

Les défis

LE MAGAZINE DE LA RECHERCHE IMPLIQUÉE
#245 – SEPTEMBRE / OCTOBRE 2021

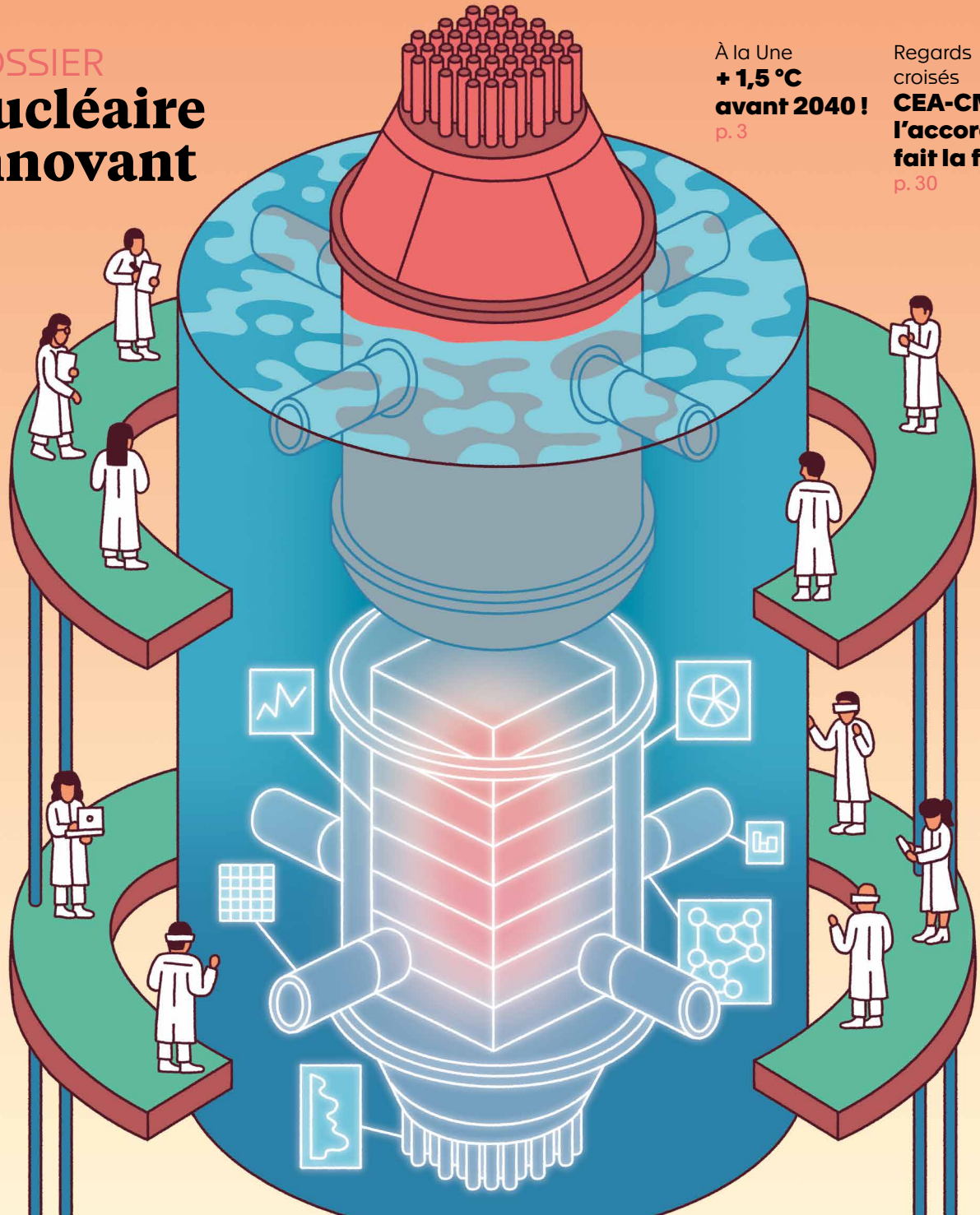
du cea

DOSSIER
**Nucléaire
innovant**

p. 16

À la Une
**+1,5°C
avant 2040!**
p. 3

Regards
croisés
**CEA-CNRS,
l'accord
fait la force**
p. 30





L'humeur de...

Aude Ganier, rédactrice en chef

Parce que l'union fera toujours la force, saluons les scientifiques du monde entier, réunis depuis plus de 30 ans au sein du Giec pour que la société comprenne les tenants et aboutissants du changement climatique. Saluons également tous ces chercheurs, ingénieurs et techniciens alliant leur savoir-faire pour soutenir les industries, dont celle de l'énergie bas carbone nucléaire, mobilisées sur cet enjeu. Interface entre la société, l'économie et l'environnement, la recherche s'inscrit plus que jamais dans une démarche durable et ouverte. À l'instar de l'accord-cadre renouvelé entre le CEA et le CNRS, et des nombreuses collaborations internationales auxquelles ils participent.

 WWW.CEA.FR

Éditeur Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, R. C. S. Paris B77568019
Directrice de la publication Marie-Ange Polacci
Rédactrice en chef Aude Ganier
Rédactrice en chef adjointe Sylvie Rivière
Ont contribué à ce numéro Luc Barbier, Hugo Leroux, Céline Lipari, Laurence Stenvot (CNRS)
Comité éditorial Claire Abou, Luc Barbier, Mathilde Costes-Majorel, Sophie Kerhoas, Elisabeth Lefèvre-Rémy, Camille Giroud, Sophie Martin, Frédérique Tacnet, Anne Orliac, Valérie Vandenbergh
Iconographie Micheline Bayard
Illustrations Jeremy Perrodeau (couverture), Marta Signori (p. 2, 30)
Conception et réalisation graphique, secrétariat de rédaction Atelier Marge Design
 N° ISSN 1163-619X.
 Tous droits de reproduction réservés.
 Papier Arctic Volume White FSC. Stipa. Octobre 2021.

SOMMAIRE #245

À LA UNE

03 Réchauffement climatique
+1,5 °C avant 2040!

EURÉKA

06 Biologie moléculaire
Lumière sur les télomères

07 Sciences cognitives
La géométrie, une intuition humaine

08 Cybersécurité
Sous la cape d'invisibilité de Snowpack

09 Climat
Ça commence dans notre assiette

09 Télécom
Allo IoT, ici satellites!

10 Électronique quantique
Préserver la cohérence avec du graphène

12 Biologie végétale
Beauté fractale

MAKING-OF

13 Icar, au service des télescopes

AGORA

32 Et que dure la mobilité durable!

32 Objectifs et performance

32 13^e place pour l'université Paris-Saclay

33 La science ouverte, un défi pour la recherche

DOSSIER ÉNERGIE

Nucléaire : soutenir l'innovation de la filière



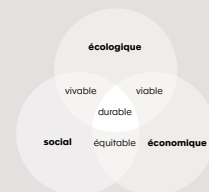
18 Nucléaire 4.0

21 Le pari des petits réacteurs modulaires

22 Du recyclage au multirecyclage

24 Gestion optimisée des déchets

26 Compétences nucléaires, un enjeu déterminant
Entretien



TOUT S'EXPLIQUE

28 Le développement durable au CEA

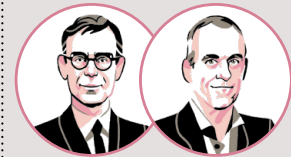
34 Grenoble, terre d'innovations

34 ClimaTicTac

34 Le CEA, en soutien des PME de la cybersécurité

REGARDS CROISÉS

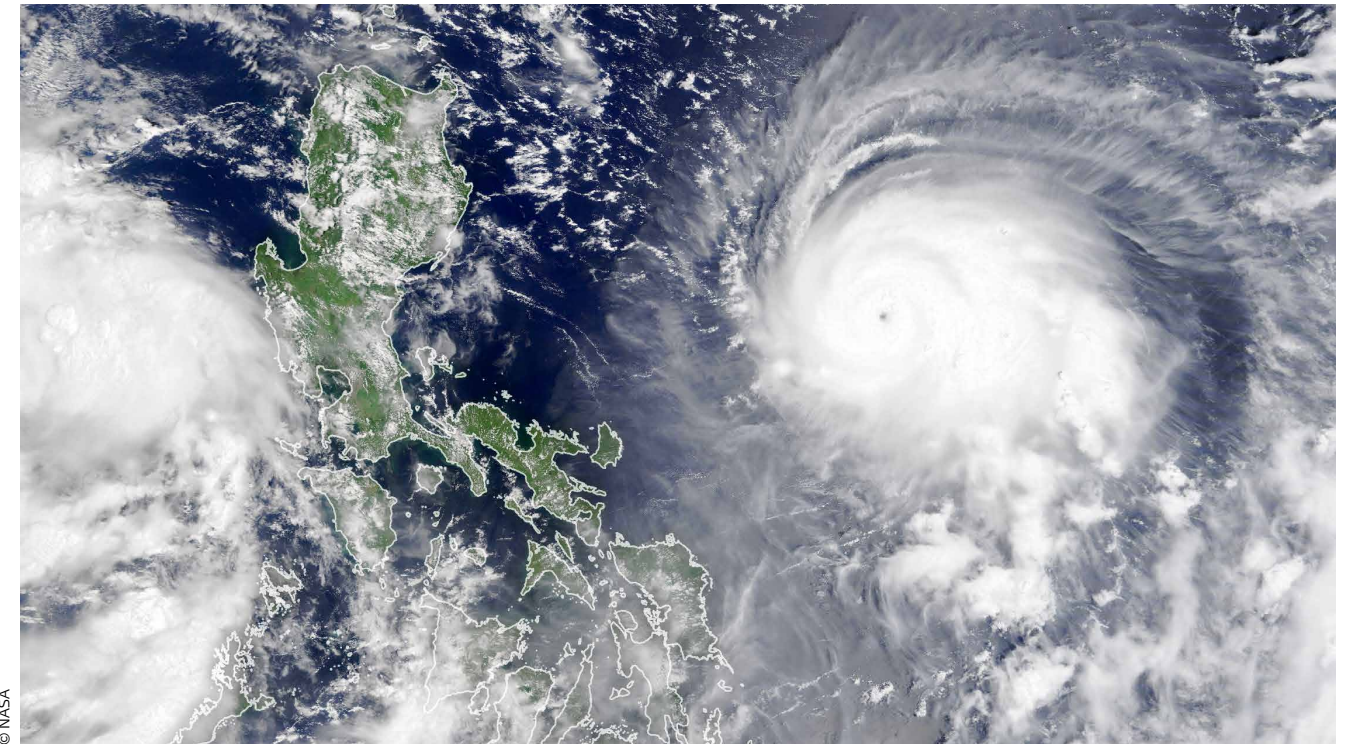
30 CEA-CNRS, l'accord fait la force
François Jacq et Antoine Petit



LE COIN DES START-UP

35 Sport Quantum invente la cible électronique

À LA UNE



© NASA

RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

+ 1,5 °C avant 2040 !

Dôme de chaleur au Canada, inondations à New York et en Allemagne, incendies en Grèce... L'été 2021 illustre plus que jamais les projections du Giec: les événements extrêmes s'intensifient en lien direct avec le réchauffement planétaire. La hausse du niveau des mers est quant à elle inéluctable. Des conclusions à lire dans le rapport du groupe de travail sur les bases physiques du changement climatique, dévoilé le 9 août dernier.

PAR SYLVIE RIVIÈRE

« Nous sommes devant une situation de rupture: le changement climatique affecte toutes les régions du monde et il s'intensifie », avertit Valérie Masson-Delmotte, paléoclimatologue au LSCE et coprésidente du groupe de travail 1 du Giec¹. La température moyenne globale (à la surface de la Terre) ne cesse de croître depuis la période pré-industrielle de 1850-1900. Son élévation atteint désormais 1,1 °C pour la décennie qui vient de s'écouler. Et chacune des quatre dernières décennies a été successivement la plus chaude depuis au moins 2 000 ans! →

FOCUS

Des changements sans précédent

La teneur en CO₂ dans l'atmosphère est la plus élevée depuis au moins

2 millions d'années

La montée du niveau des mers s'accélère, et est la plus rapide depuis au moins

3 000 ans

Le niveau de glace de mer arctique est le plus réduit depuis au moins

1 000 ans

Un recul généralisé des glaciers est observé, sans précédent depuis au moins

2 000 ans

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



Ci-dessus

9 septembre 2021, super typhon Chanthu, mer des Philippines.

ABONNEMENT
GRATUIT SUR
bit.ly/abonnement-defis

ou en faisant parvenir par courrier vos nom, prénom, adresse, profession et tranche d'âge à :

Les Défis du CEA - Abonnements
CEA - Bâtiment Siège
91191 Gif-sur-Yvette

FOCUS

Les rapports du Giec

Ils servent de base commune aux négociations lors des COP (Conférence des parties à la convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques). Le 6^e rapport de synthèse du Giec, attendu pour septembre 2022, inclura notamment les travaux de ses trois groupes de travail.

Gr1 Bases scientifiques physiques du changement climatique et du système climatique - août 2021

Gr2 Vulnérabilités, impacts et risques, évaluation de l'action et des options d'adaptation - février 2022

Gr3 Atténuation (évaluation des émissions de gaz à effet de serre et des options permettant de les réduire) - mars 2022

Le rapport du groupe 1

234 auteurs en provenance de **65** pays

> 14 000 publications scientifiques citées

> 78 000 commentaires d'experts et de gouvernements

6 chercheurs du LSCE impliqués :

- Pascale Braconnot (CEA)
- Nada Caud (CEA)
- Valérie Masson-Delmotte (CEA, coprésidente du Gr 1)
- Jérôme Servonnat (CEA)
- Sophie Szopa (CEA)
- Robert Vautard (CNRS)

→ **Ci-contre**
Changement de la température à la surface du globe (moyenne annuelle) observée et simulée, sans et avec les facteurs humains.

→ → **Page de droite**
Les populations les plus exposées aux multiples impacts du réchauffement climatique sont généralement les plus pauvres.

L'impact des activités humaines

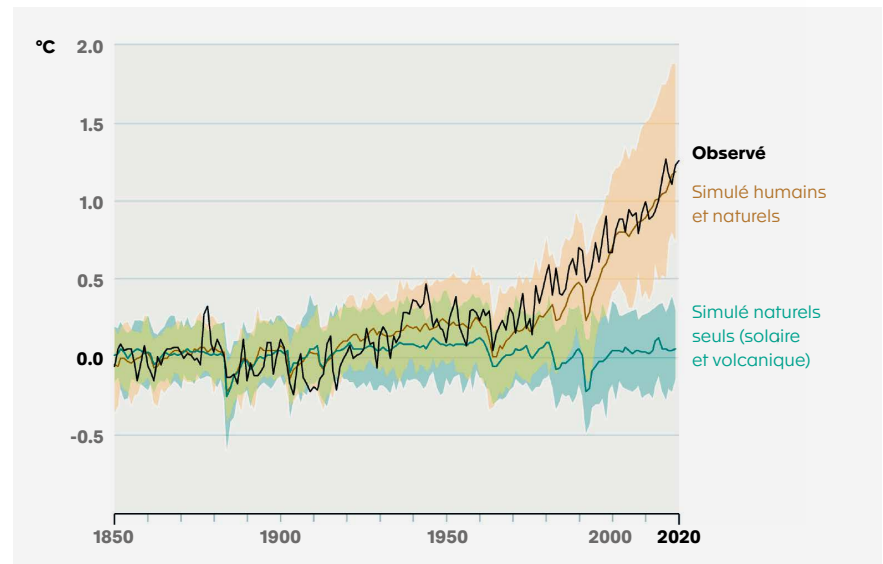
Depuis le précédent rapport du groupe 1 en 2013, les sciences du climat se sont enrichies d'avancées considérables : reconstitutions plus fines du climat passé, réseaux d'observations plus complets, amélioration des modèles de climat, meilleure compréhension des processus (comme les effets sur le cycle de l'eau), réduction des incertitudes. Si bien que les climatologues disposent aujourd'hui d'une image plus claire du fonctionnement du climat ; et concluent que le réchauffement en cours est, sans ambiguïté, intégralement imputable aux activités humaines. « *Ni les facteurs naturels seuls (activité du soleil, des volcans), ni la variabilité spontanée du climat n'ont un rôle significatif sur l'accumulation de chaleur à l'échelle planétaire depuis la fin du XIX^e siècle* », précise Valérie Masson-Delmotte.

En cause, les gaz à effet de serre libérés dans l'atmosphère par l'utilisation d'énergies fossiles (à hauteur de 80-90%) et par le changement d'usage des terres (déforestation, destruction de tourbières). Et cela, même si cette influence est atténuée d'environ un tiers par l'effet refroidissant des particules de pollution, par ailleurs néfastes pour la santé humaine. Le principal contributeur est en réalité le CO₂. « *Il y a une relation quasi linéaire entre le cumul des émissions humaines de gaz carbonique depuis la révolution industrielle et le niveau de réchauffement* », indique l'experte. Le méthane, dont la concentration a considérablement augmenté au cours de

la dernière décennie, tiré à la hausse par l'utilisation des énergies fossiles et certaines activités agricoles, tient le second rôle. Bien que sa concentration dans l'atmosphère soit plus faible et sa durée de vie plus courte, de l'ordre de la décennie, il induit un fort effet de serre. En modifiant la chimie de l'atmosphère, il entraîne de surcroît une augmentation de la teneur en ozone près de la surface. D'où un intérêt à réduire rapidement ses émissions, entraînant un double effet, sur la qualité de l'air et sur le réchauffement.

Cinq scénarios socio-économiques

Mais, prévient Valérie Masson-Delmotte, « *quoique que nous faisons aujourd'hui, nous n'éviterons pas un monde à +1,5°C dans les 20 ans à venir* ». Un monde dans lequel les conséquences que l'on observe déjà, à +1,1°C, se seront aggravées. Flore, faune, agriculture, zones littorales... rien n'y échappe. « *La saison de croissance des plantes s'est déjà allongée dans la plupart de l'hémisphère nord* », illustre la climatologue. Et la relation est désormais clairement établie entre la hausse de la température globale et les événements extrêmes (vagues de chaleur, pluies torrentielles, cyclones tropicaux, sécheresses), plus fréquents et plus intenses. « *Chaque incrément de réchauffement, autrement dit chaque tonne de CO₂ supplémentaire émise dans l'atmosphère, provoque une intensification de ces effets* ». À l'échelle mondiale, les pluies torrentielles sont par exemple 7% plus intenses par degré de réchauffement.



© IPCC



© Mohammad Pomir Hossain

Mais il est encore possible d'agir, et c'est le message fort du Giec, pour au moins contenir ce réchauffement en dessous de 2°C. Pour établir leurs conclusions, les experts ont examiné la réponse de la machine climatique à cinq scénarios socio-économiques, caractérisés par des émissions de gaz à effet de serre très contrastées. « *Le scénario selon lequel les émissions stagnent au niveau actuel pendant quelques décennies conduirait à un réchauffement qui dépasserait 2°C autour de 2050, et 3°C après 2100. Au-delà de 2°C, même en Europe, les extrêmes de chaleur atteindraient fréquemment des seuils de tolérance critiques pour l'agriculture et la santé humaine* », affirme la climatologue. À l'opposé, le scénario d'action immédiate, ambitieuse, dans lequel les émissions de CO₂ atteignent un **net zéro** mondial d'ici 30 ans, conduirait à dépasser temporairement et de manière limitée un niveau de réchauffement de +1,5°C, en restant largement en-dessous de 2°C. À condition d'engager des actions de grande échelle pour réduire immédiatement et chaque année les émissions de tous les gaz à effet de serre.

Une hausse du niveau de la mer irréversible

Quoi qu'il en soit, les composantes lentes du climat sont déjà largement perturbées, et ce de manière irréversible. La fonte des calottes polaires, la montée des eaux (due à la dilatation de l'océan qui se réchauffe

et à la fonte des glaciers et calottes) et l'acidification de l'océan profond (liée à l'absorption du CO₂) se poursuivront pendant des centaines d'années, voire sur des millénaires. Les projections sont vertigineuses : dans le meilleur des cas, les experts évaluent que l'élévation du niveau moyen des mers serait d'au moins 50 cm en 2100 (par rapport à 1900) et de plusieurs mètres en 2300. Avec des émissions de gaz à effet de serre qui seraient en forte augmentation, les chiffres s'envolent : près d'1 mètre en 2100, et entre 2 et 7 mètres en 2300, voire davantage en cas de déstabilisation rapide de certains secteurs de l'Antarctique. « *Mais on peut encore ralentir ce rythme. Une montée graduelle laissera plus de temps pour adapter tous les littoraux*, plaide Valérie Masson-Delmotte. *Nous sommes dans une période cruciale, car l'ampleur du réchauffement à venir dépendra des choix et des actions d'aujourd'hui* ». Seule une initiative coordonnée, forte et rapide de tous – États, mais aussi collectivités, entreprises, citoyens – sortira le climat de cette spirale. Six ans après les accords de Paris de 2015 signés lors de la COP21, le constat est que les récents engagements pris par les pays à horizon 2025-2030 ne seront pas suffisants pour en atteindre les objectifs². Et la perspective de limiter le réchauffement à un niveau proche de 1,5°C s'éloigne... Espérons que ce nouveau rappel à la réalité climatique formulé par le Giec sera entendu lors de la prochaine COP, prévue en novembre à Glasgow. La 26^e. ●

Un atlas régional

Un tiers du rapport du groupe 1 est consacré aux changements climatiques à l'échelle régionale, une nouveauté rendue possible grâce aux progrès des connaissances. Les experts du Giec ont élaboré un atlas interactif qui permet de visualiser les projections régionales pour différentes variables climatiques (précipitations, températures, etc.) et à différentes échelles de temps, selon différents niveaux de réchauffement planétaire et en fonction des scénarios d'émissions futures de gaz à effet de serre.

→ interactive-atlas.ipcc.ch

LEXIQUE

Émissions nettes zéro CO₂
Situation dans laquelle les émissions de CO₂ dans l'atmosphère sont soit nulles, soit compensées par des éliminations anthropiques. Ce comptage ne prend pas en compte le piégeage par les puits naturels de carbone.

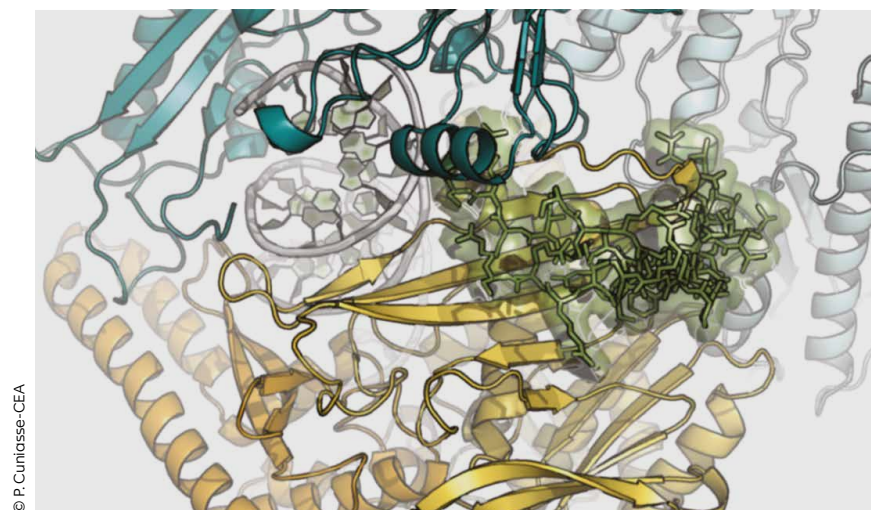
2. Limiter le réchauffement en-deçà de 2°C, et si possible en-deçà de 1,5°C.

LSCE
Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (Saclay).

EURÉKA L'ACTU DES LABOS

BIOLOGIE MOLÉCULAIRE

Lumière sur les télomères



© P. Cuniasso-CEA

↑ **Ci-dessus**
Études de modélisation *in silico* de structures tridimensionnelles. Un petit motif (en vert, au milieu) de la protéine Rif2 est suffisant pour sa liaison à MRX (en bleu, orange et jaune) et pour son inhibition.

LEXIQUE

Acide aminé
Composant des protéines.

Peptide
Petite chaîne d'acides aminés.

● **CEA-Jacob**
Institut de biologie François-Jacob (Fontenay-aux-Roses).

● **CEA-Joliot**
Institut des sciences du vivant Frédéric-Joliot (Orsay).

Les télomères jouent un rôle capital dans la stabilité de nos chromosomes, mais les mécanismes moléculaires sous-jacents sont en grande partie inconnus. Des chercheurs révèlent l'un d'entre eux.

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Tels des stylos encapuchonnés, nos chromosomes sont constitués à leurs extrémités de complexes ADN-protéines : les télomères. Ces structures non codantes jouent un rôle de « tampon », protégeant notre patrimoine génétique. Dans la plupart de nos cellules, lors du cycle de division, elles tendent à se raccourcir et lorsqu'elles deviennent trop courtes, les cellules arrêtent de se multiplier. C'est un processus anti-tumoral, mais il contribue aussi au vieillissement de l'organisme.

Éviter les fusions de chromosomes

Bien que situés en bout de chromosome, les télomères ne doivent pas être confondus avec les extrémités produites par des cassures d'ADN. Des processus complexes empêchent donc certains mécanismes de réparation de l'ADN d'opérer à cet endroit, bloquant toute

tentative de fusion entre deux chromosomes différents *via* leurs extrémités ; évitant ainsi un scénario catastrophe, source de cancers et autres maladies.

Des chercheurs des instituts Jacob et Joliot viennent de décrypter l'un de ces mécanismes chez la levure. Il implique deux protéines : MRX et Rif2. La première est un facteur central, engagé dans plusieurs voies de réparation de l'ADN. « *C'est un moteur moléculaire capable de reconnaître rapidement les extrémités double brins de l'ADN lorsqu'elles se forment* », explique Stéphane Marcand, du CEA-Jacob. Rif2, directement associée aux télomères, bloque quant à elle le fonctionnement de MRX. « *On connaît bien les fonctions de ces deux protéines, mais mal leur mode d'action* », ajoute le chercheur.

Un peptide-clé identifié

« *Nous avons identifié une petite séquence de 26 acides aminés dans Rif2, sur laquelle vient se fixer MRX. Dans des cellules de levure, cette liaison empêche le fonctionnement de MRX.* » Par quel mode opératoire ? C'est là qu'interviennent les prédictions de structure de protéines. « *Nous avons de cette manière identifié sur MRX la zone d'interaction avec Rif2, indique Philippe Cuniasso, du CEA-Joliot. Cela nous permet de proposer un scénario* ». La liaison gênerait physiquement MRX et l'empêcherait de s'accrocher à l'ADN télomérique, bloquant ainsi toute fusion entre chromosomes, délétère pour la cellule. Une hypothèse que devront confirmer de futures études de biologie structurale. Stéphane Marcand entrevoit déjà comment utiliser ces nouvelles connaissances. « *Est-ce que l'on pourrait synthétiser un petit peptide qui inhiberait MRN, l'équivalent de MRX chez l'homme ?* » Par exemple, pour explorer si des cellules cancéreuses peuvent être sensibles à cette inhibition. Une piste que l'équipe va désormais explorer. ●

SCIENCES COGNITIVES

La géométrie, une intuition humaine

L'être humain aurait la capacité innée de comprendre les formes géométriques, contrairement aux autres primates. C'est ce que montre une étude en psychologie cognitive expérimentale.

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Spirales, carrés, droites, lignes parallèles... de tout temps, les hommes ont utilisé et dessiné des formes géométriques. Cette appétence serait-elle exclusive à l'espèce humaine ? Une équipe de NeuroSpin a exploré la question en soumettant des humains et d'autres primates, des babouins, à une même série de tests. « *L'expérience consiste à trouver l'intrus parmi six quadrilatères, dont un seul comporte une irrégularité, comme un côté un peu plus long, une erreur de parallélisme ou un angle différent ; le test a été répété avec des formes de plus en plus complexes, allant du carré à un quadrilatère quelconque et sans régularité* », explique Mathias Sablé-Meyer, doctorant et concepteur de l'étude.

Ces expériences mettent en évidence un effet de régularité géométrique. « *L'humain trouve quasiment toujours l'intrus parmi des carrés, mais son taux d'erreur monte à 40 % avec un quadrilatère irrégulier* », commente-t-il. Autrement dit, nous trouvons l'intrus bien

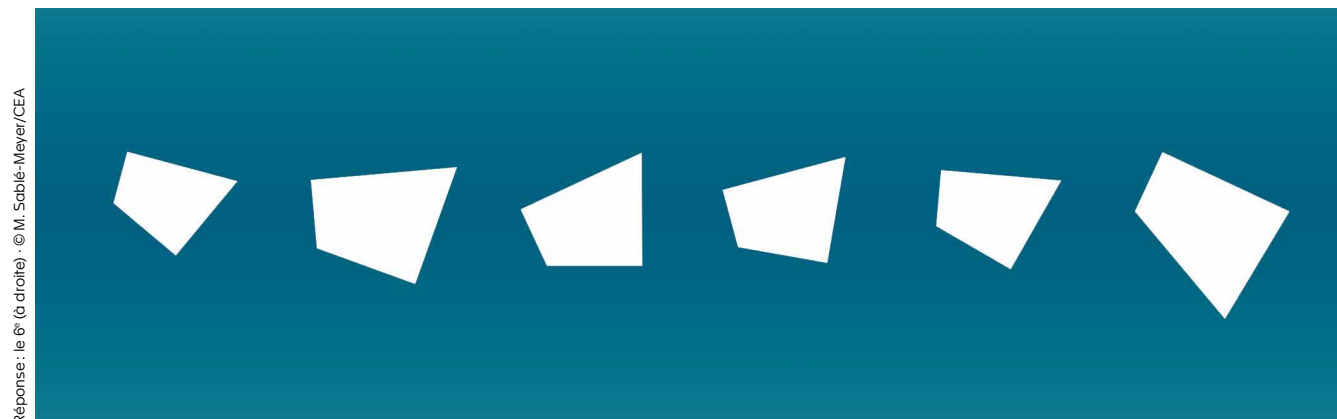
plus facilement si la forme est régulière, comme un carré.

Une capacité universelle

Cette capacité d'abstraction symbolique semble être propre à l'humain, indépendamment de l'âge, de l'éducation et de la culture. Des tests menés avec des enfants de maternelle et de première année d'école primaire ont en effet conduit aux mêmes conclusions, tout comme ceux réalisés par des adultes himbas n'ayant pas été scolarisés. Ce peuple pastoral de Namibie ne dispose pourtant que d'un vocabulaire réduit pour les formes géométriques. Chez les babouins, l'histoire est tout autre, comme l'expose Mathias Sablé-Meyer : « *il leur faut un entraînement intensif, 10 000 essais, pour bien comprendre le test et arriver à reconnaître l'intrus. Mais surtout, ils ne font pas de distinction entre une forme simple, régulière, et une forme complexe. Il leur est aussi facile, ou difficile, de percevoir un carré qu'un trapèze* ». Pour les chercheurs, l'humain dispose donc d'une intuition de régularité géométrique, un « langage » utilisant des notions comme l'angle droit ou le parallélisme. Elle constitue d'ailleurs un défi dans un domaine connexe, celui de la conception des modèles de réseaux de neurones de reconnaissance d'objets. ●

● **NeuroSpin**
Centre de recherche pour l'innovation en imagerie cérébrale (Saclay).

↓ **Ci-dessous**
Un des tests réalisés au cours de l'étude : cherchez l'intrus parmi ces six quadrilatères !



Réponse : le 6° (à droite). © M. Sablé-Meyer/CEA

CYBERSÉCURITÉ

Sous la cape d'invisibilité de Snowpack

Sur Internet, le piratage de données et la surveillance de masse alimentent un marché noir lucratif. Ils soulèvent aussi des enjeux de souveraineté. Protéger ces données exige des innovations constantes. Les ingénieurs du CEA-List ont imaginé une solution inédite, bientôt commercialisée par la start-up Snowpack.

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Si la plupart des données sensibles transitant sur Internet sont aujourd'hui chiffrées et donc plutôt bien protégées, les métadonnées nécessaires à leur acheminement, comme les adresses IP (l'identifiant unique de l'utilisateur) restent visibles et constituent un point de vulnérabilité. «*Épier les interactions entre ces adresses vaut de l'or*, assure Christophe Janneteau, chef de service au CEA-List. *Elles permettent par exemple de connaître tout le réseau de relations d'une entreprise, d'identifier les clients d'une banque, etc. C'est aussi une voie pour accéder aux données elles-mêmes, susceptibles dès lors de subir des tentatives de déchiffrement*».

Des solutions d'anonymisation existent, comme les services VPN. S'ils attribuent à l'utilisateur une autre adresse IP, ils restent néanmoins des «*tiers de confiance*» ayant accès aux contenus et aux utilisateurs. «*Avec notre solution, nous camouflons les*

données et métadonnées», explique Alexis Olivereau, chef de laboratoire au CEA-List.

Démultiplier les messages

Les échanges, et donc les paquets de données qu'ils contiennent, sont coupés en N «*flocons*», c'est-à-dire N fragments complémentaires chiffrés et anonymes, transmis via différents chemins. À la réception, seul l'utilisateur du système Snowpack peut recombinaison le tout. Impossible *a priori* pour un attaquant d'identifier les différents «*flocons*» complémentaires. Pour le chercheur, «*cette technologie offre une réponse efficace et économique aux enjeux de souveraineté des réseaux numériques européens*».

Ambition internationale

Pour autant, garantir l'anonymisation des échanges sur Internet n'est pas sans contrepartie. Un tel service pourrait bien séduire toutes sortes de réseaux malveillants et criminels. Rassurant, Frédéric Laurent, président de la start-up, précise : «*nous pouvons filtrer et bloquer les serveurs répertoriés comme malveillants ou limiter l'accès à notre service aux seuls serveurs de confiance*». La start-up vise un déploiement à grande échelle dès que possible. Comme le résumement les experts, «*plus on a d'utilisateurs, plus "la couche de flocons" est épaisse, plus on a des chemins disjoints les uns des autres, et plus le système est efficace*». Et affiche son ambition de devenir LA plateforme d'anonymisation et de sécurité sur Internet. ●

« La technologie Snowpack offre une réponse efficace et économique aux enjeux de souveraineté des réseaux numériques européens. »

Christophe Janneteau, du CEA-List

CEA-List
Laboratoire des systèmes numériques intelligents (Saclay).

CLIMAT

Ça commence dans notre assiette

Selon une étude internationale impliquant le LSCE, la production d'aliments d'origine animale était en 2010, deux fois plus émettrice de gaz à effet de serre que celle de produits d'origine végétale.

PAR AUDE GANIER

Depuis l'université d'Illinois (États-Unis), l'équipe internationale de Xiamong Xu a construit la première base de données permettant d'estimer les émissions mondiales des gaz à effet de serre (GES) liées à l'alimentation humaine. En développant un modèle et à partir des données de plus de 200 pays, elle prend en compte un large éventail de produits agricoles et de pratiques, y compris l'alimentation animale, le transport et le commerce. Il en résulte qu'en 2010, la production alimentaire mondiale est responsable d'une émission de GES équivalente à 17,318 milliards

de tonnes de CO₂ (soit 48 % de celles émises par la combustion d'énergies fossiles).

La part du bœuf et du riz dans le bilan carbone

Publiée dans la revue *Nature food*, l'étude détaille la répartition de ces émissions. 57 % sont attribuées à la production d'aliments d'origine animale; 29 % à celle d'aliments d'origine végétale; et 14 % à d'autres secteurs (caoutchouc, coton, etc.). Par ailleurs, il ressort de l'étude que le bœuf et le riz sont les produits les plus contributeurs de GES liés à l'alimentation avec respectivement 25 % et 12 %. De même, l'Asie du Sud et du Sud-Est ainsi que l'Amérique du Sud apparaissent comme étant les principaux émetteurs. ●

LSCE
Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (Saclay).



© Healthly food creation



© ESA

TÉLÉCOM

Allo IoT, ici satellites !

Une équipe du CEA-Leti étudie l'adaptation d'un protocole de communication permettant des liaisons entre satellites et objets connectés. Une mission confiée par le CNES.

PAR AUDE GANIER

L'un des principaux protocoles de communication pour l'Internet des objets (le NB-IoT) pourrait être utilisé pour des liaisons satellite, moyennant des adaptations mineures. C'est la conclusion d'une étude du CEA-Leti qui montre, par simulation, qu'une constellation de satellites gravitant à quelques centaines de kilomètres au-dessus de la Terre peut se connecter à plusieurs millions d'objets, avec des débits de quelques kilobits par seconde. Le NB-IoT par satellite se justifierait en particulier dans les zones rurales à faible densité et les océans non couverts par des stations terrestres de connexion. Les chercheurs ont notamment défini des paramètres de la forme d'onde adaptés à ce nouvel usage. Mais ils doivent à présent gérer l'effet Doppler lié à la vitesse de déplacement du satellite; effet qui induit le changement apparent de la fréquence d'un signal reçu par un observateur mobile par rapport à une source émettrice fixe, et inversement, entre un récepteur fixe et un émetteur mobile. ●

CEA-Leti
Institut des micro et nanotechnologies et de leur intégration dans les systèmes (Grenoble).

ÉLECTRONIQUE QUANTIQUE

Préserver la cohérence avec du graphène



© CEA

Des chercheurs du CEA-Iramis et leurs partenaires ont mis au point un dispositif en graphène, qui permet de tester la robustesse de circuits quantiques à base de graphène face aux perturbations induites par la « décohérence » quantique.

PAR LUC BARBIER ET AUDE GANIER

Enfermé dans une boîte contenant un atome radioactif susceptible d'actionner un marteau qui brisera une fiole de poison, le chat est à la fois mort et vivant... tant que l'on n'a pas ouvert cette boîte pour connaître son état. Cette image de Schrö-

dinguer, ici très résumée, illustre deux principes de la mécanique quantique : l'intrication et la superposition. Et cette possibilité d'intriquer et de superposer plusieurs états quantiques de particules (par exemple des électrons) et de les traiter simultanément, est à l'origine de la puissance du traitement quantique de l'information.

Une condition toutefois, et non des moindres : savoir préserver tout au long du calcul, au risque de générer des erreurs, la cohérence de ces états ainsi intriqués. Un graal de l'électronique quantique que Preden Rouleau aborde dans le cadre de son contrat européen ERC Cohegraph : « au CEA-Iramis, nous cherchons à concevoir

les meilleurs circuits électroniques permettant de réaliser et de manipuler des états quantiques intriqués, tout en veillant à les préserver de la décohérence. Celle-ci est induite par l'inévitable interaction avec l'environnement et fait disparaître la superposition des états ».

Mesurer l'interférence de faisceaux quantiques électroniques

Un moyen de tester les performances de ces circuits est de réaliser des expériences d'interférométrie entre ondes électroniques initialement cohérentes (cf. dualité onde-particule). Il s'agit d'observer, par le biais des interférences ainsi obtenues, si la cohérence est préservée ou non. Pour cela, les dispositifs utilisés (des conducteurs bidimensionnels) nécessitent de séparer ou recombiner les faisceaux quantiques électroniques. Ils sont usuellement constitués d'hétérostructures semi-conductrices en gallium (précisément, GaAs et GaAlAs). Mais aujourd'hui, un matériau apparaît bien plus prometteur du fait de ses propriétés électroniques et magnétiques remarquables : le graphène, couche monoatomique de carbone ou simple monofeuillet de graphite que l'on trouve aussi dans les mines des crayons à papier.

La piste du graphène

Restait toutefois à utiliser ce précieux matériau pour réaliser des circuits comportant une lame séparatrice, sorte de miroir semi-transparent, à même de transmettre des faisceaux quantiques électroniques pour faire les expériences d'interférométrie.

C'est ce qu'est parvenu à faire l'équipe de

l'Iramis en encapsulant le graphène entre des couches de nitrure de bore pourvues d'électrodes afin de le polariser localement. Deux zones adjacentes peuvent être ainsi définies : l'une avec un excès d'électrons, « dopée n », l'autre avec un manque d'électrons, « dopée p ». Ce dispositif fonctionne sous un champ magnétique intense en régime d'effet Hall quantique, tel que l'explique Preden Rouleau. « Dans ce régime, des "canaux" électroniques s'ouvrent sur les bords du conducteur. Les électrons s'y propagent, sans dissipation d'énergie et dans un état bien défini, suivant la direction imposée par le dopage local et le sens du champ magnétique. »

La robustesse du circuit vis-à-vis de la décohérence

La clé de la découverte ? « En mettant à profit les propriétés électroniques très spécifiques du graphène, nous avons pu réaliser en bord du conducteur deux espaces séparateurs d'états électroniques. Il suffit alors de déplacer le point de séparation pour accorder leur coefficient de transmission électronique, ce que confirme la modélisation réalisée par notre collègue Geneviève Fleury », indique François Parmentier.

Ainsi, en réalisant un circuit graphène équipé de lames séparatrices, qui plus est ajustable, l'équipe a pu mettre au point un interféromètre électrique (de type Mach-Zehnder), modéliser son fonctionnement et obtenir de premières figures d'interférences. Celles-ci montrent une robustesse vis-à-vis de la décohérence quantique qui dépasse de loin celle des interféromètres en gallium. Le graphène sera-t-il le matériau d'avenir de l'électronique quantique ? ●

« Nous cherchons à concevoir les meilleurs circuits électroniques permettant de réaliser et de manipuler des états quantiques intriqués, tout en veillant à les préserver de la décohérence. »

Preden Rouleau, chercheur au CEA-Iramis

À gauche

Dispositif en graphène qui, sous un champ magnétique intense et par effet Hall, fait apparaître des canaux de conduction des électrons avec deux sens de circulation.

CEA-Iramis

Institut rayonnement-matière de Saclay.

PETIT LEXIQUE QUANTIQUE

Mécanique quantique

Théorie décrivant la structure et l'évolution dans le temps et l'espace des phénomènes physiques à l'échelle de l'atome et en dessous.

Intrication quantique

Phénomène dans lequel deux particules (ou groupes de particules) forment un système lié et présentent des états quantiques dépendant l'un de l'autre quelle que soit la distance qui sépare ces particules.

Superposition quantique

Principe selon lequel un même état quantique d'une particule peut posséder plusieurs valeurs pour une certaine quantité observable (spin, position, quantité de mouvement, etc.).

État quantique

Terme qualifiant tous les aspects d'un système physique. Et pour un système placé dans un état quantique défini, une mesure peut donner plusieurs résultats différents selon la probabilité d'apparition de chacun.

Cohérence quantique

Situation dans laquelle la propriété d'onde d'une particule est divisée en deux ondes quantiques qui interfèrent l'une avec l'autre de manière cohérente.

Décohérence quantique

Interaction constante d'un système avec son environnement (instruments de manipulation, observations, mesure, etc.) qui provoque la disparition de la superposition cohérente des états quantiques.

Dualité onde-particule

Principe selon lequel tous les objets de l'univers microscopique présentent simultanément des propriétés d'ondes et de particules.

Effet Hall quantique

Effet par lequel les électrons d'un conducteur bidimensionnel (comme le graphène), soumis à un champ magnétique intense, suivent des trajectoires circulaires et se retrouvent dans des états quantiques fortement dégénérés. La conduction électrique prend alors des valeurs particulières quantifiées. Il en résulte que les électrons en volume ne se propagent pas, tandis que seuls ceux situés en bord du conducteur assurent la conduction électrique.

BIOLOGIE VÉGÉTALE

Beauté fractale

Le mystère de la forme des choux romanesco vient d'être élucidé. Une histoire de bourgeons qui ne fleurissent jamais...

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Quel est le point commun entre une feuille de fougère, un flocon de neige et un chou romanesco? La beauté mathématique, celle des structures fractales. Ces objets portent en eux des motifs géométriques similaires se répétant, comme à l'infini, à des échelles de plus en plus petites. Pour comprendre les dessous génétiques de la croissance si parfaite du romanesco, les chercheurs ont combiné génie génétique et modélisation mathématique.

Des petits choux empilés

« Nous avons travaillé avec une plante très utilisée en laboratoire, *Arabidopsis thaliana*. Chez cette cousine du chou, nous savions que deux mutations génétiques suffisaient pour changer les fleurs en petits choux », indique François Parcy, directeur de recherche CNRS au CEA-Irig. Au fil des expériences, les chercheurs découvrent pourquoi chez les choux, les bourgeons ne parviennent pas à donner des fleurs. Ils se transforment en tiges qui à leur tour tentent de produire des fleurs, et ainsi de suite. Le tout provoque une accumulation ramassée de tiges sur tiges, formant un empilement de petits choux. « *Ilya un va-et-vient entre activation des gènes gouvernant la formation des fleurs et ceux des tiges, dû à des systèmes perturbés de régulation des gènes, par le biais de mutations. Mais si on ne cueille pas le chou, la plante finira quand même par produire une multitude de fleurs, puis des graines.* » Si tous les choux construisent des structures fractales, ces dernières sont exacerbées chez le romanesco : « *un paramètre diffère, expliquant sa structure pyramidale*, précise le généticien. *Ses tiges produisent des bourgeons de plus en plus rapidement alors que ce rythme de production est constant chez le chou-fleur.* »

Une sélection artificielle séculaire

Chou romanesco, de Bruxelles, chou-rave, chou-fleur... tous résultent d'une sélection artificielle à partir d'une seule espèce ancestrale. Sans le savoir, l'humain a en effet accumulé sur des siècles d'importants changements génétiques dans ces plantes, modifiant de façon drastique leur apparence. « *C'est d'ailleurs le cas de toutes les plantes que l'on consomme. Bien souvent, elles sont aussi devenues plus fragiles, en perdant par exemple des gènes de résistance naturelle*, déplore le chercheur, qui se prend à envisager une domestication de novo. *Cette approche consiste à revenir à des plantes ancestrales, naturellement résistantes aux insectes et maladies, ou peut-être même, plus aptes à faire face au changement climatique; puis à les domestiquer avec seulement quelques modifications génétiques ciblées, comme celles que nous venons de découvrir chez le chou romanesco.* » ●



© Nathanaël Prunet

LEXIQUE

Domestication (des plantes)
Sélection (ou élaboration) de plantes présentant des avantages pour l'homme (fruits plus gros, plus charnus, graines restant attachées à l'épi, meilleur goût, couleurs choisies, etc.).



CEA-Irig
Institut de recherche interdisciplinaire de Grenoble.



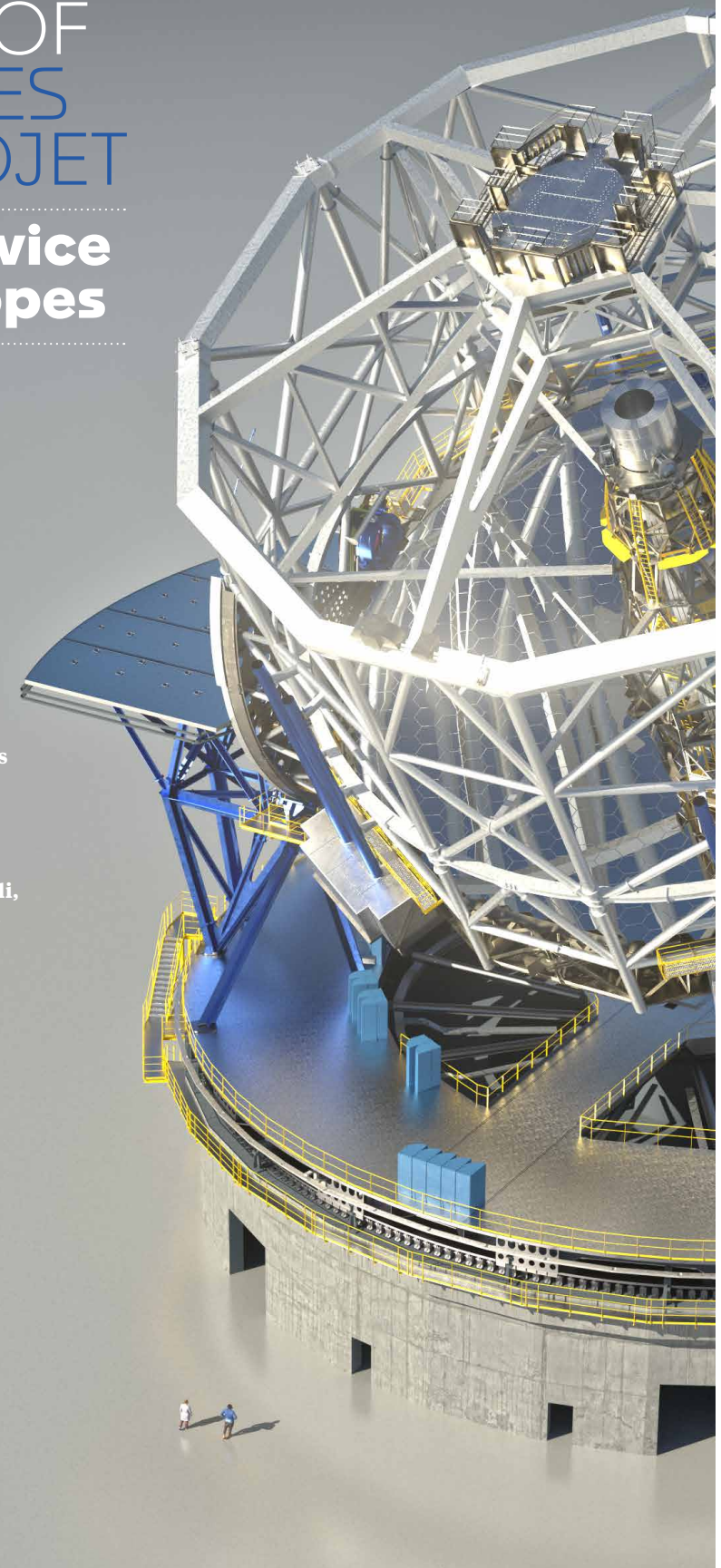
Ci-dessous
Chou romanesco, détail.

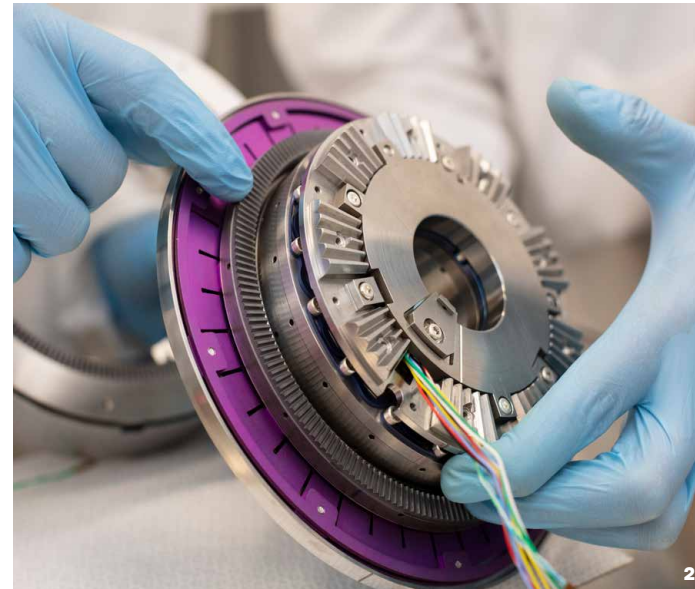
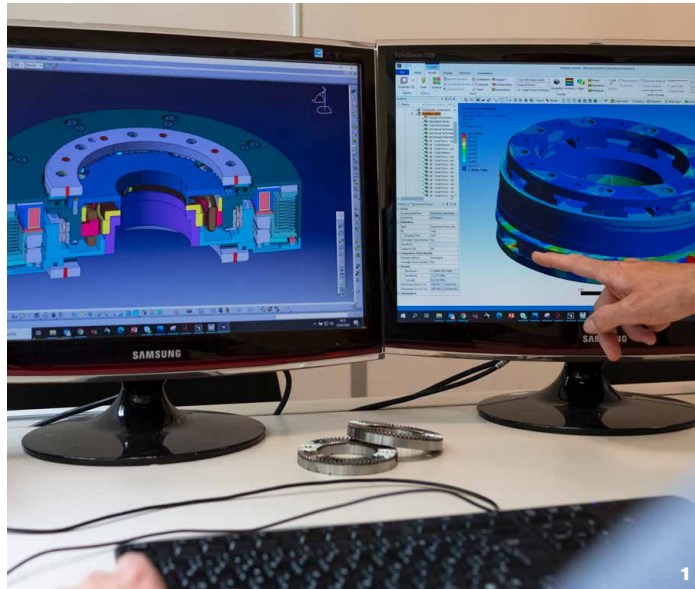
MAKING-OF COULISSES D'UN PROJET

Icar, au service des télescopes

Cela n'a peut-être l'air de rien pour ces pionniers du CEA-Irfu rompus à l'exercice depuis 1997. Mais la nouvelle génération de cryomécanisme Icar qu'ils développent bat des records, alors même que la contrainte imposée était d'en réduire significativement le coût. De quoi s'agit-il? Ce dispositif permet de positionner précisément des composants optiques afin de configurer les instruments d'analyse des télescopes selon les objectifs scientifiques. C'est dans le cadre de l'ELT (*Extremely Large Telescope*), le plus grand observatoire au sol du monde en cours de construction au Chili, que les physiciens et ingénieurs ont redoublé d'ingéniosité. Le prototype vient d'être validé par l'Eso (*European Southern Observatory*). →

REPORTAGE RÉALISÉ
PAR AUDE GANIER (TEXTE)
ET ROMAIN GUITTET (PHOTOS)





EN IMAGES

① Conception assistée par ordinateur du prototype Icar de 5^e génération.

② Assemblage et tests du fonctionnement du prototype à température ambiante.

FOCUS

ELT, Metis et Icar

Le futur télescope ELT observera la matière « tiède » (300 – 3 000 kelvin) de l'Univers dans l'infrarouge. Divers environnements du milieu interstellaire seront ciblés : des disques proto-planétaires de notre galaxie dans lesquels des planètes géantes sont en train de se former, jusqu'aux petits corps éloignés de notre système solaire. Son miroir de 39 m de diamètre réfléchira les faisceaux lumineux avec un système d'optique adaptative corrigeant les turbulences atmosphériques. Pour cela, les cryomécanismes Icar du CEA-Irfu positionneront précisément les optiques dans le champ des détecteurs. L'un des instruments, le spectromètre Metis, pourra alors analyser les rayonnements émis par les objets célestes pour en connaître la composition chimique.

1 Principe

« L'idée de départ du cryomécanisme Icar développé dans notre institut est l'association improbable de deux outils non destinés à fonctionner ensemble. »

Mickaël Lacroix, ingénieur du bureau d'études

Icar est constitué d'un moteur pas à pas, dispositif enclenchant un mouvement angulaire à partir d'une impulsion électrique, et d'un embrayage à dentures, qui accouple ou sépare des « dents » grâce à un électro-aimant. Le premier est utilisé pour positionner précisément une roue qui supporte les composants optiques des instruments du télescope. Le second permet de bloquer la position de la roue, avec une très grande « répétabilité angulaire ». Celle-ci garantit que la roue se repositionne toujours au même endroit.

Bien qu'ayant fait ses preuves sur d'autres télescopes (*voir focus*), l'architecture d'Icar a dû être repensée pour le futur observatoire ELT et son spectromètre Metis. Enjeu : réduire le coût de fabrication.

2 Conception

« L'une des difficultés de conception a consisté à garantir le fonctionnement d'Icar de 20 °C à – 250 °C. »

Olivier Corpace, ingénieur en instrumentation

Si le moteur pas à pas, certifié pour le spatial lors de précédentes missions, demeure celui fourni par Safran, les autres pièces ont dû être reconsidérées. C'est le cas des dentures très fines de l'embrayage dont les ingénieurs ont revu les exigences pour ne pas avoir à s'adresser à des entreprises de mécanique de haute précision. Ils se sont tournés vers les industries qui fabriquent des engrenages et ont pu constater que les performances étaient compatibles avec les besoins. Mais une autre contrainte fut de garantir que l'ensemble des composants (y compris les roulements à billes) puissent opérer depuis la température ambiante jusqu'aux températures cryogéniques. Car l'instrument Metis fonctionne à très basse température pour ne pas parasiter l'analyse du rayonnement infrarouge des lumières stellaires.

3 Validation

« Les tests de durée de vie ont été effectués sur 165 000 mouvements, soit 18 années d'observations de Metis. »

Jean-Christophe Barrière, ingénieur en instrumentation

Pour s'assurer du fonctionnement d'Icar à basse température, un prototype a été testé dans un cryostat. Cette étape a permis de révéler plusieurs difficultés, qui ont conduit les ingénieurs à changer les matériaux de certains composants. Par exemple, pour éviter que les roulements à billes interagissent avec le champ magnétique de l'électro-aimant de l'embrayage, ils ont remplacé l'acier inoxydable des billes par de la céramique. De même, les cages en laiton retenant les billes frottaient avec les pistes du roulement. La solution fut d'en concevoir de nouvelles avec un matériau « glissant » et compatible avec le vide et le froid cryogénique. Une fois ces problèmes résolus, les essais se sont poursuivis dans le même cryostat avec un test de durée de vie effectué sur 165 000 mouvements.

4 Performances

« La précision du positionnement de 15 microradians équivaut à observer une pièce d'1 € à 1 km de distance. »

Olivier Corpace, ingénieur en instrumentation

L'objectif de réduction des coûts est atteint avec un gain d'un facteur 2,5 par rapport à la précédente génération. Un pari doublement réussi au vu des performances : la répétabilité de positionnement angulaire de la roue est de 15 microradians (μrad), une précision équivalant à observer une pièce d'1 € à 1 km de distance ; quand celle du cryomécanisme développé il y a vingt ans pour l'instrument Visir du VLT (*voir focus*) était de 50 μrad , soit l'observation d'une orange à 1 km. La validation par l'Eso de ce nouveau prototype Icar marque à présent le début de la phase de fabrication et de qualification des modèles de série. Les douze cryomécanismes du CEA-Irfu devront rejoindre Metis en 2024 pour que l'ELT puisse livrer ses premières images à partir de 2029.

EN IMAGES

③ Tests en cryostat permettant de descendre jusqu'à – 250 °C.

④ Détail de l'embrayage à dentures du prototype Icar.

FOCUS

5 générations d'Icar réalisées par le CEA-Irfu pour différents instruments

2004 Imageur et spectromètre Visir du télescope au sol VLT de l'Eso.

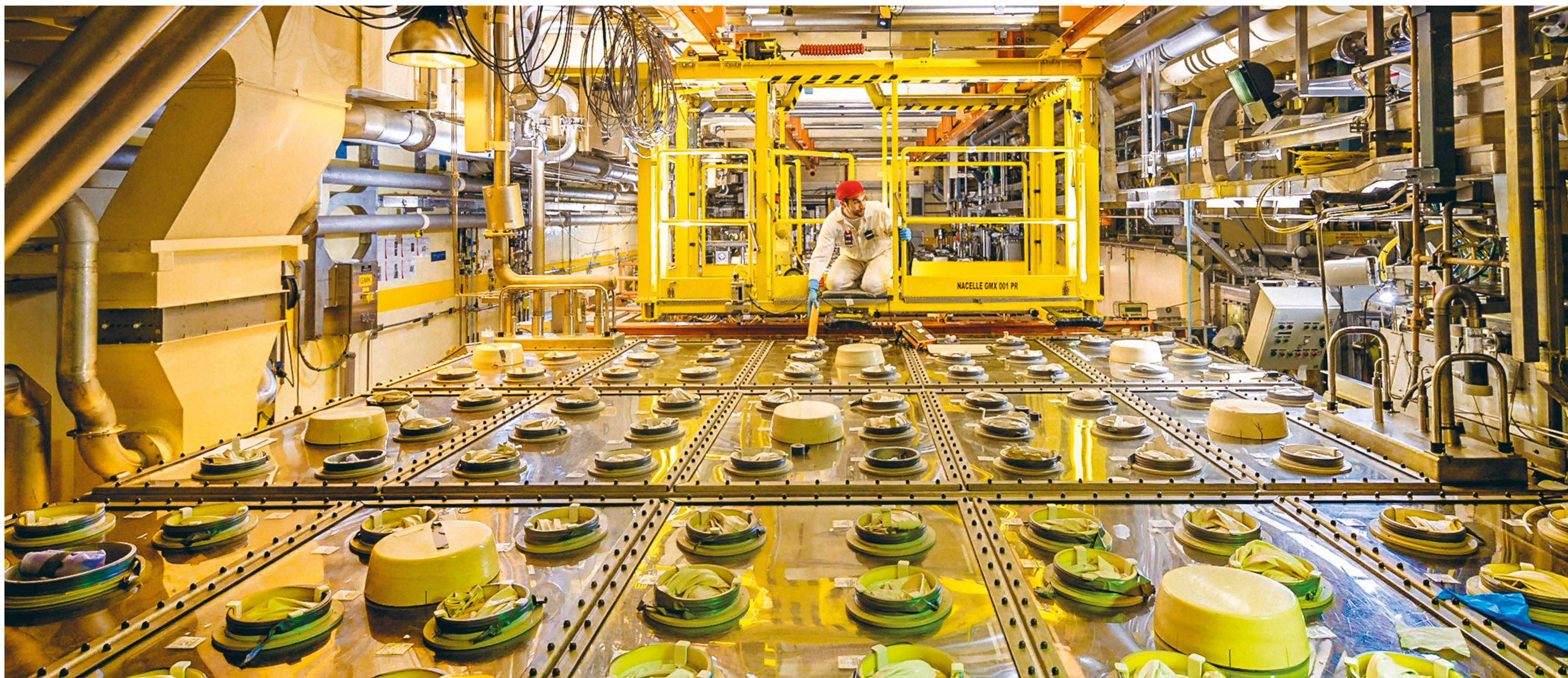
2010 Coronographe et spectroscopie Miri (études de faisabilité) du télescope spatial JWST de la Nasa (lancement prévu en décembre 2021).

2012 Caméra Camistic du télescope au sol IRAIT d'un consortium international.

2017 Spectro-photomètre NISP du télescope spatial Euclid de l'Esa (lancement prévu en 2022).

2021 Spectromètre Metis du télescope au sol ELT de l'Eso (fonctionnement prévu en 2029).

CEA-Irfu
Institut sur les lois
fondamentales de l'Univers
(Saclay).



DOSSIER ÉNERGIE

Nucléaire : soutenir l'innovation de la filière

PAR AUDE GANIER ET HUGO LEROUX

↑
Ci-dessus
Boîtes à gants
de l'usine Melox
de fabrication
du combustible Mox.

Le contexte mondial de l'énergie fait face depuis plusieurs années au défi colossal du changement climatique. Plus que jamais, la technologie bas carbone de l'énergie nucléaire s'avère pertinente et compétitive pour répondre aux besoins croissants en électricité. Troisième industrie de France regroupant 2 600 entreprises et totalisant 220 000 emplois directs et indirects, la filière nucléaire est confrontée elle-même à ses propres enjeux en vue de sa pérennité. Cinq axes structurants, porteurs d'innovations de rupture et garants

de la sûreté, ont ainsi été identifiés en avril dernier par le Comité stratégique de la filière nucléaire. Parmi eux, la numérisation de la filière, la conception des réacteurs de demain, la promotion de l'économie circulaire impliquant tant le multirecyclage du combustible usé que l'optimisation de la gestion des déchets, ainsi que le maintien et le renouvellement des compétences. Autant de sujets qui mobilisent les équipes du CEA.

Nucléaire 4.0

Le projet « Réacteur numérique » ambitionne de créer de véritables jumeaux virtuels de centrales nucléaires. De quoi faciliter leurs conception, pilotage et maintenance.

Imaginez la réplique numérique d'un réacteur nucléaire, capable de simuler et de prévoir les phénomènes qui s'y déroulent. Telle est l'ambition du projet « Réacteur numérique » piloté par EDF, impliquant le CEA et sept autres partenaires. « *Aujourd'hui, les acteurs du nucléaire savent déjà simuler les phénomènes physiques au cœur d'un réacteur* », indique Xavier Raepsaet, responsable des programmes simulation au sein de la Direction des énergies (DES) du CEA. *Mais, dépendant des besoins, chacun a développé ses propres méthodes et parfois ses propres outils de calcul*. Les logiciels du CEA sont par exemple complémentaires des simulations des industriels qui travaillent à d'autres échelles de raffinement, et avec des temps de restitution des résultats plus exigeants. « *Avec le jumeau numérique, il s'agit de faire converger des millions de lignes de code de calcul dans un système multiphysique, dans lequel ces différents codes sont intégrés et interopérables* », résume le spécialiste. « *Il faut voir cela comme une centrale virtuelle où l'on peut effectuer des opérations de pilotage à l'avance pour voir ce*

qu'il se passera », ajoute Jean-Yves Pierron, ingénieur au CEA-List. Avec, à la clé, des simulations optimisées pour la conduite des centrales et l'entraînement des ingénieurs et opérateurs.

Optimiser la maintenance et l'aide au pilotage

Au-delà de la simple simulation de scénarios « type », le projet ambitionne de pousser le réalisme jusqu'à la prédiction des phénomènes. « *Jusqu'ici, les calculs étaient trop lourds pour permettre le pilotage des centrales en temps réel. Mais en tirant parti des progrès des supercalculateurs, nous pourrions effectuer très rapidement des simulations très complexes et anticiper l'évolution des réactions en situation* », pointe Xavier Raepsaet. Pour ce faire, cette prédiction se nourrira des historiques de données de fonctionnement des centrales, fournies par les différents capteurs (température, pression, etc.). « *Les technologies d'intelligence artificielle (IA) comme l'apprentissage profond permettent désormais de donner du sens à ces masses de données. Marier la simu-*

« En tirant parti des progrès des supercalculateurs, nous pourrions effectuer très rapidement des simulations très complexes et anticiper l'évolution des réactions en situation. »

Xavier Raepsaet, responsable des programmes simulation au sein de la Direction des énergies du CEA.

lation à la donnée est la clé », souligne Jean-Yves Pierron. Cela bénéficiera en premier lieu à la maintenance. « *Prenons l'exemple de la formation de défauts d'irradiation sur la cuve du réacteur : jusqu'ici, les inspections décennales permettaient d'obtenir une photographie précise de l'état des installa-*

tions ; grâce à la prédiction, nous pourrions anticiper bien plus efficacement l'usure des matériaux », illustre Xavier Raepsaet. La formation des personnels s'en trouvera également facilitée. « *On ne travaillera plus sur un modèle de centrale-type car chacune pourra avoir son jumeau numérique* », précise Jean-Yves Pierron. *D'autant que des représentations 3D des installations pourraient être couplées aux simulations afin de visualiser des phénomènes physiques s'y déroulant, comme des écoulements ou des flux de chaleur* ».

Expertises en calcul multiphysique et en technologies numériques

Au sein du projet, la DES apportera son expertise historique en termes de calcul multiphysique. « *Le CEA a codéveloppé de nombreux codes de calcul, dans de nombreuses disciplines (neutronique, thermohydraulique...), aujourd'hui utilisés en partie par les industriels qui attendent du CEA de bénéficier du meilleur de l'expertise physique par rapport à leurs concurrents* », rappelle Xavier Raepsaet. Au niveau des



Ci-contre

Visualisation d'une simulation thermohydraulique d'un cœur de réacteur.





© EDF

technologies du numérique, le CEA-List proposera ses compétences sur les aspects IA pour l'intégration des données. Il s'agira notamment de développer des outils de traitement du langage naturel. Ceux-ci doivent être capables de traduire les exigences d'exploitation d'EDF en règles logiques vérifiables par des observateurs intégrés aux simulateurs, pour aider à la

surveillance du bon fonctionnement d'une centrale. Concernant la cybersécurité, les ingénieurs travaillent à la mise en place d'une plateforme finale d'utilisation, en veillant à ce que le jumeau numérique soit facile à prendre en main par les utilisateurs finaux.

De l'harmonisation des données jusqu'à la certification

Pour concrétiser cette vision ambitieuse, les équipes du CEA devront néanmoins relever quelques défis. « *L'une des difficultés est de rendre interopérables les outils de calcul. Il y a un gros travail d'harmonisation à effectuer* », souligne Xavier Raepsaet. Autre challenge : la certification du jumeau numérique auprès des autorités de sûreté comme l'ASN¹. En effet, comment garantir son niveau de réalisme ? Quel degré de confiance lui accorder ? Quelles incertitudes sont associées aux résultats ? Des questions dont la DES et le List sont suffisamment coutumiers pour miser sur la livraison, en 2023, du premier code intégré pour la simulation du réacteur. ●

« Une centrale virtuelle où l'on peut effectuer des opérations de pilotage à l'avance pour voir ce qu'il se passera. »

Jean-Yves Pierron, ingénieur au CEA-List

FOCUS

Le numérique booste aussi l'aval de la filière

Accélérer la transition numérique des usines de traitement et conditionnement des déchets est l'objectif du projet « Usine de demain », que proposent Orano et le CEA avec leurs partenaires. Il consiste à déployer des technologies de pointe, comme les caméras à rayons gamma ultraminiaturisées localisant les points chauds radioactifs et des systèmes de monitoring de la radioactivité dans les effluents, avec une sensibilité de l'ordre du becquerel. Autre technologie prometteuse, la dosimétrie par fibre optique pour le suivi radiologique dans des environnements contraints, et la visualisation des risques de contamination par les opérateurs directement depuis des lunettes de réalité virtuelle. S'ils font leur preuve, les nombreux développements pourraient, à terme, enrichir l'offre d'industriels français. « *Des partenaires comme Shark Robotics, fabricant de robots pour le secteur de l'énergie, ou la start-up Diota spécialisée en réalité augmentée, seront en mesure de les industrialiser* », se réjouit Frederick Carrel, chef du projet au CEA-List. Le numérique est également au cœur de la R&D en robotique pour l'industrie nucléaire. Il permet d'enrichir les technologies de télé-opération à retour d'effort par des outils de commande supervisée, d'automatisation et d'immersion de l'opérateur.

LEXIQUE

Observateurs
Processus dédiés à la vérification de règles logiques.

1. Autorité de sûreté nucléaire.

CI-dessus

Développement du projet Réacteur numérique.

Le pari des petits réacteurs modulaires

Le renouveau de la filière passe également par des concepts de petits réacteurs modulaires, appelés SMR (*Small Modular Reactor*).

LEXIQUE

Puissance résiduelle
Puissance qui subsiste même après l'arrêt du réacteur, en raison des réactions de fission qui continuent de se dérouler.

Fonctionnement nominal
Fonctionnement d'un système en mode non dégradé, sans erreur ni dysfonctionnement.

Corium
Magma formé lors de la fusion accidentelle du cœur d'un réacteur, composé du combustible et de la matière qui fond à son contact.

« Ces centrales étant plus petites, on pourra, à puissance équivalente, fabriquer davantage de pièces en usine, à la façon d'un Airbus. »

Jean-Michel Ruggieri,
chef du programme SMR
à la DES

1. Framatome, TechnicAtome et Naval Group.

Après des décennies dédiées à la croissance de la puissance des réacteurs, dans une logique qui culmine aujourd'hui avec l'EPR (1 650 MW), les petits réacteurs modulaires SMR s'apprentent à voir le jour. Positionnés dans la tranche des 50 à 300 MW, ils suscitent depuis quelques années un engouement mondial : pas moins d'une cinquantaine de projets seraient actuellement en développement. En France, le CEA explore ce créneau *via* notamment le projet NuwardTM qu'EDF mène avec d'autres partenaires¹. « *Ce type de réacteur est une solution pertinente pour alimenter les zones hors réseau et pour les pays désireux de décarboner leur électricité avec un réacteur dimensionné sur les capacités des centrales au charbon (environ 300 MW)* », analyse Jean-Michel Ruggieri, chef du programme SMR à la DES du CEA. Concrètement, NuwardTM repose sur deux réacteurs de 170 MW chacun et l'objectif est de délivrer une première série à l'horizon 2030.

Sûreté, agilité et compétitivité

Ce créneau implique d'ambitieux choix de conception. « *Pour délivrer une énergie compétitive avec des réacteurs plus petits, on ne peut pas se contenter de reproduire les architectures actuelles à échelle réduite. Au contraire, nous tirons parti de la faible puissance pour introduire des simplifications de systèmes qui sont inenvisageables aux échelles supérieures* », révèle le chercheur. Autres leviers de gain : la standardisation et la modularité. « *Ces centrales étant plus petites, on pourra, à puissance équivalente, fabriquer davantage de pièces en usine, à la façon d'un Airbus. Cela offre des avantages au niveau du contrôle-qualité, de la maîtrise des coûts, et de la réduction de la durée des chantiers car les composants pourront être assemblés sur place*

au dernier moment », poursuit-il. Côté sûreté, le concept présente d'importants avantages du fait notamment de cette faible puissance qui permet de récupérer la puissance résiduelle en fonctionnement nominal grâce à des systèmes autonomes d'échange de chaleur. Par ailleurs, en cas d'accident entraînant la fusion du cœur, cette faible puissance associée à une cuve de grande dimension garantit le maintien du corium en cuve sans devoir recourir à des dispositifs de récupération. « *Et donc de manière naturelle et passive car ces systèmes ne nécessitent aucune intervention humaine* », assure Éric Hanus, chef de projet SMR au CEA-Iresne.

Le complément local des énergies

À plus long terme, le CEA envisage la possibilité de mobiliser ces petits réacteurs pour décarboner les autres pans des systèmes énergétiques. Au sein du projet Idnes, les chercheurs évaluent la capacité des SMR à assurer, selon les besoins locaux, la production d'électricité, d'eau chaude et d'hydrogène décarboné. Dans ce dernier cas, ils seront couplés à des unités d'électrolyse à haute température – une innovation développée au CEA-Liten. « *Le nucléaire pourrait alors devenir le complément local idéal aux énergies renouvelables* », esquisse Éric Hanus. Si le concept du SMR semble prometteur, reste un défi de taille : l'harmonisation au niveau international des standards de sûreté. « *Certifier ces nouvelles architectures auprès de chaque autorité de sûreté nationale coûtera cher. Le CEA et EDF travaillent donc à établir une concertation entre les différentes autorités, en vue d'harmoniser les approches de sûreté* », expose Jean-Michel Ruggieri. Un effort capital pour garantir la viabilité future de ce marché. ●

Du recyclage au multirecyclage

« L'usine de La Hague qui retire aujourd'hui des combustibles usés contenant environ 1% de plutonium, pourrait demain travailler avec des teneurs allant jusqu'à 10%. »

François Sudreau,
responsable du programme
Cycle nucléaire à la DES

↓
Ci-dessous
Expérience de dissolution de
pastilles de combustible Mox.

Le volume des combustibles nucléaires usés augmente. Aussi la Programmation pluriannuelle de l'énergie réaffirme-t-elle la nécessité de contenir cette progression. Plusieurs pistes.

« Le recyclage du combustible est déjà une réalité sur le parc nucléaire français. Le plutonium produit au sein des réacteurs est recyclé sous forme de combustible Mox, fabriqué par l'usine Melox d'Orano à Marcoule », rappelle François Sudreau, responsable du programme Cycle nucléaire à la DES. Un choix mis en place par la filière dans les années 1980, à partir d'études menées au CEA, pour réduire la dépendance de la France vis-à-vis de la ressource uranium.

Généraliser l'utilisation du combustible Mox

Le Mox incorpore un peu moins de 10% de plutonium (Pu) complété par de l'uranium appauvri, et il alimente une vingtaine de réacteurs à eau sous pression (REP) du parc d'EDF. Mais ce recyclage n'a lieu qu'une fois, puis le Mox est entreposé. En effet, le Pu étant isotopiquement modifié, le multirecyclage du Mox n'est pas directement possible dans un REP, alors qu'il l'est dans un réacteur à neutrons rapides de type refroidi au sodium. Pour l'heure, l'un des objectifs de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE)

est d'étendre l'utilisation du combustible Mox à tous les réacteurs du parc, au-delà de ceux d'une puissance de 900 MW.

À moyen terme, un second objectif est de parvenir à convertir le Mox en un nouveau combustible : c'est le multirecyclage. Et c'est tout l'enjeu d'un projet de grande envergure lancé par le CEA, Orano, EDF et Framatome, qui vise à étudier la faisabilité technico-économique de ce procédé dans un REP.

Dimensionner de nouvelles usines

Dans ce cadre, les équipes du CEA étudient des scénarios pour évaluer les quantités de Mox à fabriquer et à retraiter, dont les flux pourraient tripler, et ainsi dimensionner des usines capables d'assurer ces opérations. « Par exemple, l'usine de La Hague qui retire aujourd'hui des combustibles usés contenant environ 1% de plutonium, pourrait demain travailler avec des teneurs allant jusqu'à 10% », illustre François Sudreau.

Toutefois, ce multirecyclage n'est pas sans poser de problèmes car il conduit à introduire dans le cycle davantage de plutonium dégradé. « Cela présente deux inconvénients : il est moins réactif du point de vue neutronique, tout en étant plus radioactif », expose François Sudreau. Les équipes du CEA s'attachent notamment à repenser les procédés de fabrication du combustible, par exemple en cherchant des additifs organiques plus résistants aux rayonnements pour maintenir leurs propriétés. « Nous travaillons également à l'adaptation des boîtes à gants pour limiter l'exposition des opérateurs », poursuit-il.

Autonomie énergétique

Les premières expériences de multirecyclage sont envisagées à partir de 2025-2028, avant une industrialisation visée en 2040 par la PPE. Si un recyclage du Mox à l'infini paraît difficilement envisageable dans les réacteurs actuels, le multirecyclage permettra de valoriser jusqu'à la fin du XXI^e siècle. « À ce moment-là, de nouveaux concepts de réacteurs, dits de génération IV, seront susceptibles de prendre le relai et de produire du plutonium à partir d'uranium appauvri », prévoit l'expert. Une perspective qui offrirait à la France son autonomie vis-à-vis des ressources minières grâce aux réserves déjà disponibles sur son sol. ●



© S. Le Couster/CEA



© P.F. Grosjean/CEA

Gestion optimisée des déchets

De l'optimisation du conditionnement des colis de déchets jusqu'à la possible transmutation des actinides mineurs, le CEA poursuit ses recherches sur la gestion des déchets.

Le projet Cigéo de l'Andra prévoit le stockage profond des déchets nucléaires français de haute et moyenne activité à vie longue à partir de 2040. « Il est encore possible d'optimiser le conditionnement des futurs déchets afin de rendre le processus plus économique et efficace, ou encore de

densifier le futur stockage des colis dans Cigéo sans transiger avec les normes de sécurité et de sûreté », affirme Cécile Ferry, responsable de la R&D sur la gestion des déchets à la DES.

Matrice cimentaire

Les recherches portent ainsi sur deux grandes typologies de déchets (voir focus). Au niveau des « MAVL », les enjeux portent notamment sur la limitation des émissions de dihydrogène gazeux (H_2) des colis cimentés. « La production de H_2 peut avoir deux origines : la radiolyse de la solution interstitielle présente dans la porosité de la matrice cimentaire, et la corrosion dans le cas de déchets métalliques », détaille Céline Cau Dit Coumes, chef de projet au CEA-Isec, dont l'équipe a imaginé deux parades. La première a consisté, dans le cadre d'une collaboration avec le cimentier Vicat et

l'entreprise de BTP Léon Grosse, à évaluer des formulations alternatives au ciment Portland classique, comme par exemple un ciment dit « phosphomagnésien » dont la consolidation consomme davantage d'eau et produit des hydrates plus résistants à l'irradiation. « Nos tests de laboratoire ont montré que cette formulation réduisait les émissions de H_2 par des facteurs 2 à 5. Il s'agit maintenant de poursuivre l'évaluation sur le long terme car nous ne disposons pas du même recul historique que pour le ciment Portland découvert il y a plus de 200 ans et largement employé industriellement », précise la chercheuse. La deuxième piste, plus exploratoire et étudiée avec les écoles Centrale et de Chimie de Lille, consiste à tester l'ajout au ciment d'un composé à base d'oxyde de manganèse qui permet de piéger de façon irréversible le H_2 par réaction d'oxydo-réduction. Si l'adjonction de

ce « piège » doit être évaluée à l'aune de son coût et de son vieillissement à long terme, il pourrait permettre d'après les premières expériences des gains très significatifs.

Vitrification des déchets en creuset froid

Les déchets HA issus du traitement des combustibles usés sont quant à eux conditionnés via le procédé calcination-vitrification industrialisé par le CEA dès le début des années 1970. Depuis lors, il n'a eu de cesse d'évoluer comme avec cette technique de vitrification en creuset froid. En cours d'industrialisation à l'usine de La Hague, elle consiste à chauffer un bain de verre par induction directe dans un creuset refroidi. Ceci conduit à la formation d'une couche de verre refroidi et donc solidifié à l'interface des parois du creuset et de celle du verre chaud à l'état liquide. « Cet autocreuset en verre refroidi protège le creuset métallique de la corrosion et facilite considérablement les opérations de vitrification. De plus, la vitesse d'élaboration est améliorée puisque l'on passe de 25 kg de déchets conditionnés par heure pour le procédé « à chaud », à 36 kg/h », explique Sophie Schuller, chef du projet simulation de la vitrification au CEA-Isec. Tout récemment, les équipes ont développé

un modèle multiphysique pour simuler de concert les phénomènes magnétiques, thermiques et hydrauliques du creuset froid ainsi que les processus chimiques se déroulant lors de la vitrification à haute température. « Grâce à ce nouvel outil, nous serons en mesure d'optimiser encore plus la vitesse d'élaboration des verres ainsi que le taux d'incorporation de déchets, tout en garantissant l'intégrité des colis finaux », précise la spécialiste.

Transmuter les actinides mineurs

Les recherches se poursuivent également sur les déchets « ultimes » des combustibles usés, à savoir les produits de fission et les actinides mineurs. Le CEA s'intéresse depuis longtemps à la transmutation des actinides mineurs très radioactifs et à vie très longue. Même s'ils sont stockables dans Cigéo, la transmutation permettrait d'en réduire la radioactivité. « Les réacteurs à neutrons rapides envisagés dans la quatrième génération permettent théoriquement de consommer ces actinides en mélange avec du combustible classique – et donc de les transmuter », indique Jean-Claude Garnier, responsable du programme génération IV au CEA.

Mais un premier défi réside dans la fabrication même du combustible : « il s'agit d'un processus complexe et l'incorporation de ces éléments fortement émetteurs de neutrons et de rayons gamma nécessite des dispositifs de protection renforcés pour protéger les opérateurs », explique le spécialiste. D'autres impacts négatifs ont également été mis en évidence, comme les difficultés de transport de combustibles entre sites distants. Une autre technologie refait ainsi surface : celle des réacteurs à neutrons rapides à sels fondus. La transmutation des actinides mineurs aurait également lieu au sein du réacteur mais comme dans ce cas le combustible est liquide, son traitement interviendrait directement *in situ*. « On peut ainsi le transporter et le traiter tout en limitant largement les opérations manuelles sur les procédés », précise le chercheur. Là encore, des défis demeurent, notamment liés à la chimie très complexe et évolutive de ce combustible liquide par ailleurs très corrosif pour les matériaux. Le CEA va ainsi déposer cette année à la BPI¹ un projet de R&D piloté par l'Andra et en partenariat avec Orano pour étudier cette piste. ●

FOCUS

2 grandes typologies de déchets

- Les déchets « technologiques » (résultant de l'exploitation des usines et laboratoires) de moyenne activité et vie longue (MAVL) sont piégés dans une matrice cimentaire.
- Les déchets issus du combustible usé (produits de fission et actinides mineurs) dits de haute activité (HA) sont destinés à être scellés dans une matrice de verre. Ils contiennent des éléments à vie courte et à vie longue.

LEXIQUE

Vitrification

Procédé permettant de piéger les atomes radioactifs dans un verre, via la formation de liaisons chimiques se formant entre la matrice vitreuse et les atomes lors de leur fusion à haute température.

Transmutation

Procédé qui consiste à transformer des éléments en d'autres ; comme des actinides mineurs en éléments faiblement radioactifs ou à vie courte.

1. Banque publique d'investissement.



© L. Godard/CEA



© P.F. Grosjean/CEA



Ci-contre

Creuset froid utilisé pour le nouveau procédé de vitrification.



À gauche

Entreposage de déchets de moyenne activité à vie longue, dans l'attente de la mise en service du centre de stockage Cigéo de l'Andra.



Page précédente

Sortie du verre à chaud lors du procédé de vitrification.



Christophe Poussard
directeur des Ressources
humaines du CEA



Stéphane Sarrade
directeur des Programmes
Énergies de la DES

ENTRETIEN

Compétences nucléaires, un enjeu déterminant

De la question du maintien et du renouvellement des compétences de la filière.

Le comité stratégique de la filière nucléaire identifie le maintien des compétences comme un enjeu déterminant pour cette industrie. Qu'en est-il ?

Christophe Poussard Il s'agit de pérenniser la filière et la compétitivité de la France en la matière. Et cela, pour faire face à l'enjeu mondial du changement climatique, le nucléaire étant une énergie bas carbone. La filière a identifié seize compétences-clés, dont trois sont exclusives au nucléaire (radioprotection, sûreté et neutronique, gestion des déchets), et certaines s'avèrent critiques. Le maintien de ces compétences implique d'œuvrer à l'attractivité de la filière et doit reposer sur des formations innovantes et également attractives. Aussi le CEA est-il pleinement engagé, *via* son école de spécialisation INSTN (*voir focus*), dans l'Université des métiers du nucléaire récemment créée pour soutenir la filière.

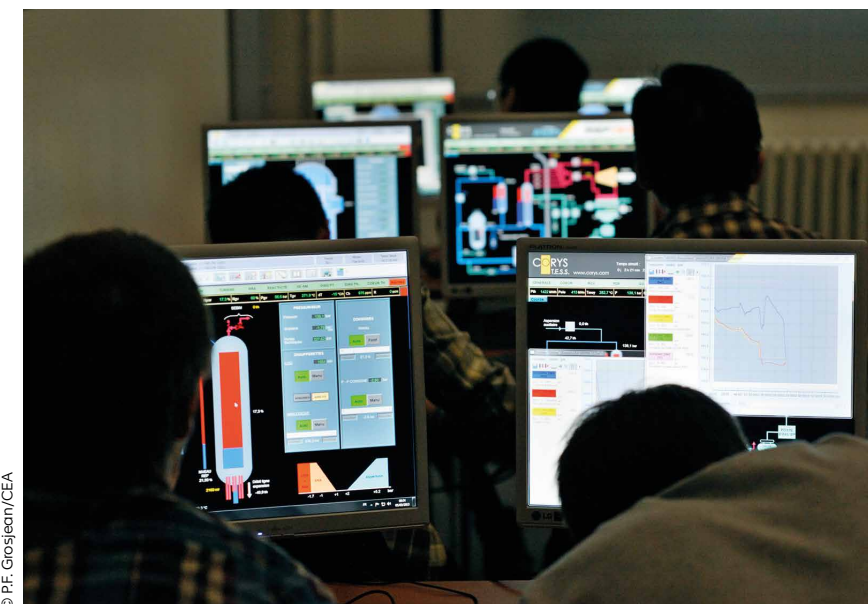
Stéphane Sarrade Quand je suis entré au CEA en 1991, j'ai vu partir des pionniers comme ceux qui avaient contribué à la mise en place de la première ligne pilote de traitement des déchets. Aujourd'hui, nous cherchons également des experts en cybersécurité. Le maintien des compétences est une approche dynamique qui concerne également leur renouvellement et transfert. Un autre enjeu est le financement de la R&D par les industriels, en baisse depuis 2017. Mais des opportunités se dégagent. Je prends l'exemple

d'un récent projet d'Orano qui place dans l'une de nos équipes deux de ses salariés, financés par le Plan de relance. Ces deux personnes vont travailler à notre profit pendant deux ans puis repartiront dans leur entreprise avec de nouvelles compétences. Ce transfert illustre l'une de nos contributions en soutien à l'industrie nucléaire.

Comment abordez-vous la question de l'attractivité de la filière ?

C. P. L'attractivité de la filière passe avant tout par la valorisation des métiers du nucléaire et de tous ceux dont la filière, et donc le CEA, a besoin. Cela repose sur la reconnaissance de l'expertise et l'identification de parcours professionnels favorisant le développement de compétences. Dans cette logique, des efforts significatifs ont été effectués depuis 2019 pour proposer des parcours attractifs dans les domaines de la sûreté-sécurité. Cette approche doit être élargie à tous les métiers d'intérêt pour la filière. À ce titre, nous réfléchissons à notre capacité de proposer des mobilités internes et externes afin d'enrichir les compétences. Il en va de même de nos capacités à proposer et cibler les formations nécessaires.

La politique salariale est un autre levier et nous allons prochainement déployer des mesures de revalorisation pour les futurs recrutés. Il s'agit d'être attractif dans notre environnement socio-économique concurrentiel, et ceci pour toutes les catégories



© P.F. Grosjean/CEA

de personnel : cadres, non-cadres, doctorants, post-doctorants, etc. De manière générale, notre politique va être revue dans le cadre du projet de modernisation sociale dans lequel le CEA s'est engagé en début d'année.

S. S. L'attractivité passe également par la connaissance de l'enjeu que revêt l'énergie nucléaire, celui d'être un élément majeur du mix électrique bas carbone pour lutter contre le réchauffement climatique. Nous consacrons beaucoup de temps à la communication sur la vision intégrée de ces énergies (*voir Les défis du CEA n°241*) et à la formation sur ce sujet, tant en interne qu'à l'externe. Nous avons de nombreux échanges avec le milieu universitaire et académique, au travers de séminaires, conférences... Il s'agit de sensibiliser aux réalités et opportunités du nucléaire les professeurs et étudiants qui représentent notre futur vivier de chercheurs. À ce titre, l'INSTN est un excellent vecteur de communication et d'attractivité.

Comment capitalisez-vous les compétences acquises dans le cadre du programme Astrid, prototype de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium ?

S. S. L'arrêt de ce programme en 2019 n'entraîne pas celui de la recherche sur la quatrième génération qui se poursuit aux niveaux du réacteur et du cycle du combustible. L'expertise développée sur Astrid

s'avère indispensable pour la conception des nouveaux concepts de réacteurs SMR (*voir p. 21*), ainsi que des AMR de 4^e génération (*Advanced Modular Reactor*) et des réacteurs à sels fondus sur lesquels nous menons une veille active.

Grâce aux acquis du programme Astrid, nous pouvons également travailler sur le multirecyclage des combustibles usés en réacteur à eau sous pression (*voir p. 22*). Sans compter que la même problématique se pose avec les réacteurs à neutrons rapides de 4^e génération, ce que nous étudions dans le cadre de collaborations internationales.

Le CEA recrute-t-il ?

C. P. Chaque année, le CEA recrute environ 1 000 personnes, tous niveaux, disciplines et domaines d'activités confondus. De plus, nous attachons une grande importance à la formation des jeunes avec l'objectif important d'accueillir avant la fin de l'année plus 1 000 alternants.

S. S. À la DES, nous recrutons également afin de maintenir et/ou renouveler des profils bien précis : techniciens de laboratoire, opérateurs de télémanipulation, ingénieurs de R&D, chefs de projets, chargé d'affaires. Et nous recherchons également une expertise dans le domaine de la simulation : développement de codes de calcul, intelligence artificielle, cybersécurité. ●

FOCUS

INSTN, formations à la pointe

École de spécialisation des énergies bas carbone et des technologies de la santé, l'INSTN est à la fois un établissement d'enseignement supérieur et un organisme de formation. Chaque année, elle accueille 8 000 stagiaires en formation continue et 1 300 étudiants du niveau opérateur à ingénieur spécialisé.

« Nous maintenons nos formations aux meilleurs niveaux scientifique, technique et pédagogique », explique Éric Gadet, son directeur. Depuis quelques temps, l'INSTN a en effet pris le tournant du numérique avec la mise en place d'une plateforme d'apprentissage en ligne. Autre illustration : le développement avec la DES et le CEA-List de la plateforme EVOC qui, dans un environnement à la fois tangible et virtuel, immerge l'apprenant dans une installation nucléaire à l'échelle 1 afin de mieux appréhender la physique des réacteurs. De même, la formation dédiée aux « Fondamentaux de la maîtrise des projets au CEA », en cours de conception, fait appel aux techniques de *serious game*. Créée en 1956 pour accompagner le développement de la filière nucléaire française, l'INSTN poursuit plus que jamais sa mission.

« Par exemple, nous avons établi une cartographie des métiers du démantèlement à destination du Gifem (Groupement des industriels français de l'énergie nucléaire) et nous contribuons aux travaux de sa commission compétences & formation », cite, non exhaustif, Éric Gadet. L'école soutient également la filière à l'export : « L'INSTN est désignée Collaborating center par l'AIEA, ce qui fait de nous un partenaire de référence à l'international », se réjouit le directeur.

☛
Ci-dessus

Initiation au pilotage du cœur d'un réacteur à eau pressurisée.

TOUT S'EXPLIQUE

PAR AUDE GANIER, EN COLLABORATION AVEC ARMELE MESNARD, DIRECTRICE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET RÉFÉRENTE INTÉGRITÉ SCIENTIFIQUE DU CEA

Le développement durable au CEA

Chaque automne, l'Union européenne met en exergue le développement durable lors d'une « semaine » dédiée. L'occasion de découvrir comment le CEA se positionne sur cet enjeu affirmé par l'ONU, dont les contours sont parfois mal compris.

Le développement durable est trop souvent associé au seul impératif écologique. Or, cette notion s'appréhende au regard de trois responsabilités : écologique, économique et sociale. Il s'agit d'une conception de la croissance qui s'inscrit dans une perspective de long terme.

Des objectifs sur lesquels s'appuyer

Fruit d'une prise de conscience dans les années 1970, cette notion est apparue la première fois en 1987 dans le rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement de l'ONU, dit « rapport Bruntland ». Elle y est présentée comme suit : « *développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs* ». Elle fut précisée en 2015, au prix de longues négociations entre les États membres de l'ONU (gouvernements et représentants des sociétés civiles), dans le cadre de l'élaboration de l'Agenda 2030. Celui-ci identifie 17 objectifs de développement durable (les ODD), que détaillent pas moins de 169 cibles.

Des programmes et engagements en cohérence

Chacun est concerné : pouvoirs publics, administrations, organismes, opérateurs d'État, entreprises et particuliers. Le CEA s'inscrit dans cette logique de développement durable, autour de cinq engagements formalisés dans une charte

signée en 2019 et déclinés en actions opérationnelles :

- contribuer au progrès par la connaissance et la technologie au travers de ses résultats de recherche et de ses publications ;
- réduire l'empreinte de ses activités par des actions de gestion environnementale ;
- agir pour le développement social à travers les accords signés avec ses partenaires sociaux, en particulier sur la qualité de vie au travail, l'égalité professionnelle et l'emploi des personnes handicapées ;
- agir pour le développement économique de plus de 700 partenaires industriels variés ;
- promouvoir l'ouverture et le dialogue autour de ses activités, en particulier par des actions pédagogiques et les commissions locales d'information autour de ses centres de recherche.

Cette démarche est mise en lumière par le contrat d'objectifs et de performance 2021-2025, signé le 23 juillet 2021 avec l'État, dont les axes thématiques et stratégiques sont en cohérence avec 12 des 17 Objectifs de développement durable.

Une forte intégration dans les écosystèmes innovants locaux, européens et internationaux

La sûreté et la sécurité comme priorité et valeur communes

Les meilleures pratiques de recherche

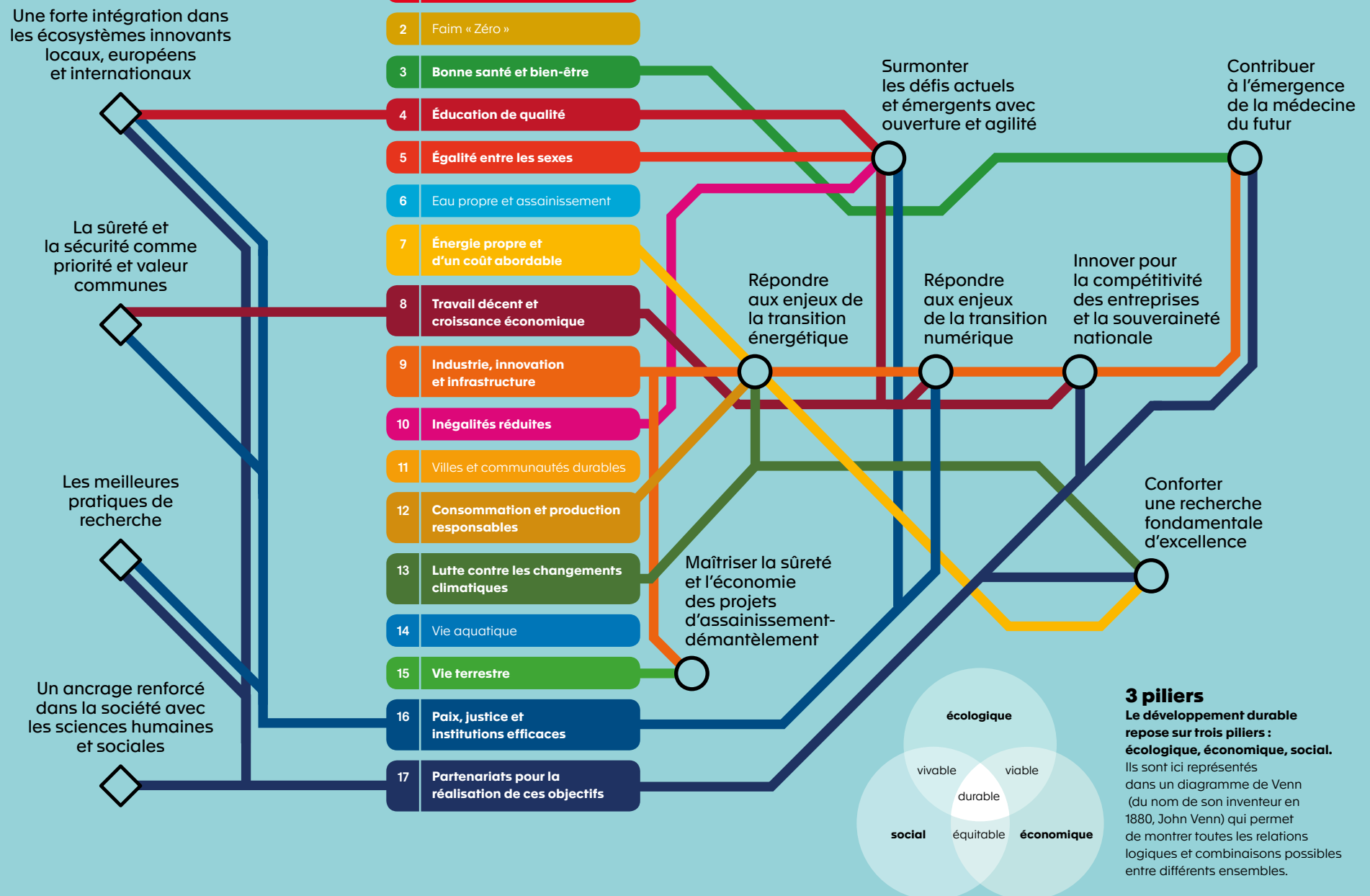
Un ancrage renforcé dans la société avec les sciences humaines et sociales

Cohérence de la stratégie du CEA avec les Objectifs de développement durable de l'ONU

◇ 4 thématiques transversales ○ 7 axes stratégiques

Les 17 Objectifs de développement durable de l'agenda 2030 de l'ONU

- 1 Pas de pauvreté
- 2 Faim « Zéro »
- 3 Bonne santé et bien-être
- 4 Éducation de qualité
- 5 Égalité entre les sexes
- 6 Eau propre et assainissement
- 7 Énergie propre et d'un coût abordable
- 8 Travail décent et croissance économique
- 9 Industrie, innovation et infrastructure
- 10 Inégalités réduites
- 11 Villes et communautés durables
- 12 Consommation et production responsables
- 13 Lutte contre les changements climatiques
- 14 Vie aquatique
- 15 Vie terrestre
- 16 Paix, justice et institutions efficaces
- 17 Partenariats pour la réalisation de ces objectifs

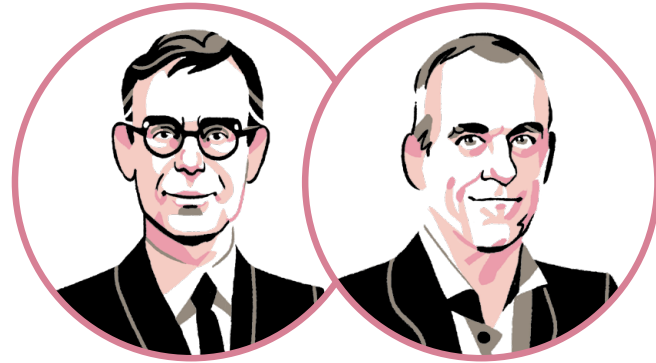


REGARDS CROISÉS

CEA-CNRS L'accord fait la force

François Jacq
Administrateur
général du CEA

Antoine Petit
Président-directeur
général du CNRS



Le 22 juillet 2021, le CEA et le CNRS signaient un nouvel accord-cadre de recherche. Il rénove une longue et fructueuse collaboration, dans un contexte en forte mutation : défis sociétaux à relever au premier rang desquels figure l'urgence climatique, et un paysage de la recherche qui évolue. Éclairage avec leurs deux dirigeants : François Jacq, administrateur général du CEA et Antoine Petit, président-directeur général du CNRS.

La recherche, dans un monde en mutation

François Jacq Nos sociétés contemporaines évoluent dans un monde marqué par de profondes ruptures scientifiques et technologiques, avec par exemple l'irruption massive du numérique. La situation est aussi paradoxale : la recherche est à la fois perçue comme positive parce qu'elle contribue au savoir et à l'innovation tout en suscitant parfois la méfiance, soit par les conséquences des découvertes, soit par les incertitudes qui demeurent. La manière dont la recherche s'adapte à ces évolutions, dans un contexte de défis sociétaux que sont les transitions écologique, énergétique, numérique et de la médecine du futur, est fondamentale.

Antoine Petit Un véritable enjeu est aussi de préserver l'excellent niveau global de la recherche française à l'international. La compétition mondiale en recherche est beaucoup plus féroce qu'il y a trente ans. L'exemple le plus frappant est celui de la Chine, qui est devenue un très grand pays scientifique. Nous devons y être attentifs, car le risque de décrochage de la recherche française, voire européenne, dans certains domaines est réel.

L'effet de loupe de la pandémie de Covid-19

A. P. La situation engendrée par la Covid-19 l'a une nouvelle fois prouvé, la recherche est indispensable à la société pour comprendre et aider à résoudre les grandes crises. Faciliter la prise en compte des connaissances par les citoyens est tout

« Plus que l'accord lui-même, c'est la coopération enthousiaste et ouverte, quotidienne et concrète, qui existe entre nos deux organismes, que je souhaite souligner. »

François Jacq

aussi essentiel. L'importance du temps long de la recherche fondamentale a également été illustrée. L'ARN messenger a été découvert en 1961 ; mais c'est soixante ans plus tard qu'il a été utilisé pour un vaccin.

F. J. Au-delà de la pandémie elle-même, la crise a aussi mis en lumière un certain nombre de questions et de défis sociétaux. Prenons l'exemple du changement climatique. Lorsque l'économie est à l'arrêt, les émissions de CO₂ ne baissent que peu en regard de ce qu'il nous faut atteindre. La crise met en lumière l'acuité des défis. Ajoutons la prise de conscience de la domination de géants industriels chinois et américains, révélant l'importance cruciale de la maîtrise de nos chaînes d'approvisionnement et des grands processus techniques qui conditionnent nos vies. Nous, organismes de recherche, devons être présents sur ces thématiques qui étaient peut-être jusque-là minimisées. Les dimensions technologique et industrielle de la recherche, profondément inscrites dans le patrimoine d'un organisme comme le CEA, sont à cet égard vitales. D'une certaine manière, la crise nous encourage dans notre raison d'être.

A. P. Ces questions exigent bien souvent des innovations de rupture, qui naîtront d'une recherche au meilleur niveau mondial. Elles nécessitent aussi des collaborations internationales, ou à l'échelle euro-

péenne sur certaines thématiques pour des raisons de souveraineté. C'est aussi pour cela que le CNRS se donne les moyens d'être un acteur fort, engagé dans la construction de l'espace européen de la recherche.

Un paysage de la recherche française en évolution

A. P. Les mentalités évoluent. Les chercheurs travaillent beaucoup plus volontiers avec les industriels qu'il y a trente ans, et les industriels comprennent mieux tout l'intérêt de travailler avec un organisme de recherche tel que le CNRS. Développer des relations plus étroites avec les industriels, tout en assumant notre métier de base qui consiste à faire de la recherche fondamentale, est devenu au fil des ans l'une de nos priorités. Les grands défis de société ou les grandes questions industrielles ne peuvent s'aborder avec des approches monodisciplinaires. Ils nécessitent des coopérations entre les sciences, y compris bien sûr les sciences humaines et sociales. Au sein du CNRS, qui a la chance d'avoir un spectre très large, faire travailler ensemble les équipes de nos dix instituts est un enjeu majeur, car c'est une force.

F. J. Se placer à l'interface entre les acteurs (de la recherche académique au monde industriel) est une compétence que le CEA a développée de longue date. Il réunit d'ailleurs en son sein une grande diversité d'approches. Au-delà, même si nous disposons de technologies et de savoir-faire, cela ne suffit pas. Encore faut-il pouvoir créer les conditions qui permettent d'en tirer tout le profit. L'exemple récent de l'essai de création d'une filière française de production d'hydrogène décarboné est en cela emblématique, avec l'alliance entre le CEA et un industriel comme Schlumberger. L'écosystème grenoblois est aussi une très belle réussite où le CEA a joué un rôle de catalyseur, je pense. Les politiques de sites et l'émergence de clusters, comme l'université Paris-Saclay ou l'université Grenoble Alpes, dans lesquelles le CEA est partie

« L'expertise scientifique collective, c'est-à-dire validée par les pairs, qui se construit et s'accumule au fil du temps, est une notion essentielle à comprendre et à partager. »

Antoine Petit

prenante, marquent désormais le paysage et sont un atout. Ces lieux, qui réunissent des compétences variées, donnent une force d'impact et une capacité de mobilisation autour des grands enjeux, mais aussi pour inventer de nouvelles approches.

A. P. La création de ces universités de grande taille est en effet une chance pour la recherche française. Et le CNRS se réjouit de leur montée en puissance dans les classements internationaux. Nous sommes fiers d'en être des partenaires privilégiés. Il nous faut maintenant développer des collaborations plus individualisées et reposant davantage sur des stratégies scientifiques partagées.

L'accord CEA-CNRS

F. J. Notre accord atteste de cette volonté de mobilisation commune. Il a été construit pour nous permettre, ensemble, de relever un certain nombre des grands défis précédemment évoqués. Au travers de programmes de recherche communs, mais aussi *via* les trois PEPR¹ que nous copilotons (technologies quantiques ; cybersécurité ; hydrogène décarboné), avec l'Inria pour deux d'entre eux. Plus que l'accord lui-même, c'est la coopération enthousiaste et ouverte, quotidienne et concrète, qui existe entre nos deux organismes, que je souhaite souligner.

A. P. Cet accord est symboliquement important, à la fois en interne et vis-à-vis des pouvoirs publics, par le message qu'il porte : les deux plus grands organismes de recherche français, qui figurent parmi les plus importants au niveau international, affichent une convergence de vue. François et moi, nous nous connaissons maintenant depuis une quinzaine d'années, et je peux témoigner de la liberté et du climat de confiance dans nos échanges. Cette entente bénéficie également à nos équipes. C'est une vertu pour que le système fonctionne.

L'enjeu de la défiance

F. J. La défiance à l'égard de la parole publique, des experts, y compris des scientifiques, n'est pas un sujet nouveau. Face à cela, nous devons réexpliquer les mécanismes du fonctionnement de la recherche : la réalité de la pratique scientifique, sa complexité, sa progression par le débat, la controverse. Et réfléchir à la manière de porter les savoirs et de les partager, en sortant d'une posture de « savoir immaculé ». Dans cette réflexion, les sciences humaines et sociales peuvent nous aider.

A. P. Constate-t-on plus de défiance ? Je n'en ai jamais vu la démonstration. Internet et les réseaux sociaux ont simplement davantage mis en avant des opinions. Mais je crois que les citoyens ont une vraie soif de savoir. Pour autant, tout n'est pas discutable : la Terre n'est pas plate ! À nous de mieux expliquer ce qu'on sait, ce qu'on ne sait pas. La science, c'est le doute permanent. L'expertise scientifique collective, c'est-à-dire validée par les pairs, qui se construit et s'accumule au fil du temps, est aussi une notion essentielle à comprendre et à partager. Des institutions comme le CNRS ou le CEA pourraient se porter garants de cette expertise, même si cela serait une grande responsabilité pour nous. ●

1. Programme et équipement prioritaire de recherche.

PROPOS RECUEILLIS
PAR SYLVIE RIVIÈRE ET
LAURENCE STENVOT (CNRS)

ÉVÉNEMENT

Et que dure la mobilité durable !

10^e édition des Journées mobilité durable sur le centre CEA de Grenoble. L'occasion de sensibiliser à nouveau les collaborateurs sur les modes de transport doux, ceux ayant une empreinte carbone nulle ou faible.

Dans le cadre de la Semaine européenne de la mobilité durable (des 16 au 22 septembre dernier), le CEA a organisé à Grenoble différents ateliers : maniabilité et ergonomie à vélo, essais de vélos à assistance électrique, stand autopartage, etc. Une grande attention a été portée à la question de la sécurité à travers, grande première, la réalisation d'un *escape game*. Cette animation ludique a permis d'échanger avec les collaborateurs sur cet enjeu de sécurité des déplacements. En complément, un outil digital a été lancé pour que les personnels renseignent les zones à risques identifiées sur le site pour ainsi en améliorer l'aménagement (voir photo ci-dessous).

Le centre, tout comme celui de l'Institut de l'énergie solaire à Chambéry, a également participé au défi régional « Au travail j'y vais autrement », en effectuant des comptages aux entrées de site. Les résultats ont par ailleurs confirmé l'évolution vers les mobilités alternatives et la diminution de la voiture solo. AG

Modes de transport domicile-travail (CEA Grenoble) en 2021

- 29 % piétons
- 27 % cyclistes
- 12 % autosolistes
- 5 % télétravail
- 5 % covoitureurs

STRATÉGIE

Objectifs et performance

Placé sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et de celui de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, le CEA a signé avec l'État, le 23 juillet 2021, son contrat d'objectifs et de performance (COP) pour la période 2021-2025. Ce COP consacre sa vocation de transfert de connaissances vers les acteurs industriels et réaffirme son positionnement sur des domaines de recherche majeurs au regard des grands défis contemporains : les transitions énergétique et numérique ainsi que le développement de technologies pour la médecine du futur. Il présente également la contribution du CEA aux objectifs de développement durable de l'Agenda 2030 de l'ONU (voir p. 28-29). AG

CLASSEMENT INTERNATIONAL

13^e place pour l'université Paris-Saclay

L'université Paris-Saclay, dont le CEA est partenaire, figure pour la deuxième année consécutive dans le top 20 des meilleurs établissements mondiaux, selon le classement établi depuis 2003 par l'université de Shanghai (*Academic Ranking of World University*). Créée en 2019, elle fait partie des nouveaux modèles français d'université, basés sur une politique de regroupement d'établissements d'enseignement supérieur et de recherche. Entrée dans le palmarès de 2020 à la 14^e place, l'université Paris-Saclay progresse d'une place cette année. Le classement par thématique, publié en mai dernier, confirme en outre ses excellentes positions : 1^{er} en mathématiques, 9^e en physique et parmi les 50 meilleures mondiales dans 11 disciplines. SR

ENTRETIEN

La science ouverte, un défi pour la recherche

Depuis 2008, le CEA soutient le libre accès aux publications scientifiques. Explications avec Elsa Cortijo, directrice de la Recherche fondamentale du CEA.

PROPOS RECUEILLIS PAR CÉLINE LIPARI

Qu'est-ce que la « science ouverte » ?

La science ouverte est un nouveau modèle, apparu à l'ère du numérique. Il vise à démocratiser la diffusion et le partage des connaissances scientifiques. Il s'agit de rendre accessibles à tous, gratuitement et sans délais, les résultats de la recherche scientifique. Et cela, qu'il s'agisse de publications ou encore de données, afin de favoriser la coopération scientifique, tout en respectant la confidentialité et l'éthique.

Par ailleurs, la science ouverte augmente la transparence de la recherche en permettant un accès sans entrave à plus d'informations. Elle favorise également la réutilisation des données dans un souci de valorisation des résultats de recherche et d'accélération de l'innovation. Enfin, elle constitue un levier pour l'intégrité scientifique et participe à réinstaurer une relation de confiance des citoyens dans la science.

Comment le CEA participe-t-il à cette démarche ?

Il y participe depuis 2008, date à laquelle il a choisi la plateforme nationale HAL comme réservoir institutionnel ouvert. Cela permet de garantir un archivage pérenne et une visibilité internationale de ses publications scientifiques. Depuis une dizaine d'années, les actions en faveur d'une science ouverte se sont multipliées, notamment au sein d'un Comité de pilotage de l'information scientifique et technique qui réunit les différentes directions du CEA. Fin mai 2021, la charte du CEA pour une science ouverte a été signée par l'administrateur général, François Jacq. Elle incite les chercheurs à déposer dans HAL-CEA leurs manuscrits d'articles acceptés. Elle encourage

« La charte du CEA encourage une bonne gestion et une ouverture des données de la recherche dans le respect du principe « aussi ouvert que possible, aussi fermé que nécessaire ». »

une bonne gestion et, éventuellement, une ouverture des données de la recherche dans le respect du principe « aussi ouvert que possible, aussi fermé que nécessaire ».

Quels sont les enjeux à venir ?

Il s'agit en premier lieu de convaincre les éditeurs des grandes revues scientifiques de participer à ce mouvement, en réduisant au maximum les délais d'embargo imposés sur les articles ou à concéder aux chercheurs-auteurs le droit de publier en accès ouvert une version de leurs articles. Au sein du consortium Couperin, nous nous mobilisons avec les autres organismes de recherche et universités pour qu'ils puissent conserver leurs droits sur les résultats et données.

Impliqué au sein de collaborations internationales (climat, astrophysique, génomique, etc.), le CEA sait gérer de grands jeux de données de recherche. C'est pour cela que nous travaillons également sur les méthodes de recueil et de conservation de toutes les données, en lien avec les projets du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.



Elsa Cortijo, directrice de la Recherche fondamentale et présidente du Comité de pilotage de l'information scientifique et technique du CEA.

66 %

Part des publications scientifiques 2019 du CEA en accès ouvert, soit 10 points de plus que la moyenne nationale. Cela représente 7 268 publications.





© Franck Ardito/CEA

VISITE MINISTÉRIELLE

Grenoble, terre d'innovations

Cédric O, secrétaire d'État chargé de la Transition numérique et des Communications électroniques, et Agnès Pannier-Runacher, ministre déléguée chargée de l'Industrie, étaient en région grenobloise le 2 septembre dernier, à la rencontre de start-up et de laboratoires moteurs de l'innovation numérique. Dans les salles blanches du CEA-Leti, les équipes ont montré la recherche de pointe dans les micro et nanotechnologies et ses multiples applications dans des domaines comme la santé, l'énergie et les transports durables. Les ministres ont également visité les locaux de deux start-up issues du CEA: Soitec, leader mondial

de la microélectronique, positionné sur les marchés de la 5G, des objets connectés et de l'électrification des véhicules; et Aledia, qui posait la première pierre de son usine de production de microLEDs en 3D. Avec cette technologie de rupture, la start-up cible le marché mondial des écrans de nouvelle génération pour ordinateurs, tablettes, smartphones, montres connectées, lunettes à réalité augmentée, grands téléviseurs... SR



Ci-dessus

Cédric O (à droite) en visite au CEA-Leti.

FRANCE RELANCE

Le CEA, en soutien des PME de la cybersécurité

Le Secrétariat général pour l'investissement a présenté cet été les 27 lauréats du « Grand défi cyber », lancé en 2020

par le gouvernement. Ces projets d'innovation de rupture en cybersécurité proposés par seize PME et onze start-up vont se répartir une subvention totale de 15,9 milliards d'euros. Parmi eux, deux ont été conçus avec les instituts Leti et List du CEA: celui de la société Tiempo Secure consiste en la conception d'une nouvelle génération



©DR

JEU ÉDUCATIF ClimaTicTac

Et si on s'alliait, entre amis et famille, pour lutter contre le réchauffement climatique? En faisant des choix stratégiques d'émissions de CO₂ pendant 100 ans pour protéger les populations, les villes et les écosystèmes? C'est l'objectif du tout nouveau jeu collaboratif ClimaTicTac. Inspiré par les accords de Paris sur le climat de 2015, il a été imaginé par un collectif d'une vingtaine de chercheurs de l'Institut Pierre-Simon Laplace, une fédération de recherche regroupant huit laboratoires, dont le LSCE. Il vise à faire comprendre de manière ludique les enjeux du dérèglement climatique. Accessible dès 10 ans, ClimaTicTac est en vente chez l'éditeur Bioviva depuis la rentrée 2021. SR

de composants, baptisés IRMC, garantissant la sécurité de connexion des puces électroniques à des modules de monitoring géré dans le *cloud*. Quant au projet Leia de Systerel, il vise à fournir une plateforme d'analyse de logiciels offrant des garanties fortes sur la sécurité des programmes analysés. AG

LE COIN DES START-UP

PAR SYLVIE RIVIÈRE

Sport Quantum invente la cible électronique

Après les écrans tactiles, voici les écrans « impactiles » ! Conçus par Sport Quantum pour le tir sportif, ils localisent le point d'impact d'un projectile à 100 microns près, soit l'épaisseur d'un cheveu. L'assemblage comprend une plaque transparente en plastique rigide sous laquelle sont placés quatre capteurs piézoélectriques qui mesurent l'onde de choc générée par l'impact. Derrière, un écran d'ordinateur affiche la cible, des méthodes d'entraînement ou des jeux. « C'est une rupture technologique », annonce Jean-Marc Alexandre, cofondateur de la start-up avec Robert Boden, puis Jean Sreng. Plus besoin de cibles en carton qu'il faut changer entre les tirs et ramener pour être lues. Les résultats sont visibles en temps réel sur une tablette, grâce à une connexion sans fil et à des algorithmes de traitement du signal. « Je pressentais le fort potentiel



© Sport Quantum

des capteurs piézoélectriques sur lesquels nous travaillons au CEA-List, se souvient Jean-Marc Alexandre. Mais c'est Robert Boden, adepte du tir sportif, qui a lancé en 2016 l'idée décisive de la cible électronique ». Depuis, plus de 500 dispositifs ont été installés en France et 300 à l'international. « Plusieurs athlètes internationaux ont déjà adopté notre modèle SQ10 pour leur entraîne-

ment. Celui-ci est aujourd'hui homologué par les fédérations française et anglaise de tir, et nous allons continuer cette démarche pour aller vers l'homologation par la fédération internationale de tir », ajoute-t-il. En parallèle, la start-up développe SynQro, un logiciel de supervision qui permet de gérer plus de 100 cibles à la fois. Objectif: le marché de l'organisation des compétitions. ●

MARCHÉS

- Clubs de tirs
- Particuliers
- Organismes de compétitions

TECHNOLOGIES

- Capteurs piézoélectriques placés sous une plaque en polycarbonate. Largement utilisés dans la vie courante (pare-chocs de voiture, vibreurs de téléphone portable, etc.), ils émettent un signal électrique en correspondance avec une sollicitation mécanique reçue ou, à l'inverse, vibrent en fonction d'un signal électrique reçu. Ici, ils mesurent le point d'impact du projectile.
- Affichage des cibles sur un écran situé derrière la plaque.
- Logiciel associé, proposant de nombreuses fonctionnalités: analyse des scores (moyennes, écarts-types, suivi des performances).

DATES-CLÉS

- 2017**
Création de Sport Quantum
- 2018**
Premières ventes de cibles
- 2019**
Levée de fonds de 600 000 €

- 2020**
Homologation de la cible SQ10 par la fédération française de tir sportif; Cibles SQ10 choisies par la région Île-de-France pour ses compétitions (110 cibles)
- 2021**
Première médaille de la Team Sportive Sport Quantum aux JO 2020 de Tokyo (Lucas Koziensky - US)



Ci-dessus

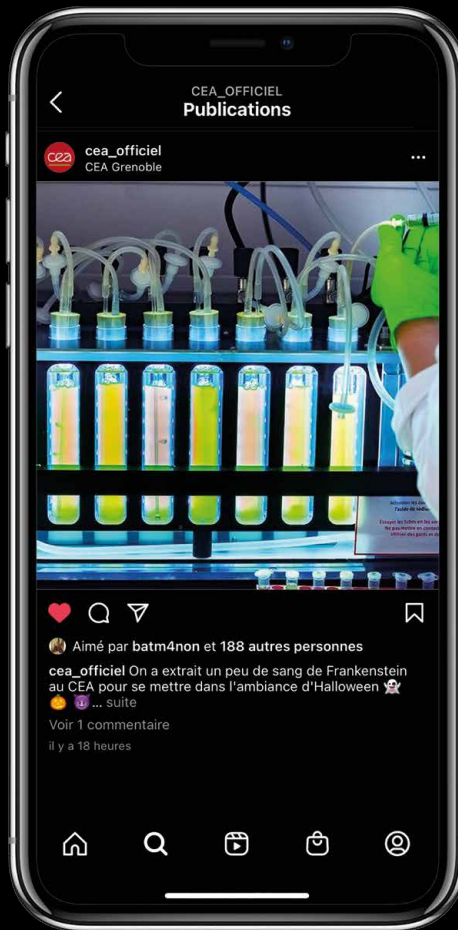
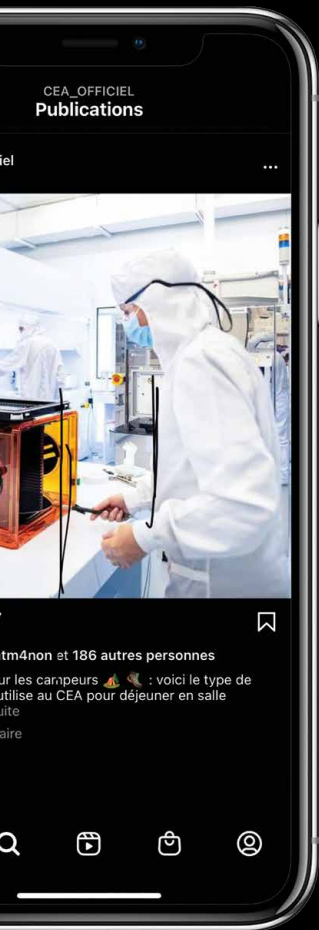
La championne française Sandrine Goberville, à l'entraînement sur une cible Sport Quantum.



CEA-List

Laboratoire des systèmes numériques intelligents (Saclay).

→ www.sportquantum.com



Suivez #CEA_Officiel

