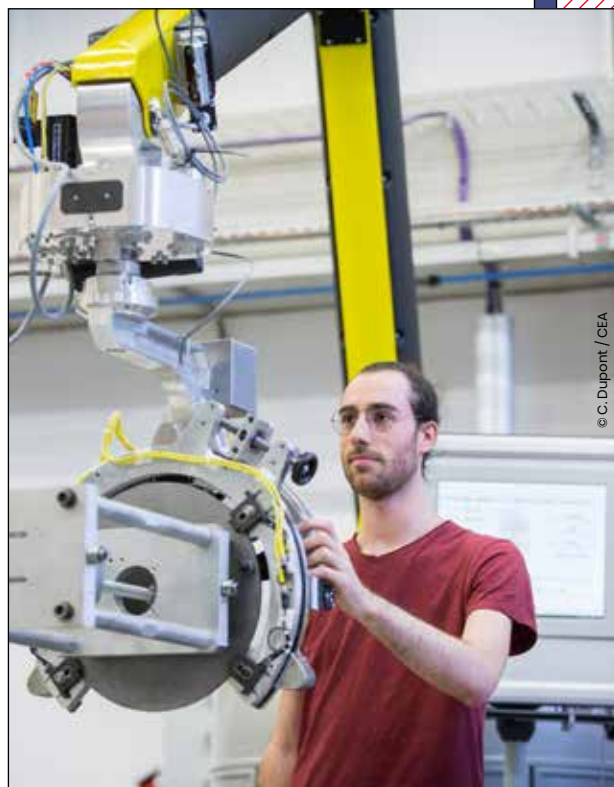
Grâce à la programmation par démonstration, l'opérateur montre au robot comment exécuter les tâches et le robot le fait automatiquement. Le jumeau numérique couplé au robot produit en temps réel une représentation 3D de son environnement, lui permettant de s'adapter de manière robuste aux variations et incertitudes de la scène.

Les technologies

Un ensemble de compétences robotiques associées à des modalités d'interaction (téléopération à retour d'effort, *motion capture*, *hand guiding*, réalité virtuelle) adaptées au procédé à réaliser, le tout couplé à un jumeau numérique interactif qui fournit à la fois une interface naturelle pour l'opérateur et des assistances au guidage du robot (guides virtuels, anticollision) pour faciliter le pilotage et l'apprentissage.

L'application

Les technologies de supervision trouvent des applications dans la téléopération, l'apprentissage par démonstration, la maintenance à distance et les interventions en environnements dangereux.



© C. Dupont / CEA

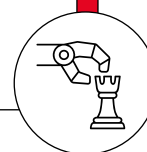
FOCUS

Parmi les cas d'usage du projet européen JARVIS, on développe la manipulation à distance et en temps réel de matériaux contaminés dans le cadre du démantèlement d'installations nucléaires. Grâce à un système de téléopération *via* du *motion capture* et une caméra 3D, le robot identifie et localise les éléments à démanteler et exécute précisément les tâches de démantèlement apprises par l'opérateur (cisaille de tubes, découpe laser de surfaces, etc.).

Les perspectives

L'objectif est d'automatiser les tâches répétitives tout en renforçant l'assistance apportée à l'opérateur. Les travaux portent notamment sur le développement d'interfaces plus intuitives, la commande vocale, l'apprentissage accéléré de nouvelles tâches et l'intégration d'outils d'IA capables d'assister les opérateurs dans la préparation et la supervision des missions.

Adapter le geste du robot aux objets manipulés



Le principe

Permettre aux robots d'interagir physiquement avec leur environnement afin de saisir, déplacer, assembler ou manipuler des objets de formes, de tailles et de propriétés variées. L'un des enjeux est de développer un système mécatronique capable d'effectuer des fonctions complexes en termes de préhension, de transfert, voire de manipulation d'objets hétérogènes. La main humaine est souvent considérée comme un modèle de référence en raison de sa dextérité et de sa polyvalence.

Les technologies

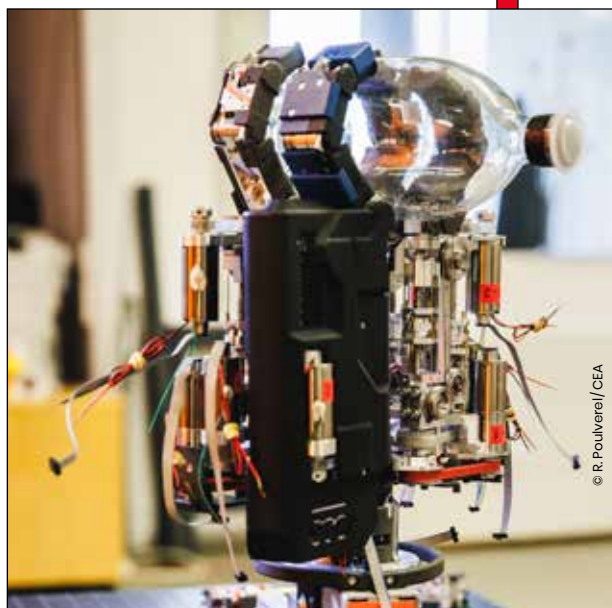
Le développement de préhenseurs pluridigitaux constitue l'un des défis les plus complexes de la robotique, car ils combinent perception fine, contrôle moteur avancé et interaction physique riche. Pour s'approcher de la dextérité humaine, ces systèmes intègrent des actionneurs et des capteurs multimodaux (vision, tactile et kinesthésique) qui lui permettent de percevoir son environnement et d'agir de manière autonome. Le robot doit planifier la saisie d'un objet en déterminant quelle est la meilleure stratégie à adopter pour garantir sa stabilité.

L'application

Les technologies de manipulation robotique trouvent des applications dans l'industrie manufacturière, la logistique, la pharmacie, l'agroalimentaire ou encore la santé, partout où des objets doivent être manipulés avec précision et fiabilité.

Les perspectives

Elles visent à combiner modèles d'intelligence artificielle, de perception multimodale et d'interaction physique afin de permettre aux robots de généraliser leur capacité de manipulation à de nouveaux objets et de nouvelles situations, tout en garantissant la fiabilité des actions réalisées.



© R. Poulverel / CEA

FOCUS



Manipulation de produits pharmaceutiques. Tracebot, un préhenseur pluridigital (voir La Revue du CEA n° 5), est doté de quatre doigts équipés de capteurs tactiles. Il intègre des algorithmes de contrôle-commande à base de réseaux de neurones.

L'innovation à l'épreuve du réel

Pour soutenir ses recherches et faciliter le transfert de ses technologies vers l'industrie, le CEA opère des plateformes d'innovation uniques pour accélérer la montée en maturité des solutions et préparer les conditions d'un déploiement industriel. C'est le cas de Prism au CEA-List.

Prism est une infrastructure technologique dédiée au test et à l'expérimentation des technologies numériques pour l'industrie du futur. Acronyme de *Platform for Research In Smart and Sustainable Manufacturing*, cette plateforme a été pensée comme un écosystème intégré de services, de technologies et d'équipements pour expérimenter des cas d'usage industriels et développer des solutions innovantes.

Ses capacités s'appuient sur les résultats concrets des projets de recherche du List. Les technologies ayant atteint un niveau de maturité suffisant y sont intégrées. Prism s'est déployé en plusieurs étapes : après Prisma en 2024 au service de la continuité de la chaîne numérique dédiée à la fabrication additive, R2I a été ouverte en 2025 pour une offre robotique interactive et intelligente. Trois nouvelles capacités verront le jour en 2026, incluant le jumeau numérique,

l'ingénierie logicielle et systèmes, ainsi que les applications de l'IA.

PRISM s'inscrit au cœur de la démarche d'innovation ouverte, en proposant des espaces de type *Lab2Fab* (du laboratoire à la fabrication). Complémentaire des autres plateformes du List, matérielles ou logicielles, elle permet leur interconnexion et leur interopérabilité, favorisant ainsi l'agilité, l'innovation et le passage à l'échelle.

PRISM est ouverte aux ingénieurs-chercheurs du CEA-List et à leurs partenaires industriels, *via* les services de AI-MATTERS¹, le club affilié DEFI-Lab, ou encore dans le cadre de projets R&D collaboratifs ou bilatéraux. ●

(1) AI-MATTERS est un réseau européen de TEF (*Testing and Experimentation Facilities*) qui vise à renforcer la résilience et l'agilité du secteur manufacturier européen, en mettant en œuvre les dernières avancées en intelligence artificielle, robotique et systèmes intelligents et autonomes.

↓ L'espace R2I avec un jumeau numérique d'une ligne de production.



© CEA



Vers plus d'INTERACTIVITÉ, d'AUTONOMIE et d'INTELLIGENCE

Si le temps des robots généralistes n'est pas encore advenu, ce sont les nouveaux usages dopés par l'arrivée de l'IA qui favorisent le développement actuel et futur de la robotique. Avec plusieurs défis à relever.

Si des secteurs industriels comme l'automobile, l'énergie et la santé utilisent déjà des systèmes robotiques, ils demandent toujours plus de flexibilité, d'autonomie et d'intelligence. Ces nouvelles capacités dessinent également des perspectives importantes pour de nombreux autres secteurs, comme le BTP, la logistique, l'agriculture et la maintenance d'infrastructures, notamment pour l'assainissement-démantèlement (ponts, bâtiments, etc. ; voir *La Revue* n°4). Un gros effort de développement reste nécessaire pour répondre à la diversité des besoins et à la complexité des opérations et des installations visées.

S'adapter à l'évolution des produits

Au-delà de l'automatisation de tâches répétitives, les industriels recherchent également des systèmes plus flexibles, capables de s'adapter à l'évolution des produits, des procédés ou des environnements. C'est précisément ce qui explique l'intérêt croissant pour les technologies d'IA, qui confèrent aux systèmes robotiques des capacités de perception, de compréhension, de décision et *in fine* d'actions dans des contextes plus ouverts, plus variés et évolutifs. L'utilisation grandissante de l'IA dans les

systèmes robotiques soulève toutefois des questions majeures d'embarquabilité, d'intégration dans des systèmes physiques réels, d'explicabilité, de robustesse, de fiabilité et de répétabilité de leurs actions. Pour y répondre, le CEA a mis en place le programme Machines intelligentes qui vise à renforcer la structuration transverse et la coordination des expertises de ses différentes équipes afin de répondre rapidement à ces enjeux difficiles.

Résoudre des défis majeurs

L'objectif est d'accélérer le développement et l'intégration multidisciplinaire de systèmes intelligents combinant perception, mécatronique, robotique, jumeau numérique, IA et simulation pour des environnements industriels critiques. Ils cherchent notamment à résoudre plusieurs défis scientifiques majeurs : la prise de décision face à des informations partielles ou incertaines, l'adaptation à des situations inédites malgré la disponibilité limitée des données, la coordination intelligente entre plusieurs fonction basées IA (« les agents ») et la validation de systèmes autonomes de plus en plus complexes. Les équipes du CEA explorent la combinaison entre modélisation, simulation et apprentissage afin de concevoir des systèmes plus adaptatifs, tout en conservant les garanties nécessaires en matière de robustesse, d'explicabilité et de confiance.

Ces travaux s'inscrivent autour de plusieurs enjeux stratégiques, qui sont au cœur des développements du CEA : renforcer la souveraineté technologique française et européenne et favoriser le transfert de technologies, construire une IA de confiance et accélérer la transition numérique de l'industrie. ●

Renforcer la recherche et l'innovation dans le domaine des énergies

Par **Alexandre Legris**,
directeur de l'Agence de programme
« Énergies décarbonées »



Une des priorités de l'État concernant la recherche et l'innovation est de renforcer la réflexion stratégique en améliorant l'articulation entre les différents acteurs afin d'optimiser l'organisation globale de l'écosystème de la recherche et de l'innovation, et de produire des études prospectives pertinentes. La création d'agences de programmes sur des thématiques spécifiques, aux côtés d'une recherche fondamentale forte. La transition énergétique constitue un des défis majeurs pour la société avec l'objectif d'atteindre la neutralité carbone en 2050. Pour répondre aux enjeux associés à cette transition et trouver des solutions efficaces, la création de l'agence de programme « Énergies décarbonées » (APED), hébergée au CEA, vise à renforcer la recherche et l'innovation dans ce domaine, en y intégrant l'ensemble de ses dimensions sociétales (engagement et adhésion de la société, incitations économiques et régulation...).

L'APED doit parvenir à disposer d'une vue d'ensemble sur la situation nationale et européenne dans le domaine et a été constituée de manière indépendante par rapport aux activités de recherche menées en propre par le CEA sur les énergies ; elle couvre ainsi des sujets de recherche en énergie qui ne sont pas traités au CEA. Elle a pour mission de développer une approche intégrée (de l'amont avec l'aval en ligne de mire) et systémique qui ne se limite pas à une liste de technologies, mais prenant bien en compte comment elles se combinent et interagissent dans la logique d'apporter des solutions pour la transformation énergétique. Les domaines de l'agence couvrent : les technologies de production/transformation de l'énergie, les modes de transport et de stockage de cette énergie, les réseaux énergétiques et la compréhension du fonctionnement de ces derniers ; la maîtrise des matières indispensables au développement énergétique dans une approche d'économie circulaire (connaissance ou conception des matériaux, géopolitique des matières, recyclage, substitution des matériaux critiques) ; et

la compréhension des pratiques d'adoption des technologies et des solutions dans une logique de construction d'un système sociotechnique en lien avec les sciences humaines et sociales et l'industrie.

L'analyse réalisée à sa création a conduit l'APED à cibler ses premiers travaux sur plusieurs thématiques :

- les systèmes nucléaires futurs, qu'ils soient de fission ou de fusion, pour de nombreuses applications (électrogène, chaleur urbaine ou industrielle, cogénération, synthèse d'hydrogène...);
- l'énergie photovoltaïque, les énergies éoliennes et les énergies marines;
- les batteries pour des aspects de mobilité et de stockage de l'énergie;
- les biocarburants pour la mobilité;
- les systèmes énergétiques et les réseaux;
- l'analyse des cycles de vie de l'hydrogène pour la mobilité, le stockage et la décarbonation de l'énergie et de l'industrie;
- l'accessibilité des matériaux critiques indispensables aux systèmes énergétiques;
- le cycle du carbone et sa valorisation.

L'APED ambitionne d'être stratège dans son domaine et de participer à la définition et à la gestion de thématiques de recherche prioritaires, d'agir pour organiser la veille scientifique de son domaine de compétences, d'interagir avec les homologues européens et internationaux et de veiller au développement des infrastructures de recherche. Elle peut aussi proposer des programmes de recherche à la puissance publique ou répondre à des sollicitations, comme lors de la réalisation du travail de réflexion sur les priorités de recherche et développement en déclinaison de la *Revue nationale stratégique*, mené en 2025 et qui a été présenté début 2026 lors d'un séminaire avec les administrations en présence du ministre en charge de la Recherche.

Le fonctionnement de l'agence est collégial. Constituée de collaborateurs issus du CEA, du CNRS, de l'Ifpen et des universités,

l'équipe APED (une dizaine de personnes, la plupart à temps partiel) travaille en forte interaction avec trois comités. Le Comité des partenaires, présidé par l'administratrice générale du CEA, fonctionne comme un « conseil d'administration » qui définit ses orientations, approuve sa feuille de route et valide ses actions. Y sont représentés l'ensemble des acteurs académiques (organismes, Epic, établissements universitaires et écoles d'ingénieurs) ainsi que des représentants des filières industrielles et des agences de l'État (ANR, SGPI, SGPE, etc.). La mise en œuvre concrète des actions de l'APED est discutée au sein du Comité opérationnel présidé par le directeur des Énergies du CEA. Deux fois par an, l'APED présente son action et ses perspectives aux administrations siégeant au sein du Comité de liaison présidé par le directeur général pour la Recherche et l'Innovation.

« La transition énergétique constitue un des défis majeurs pour la société avec l'objectif d'atteindre la neutralité carbone en 2050. »

Pour la période à venir, l'APED s'est fixé trois objectifs concrets : assurer le suivi pour le compte de l'État des trois nouveaux PEPR que l'agence avait proposés et qui ont été retenus (« Sciences amont pour le nucléaire », « E-biocarburants » et « Réseaux énergétiques du futur »), produire entre quatre et six papiers de position par an pouvant éventuellement donner lieu à la construction de nouveaux programmes de recherche et établir une cartographie nationale des compétences de recherche dans le domaine des énergies, qu'elle mettra périodiquement à jour et partagera avec ses tutelles et ses partenaires. ●

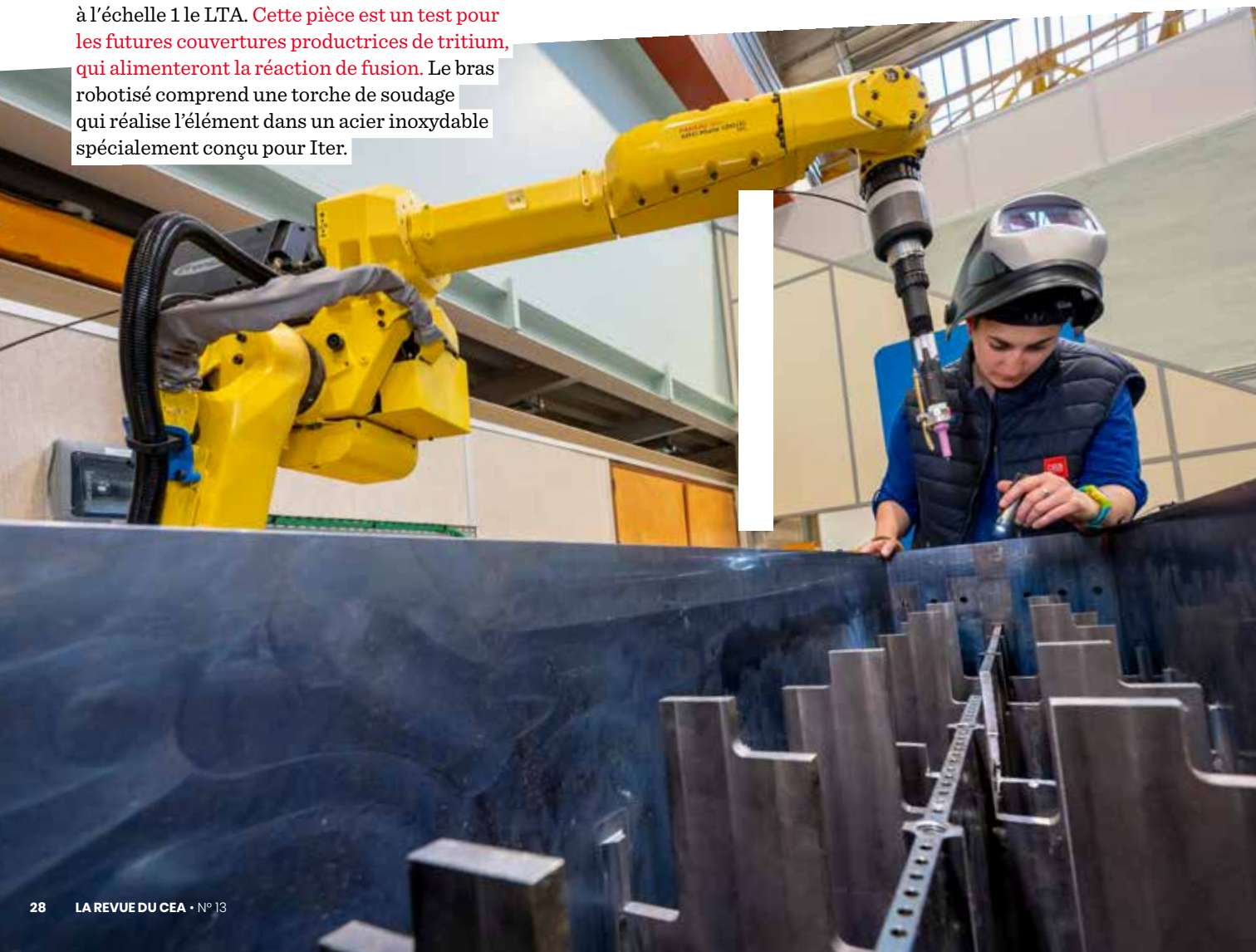
ASSEMBLER et DÉASSEMBLER l'avenir pluriel du nucléaire

1

Drôle de labyrinthe de métal qui s'offre à nous ! C'est en réalité un élément clé d'Iter que reproduit à l'échelle 1 le LTA. Cette pièce est un test pour les futures couvertures productrices de tritium, qui alimenteront la réaction de fusion. Le bras robotisé comprend une torche de soudage qui réalise l'élément dans un acier inoxydable spécialement conçu pour Iter.

À Saclay, le Laboratoire des technologies d'assemblage (LTA) développe des procédés de soudage, de fabrication additive et de découpe laser pour le nucléaire d'aujourd'hui et du futur, ainsi que pour le démantèlement.

Reportage L. Godart / CEA





2

Pour tester ou réaliser des pièces pour le nucléaire, le LTA dispose de plusieurs plateformes, comme cette cellule de fabrication additive. La tête laser vient fondre et déposer progressivement un fil de métal afin de former l'objet. Cette technique, dite WLAM, est dérivée du soudage.



3

Elle permet de fabriquer rapidement des grandes pièces, comme ici une tranche d'un divertor pour la fusion nucléaire.



4

Plus loin, la plateforme de soudure laser sert à la réalisation d'assemblages, tel ce porte-éprouvettes qui sera irradié en réacteur expérimental.



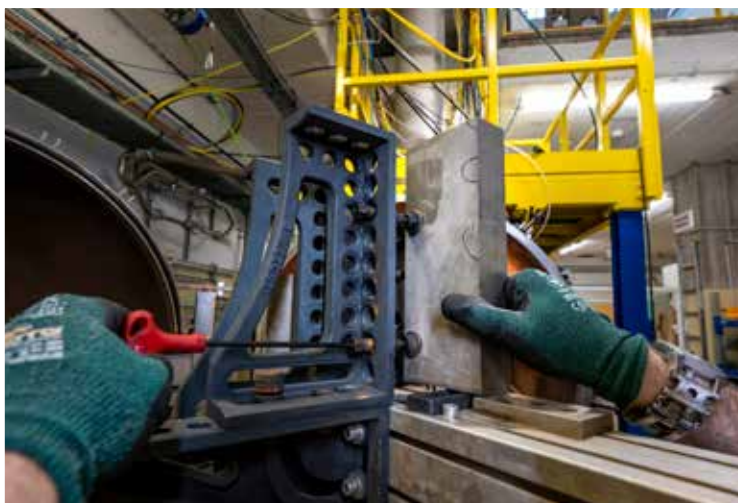


*Découvrez comment
le CEA accompagne
le démantèlement
à Fukushima.*

5

Le LTA travaille également à la découpe laser pour le démantèlement.

Sa plateforme Delia comporte une enceinte de 5m³, qui peut être mise en eau et reproduit les conditions de pression équivalentes au fond des piscines de réacteurs en démantèlement. De quoi expérimenter la découpe de différents matériaux, comme ici un bloc d'acier inoxydable.

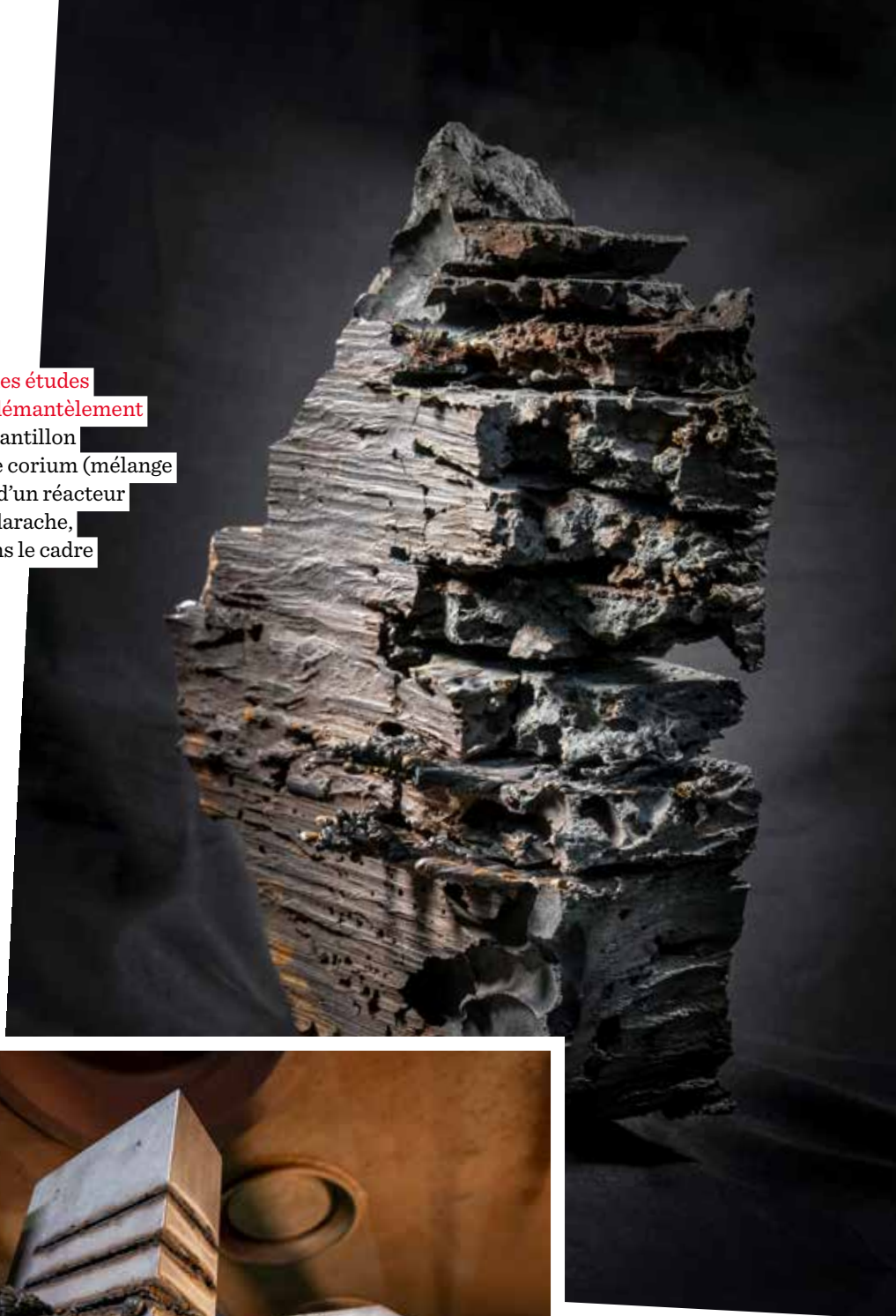


6

Une fois l'enceinte fermée, les opérations sont pilotées à distance. La tête de découpe laser attaque l'échantillon d'acier inoxydable.

8

Le LTA participe ainsi à des études de découpe laser pour le démantèlement de Fukushima. Ici, un échantillon non radioactif simulant le corium (mélange issu de la fusion du cœur d'un réacteur nucléaire), fabriqué à Cadarache, a été découpé au laser dans le cadre d'une campagne de tests.



7

Les traits de découpe, réalisés à différentes puissances et vitesses, sont clairement visibles sur cet échantillon de forte épaisseur.

Les maladies infectieuses

Les maladies infectieuses peuvent générer des catastrophes sanitaires à l'échelle régionale, voire planétaire, désorganisant nos sociétés et impactant sévèrement notre économie. La pandémie de Covid-19 nous l'a rappelé. Elle a aussi montré l'importance de disposer de filières souveraines. L'anticipation et la préparation de ces crises constituent ainsi des enjeux majeurs de santé publique, auxquels le CEA contribue par sa recherche fondamentale, sa capacité à conduire des études précliniques et cliniques, ses développements technologiques allant des dispositifs de diagnostic aux stratégies thérapeutiques et vaccinales, et ses liens étroits avec le monde industriel.

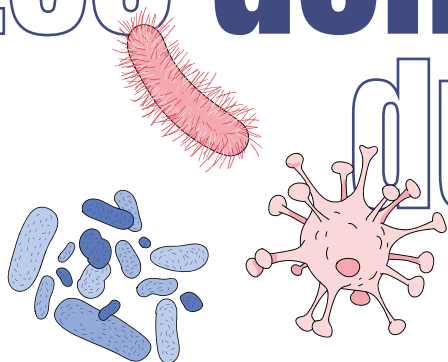
enjeu de santé publique

↓ Travail sur des agents pathogènes en laboratoire de haute
↓ sécurité biologique de niveau 3.





Les données du problème



Qu'est-ce qu'une maladie infectieuse ?

C'est une maladie provoquée par des micro-organismes pathogènes – bactérie, virus, parasite, champignon – ou des agents transmissibles non conventionnels comme les prions⁽¹⁾, qui pénètrent dans le corps humain (ou animal). Elle peut être bénigne, comme le rhume, ou très grave, comme le sida ou la fièvre Ebola.

(1) Les prions sont des protéines naturellement présentes dans l'organisme. Leur pouvoir pathogène est lié à un changement de structure tridimensionnelle.

Comment se propagent ces maladies ?

Lorsqu'elle est contagieuse, une maladie infectieuse peut se transmettre d'une personne à l'autre, directement (contact interhumain, gouttelettes respiratoires, fluides biologiques) ou indirectement (par exemple par des moustiques, de l'eau ou des aliments contaminés, voire des surfaces inertes).



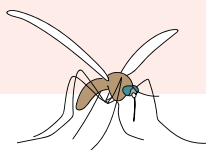
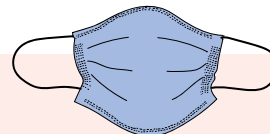
Quels risques ?

Apparition de maladies émergentes, comme le sida, le chikungunya ou la Covid-19. Ces nouvelles maladies sont liées à l'irruption au sein d'une population humaine d'un agent pathogène provenant d'un réservoir animal ou environnemental, ou d'une version mutante d'un agent pathogène existant.

Maladies réémergentes, comme le choléra, la rougeole ou la peste. Ces maladies connues, peu répandues, voire éradiquées dans de nombreux territoires, peuvent réapparaître en s'étendant géographiquement ou en devenant plus transmissibles ou plus sévères.

Antibiorésistance. C'est un phénomène qui consiste, pour une bactérie, à devenir résistante aux antibiotiques. Il est lié à un usage abusif et souvent incorrect de ces médicaments, en santé humaine ou animale. L'OMS l'a identifiée comme l'un des dix plus sérieux risques de santé publique pour l'humanité.

Épidémies et pandémies. Les maladies infectieuses peuvent se propager rapidement et causer un grand nombre de cas. Une épidémie est locale, cantonnée à une région géographique. Une pandémie est planétaire. Toutes deux peuvent être limitées dans le temps ou durer, comme avec le sida. On parle alors de maladies endémiques.

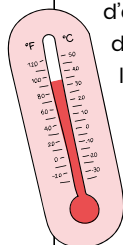


Quels facteurs d'émergence ?

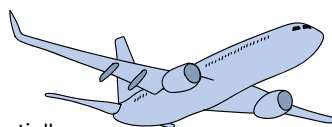
Les raisons pour lesquelles les maladies infectieuses apparaissent ou réapparaissent sont multiples, et peuvent se combiner entre elles.

Le changement climatique,

induisant le déplacement d'espèces animales vers de nouveaux territoires et l'exposition des populations qui y vivent à des agents potentiellement pathogènes.



La mondialisation, et avec elle l'augmentation exponentielle de la circulation des personnes et des biens de consommation qui dissémine les agents infectieux à l'échelle planétaire.

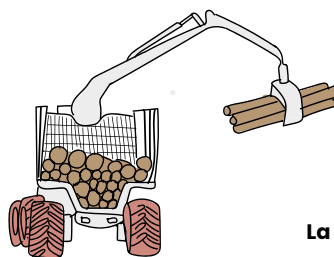


Les situations géopolitiques

(guerres, instabilités) et leurs impacts sur les campagnes de vaccination, la surveillance sanitaire et les antibiorésistances.

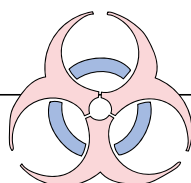
Des facteurs économiques, culturels

et sociétaux : déforestation, modification des pratiques d'élevage et des habitudes alimentaires, marchés d'animaux vivants, etc., qui multiplient les contacts entre les espèces animales et les humains.

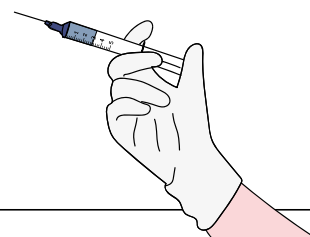


La désinformation, notamment sur les vaccins.

Le bioterrorisme (dissémination volontaire d'un agent pathogène).



L'évolution naturelle génétique des agents pathogènes.



DES MALADIES INFECTIEUSES PRIORITAIRES

En France, le Haut conseil de la santé publique a identifié une liste de maladies infectieuses (ou groupes de maladies) prioritaires à l'échelle nationale : fièvres hémorragiques virales, ensemble des viroses respiratoires, arboviroses transmises par les moustiques, infections liées à des bactéries multirésistantes aux antibiotiques, infections invasives à méningocoques et à pneumocoques, maladies à prions, rage et tuberculose.



Quels liens entre le changement climatique et les maladies infectieuses ?

Valérie Masson-Delmotte, experte internationale du climat, et **Roger Le Grand**, spécialiste des maladies infectieuses, en débattent.





Bâtir un écosystème coordonné pour mieux gérer les épidémies



Roger Le Grand, directeur d'Idmit de 2012 à 2026, l'infrastructure de recherche dédiée aux maladies infectieuses humaines



© Isabelle Mangoot / CEA

Comment mieux se préparer aux éventuelles pandémies à venir ?

Roger Le Grand — Cette réflexion impose une prise en compte globale de la santé, dans une approche *One Health* incluant la santé humaine, celle des animaux, et l'environnement, en allant de la R&D aux aspects socio-économiques. Elle implique aussi des investissements financiers importants et sur le long terme. Si les vaccins à ARN messager ont pu être proposés lors de la crise de la Covid-19, c'est parce la communauté scientifique disposait déjà d'un capital de 25 années de R&D et de maturité sur le sujet : l'innovation s'anticipe !

Tout un continuum doit être préparé, de la recherche amont jusqu'au déploiement sur le terrain selon divers scénarios de distribution préalablement envisagés, en passant par les essais précliniques, puis cliniques, la production de contre-mesures en grande quantité, etc., avec des acteurs entraînés à travailler ensemble. Au moment de la crise, les États doivent aussi être prêts à prendre des risques financiers, en soutenant par exemple des projets de vaccins. J'inclus également le volet juridique, tout aussi important. Ce que Moderna avait par exemple anticipé aux États-Unis, en négociant

en amont les conditions de propriété intellectuelle et de transfert des technologies futures, les conventions entre partenaires, etc. Le cadre réglementaire français gagnerait également à être optimisé, de manière à accélérer les procédures en cas de crise, par exemple pour pouvoir disposer très rapidement d'échantillons biologiques sans avoir à suivre les longues procédures habituelles. Construire un écosystème complet et coordonné est l'un des enjeux clés pour l'avenir. Et cela nécessite une volonté politique très forte.

La question de la souveraineté est aussi essentielle...

R. Le G. — Oui, et à tous les échelons, ce qui suppose des investissements massifs, notamment dans les moyens de production. Et soyons réalistes, cette stratégie n'est quasiment envisageable qu'à l'échelle européenne, en s'appuyant sur une politique d'investissements. Bien sûr, nous devons veiller à préserver l'influence de la France, à la fois sur les politiques européennes et, en retour, sur une juste distribution des contre-mesures. Disposer en Europe de stocks de réactifs pour développer de nouveaux vaccins, ainsi que d'outils pour leur

assemblage (des automates de production par exemple, qui peuvent être chinois) est également critique. Tout comme la constitution de stocks stratégiques de vaccins, même si on peut se tromper. Certaines réémergences sont difficiles à anticiper. J'ajoute qu'être souverain ne se réduit pas qu'aux seules questions de santé publique. La diplomatie et la géopolitique à l'échelle internationale en font intégralement partie. L'épisode des commandes de vaccins contre la Covid-19 en est une claire illustration.

Quelle est la stratégie nationale de R&D sur les maladies infectieuses, et comment le CEA s'y insère-t-il ?

R. Le G. — Un ensemble de briques se met en place, du fait de subventions allouées par l'État, dans lesquelles le CEA est partenaire ou largement impliqué : la stratégie nationale d'accélération MIE-MN (Maladies infectieuses émergentes et menaces nucléaires, radiologiques, biologiques et chimiques), et celle sur les biothérapies et la bioproduction de thérapies innovantes, les actions de l'ANRS-MIE, le biocluster maladies infectieuses (IDCluster)¹, le renforcement de l'IHU Méditerranée infection. Et bien sûr le programme NRBC-E, du moins son volet B (biologique) si l'on parle des maladies infectieuses, piloté par le SGDSN² et mis en œuvre par le CEA depuis plus de 20 ans (voir p. 41).

À cela s'ajoutent d'excellentes initiatives d'acteurs de la recherche, comme celle du laboratoire commun créé entre le CEA,

l'AP-HP et l'entreprise de biotechnologie NG Biotech, pour développer des tests de diagnostic rapide des agents infectieux (voir p. 39).

Il manque encore à mon sens une mise en cohérence de ces briques, pour couvrir tout le continuum de la recherche et assurer une coordination maximale entre ces différents acteurs.

Qu'en est-il au niveau européen ?

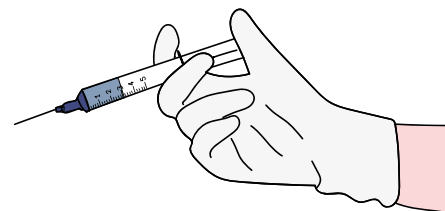
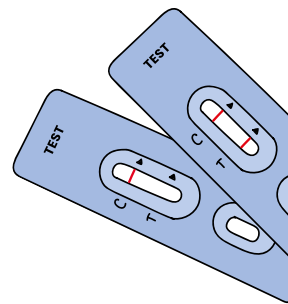
R. Le G. — Après la crise de la Covid-19, l'Union européenne a lancé plusieurs initiatives. Hera, l'Autorité de préparation et d'intervention en cas d'urgence sanitaire, a été créée pour prévenir, détecter et réagir rapidement aux urgences sanitaires. Tout comme l'*European Vaccine Hub*, un hub collaboratif visant à renforcer la souveraineté européenne en matière de vaccins, auquel le CEA contribue *via* Idmit (voir p. 42).

Un PIIEC³ santé a également été lancé. Sa première vague, Med4Cure, inclut la lutte contre l'antibiorésistance et les maladies émergentes. Plusieurs projets français figurent parmi ceux présentés, dont celui de création d'une plateforme intégrée de R&D et de production de vaccins à ARNm de nouvelle génération, porté par Sanofi avec le concours du CEA.

(1) Pôle européen coordonné par Lyonbiopôle et soutenu par la région Auvergne-Rhône-Alpes, IDCluster fédère les principales organisations nationales impliquées dans l'infectiologie.

(2) Secrétariat général de la Défense et de la Sécurité nationale.

(3) Projet important d'intérêt européen commun, dont le financement est partagé entre les États et des investisseurs privés.



« Si les vaccins à ARN messager ont pu être proposés lors de la crise de la Covid-19, c'est parce la communauté scientifique disposait déjà d'un capital de 25 années de R&D et de maturité sur le sujet : l'innovation s'anticipe ! »

Sur le terrain du NRBC, le CEA est aujourd'hui en position de leader européen sur les contre-mesures pour la menace biologique. C'est pourquoi nous avons été choisis pour coordonner deux grands programmes européens dans ce domaine, financés par le Fonds européen de défense (FED) : Counteract et Resilience, portant sur les contre-mesures médicales, les technologies d'identification des menaces biologiques et l'autonomie européenne.



Pourquoi le CEA a-t-il commencé à travailler sur le sida ?

(4) Système auto-organisé de cellules en 3D, représentatif de l'architecture et du fonctionnement d'un organe.

Concrètement, qu'apporte le CEA à la R&D sur les maladies infectieuses ?

R. Le G. — Notre longue expertise dans la lutte contre les risques NRBC est évidemment cruciale, tout comme notre manière de travailler. Si nous devons faire face à une nouvelle crise d'épidémie virale ou d'antibiorésistance, tout serait déjà en place : équipes et infrastructures, organisation en gestion de projets, qui autorise une grande réactivité, maîtrise des risques biologiques, nourrie par notre culture en matière de sécurité et de sûreté nucléaires, et capacité à mener des innovations jusqu'à des niveaux de maturité industrielle élevés.

Côté recherche, nous concourons, en partenariat avec d'autres acteurs comme l'Inserm, l'ANRS-MIE, l'AP-HP ou l'Institut Pasteur, à toute la chaîne, du fondamental au patient, de la prévention – avec les vaccins – aux thérapies. Le CEA se distingue en particulier sur les tests de diagnostic rapide des infections, sur la recherche préclinique, notamment au sein de notre infrastructure Idmit, sur la recherche clinique en lien avec des centres hospitaliers, et enfin sur les tests sans animaux. Ces derniers montent en puissance, s'appuyant sur les organoïdes⁴ et les modélisations, avec le recours à l'IA. L'instrumentation est également l'un de nos points forts, par exemple pour optimiser et automatiser le pilotage d'unités de bioproduction (de vaccins, d'anticorps, etc.) et leur contrôle qualité. C'est notamment ce que nous apportons à Sanofi au sein de leur projet de production de vaccins à ARNm, financé dans le cadre du PIIEC santé européen.

Nos capacités de calcul, parmi les plus puissantes en France, ont aussi été largement exploitées pour modéliser et anticiper l'évolution de l'épidémie de Covid-19.

Et en recherche fondamentale, nous pouvons compter sur des équipes et des experts reconnus mondialement dans leurs domaines, qui travaillent sur la compréhension des mécanismes d'action de ces maladies, la caractérisation des réservoirs de virus, le développement d'anticorps, de particules vaccinales, de molécules antivirales, etc. ●



« Être souverain ne se réduit pas qu'aux seules questions de santé publique. La diplomatie et la géopolitique en font intégralement partie. »

DIAGNOSTIC

Des tests pour détecter les malades

Depuis plus de vingt ans, le CEA s'est spécialisé dans la conception de tests de diagnostic rapide des maladies infectieuses. Ces outils, faciles à mettre en œuvre, sont des maillons essentiels de toute stratégie de lutte contre les pandémies. Retour sur le dernier test développé au CEA, détectant le virus monkeypox.

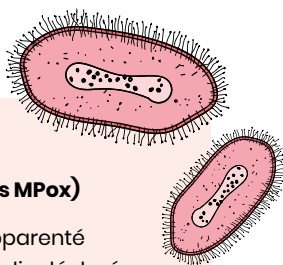
Mai 2022. Alors que le monde peine à s'extraire de la pandémie de Covid-19, de premiers cas de « variole du singe » – depuis renommée variole de type B – se déclarent en Europe, bien loin des régions endémiques de la maladie situées en Afrique. En quelques mois, l'épidémie se répand dans plus de 75 pays, dont la France qui comptabilisera entre 3 000 et 5 000 cas en un an.

Si la maladie semble relativement bénigne avec un faible taux de mortalité, les autorités sanitaires s'inquiètent de l'existence potentielle de variants du virus plus agressifs, voire d'une évolution vers des formes plus dangereuses, mais aussi de sa forte parenté avec celui de la variole, certes éradiqué depuis 1980 mais hautement mortel¹, transmissible (entre autres) par voie aérienne et très contagieux. D'autant plus qu'une partie de la population n'est plus vaccinée contre la variole. Si bien que l'OMS qualifie la maladie « d'urgence de santé publique de portée internationale » en juillet 2022.

Variole de type B

(anciennement variole du singe, puis MPox)

- > Virus (appelé monkeypox) à ADN apparenté au virus de la variole humaine, maladie déclarée éradiquée en 1980 grâce à la vaccination.
- > Transmission interhumaine par contact direct (lésions, muqueuses), indirect (par des objets contaminés) et *via* des animaux infectés (rongeurs).
- > Maladie bénigne, sauf pour les personnes fragiles ou immunodéprimées.
- > 78 % des cas localisés en Afrique ; circulation à bas bruit en France.
- > Vaccin disponible (contre la variole).
- > Pas de traitement efficace connu.



(1) Taux de létalité estimé entre 10 et 50 %.

(2) Détection de la Covid-19, Ebola, de résistances aux antibiotiques, de bactéries environnementales pathogènes (*Francisella tularensis*, *Yersinia pestis* et *Bacillus anthracis*), etc.

Des stocks d'anticorps disponibles

Les équipes du CEA, qui cumulent 20 ans d'expérience dans le développement de tests de diagnostic rapide², notamment dans le cadre du programme interministériel de R&D pour la lutte contre les menaces NRBC-E (voir encadré p. 41), se joignent à la mobilisation scientifique internationale. Comme les tests antigéniques utilisés lors de la pandémie de Covid-19, ces outils confirment en 15 minutes la présence du virus dans l'échantillon testé, par l'apparition d'une ligne colorée. Sur le principe, le fonctionnement est simple : le virus est pris



↑
Évaluation de tests de détection d'agents
biologiques pathogènes dans un laboratoire de haute
sécurité biologique L3.

faciliter le développement et le transfert industriel de nouveaux tests de diagnostic, avec une mise sur le marché plus rapide pour une réponse plus efficace face aux épidémies», rappelle Hervé Volland, responsable du laboratoire commun CEA-NG Biotech.

en sandwich entre deux anticorps qui reconnaissent chacun une partie de l'agent infectieux, le premier anticorps étant fixé sur le dispositif, le second portant un colorant. « *Nous disposons de stocks d'anticorps dirigés contre le virus monkeypox. Ceux-ci avaient été préparés dans le cadre de programmes de recherche antérieurs liés aux risques NRBC, du fait de la parenté du virus avec celui de la variole. Ils nous ont permis, très vite, de mettre au point un test de diagnostic rapide* », raconte Stéphanie Simon, responsable du Département médicaments et technologies pour la santé du CEA.

La méthode de travail est en effet bien rodée. Elle s'appuie sur un trio réuni depuis 2019 au sein d'un laboratoire commun : le CEA, qui développe et produit les anticorps, l'AP-HP, responsable de la validation clinique, et l'entreprise NG Biotech, en charge de l'industrialisation du test, de sa fabrication et de sa commercialisation. « *Nous avons monté ce laboratoire commun après quatre années de collaboration qui ont abouti à la commercialisation de trois tests de détection rapide d'antibiorésistances dans plus de 80 pays. Cette structure commune vise à*

Une performance validée

Dès le printemps 2022, à l'issue de quelques allers-retours entre les labos du CEA, le Centre national des orthopoxvirus de l'Irba³ et NG Biotech, les tests étaient disponibles en version préindustrielle et prêts pour la validation clinique, sur le terrain. L'épidémie européenne étant alors éteinte, l'évaluation s'est déroulée en République démocratique du Congo, courant 2024, en partenariat avec l'Institut de médecine tropicale d'Anvers et l'Institut national de recherche biomédicale de Kinshasa, ainsi qu'en Ouganda. Les données recueillies ont confirmé la bonne performance du test, sous réserve de respecter le mode de prélèvement de l'échantillon. « *Nos études sont désormais achevées, le test est prêt et commercialisé par NG Biotech en version RUO (Research Use Only), autrement dit à usage de recherche. En cas de crise sanitaire, il pourrait être déployé très rapidement à grande échelle* », résume Laurent Bellanger, en charge de la thématique biologie du programme interministériel NRBC-E pour la partie recherche fondamentale.



Retrouvez l'intervention de Stéphanie Simon sur les tests de diagnostic rapide, au Paris-Saclay Summit 2026.

⁽³⁾ Institut de recherche biomédicale des armées.

⁽⁴⁾ Maladies infectieuses émergentes et menaces nucléaires, radiologiques, biologiques et chimiques.

Ces tests de diagnostic rapide sont utiles à plus d'un titre. En cas de forte épidémie, ils permettent de rapidement repérer et isoler les malades, ralentissant ainsi la transmission de la maladie. « *En conditions de terrain difficiles, comme en Afrique, ces petits objets, peu chers, sont particulièrement pertinents. Facilement transportables et stockés à température ambiante, ils sont très simples à mettre en œuvre et ne nécessitent ni matériel de laboratoire ni électricité. Ils permettent par exemple de facilement distinguer les malades atteints de varicelle ou de la variole B, alors même que les signes cliniques sont identiques* », précise Stéphanie Simon.

La question de la souveraineté

Cet exemple illustre parfaitement la volonté française de disposer d'une filière souveraine. « *En 2021, le gouvernement présentait sa stratégie d'accélération MIE-MN⁴ et lançait les premiers appels à manifestation d'intérêt. Partant du constat que la France souffrait d'un important retard dans le domaine des tests rapides, NG Biotech, en partenariat avec le CEA et l'AP-HP, et dans la continuité de notre laboratoire commun, a proposé le projet DiagRaMIE* », explique Hervé Volland. Objectif : développer et pérenniser une filière française de tests de diagnostic rapide de maladies infectieuses et d'agents de la menace bioterroriste, indispensable pour être plus réactifs en cas de crise sanitaire. « *Avec DiagRaMIE, nous avons mis à profit nos connaissances et notre expertise acquises au sein du programme NRBC-E pour aller plus loin, vers l'industrialisation des tests, comme ici avec le cas de la variole B. L'idée est aussi d'anticiper les validations cliniques, en constituant des biobanques d'échantillons biologiques et des réseaux collaboratifs internationaux qui faciliteront les accès aux pays dans lesquels circulent ces agents pathogènes* », poursuit-il. D'autres projets sont en cours, par exemple pour détecter le champignon *Candida auris*, responsable d'une infection multi-résistante aux antifongiques et à la mortalité élevée dans ses formes invasives, ou encore la bactérie responsable de la peste, qui sévit en République démocratique du Congo et à Madagascar. ●



NRBC-E

Être prêts face aux menaces

Depuis 2005, le CEA met en œuvre le programme interministériel de R&D pour la lutte contre les menaces NRBC-E (nucléaire, radiologique, biologique, chimique, explosifs), piloté par le SGDSN (voir La Revue du CEA n°2). Focus sur le volet des maladies infectieuses.

Quel objectif ?

Aider les autorités à protéger les populations, sécuriser les grands événements et les installations vitales, ainsi que les soldats en opération.

Comment ?

En développant des technologies innovantes à la fois en matière de détection, de protection et de décontamination, et des solutions thérapeutiques, jusqu'au transfert industriel.

À l'actif du CEA sur les maladies infectieuses

- Constitution de banques et de stocks d'anticorps contre différents agents infectieux.
- Tests de détection ultrarapides d'agents infectieux.
- Contre-mesures médicales : développement de molécules thérapeutiques à large spectre et d'anticorps thérapeutiques dirigés contre des bactéries.
- Dispositifs portés en sac à dos pour générer des mousses de décontamination biologique, efficaces en 30 minutes contre des agents pathogènes.
- Simulation de la dispersion atmosphérique d'agents biologiques, par exemple rejetés sous l'effet d'une explosion ou d'une dissémination intentionnelle, aussi bien sur de vastes régions qu'à travers les rues d'une ville, et ses conséquences sanitaires.

CLINIQUE

Vers des traitements et des vaccins

Les équipes d'Idmit, infrastructure dédiée aux maladies infectieuses humaines, sont spécialisées dans les recherches précliniques et cliniques. Objectif : comprendre le mode opératoire de ces maladies et tester des traitements et vaccins. Une quinzaine d'entre elles sont ici étudiées, la dernière en date étant la variole de type B.

Dès les premiers cas de « variole du singe » (variole de type B) en mai 2022, l'équipe d'Idmit, bien qu'encore largement focalisée sur la Covid-19, se met immédiatement en ordre de marche. Très vite, une nouveauté intrigue les scientifiques : la maladie, essentiellement observée au sein de la population homosexuelle masculine, se transmet de manière accrue par voie sexuelle. « *Un mode totalement inédit pour ce type de virus apparenté à la variole* », souligne Jean-Nicolas Tournier, spécialiste du virus monkeypox à Idmit.

Plusieurs questions essentielles sont à résoudre dans les plus brefs délais, posées à la fois par les autorités de santé et les équipes scientifiques : comprendre les mécanismes de ce nouveau mode de transmission de manière à proposer des contre-mesures pertinentes, tester les modalités de vaccination et des molécules antivirales.

Avant toute chose, un modèle animal de l'infection par voie sexuelle (rectale) doit être mis au point chez le primate non

IDMIT EN BREF

- > Structure mixte (UMR) CEA-Inserm-Université Paris-Saclay.
- > Opérationnelle depuis 2018
- > 6 800 m² de locaux, dont des laboratoires de haute sécurité biologique de niveaux 2 et 3¹.
- > Des équipements de pointe, notamment d'imagerie *in vivo*, dont certains uniques en Europe.
- > 150 chercheurs et techniciens.



© L. Codard / CEA

humain (*voir encadré*), mimant le mieux possible les caractéristiques de la maladie chez l'homme. « *Nous devons nous assurer qu'une transmission par voie sexuelle induisait bien dans le modèle animal une infection généralisée, avec des lésions cutanées et sur les muqueuses, ainsi qu'une excrétion du virus dans les fluides séminal et rectal* », poursuit l'expert. Ce sera chose faite à Idmit en janvier 2023.

Vers une filière européenne de vaccins

Les équipes disposent alors de la souche du virus, isolée en mai 2022 par l'Irba, et de l'unique vaccin disponible, dirigé contre la variole, mais jamais évalué contre celle de type B en population humaine. Qu'en est-il de son efficacité, *a priori* possible ? Permet-il une protection sur le long terme ? Une vaccination dans les jours qui suivent la contamination, pendant la période d'incubation du virus, est-elle efficace, comme dans le cas de la variole ?

Les études sont lancées et les premiers résultats publiés : le vaccin administré avant l'exposition au virus par voie sexuelle protège correctement l'individu. Mais proposé quelques jours après, il est sans effet. Des données utiles pour ajuster les stratégies de vaccination et de prévention chez les populations à risque. La question de l'efficacité à long terme est tout aussi cruciale. Les observations de terrain ont en effet révélé une faiblesse : des individus vaccinés en 2022 ont pu être infectés environ deux ans plus tard. Les études chez l'animal, réalisées sur une durée de plusieurs années, sont toujours en cours. Elles permettront à terme de préciser les campagnes de rappel vaccinal. Côté traitement, le seul antiviral connu, là aussi contre la variole, est peu efficace. Des études pour tester de nouvelles molécules thérapeutiques sont d'ores et déjà envisagées.



Travail sous poste de sécurité microbiologique en laboratoire de sécurité de niveau 3.

De l'expérimentation animale

L'expérimentation animale chez le primate non humain reste parfois indispensable, du fait des grandes similitudes entre les systèmes immunitaires simiesque et humain. Les équipes veillent à limiter au maximum le nombre d'expériences et d'animaux, et à assurer les meilleures conditions possible pour ces derniers.

Partenaire de projets européens

Reconnu pour l'ensemble de ces travaux, Idmit est désormais partenaire de trois actions européennes de lutte contre la variole de type B. D'abord dans le cadre du programme Resilience en lien avec la thématique NRBC, pour développer un vaccin européen. « *En situation de pandémie, les capacités mondiales de production actuelles seraient totalement insuffisantes. Nous devons construire une filière européenne souveraine* », martèle Jean-Nicolas Tournier. Pour cela, la France dispose déjà d'un vaccin candidat développé à l'Irba, efficace à la fois contre les varioles de type A (éradiquée) et B, à des doses injectées 100 fois moins importantes que celles du vaccin contre la variole. Ce qui laisse présager des capacités de production multipliées par 100. Un vaccin de génération suivante, à base d'ARN messenger, est également à l'étude.

Les deux autres projets, Impact et Thanatos, sont inclus dans le programme-cadre européen de recherche Horizon Europe. Objectifs : développer des anticorps monoclonaux, le premier pour le traitement des malades les plus fragiles (immunodéprimés, avec contre-indications, etc.), le second pour la prévention et le traitement de patients exposés ou infectés au virus par voie aéroportée², « *même s'il ne s'agit pas d'une voie naturelle de transmission pour ce pathogène* », rappelle Jean-Nicolas Tournier. La question est néanmoins examinée, au cas où... ●



Au cœur de l'infrastructure Idmit.

(1) Classement des installations conçues 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).

(2) La fonction pulmonaire étant plus critique pour la survie à court terme, elle est réputée plus létale que les autres voies. Les anticorps serviraient alors au traitement des patients infectés, mais aussi en préventif chez les populations fragiles.



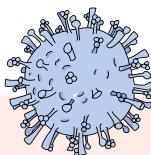
Le spectromètre de RMN (résonance magnétique nucléaire) est essentiel pour étudier la structure et le comportement de protéines hautement flexibles.

RECHERCHE FONDAMENTALE

Acquérir des connaissances

Avant de lutter contre une maladie, encore faut-il la comprendre et cerner les mécanismes biologiques à l'œuvre. C'est le rôle de la recherche amont. Exemple d'une découverte sur la compréhension de la transmission de la grippe aviaire à l'humain.

Grippe



- > Virus à ARN, de grande variabilité génétique. Il en existe 3 familles : A (infecte l'humain et de nombreuses espèces animales), B (touche principalement l'humain) et C (plus rare). A et B sont responsables des épidémies saisonnières.
- > Transmission par voie aérienne (gouttelettes) et contact.
- > 2 à 6 millions de personnes touchées chaque année en France.
- > Vaccin disponible, dont la formule varie chaque année afin d'être le plus efficace possible.

H5N1, cette simple évocation suffit à donner des sueurs froides aux épidémiologistes. C'est l'un des sous-types des virus de la grippe de type A, naturellement portés par les oiseaux aquatiques sauvages. Si la plupart de ces virus restent cantonnés à ces animaux, il arrive que la barrière entre espèces soit franchie à la faveur de mutations génétiques. C'est le cas par exemple du H1N1, relativement bénin, qui contribue aux épidémies humaines saisonnières. Le risque lié au H5N1 est tout autre, car ce virus est hautement mortel chez les oiseaux. Évoluant en permanence, il s'est déjà adapté à certains mammifères : phoques, cerfs, et tout récemment aux bovins aux États-Unis. S'il venait à s'adapter à l'humain, avec la capacité de se transmettre

directement entre eux, la pandémie qui en découlerait pourrait être gravissime¹.

« Nous cherchons à comprendre comment ces virus s'adaptent pour passer des oiseaux à l'homme », explique Martin Blackledge, directeur de recherche à l'institut Irig du CEA. Pour cela, une plongée au cœur de la machinerie cellulaire s'impose. Chez les

oiseaux, le virus s'empare et détourne une des protéines de son hôte : la ANP32. Celle-ci porte une sorte de queue très flexible, sur laquelle le virus peut greffer côte à côte deux de ses protéines virales, dont la polymérase. Ensemble, toutes trois vont permettre la fabrication de grandes quantités d'ARN viral.

Mais chez l'homme, cette queue mobile est beaucoup plus courte, rendant impossible la fixation de ces deux protéines. Un manque de place salutaire pour l'espèce humaine, puisqu'il empêche toute multiplication du virus. Mais... et c'est là que réside la faculté d'adaptation de ces virus aviaires, il suffit de quelques mutations sur la polymérase pour que les deux protéines virales se collent entre elles et arrivent à se fixer sur la très courte partie mobile de l'ANP32 humaine. Ce qui est sans doute le cas chez le H1N1.

« Cette découverte fondamentale, issue de notre laboratoire, est importante. Elle va permettre de mieux comprendre la multiplication du génome viral dans les cellules infectées, et in fine la dangerosité du virus, s'enthousiasme le chercheur. Nous allons surtout l'exploiter pour trouver des médicaments antiviraux, en étudiant la piste d'inhibiteurs de l'interaction de l'ANP32 avec les protéines virales. C'est l'objet du projet que nous portons au sein du PEPR maladies infectieuses émergentes. » ●

(1) Des cas sporadiques d'infection humaine au H5N1 par les oiseaux ont déjà été observés.

Diminuer les bactériémies dans le monde

Les dispositifs médicaux portables, mêlant électronique, IA, optique, biologie et bien d'autres disciplines, sont l'une des spécialités du CEA. Illustration avec cet outil de diagnostic des bactériémies pour les pays à faible revenu, notamment en Afrique subsaharienne.

Les bactériémies, caractérisées par la présence de bactéries pathogènes dans le sang, peuvent provoquer des infections potentiellement mortelles. Les diagnostiquer dans un pays occidental est aisé et rapide, notamment grâce à des systèmes d'analyse automatisés. Dans les pays à faible revenu, c'est une tout autre histoire. Faute de laboratoires de microbiologie en nombre suffisant, ces infections restent une importante cause de maladies et de décès.

Pour changer la donne, voici Simble, un projet multipartenaire initié en 2021. Objectif : développer un système simple à utiliser, peu cher et robuste (résistant à la poussière, à l'humidité et aux coupures de courant) pour les hôpitaux et dispensaires. L'appareil, désormais achevé et fonctionnant sur batterie, mesure la croissance des bactéries issues d'un prélèvement sanguin en se basant sur la turbidité¹ du milieu de culture. « Nous y avons apporté un module supplémentaire qui identifie automatiquement la bactérie incriminée grâce à un microscope sans lentille », précise Pierre Marcoux, expert en diagnostic de maladies infectieuses au CEA (voir encadré). Identifier au plus tôt la bactérie est crucial, de façon à prescrire l'antibiotique le plus

adapté, pour un soin efficace, mais aussi pour éviter les antibiorésistances. » Les études cliniques de terrain, impliquant plus de 1 000 patients à Bruxelles, mais surtout au Bénin et au Burkina Faso au sein de deux hôpitaux et d'un dispensaire, sont achevées, et les premiers résultats démontrent la grande fiabilité du dispositif, avec une précision de 92 % sur les 250 premiers échantillons analysés !

Pierre Marcoux envisage déjà la suite : détecter davantage d'espèces de bactéries, mais aussi des parasites et des champignons. Ce qui implique de considérablement étoffer la base de données associée à l'imageur sans lentille, notamment avec des espèces bactériennes bien plus rares, autrement dit inclure un plus grand nombre de patients dans l'étude clinique. « L'idéal serait de disposer de 30 à 50 dispositifs sur toute l'Afrique », illustre l'expert. À la fois pour que des hôpitaux puissent déjà utiliser le modèle actuel, et pour continuer le travail sur la base de données. » La course aux financements est donc lancée, auprès de l'Europe et d'ONG. ●

Made in CEA

L'imagerie sans lentille, très simple et peu onéreuse, est une technologie CEA. Dans ces microscopes, les micro-organismes (poussant en boîtes de Petri) sont illuminés par une source LED. La lumière diffusée par les colonies est enregistrée par un capteur d'images CMOS, du même type que ceux des téléphones portables. L'image acquise est ensuite analysée par des algorithmes d'intelligence artificielle, associés à une base de données qui relie chaque espèce bactérienne à sa signature optique.

(1) Degré d'opacité d'un liquide.

Utilisation du dispositif Simble au Bénin. Ici le turbidimètre, qui sert à mesurer la croissance des bactéries issues du prélèvement sanguin.





Autour du MONDE

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



JAPON - CORÉE DU SUD

TOURNÉE ASIATIQUE

Anne-Isabelle Etienvre, administratrice générale du CEA, a accompagné le président de la République lors de ses visites officielles au Japon et en Corée du Sud, du 31 mars au 3 avril 2026. Ce déplacement a permis de consolider les coopérations scientifiques et technologiques déjà existantes, notamment dans les domaines du nucléaire, de la microélectronique, du quantique et de l'IA.



UE

PROJET

Genesis, pour une microélectronique durable

Le CEA coordonne le projet européen Genesis qui développe des procédés de fabrication plus respectueux de l'environnement.

C'est l'un de ces secteurs où souveraineté et environnement sont étroitement mêlés. La fabrication de puces pour la microélectronique s'avère à la fois stratégique pour nos économies et grande consommatrice de ressources. Pour répondre à ce double défi, le CEA coordonne le projet européen Genesis, lancé en mai 2025. Plus de 50 partenaires industriels et académiques, issus de 12 pays, y représentent toute la chaîne de valeur, de la fourniture d'équipements et matériaux jusqu'à l'utilisation finale de composants. « Ce programme international est le seul de cette envergure et s'inscrit dans le Chips Act et le Pacte vert européens, débute Laurent Pain, responsable de Genesis au CEA. Nous constatons une très forte attente de nos partenaires et au-delà. »

D'ici 2028, plus de quarante innovations devraient émerger. Les premières publications scientifiques sont sorties et les prototypes montent progressivement en maturité, par exemple pour remplacer les PFAS. Ces molécules sont utilisées en microélectronique pour les étapes de lithographie et de collage.

Compte tenu de leur impact polluant, Genesis cherche à les remplacer par des résines nouvelle génération. « Nous allons tester des matériaux alternatifs, développés par des partenaires européens, pour les préqualifier industriellement », décrit Laurent Pain. En parallèle, les équipes travaillent aussi sur des capteurs pour surveiller l'usage actuel des PFAS lors de la phase de production, ainsi qu'à des solutions pour les concentrer et les détruire en fin de processus, afin de les retirer des rejets finaux.

Autre point d'amélioration, le recyclage et la réutilisation de matériaux critiques, comme le gallium, dont plus de 90 % de la production provient de Chine. « Genesis, par son ampleur, permettra d'évaluer une solution de récupération des déchets riches en gallium et de vérifier si cette filière est économiquement viable », appuie le responsable. Toutes ces solutions sont testées au CEA et chez ses homologues européens, tels le Fraunhofer en Allemagne et l'Imec en Belgique. Les salles blanches et les équipements y sont semblables à ceux des industriels, permettant la montée en maturité et la qualification en environnement réel. ●



Wafer pour la microélectronique

© A. Aubert / CEA





FINLANDE

UNE COOPÉRATION QUI DURE

En mai dernier à Saclay, le CEA a reçu une délégation de son homologue finlandais, VTT, pour renforcer un partenariat scientifique engagé depuis plus de 20 ans. À l'occasion de cette rencontre de haut niveau, les deux organismes, déjà impliqués dans plus de 50 projets européens, ont prolongé leur accord-cadre de coopération. Objectif : développer de nouvelles collaborations dans les technologies quantiques, l'intelligence artificielle et la microélectronique.



© T. Holtzapffel / CEA



MONGOLIE

PORTRAIT

Surveiller le terrain

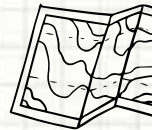
Chaque année, des dizaines de personnes au CEA bénéficient de coopérations avec nos partenaires étrangers. Ces aventures humaines permettent de tisser des liens forts pour faire progresser la science. Rencontre avec **Thibaut Holtzapffel**, ingénieur chargé de stations de surveillance du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires, qui partage avec nous son expérience en Mongolie.

Dans le cadre du Traité d'interdiction complète des essais nucléaires, le Tice, le CEA assure pour la France l'installation et le maintien en conditions opérationnelles de stations de surveillance. À travers le globe, plus de 300 d'entre elles écoutent les sols et reniflent l'atmosphère. « Quasiment toutes sont automatisées et envoient leurs données en continu, débute Thibaut Holtzapffel, ingénieur au CEA. Mais avec 25 ans d'âge moyen, elles nécessitent des opérations de maintenance et des contrôles météorologiques pour garantir les mesures. »

Trois mois par an, l'ingénieur est donc sur la route. Son territoire de prédilection ? La Mongolie, où il a été volontaire international pendant deux ans avant de rejoindre le CEA. « J'adore travailler avec des personnes d'horizons différents et me confronter à la réalité du terrain », explique Thibaut Holtzapffel, qui souligne l'intérêt et le challenge de travailler avec une extrême diversité de partenaires, ainsi que la nécessité de s'adapter aux modes de vie locaux, par exemple la gastronomie. « Il faut accepter d'être curieux pour bien s'intégrer, estime-t-il. Que ce soit boire un bol de lait de jument fermenté ou partager une "bassine d'abats" de mouton (reins, sang, cerveau, poumons...) en guise de plat de fête. »

Chaque déplacement implique des contraintes logistiques et demande un important travail préparatoire. « Perdre trois jours sur place parce que le matériel est bloqué à la douane n'est pas envisageable ! », illustre l'ingénieur. Dans les steppes mongoles, il doit également jongler avec le climat et la disponibilité des équipes locales. Une certaine forme de débrouille qui n'empêche pas le professionnalisme. « Il faut parfois faire avec ce qu'on a pour réparer les stations installées, mais toujours dans le respect de ceux qui sont sur le terrain au quotidien. Nous ne sommes que de passage, eux connaissent leurs équipes et leur pays », rappelle-t-il.

Le CEA travaillait déjà avec l'Académie des sciences de Mongolie en sismologie, et la surveillance du traité s'est inscrite dans le prolongement. Les stations sismologiques sont construites conjointement, et le CEA assure la formation d'équipes sur place. « La montée en compétences de nos partenaires prouve la réussite de cette collaboration, se félicite Thibaut Holtzapffel. Ils sont très investis et ont d'importants besoins en sismologie. Aujourd'hui, ces équipes sont reconnues au niveau international. » ●

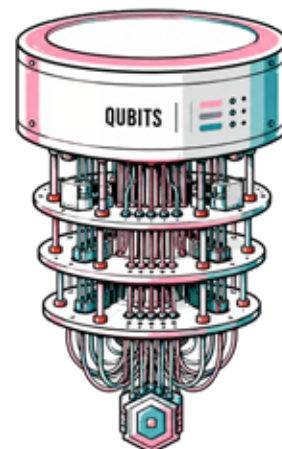


LE FRISSO DE LA S

CON SCIENCE



PLONGEZ LA TÊTE DANS LE FRIGO!



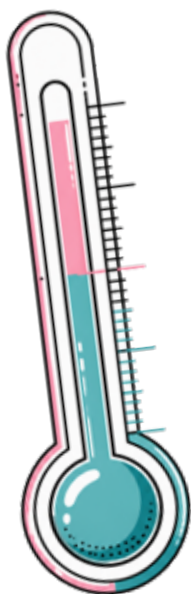
Saviez-vous qu'il existe un lieu plus froid que l'espace intersidéral à la frontière entre la France et la Suisse ? Que les IRM exigent des températures abyssales pour fonctionner, avoisinant les -270°C ? Que les futures installations dédiées à la fusion nucléaire connaîtront des extrêmes de température à affoler les thermomètres ? En science, le froid est vital. Et construire le bon « frigo » n'est pas aussi simple qu'il n'y paraît !



La CRYOGÉNIE, pour quoi faire ?

La cryogénie est la science et la technologie des températures inférieures à 120 kelvins (K), soit très précisément $-153,15^{\circ}\text{C}$. Cette limite arbitraire représente le seuil à partir duquel les gaz de l'air se liquéfient. Pour des températures supérieures, on parlera simplement de réfrigération.

L'usage de la cryogénie est bien connu en biologie et en santé pour la conservation des cellules et des tissus, par exemple. Mais la cryogénie permet surtout de ralentir l'agitation des éléments de la matière. Elle facilite ainsi l'observation scientifique et la caractérisation de la matière aux échelles de l'infiniment petit et permet d'accéder à des propriétés remarquables de la matière, comme la supraconductivité. Pour la fusion nucléaire, les accélérateurs de particules ou même les IRM, la cryogénie est ainsi vitale au bon fonctionnement des aimants. Dans le spatial, les très basses températures permettent l'observation de rayonnements émis par des corps lointains, difficilement détectables. Et dans les dispositifs quantiques, impossible d'exploiter des qubits sans cryogénie.



Quelles températures ?

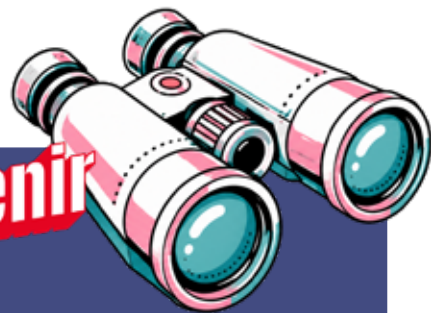
Si le degré Celsius est utilisé dans la vie courante, les échelles de température dans la cryogénie se mesurent en Kelvin, noté K. Le zéro absolu (0 K) correspond à $-273,15^{\circ}\text{C}$. Il s'agit d'une limite ultime et inatteignable où le mouvement des particules atteint son minimum.

Les usages « chauds » en cryogénie, par exemple pour la conservation des échantillons biologiques, font appel à de l'azote liquide, à 77 K. Mais la recherche de nouveaux états de la matière et le gain en performance des instruments nécessitent de descendre bien plus bas, en dessous de 20 K et jusqu'à 4 K avec l'hélium liquide. Et pour certaines applications, telles que le spatial ou le quantique, le CEA dispose de systèmes cryogéniques pouvant atteindre quelques millikelvins (mK), c'est-à-dire proche du zéro absolu.

Le rôle du CEA ?

Le CEA est un acteur reconnu au niveau mondial dans la conception et la réalisation de systèmes cryogéniques avancés, au service de la recherche en physique, de l'énergie, du spatial ou encore de la santé. Il développe des solutions innovantes et des cryotechnologies de pointe, en lien étroit avec des partenaires académiques et industriels, comme des cryogénérateurs répondant aux contraintes du spatial pour l'ESA, la conception et l'optimisation d'usines cryogéniques ou de grands instruments (aimants, accélérateurs) pour des projets internationaux (Cern, Iter, expériences de physique). Au niveau national, seules les équipes du CEA à Saclay et à Grenoble et celles de l'institut Néel du CNRS à Grenoble sont capables de telles prouesses.

Quel avenir pour la cryogénie ?



Les expertises acquises par les équipes du CEA dans le développement de systèmes cryogéniques pour répondre aux besoins de la recherche fondamentale peuvent également servir des enjeux de société comme le stockage de l'hydrogène ou le développement à grande échelle de fermes de calcul quantique (voir p. 52).

Pour cela, les technologies de pointe, jusqu'à présent conçues en petite série, doivent être optimisées et leur déploiement accéléré. Une « révolution cryogénique » dans laquelle le CEA est largement impliqué. Grâce à ses liens forts avec le tissu industriel et sa stratégie en recherche et innovation, c'est un partenaire de choix pour mener à bien ces développements.

Cryonext,

le froid vital au quantique

Au CEA et à travers le monde, les calculateurs quantiques commencent à émerger. Si les technologies diffèrent, la plupart ont un point commun : le besoin de températures cryogéniques, extrêmement basses, pour fonctionner. C'est là tout l'objectif du programme national Cryonext.

« C'est une technologie habilitante : sans elle, les autres maillons de la chaîne ne peuvent pas se mettre en place. » Raphaël Bouganne, adjoint sur la stratégie nationale pour les technologies quantiques au secrétariat général pour l'investissement, affiche clairement les enjeux en ce mardi de printemps. Devant lui, chercheurs et industriels sont réunis à l'institut Néel du CNRS, sur la presqu'île scientifique de Grenoble, pour le lancement des programmes de R&D du programme Cryonext, dans le cadre de France 2030. L'objectif ? Soutenir la montée en échelle des systèmes cryogéniques nécessaires aux technologies quantiques.

Sans froid extrême, pas de quantique. Pour exploiter les qubits (les bits quantiques au cœur de ces nouveaux calculateurs), il est indispensable d'atteindre des températures cryogéniques du kelvin (K) à quelques dizaines de millikelvins (mK). Pourquoi un tel froid ? Parce qu'à température ambiante, les atomes et les électrons s'agitent en permanence. Cette agitation thermique

perturbe les qubits, qui sont extrêmement fragiles. La moindre perturbation peut alors provoquer des erreurs ou détruire les propriétés quantiques nécessaires au calcul. En refroidissant fortement le système, on calme cette agitation et on stabilise les états quantiques, afin de pouvoir exploiter les qubits correctement. Un défi corsé par le fait que ces circuits quantiques ne sont pas complètement isolés et comprennent de très nombreuses interconnexions, câblages, électronique de lecture...

De l'unique à l'industriel

Le « frigo » classique des calculateurs quantiques s'appelle un cryostat à dilution. À la fois chambre de conditionnement et d'interface, il utilise l'hélium liquide, avec deux isotopes (hélium 3 et hélium 4). Tel un chandelier de haute technologie, il comporte plusieurs étages cryogéniques, de couleur dorée ou cuivrée, avec, à sa pointe, les circuits quantiques à la température la plus basse. *« Cette technologie est mature et bien maîtrisée pour la recherche, même si les équipes continuent à l'améliorer, »* décrit Marc Delpech, directeur scientifique adjoint au CEA et copilote du programme Cryonext. *Mais dans une logique de développement des calculateurs et des capteurs quantiques, ces cryostats doivent répondre à des besoins spécifiques. Pour les calculateurs, l'utilisation de plusieurs dizaines de cryostats à dilution n'est pas l'optimum en efficacité et en exploitation et leur coût est loin d'être négligeable. Pour un véritable essor du quantique, il faut développer des équipements adaptés, en série. »*

Quelles que soient les technologies de qubits (supraconductrice, spins de semi-conducteurs, photonique, etc.), les calculateurs quantiques seront constitués de plusieurs milliers, voire millions de qubits. *« Cela implique une puissance cryo-*



Pour un véritable essor du quantique, il faut développer des équipements adaptés et en série. »

Marc Delpech, directeur scientifique adjoint au CEA et copilote du programme Cryonext

génique considérable, plusieurs ordres de grandeur au-dessus de ce qui existe actuellement dans les laboratoires dédiés au quantique », estime Raphaël Couturier, à la tête du Département des systèmes basses températures (DSBT) au CEA.

Et si certaines technologies de qubits tolèrent des températures « chaudes », d'autres pas du tout (*voir encadré*). En Celsius, la différence paraît minime entre $-271,15^{\circ}$ et $-273,13^{\circ}$. En réalité, en kelvins, cela revient à passer de 2 à 0,02, un grand défi car on se rapproche du zéro absolu ! « Atteindre 0,1 kelvin est deux fois plus difficile qu'atteindre un kelvin, chiffre Jean-Marc Duval, directeur de recherche au DSBT. Les grands principes physiques derrière sont similaires, mais les technologies et surtout leurs intégrations pas forcément. » Outre cette puissance froide accrue, les technologies devront afficher une meilleure efficacité énergétique et un espace refroidi plus important que les quelques centimètres au bout des cryostats actuels, le tout à un coût compétitif.

Afin de répondre à ces défis, la notion de « fermes de cryostats » est l'une des missions du programme Cryonext, confié par l'État au CEA et au CNRS. Ces « fermes » visent à mutualiser les premiers étages de refroidissement, sur le modèle de ce qui existe déjà pour les accélérateurs de particules et la fusion nucléaire (*voir p. 60*). Le système de froid mutualisé et centralisé délivrera une puissance froide autour de 4 K qui viendra alimenter différents cryostats, dont le fonctionnement sera simplifié et optimisé. Il présente l'avantage d'une maintenance facilitée, avec un seul équipement primaire.

« Dans le cadre de Cryonext, nous préparons la réalisation d'un démonstrateur qui pourrait équiper une plateforme ouverte, avec un niveau TRL autour de 6 », indique Marc Delpech. À l'international, il existe à ce jour des plateformes de cryostats comme le FabLab Quantique de l'université de Sherbrooke au Canada ou le QuTI du centre de recherche technologique VTT en Finlande, mais pas encore de plateforme de type « ferme de cryostats » pour le quantique, même si plusieurs acteurs s'y intéressent comme IBM, Google ou PsiQuantum.



Différents qubits, différentes températures

La température de fonctionnement des calculateurs quantiques dépend des technologies de qubits utilisées. Les qubits supraconducteurs nécessitent de fonctionner à 10 mK. Dans le cas des autres technologies de qubit, il est possible de travailler à des températures autour du kelvin pour les qubits de spin dans des circuits semi-conducteurs, ou à quelques kelvins pour les qubits photoniques reposant sur des sources de photons uniques.

↑ Ci-dessus, un cryostat à dilution pour l'électronique quantique.



Nous avons conçu le programme en partant des besoins des industriels et des start-up. »

Sébastien Tanzilli, directeur scientifique adjoint de CNRS Physique et copilote de Cryonext

Des alternatives à l'hélium

Pour autant, les usages du quantique ne se résument pas aux calculateurs. Il faudra par exemple développer une cryogénie compacte et embarquable pour les communications ou la cryptographie quantique. Au-delà des cryostats à dilution, le programme Cryonext va donc explorer d'autres voies comme la réfrigération magnétique, déjà utilisée dans le spatial (*voir p. 58*) où les contraintes de poids et d'encombrement sont fortes. « *Basée sur un matériau magnéto-calorique qui change de température quand son champ magnétique change, cette technique présente l'avantage d'être très compacte et ne nécessite pas d'hélium* », précise Jean-Marc Duval.

S'il est l'un des éléments les plus abondants dans l'Univers, l'hélium est rare sur Terre. Il est principalement extrait auprès de gisements de gaz naturel. Le Qatar assure 40 % de l'approvisionnement européen et un tiers au niveau mondial, juste derrière les États-Unis. Avec le conflit du détroit d'Ormuz et les frappes contre les raffineries de gaz au printemps, toutes les livraisons depuis la péninsule sont suspendues à l'heure d'écrire ces lignes. Quant à l'hélium 3, c'est un isotope extrêmement rare qui s'échange autour de 2 000 euros le litre à température et pression standards. Or,

un cryostat classique pour des travaux de recherche en quantique nécessite une à plusieurs dizaines de litres. On comprend aisément l'intérêt d'une solution sans hélium !

Problème : la réfrigération magnétique n'est pas un processus continu. Il faut actionner le système comme un interrupteur va-et-vient. Son usage pour le quantique restera limité à des besoins spécifiques, dont la métrologie ou le refroidissement de détecteurs, et nécessite quelques adaptations, sur lesquelles planchent le CEA et le CNRS.

Un besoin de souveraineté

Le programme Cryonext bénéficie d'une aide de 34 millions d'euros, *via* l'ANR, jusqu'en 2030. Six projets seront menés sur des aspects spécifiques de la cryogénie pour le quantique (*voir page suivante*). S'il est difficile de dire aujourd'hui à quoi ressembleront les dispositifs quantiques dans dix ou même cinq ans, « *nous avons conçu le programme en partant des besoins des industriels et des start-up, tout en considérant les aspects liés à la compétitivité, la normalisation et la formation* », indique Sébastien Tanzilli, directeur adjoint scientifique de CNRS Physique et copilote de Cryonext. Dix laboratoires et quinze entre-

Les différents projets de Cryonext

Le programme Cryonext est découpé en six projets ciblés sur différents aspects de la chaîne de valeur et impliquant plusieurs partenaires.

PLATEFORME 500 mK DE FORTE PUISSANCE

L'objectif principal de ce projet est de concevoir une plateforme cryogénique, dite QuCUBE-1K2, pour répondre en particulier aux besoins de la start-up partenaire Quobly, afin d'accueillir un ordinateur quantique comportant plus de 1 000 qubits physiques à l'horizon 2030.

RÉFRIGÉRATION MAGNÉTIQUE INNOVANTE

Déjà présente dans le spatial (*voir p. 58*), la réfrigération magnétique a des atouts dans le quantique. Compacte, sans fluide et facile d'utilisation, elle peut s'adapter à des systèmes plus petits pour des usages de métrologie, de normalisation ou dans les communications quantiques.

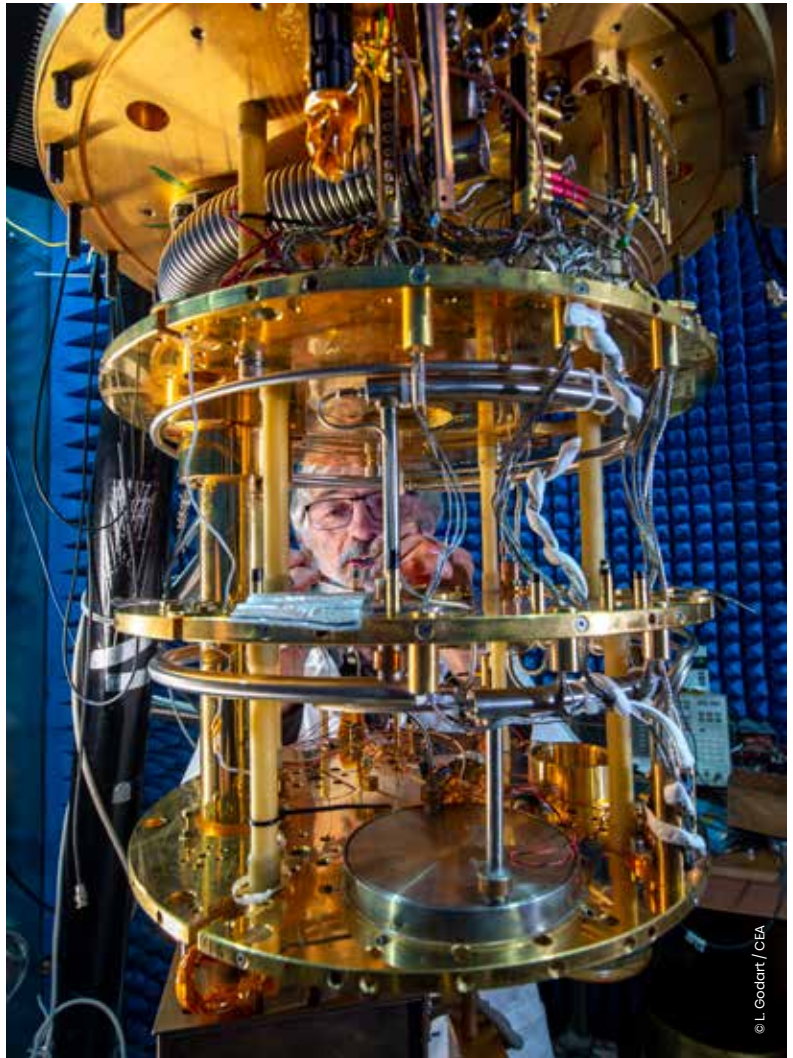
THERMOMÉTRIE MILLIKELVIN

Ce projet vise à développer et sécuriser une chaîne industrielle pour la métrologie du grand froid, une composante critique de tout système cryogénique, notamment pour les technologies quantiques. Il s'agit de garantir les températures atteintes à travers une ou plusieurs solutions de mesure.

prises et start-up, depuis la fabrication amont des éléments cryogéniques jusqu'à l'utilisation quantique, collaborent dans le cadre de ce programme.

« Cryonext rassemble toutes les visions et dégage les grandes tendances pour proposer des solutions intégrées et adaptables, appuie Marc Delpech. Il y a bien évidemment des enjeux de confidentialité entre certains acteurs, mais réunir tout le monde permet d'avancer efficacement face à la concurrence. » Une course au quantique est lancée au niveau international : les géants du numérique développent différentes technologies de qubits et irriguent financièrement tout l'écosystème cryogénique amont. Être indépendant demain sur les usages du quantique, notamment pour la défense et la cybersécurité, nécessite aujourd'hui des développements souverains. ●

→
Vue d'un cryostat à dilution ouvert, avec trois étages. Tout en bas, la plaque la plus froide à quelques dizaines de millikelvins (mK), au milieu la plaque à 100 mK et en haut la plaque à 800 mK.



CRYOSTATS 1,5-5 K OPTIMISÉS POUR LA PHOTONIQUE

Ce projet vise le développement de cryostats de petites dimensions refroidis par des machines frigorifiques autonomes. Ils seraient adaptés aux dispositifs quantiques optiques, des éléments clés pour les communications quantiques. Ils viendront répondre au besoin d'une cryogénie qui présente à la fois une température de base 1,5-5 K et un faible volume, très compact, voire embarquable.

FERMES DE CRYOSTATS ET NOUVELLES ARCHITECTURES POUR LA MONTÉE EN ÉCHELLE

Les « fermes de cryostats » sont un concept d'installations de grande taille reposant sur un système cryogénique centralisé, fournissant une puissance froide à 4 K, pour accompagner notamment la montée en échelle des calculateurs quantiques. Il ne s'agirait plus d'avoir des cryostats isolés, mais un ensemble cryogénique qui alimenterait un ou plusieurs calculateurs, permettant d'améliorer l'efficacité énergétique, réduisant le besoin en hélium et offrant des capacités opérationnelles élevées.

CRYOSTATS 20-80 K POUR LA COMMUNICATION ET LES CAPTEURS QUANTIQUES

Au-delà des calculateurs, les capteurs et la communication quantique auront également d'importants besoins cryogéniques, à des températures plus accessibles (supérieure au kelvin). De nombreux acteurs émergent en Asie, avec des investissements importants. Il est nécessaire de s'emparer de ce secteur pour développer des solutions intégrées, d'autant que les acteurs français développent des technologies performantes et compétitives dans ce domaine.

« Avec le CEA, nous avons les compétences pour lever les verrous sur le quantique »

Xavier Traversac, vice-président d’Air Liquide Advanced Technologies, revient sur le rôle d’Air Liquide et la collaboration avec le CEA dans le cadre de Cryonext.



© Air Liquide

« Air Liquide s’appuie sur une expertise historique dans la maîtrise des très basses températures, proches du zéro absolu. Dès 2019, la France a identifié la cryogénie comme une technologie clé pour réussir le virage du quantique. Nous avons sollicité de façon prospective le CEA, notre partenaire de longue date, car nous savions qu’il y a des verrous technologiques à surmonter et nous avons les compétences pour y parvenir ensemble. Cela a donné naissance au programme Cryonext.

Implanté à Grenoble depuis 1962 pour son écosystème scientifique unique, Air Liquide collabore historiquement avec le CEA et le CNRS, copilotes du programme. Nous avons par exemple un laboratoire commun avec le CEA. Dans le cadre de Cryonext, cette dynamique se prolonge à travers des collaborations étroites avec des start-up ainsi qu’avec des partenaires industriels. Ce rapprochement stratégique est essentiel pour relever le défi majeur du passage à l’échelle industrielle de l’informatique quantique. Aujourd’hui, l’enjeu n’est plus seulement de refroidir un unique cryostat de laboratoire, mais d’être capable d’alimenter de futures « fermes » de calcul quantique nécessitant plusieurs kilowatts de puissance froide en continu.

Relever ce défi technique exige de codévelopper nos architectures cryogéniques centralisées au plus près des chercheurs et des experts en électronique froide. C’est là que le rôle du CEA est essentiel : la coordination du pro-

gramme national Cryonext, conjointement avec le CNRS, permet de fédérer l’ensemble de la chaîne de valeur, de la définition des besoins jusqu’à la preuve de concept. Rassembler acteurs académiques et industriels est indispensable pour soutenir un effort de développement avec des cycles de 10 ans.

Notre ambition est de livrer des systèmes cryogéniques à grande échelle capables de répondre aux besoins de l’écosystème quantique et réduisant considérablement la consommation d’énergie pour des ordinateurs hébergés dans des centres de calcul. Pour y parvenir, nous développons des innovations majeures telles que des lignes de distribution cryogénique à très haute efficacité pour minimiser les pertes thermiques, ainsi que des échangeurs de chaleur supercritiques conçus avec les laboratoires académiques.

Dans le programme Cryonext, Air Liquide est le partenaire clé responsable de l’industrialisation des technologies cryogéniques. Nous sommes particulièrement impliqués dans le projet dédié au développement de fermes de cryostats et d’architectures de refroidissement centralisées. Nous participons également au projet qui vise à valider des capteurs pour une thermométrie basse température souveraine et robuste. En développant des capacités locales de production et d’intégration pour ces technologies habilitantes, nous soutenons l’objectif de structurer une filière souveraine. ●

Les THERMOMÈTRES du grand froid



Pour garantir les températures extrêmement basses, le CEA développe son expertise en instrumentation et métrologie.

Comment connaître la température à l'intérieur d'un réfrigérateur, quand celui-ci doit atteindre les -270°C , mesure à peine quelques centimètres, qu'il est bardé d'électronique, parfaitement isolé du monde extérieur, voire se balade dans l'espace, et que la moindre perturbation fausse la donne ? Bref, quand ce n'est pas vraiment un frigo.

Ici, pas de mercure ni de galinstan, mais une résistance électrique qui varie en fonction de la température. Problème : mesurer cette résistance nécessite d'envoyer un courant, et donc de générer de la chaleur. « *On parle d'auto-échauffement*, explique Anthony Attard, ingénieur au Département des systèmes basses températures du CEA. *À température ambiante, cela n'a aucun impact. Mais à des températures cryogéniques, cela peut fausser la mesure, voire pire : perturber le milieu dans lequel celle-ci est faite.* » Pour limiter cet effet, le courant envoyé est minime. L'instrument de mesure ULTM50, développé par le CEA dans le cadre de la mission spatiale Athena, mesure ainsi des températures de 50 millikelvins grâce à un courant d'à peine deux nanoampères.

« *Les environnements dans lesquels s'intègrent les capteurs sont très complexes, continue le spécialiste. Nous devons composer avec des vibrations, des rayonnements électromagnétiques, du magnétisme, parfois même de la production de chaleur.* » Dans la fusion nucléaire, qui peut en effet imaginer qu'à quelques mètres d'un plasma à plus de 100 millions de degrés Celsius se trouvent des aimants fonctionnant à

-269°C ? C'est précisément pour vérifier ces températures que le CEA a fourni le système CABTR au projet Iter, garantissant une mesure de la cryogénie entre 1 et 4 kelvins. « *Nous avons répondu à leur appel d'offres avec une solution d'abord développée pour des besoins internes, retrace-t-il. Nous l'avons fait monter en maturité et l'avons transférée.* »

Aujourd'hui, les équipes poursuivent leurs travaux sur cette technologie et participent aussi au programme Cryonext (voir p. 54) pour le quantique. Qu'il s'agisse de développer des nouvelles architectures pour les « fermes » de cryostats ou la communication quantique, la métrologie devra être prise en compte. D'autant que le milieu quantique, très sensible aux apports de chaleur, nécessitera pour certains qubits des courants encore plus faibles que le spatial pour la mesure de température.

Dans les cryostats, par exemple pour le calcul quantique, plusieurs enceintes d'isolation se succèdent, entre l'extérieur à température ambiante et le cœur du dispositif autour de 2 kelvins, voire beaucoup moins. Fils électriques, câbles et autres dispositifs traversent ces enceintes, amenant avec eux la chaleur et donc l'erreur de mesure. « *Nous mettons en œuvre plusieurs solutions : des câbles en manganin par exemple, qui a une faible conductivité thermique, une thermalisation des fils, l'installation d'écrans thermiques, des isolants multicouches, etc.*, liste Anthony Attard. *Le montage et l'intégration des éléments, la façon dont on passe les câbles, tout cela est un art pour éviter l'apport d'énergie et l'auto-échauffement.* » ●

pour étudier l'Univers

Les missions scientifiques d'observation de l'Univers lointain ont besoin d'instruments à des températures proches du zéro absolu. Un tour de force d'ingénierie compte tenu des contraintes du spatial !

Observer la naissance ou la mort d'étoiles, retracer la vie des galaxies primitives, étudier les premiers instants de l'Univers... La plupart des missions spatiales réalisent leurs observations dans l'infrarouge ou les rayons X afin de capter les rayonnements des objets lointains. Une technique éprouvée, mais contraignante en refroidissement. Sans entrer dans les détails, le rayonnement infrarouge est intimement lié à la chaleur émise ; c'est d'ailleurs le principe même des caméras thermiques. Or, les instruments et les télescopes spatiaux émettent leur propre chaleur en fonctionnant. Ultrasensibles, les systèmes de mesure infrarouge risquent d'être « aveuglés » par ces émissions au lieu de capter celles souhaitées du fin fond de l'Univers.

L'espace, pas aussi froid qu'on l'imagine

Les instruments embarqués ont donc besoin d'être refroidis et isolés. « *Nous distinguons deux gammes de température, débute Ivan Charles, responsable du laboratoire cryoréfrigérateurs et cryogénie spatiale au CEA. Les « hautes » températures, entre 50 et 80 kelvins (K), plutôt pour des missions d'observation de la Terre, les satellites météo, etc. Et les très basses températures, de quelques centaines voire dizaines de millikelvins, pour des missions scientifiques d'observation de l'Univers.* » Un seuil pas très loin du zéro absolu !

L'espace lui-même n'est pas aussi froid que peuvent le laisser penser les films de science-fiction, où l'astronaute mal équipé voit son visage se recouvrir instantanément de givre. Installée en orbite basse, la station spatiale internationale connaît ainsi des variations de température de 120 °C à

-160 °C. Et si l'espace vient bien refroidir passivement les satellites, des systèmes cryogéniques restent nécessaires pour atteindre les températures extrêmement basses permettant des détections précises.

La réfrigération magnétique pour Athena

Fort de ses compétences en cryogénie, le CEA a, par exemple, participé au programme Herschel. Lancé en 2009, le télescope embarquait des instruments munis de détecteurs nécessitant une réfrigération autour de 300 millikelvins (mK). « *À l'époque, nous avons conçu un système de réfrigéra-*



tion par adsorption, avec un petit réservoir d'hélium », décrit Ivan Charles. Mais cette technique de refroidissement, parfaitement maîtrisée par le CEA, ne permet pas d'atteindre des températures sensiblement plus basses que 300 mK.



Découvrez l'instrument X-IFU de la future mission Athena et son système de refroidissement unique.

Or, aujourd'hui, le laboratoire prépare la mission européenne Athena, dont le lancement est prévu vers 2038. Ici, pas d'infrarouge mais une étude des rayonnements X qui nécessite un refroidissement accru, autour de 50 mK. « Nous développons pour cela la réfrigération magnétique, par désaimantation adiabatique, explique le responsable. Ce concept, qui remonte aux années 1930, utilise les propriétés de spins au sein de matériaux magnétocaloriques. » En magnétisant ces composés, les spins de leurs électrons s'alignent. Puis, la désaimantation vient « libérer » ces spins qui perdent leur alignement. Cette « remise en mouvement » implique une consommation d'énergie, et donc l'absorption de chaleur. Le détecteur de l'instrument est alors réfrigéré.

Cette technologie présente bien des avantages pour le spatial. Utilisant le magnétisme, « elle ne comprend pas de réservoir, pas de déplacement de fluides, pas de pièce mobile et donc de risque d'usure de matériaux », liste Jean-Marc Duval, directeur de recherches au Département des systèmes basses températures du CEA. Autant d'atouts qui poussent aussi les chercheurs à envisager son application pour le quantique. « La réfrigération magnétique permet des solutions plus embarquables et mobiles, justifie-t-il. Mais elle offre une très faible puissance froide, une faible capacité à

extraire la chaleur. » Pas gênant dans l'espace où il fait déjà froid, un peu plus pour des opérations terrestres.

Des instruments uniques pour des missions uniques

La désaimantation adiabatique nécessite surtout toute une chaîne de refroidissement amont, pour gagner à chaque fois quelques degrés. Un système hybride, complexe et strictement encadré par un épais cahier des charges. Embarqué à bord d'un télescope spatial, le système réfrigérant, de la taille d'une boîte à chaussures, doit tenir compte de toutes les contraintes spécifiques (volume, masse, alimentation, perturbations, etc.). Pour le spatial, une succession de versions est mise au point sur plusieurs années : d'abord un modèle de démonstration, puis une version d'ingénierie ou de qualification, et enfin le modèle de vol, avec parfois un modèle de rechange ! L'intégration, elle, est aux mains des agences spatiales et des équipes qui développent les instruments d'observation.

Le travail se fait en étroite collaboration, pour tenir compte des besoins scientifiques et des contraintes de chacun. « La cryogénie pour le spatial est un tout petit milieu, et aujourd'hui seuls le CEA et la Nasa mettent en œuvre des systèmes en-dessous du degré kelvin », décrit Jean-Marc Duval. « Ce sont des instruments uniques pour des missions uniques », abonde Ivan Charles.

Les missions spatiales « chaudes », de la gamme entre 50 et 80 K, sont quant à elles bien plus faciles à mettre en œuvre et plus « industrialisées ». « Elles nécessitent des petites séries d'une dizaine d'unités réfrigérantes, explique Ivan Charles. Pour y répondre, le CEA a développé plusieurs technologies de tubes à gaz pulsé, que l'on a ensuite transférées aux industriels comme Thales Cryogenics pour des modèles sol, et Air Liquide pour les applications spatiales. » Ces tubes à gaz pulsé présentent les avantages d'un faible encombrement, générant peu de vibrations, et d'une longue durée de vie. Et le laboratoire continue à les améliorer, notamment en matière de miniaturisation et de performances thermiques. ●



© D. Morel / CEA

Travail sur le pulse tube 15 K (-260 °C), développé pour des applications spatiales et notamment la mission européenne Athena.

pour atteindre la supraconductivité

Le grand froid est une condition nécessaire à la supraconductivité, elle-même au cœur de grands instruments de recherche comme l'ITER ou les accélérateurs de particules.

Difficile d'imaginer un point commun entre une IRM, la fusion nucléaire du projet ITER et les longs tunnels du Cern. Et pourtant, toutes ces installations font appel à des aimants supraconducteurs. La supraconductivité, en n'opposant aucune résistance au passage du courant, permet de générer les forts champs magnétiques nécessaires à l'imagerie du corps, au confinement du plasma ou encore à l'accélération et à la concentration d'un faisceau de particules. L'IRM Iseult, développée par le CEA (voir La Revue du CEA n°4), atteint ainsi son champ magnétique de 11,7 teslas, le plus puissant au monde, grâce à un courant de 1 500 ampères, graduellement monté en 5 heures.

Mais sans température cryogénique, point de supraconductivité ! Pour atteindre cette propriété particulière, les supraconducteurs doivent être refroidis à l'extrême. Le LHC, l'accélérateur de particules du Cern situé sous la frontière franco-suisse, abrite ainsi le plus grand système cryogénique

au monde, et affiche une température plus froide que l'espace intersidéral, à moins de 2 K (-271,15 °C). Même froid proche du zéro absolu pour Iseult et ses 182 km de brins supraconducteurs. « *On parle de grande réfrigération, car les installations à refroidir sont conséquentes* », débute Davide Duri, à la tête du laboratoire Réfrigération thermohydraulique du CEA, qui gère notamment les deux plateformes expérimentales HELIOS et SHREK.

De très gros frigos à hélium liquide

Le principe ressemble à celui de votre réfrigérateur : un cycle compression-détente d'un gaz permet de produire le refroidissement. Sauf qu'ici, les systèmes font plusieurs mètres de diamètre, occupent des pièces entières, et utilisent de l'hélium 4 liquéfié autour de 4 K, voire en dessous pour l'hélium superfluide. « *Cet hélium liquide circule au plus près des bobines, en circuit*

Les cibles de la fusion inertielle

Les tokamaks tel ITER utilisent le confinement magnétique pour maintenir un plasma de fusion, mais une autre voie existe : la fusion par confinement inertiel. La réaction de fusion a alors lieu au sein d'une microbille creuse de quelques millimètres de diamètre à peine. Cette bille a besoin d'être refroidie à très basse température, autour de 20 K. « *Ce grand froid peut sembler contre-intuitif alors qu'on va provoquer une réaction à quelques millions de degrés*, reconnaît Jean Manzagol, à la tête du laboratoire Cryogénie pour la fusion du CEA. *Mais cette réaction nécessite une coque en hydrogène solide pour comprimer le gaz en son centre, d'où le recours à la cryogénie.* » À travers le LMJ, qui suit cette voie, le CEA a acquis une forte expertise en cryogénie et en fusion inertielle qu'il partage aujourd'hui avec la start-up GenF.

fermé, décrit Davide Duri. Il vient en absorber la chaleur, puis un cycle compression-détente le refroidit à nouveau. L'hélium présente l'avantage d'être neutre et inerte ; il n'interagit pas avec les autres éléments, n'est pas sensible aux radiations. Et l'hélium superfluide possède une très bonne conductivité thermique. » Le LHC utilise ainsi 120 tonnes d'hélium pour ses aimants supraconducteurs. Or, bien qu'abondant dans l'Univers, cet élément est rare sur Terre et coûte cher.

« Nous travaillons de toute façon à optimiser les systèmes cryogéniques et à limiter la consommation d'énergie, annonce François Bonne, spécialiste de la modélisation des grands réfrigérateurs. Il faut agir à toutes les étapes : production, distribution et utilisation du froid. Cela veut par exemple dire ne pas produire plus froid et ne pas faire circuler plus d'hélium que nécessaires. » Dans la cryogénie comme ailleurs, il existe des critères de performance énergétique !

L'apport de la simulation

Pour optimiser l'architecture du système et ses performances, une multitude de scénarios est explorée par simulation numérique. *« Nous l'utilisons aussi avant nos demandes aux industriels qui fournissent différents éléments, pour être à la fois réalistes et ambitieux »,* complète François Bonne. Pour les systèmes déjà installés, comme sur le tokamak japonais JT-60SA auquel contribue le CEA, la simulation permet de mieux préparer les interventions et de gagner en efficacité opérationnelle. Les équipes CEA travaillent également à limiter les pertes lors de la distribution dans les systèmes.

Pour l'avenir, de nouveaux matériaux arrivent, les supraconducteurs à haute température, dits « HTS ». N' imaginez pas un



© P. Stroppa / CEA

aimant à température ambiante pour autant ! Découverte distinguée d'un prix Nobel en 1987, ces matériaux fonctionnent à des températures supérieures à 30 ou 40 K, soit toujours largement en dessous de -200 °C. *« En théorie, le gain énergétique espéré sera d'un facteur trois, chiffre Davide Duri. Mais il reste encore beaucoup d'incertitudes et de travaux à mener sur ces matériaux avant leur déploiement. »* Comme il le résume, *« apporter un fort refroidissement est possible, mais le faire à grande échelle, dans un environnement chaud et contraint, et sur une longue durée, c'est une autre histoire ! »* ●

↑ Le détecteur CMS sur l'installation LHC au Cern. Cet accélérateur de particules, le plus puissant à ce jour, utilise des électroaimants supraconducteurs qui ont besoin d'être refroidis à une température proche du zéro absolu, plus froid que l'immensité de l'espace.

Des GLAÇONS pour la fusion



Au-delà des aimants supraconducteurs, la fusion nucléaire par confinement magnétique nécessite également des dispositifs cryogéniques afin de produire des glaçons un peu particuliers...

« Attention, on ne cherche pas à refroidir le plasma ! » prévient d'emblée Jean Manzagol, à la tête du laboratoire Cryogénie pour la fusion du CEA. S'il est bien question ici de glaçons, ils ont un tout autre usage et une tout autre composition que ceux dans votre congélateur. Développés pour des tokamaks comme West, sur le site CEA de Cadarache, ou JT-60SA au Japon, ces glaçons servent à alimenter et contrôler les réactions de fusion.

Dans le premier cas, comme dans une centrale nucléaire classique, le réacteur de fusion a besoin de combustible. Ici, point d'uranium, mais des isotopes de l'hydrogène qu'il faut injecter dans le tokamak. « Le recours à des glaçons, forme solide plutôt que gazeuse, permet de pénétrer rapidement dans le cœur du plasma », justifie le spécialiste. Pour réaliser et injecter ces solides d'hydrogène, formés autour de 5 K (soit -268 °C), le laboratoire développe tout le système cryogénique.

Dans le deuxième cas, l'injection de glaçons permet à la fois de contrôler les instabilités de bord du plasma et de réaliser un « arrêt d'urgence » si nécessaire. « Si les instabilités ne sont pas maîtrisées, le risque est celui d'une perte majeure de contrôle du plasma appelée disruption, qui peut abîmer les éléments du tokamak », explique Jean Manzagol. Les signes avant-coureurs apparaissent 20 millisecondes avant la disruption, juste le temps d'un frei-

nage d'urgence. Ce qui justifie l'usage de glaçons, plus facile à accélérer qu'un gaz.

L'idée n'est pas que ceux-ci viennent « refroidir » la réaction. Surtout avec un plasma à plus de cent millions de degrés Celsius. C'est leur composition qui va calmer le jeu. Le système de mitigation de la disruption (DMS) d'Iter comprendra ainsi des glaçons d'hydrogène, lequel augmente la densité du plasma et ralentit les électrons, et des glaçons de néon, qui permettent d'évacuer l'énergie thermique plus facilement. « Nous mettons au point les systèmes cryogéniques d'injection ultrarapide, poursuit le responsable. Sur Iter par exemple, 27 lignes enverront des glaçons de quelques centimètres de diamètre à des vitesses de près de 500 m/s. »

Le laboratoire Cryogénie pour la fusion fait partie des rares en Europe à maîtriser l'ensemble des technologies et la chaîne cryogénique nécessaire. « Nous travaillons sur la fabrication de glaçons par extrusion pour JT-60SA, ainsi que sur l'injection par centrifugation, détaille Jean Manzagol. Très grossièrement, cela revient à produire un spaghetti d'hydrogène solide que l'on découpe. » Ces techniques ont des applications au-delà de la fusion, comme l'accélération laser-plasma où le bombardement d'un ruban d'hydrogène génère un faisceau de protons, ouvrant des perspectives pour la protonthérapie contre le cancer. ●



Et de cinq ! Le festival **Sur les épaules des géants** revient au Havre pour une cinquième édition du 24 au 27 septembre, sur le thème du paradoxe. Il faut dire que la science en fourmille : des plus pointus, comme les inégalités de Bell en physique quantique, à ceux plus « grand public », comme le paradoxe du voyageur temporel qui a largement inspiré la science-fiction. Dans une vingtaine de lieux, conférences, expositions, projections et rencontres vous amèneront à vous interroger sur la logique et l'évidence.

À cette occasion, le CEA vous fera plonger dans les trous noirs pour explorer le paradoxe de l'information (ce qui entre dans un trou noir disparaît-il vraiment ?) et observer la nuit en se demandant pourquoi elle est si sombre. Les univers invisibles des neutrinos et du quantique vous attendent également, riches en problèmes théoriques et en expériences bien réelles. Vous pourrez également participer à un café scientifique à la croisée entre science et fiction, pour échanger sur la notion de vérité, chahutée par l'IA... Un programme varié dont vous ressortirez plus curieux qu'à l'entrée !

Pour en savoir plus : surlesepaulesdesgeants.fr

Notre sélection



De la géologie dans les égouts, de l'astrophysique dans les jeux vidéo, du quantique dans une déclaration d'amour... La science est partout dans nos quotidiens, et surtout là où on ne l'attend pas.

Faire de la science dans les égouts

Quand on parle de géologie, on imagine facilement des cailloux. En réalité, les chercheurs travaillent également sur des carottes de glace ou de sédiments, et ces dernières peuvent provenir de lieux inattendus... comme nos égouts. Une équipe conjointe CEA-CNRS étudie l'évolution de nos modes de vie à travers des prélèvements menés dans les égouts, en lien avec les citoyens concernés. De la science participative riche en enseignements !



L'astrophysique du jeu vidéo

Le CEA inaugure une toute nouvelle série de vidéos, réunissant un chercheur et un streamer de jeux vidéo autour d'une manette. Le principe ? Revenir sur des phénomènes scientifiques à travers les univers de pixels. Pour cette première, le Joueur du Grenier a reçu l'astrophysicien Roland Lehoucq. L'occasion de vérifier si le jeu *Star Citizen* décrit assez bien les points de Lagrange et les systèmes de propulsion spatiale...



C'est l'histoire d'un bus qui tombe dans un trou noir

Une thèse sur le paradoxe de l'information ? Non, il ne s'agit pas d'étudier les chaînes télé, mais plutôt les trous noirs. En moins de trois minutes, Angèle Lochet, doctorante au CEA, vous explique pourquoi ranger ses chemises dans le noir est une mauvaise idée et pourquoi 1000 bus ne font aucune différence quand on est dans un trou noir. Ou peut-être que si, justement...



L'amour est-il quantique ?

Pour répondre à une telle question, il fallait au moins un prix Nobel ! Michel Devoret, prix Nobel de physique en 2025 et ancien chercheur au CEA, nous explique que si poser des questions influence forcément la relation avec notre interlocuteur, et donc sa réponse, le phénomène est identique en mécanique quantique : observer un système revient à le modifier. Une comparaison droit dans les yeux.



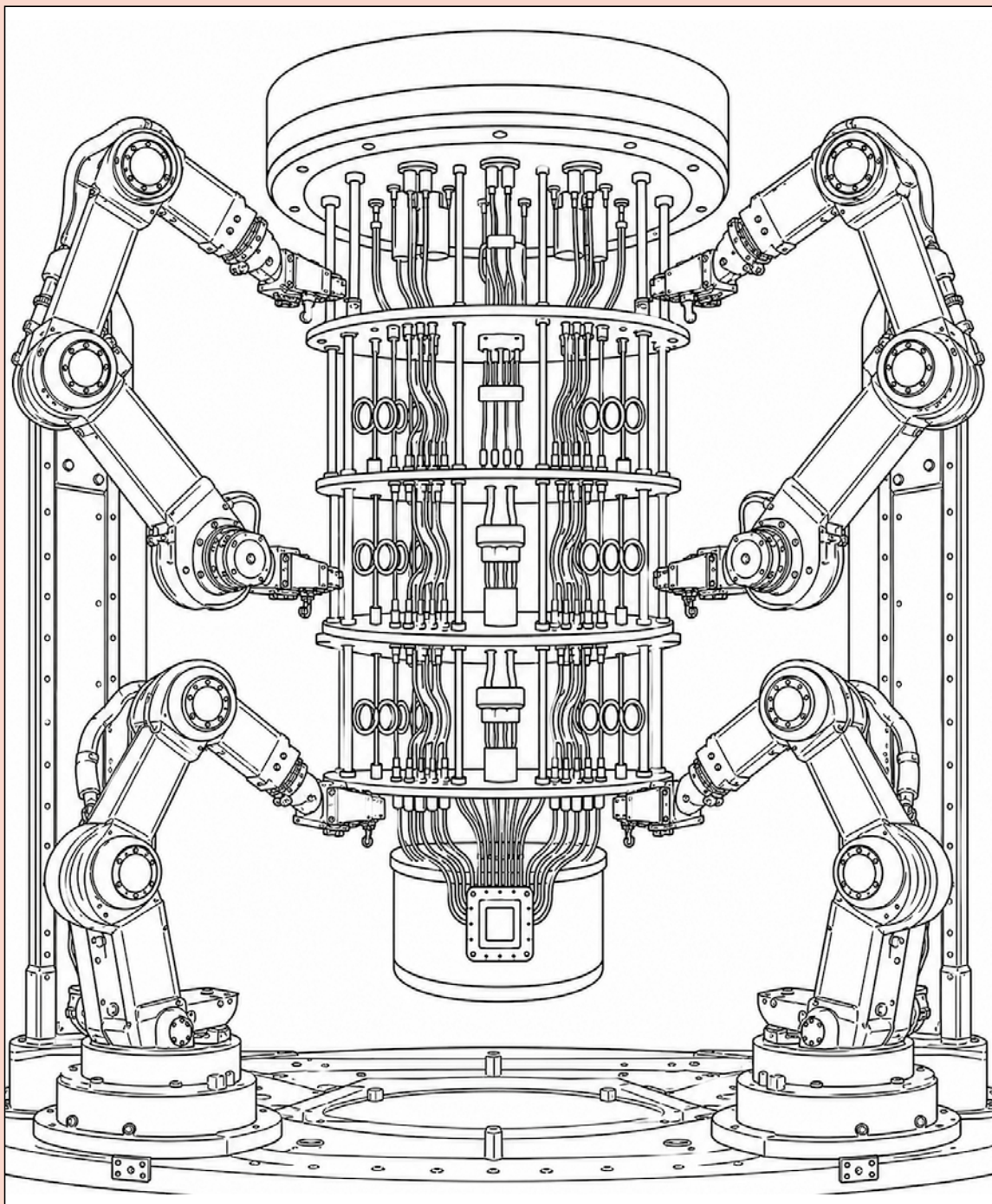
Un soin beauté aux rayons gamma

En septembre 1976, Ramsès II atterrissait en France pour une cure de jouvence. Rongée par les champignons et bactéries, la momie du pharaon s'est fait soigner au CEA par irradiation gamma. Cette technique permet d'éliminer les espèces nuisibles sans altérer la momie ni la rendre radioactive. Objet d'un accord entre la France et l'Égypte, cette aventure illustre le savoir-faire du CEA pour la conservation du patrimoine. L'équipe d'Ordres de grandeur vous en retrace l'histoire à l'occasion des 50 ans de ce moment hors du temps.



Coloriage

Besoin d'un moment de calme ? Un stylo 4 couleurs et quelques surligneurs suffisent pour colorier ce mandala quantique et robotique. Générée par une IA sur les consignes avisées de notre graphiste, cette illustration fait se rencontrer deux univers explorés dans nos dossiers.





Si vous passez vos vacances en Islande, dans le nord de l'Espagne ou aux Baléares, **le ciel vous réserve un spectacle grandiose le 12 août prochain, avec une éclipse solaire totale**. La Lune viendra complètement occulter le Soleil. N'oubliez pas vos lunettes pour observer le phénomène !

Le CEA et ses partenaires étudient le Soleil, notamment grâce à la mission européenne Solar Orbiter, dédiée à la météo solaire et à l'observation des perturbations. Très récemment, une collaboration internationale à laquelle participe le CEA a ainsi démontré que la dissipation d'énergie à l'origine des éruptions solaires se propage comme une avalanche. Ces travaux sont vitaux pour mieux cerner ces phénomènes et leur impact sur nos télécommunications.



Rares ou pas rares, les éclipses ? Les explications d'Antoine Strugarek, astrophysicien au CEA.



Qui sommes-nous ?

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

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



Conçue à Paris,
imprimée dans
le Limousin,
distribuée depuis
le Maine-et-Loire...



*Rendez-vous ici
pour découvrir La Revue!*

et inspirée
par celles et ceux
qui innovent
partout en France.