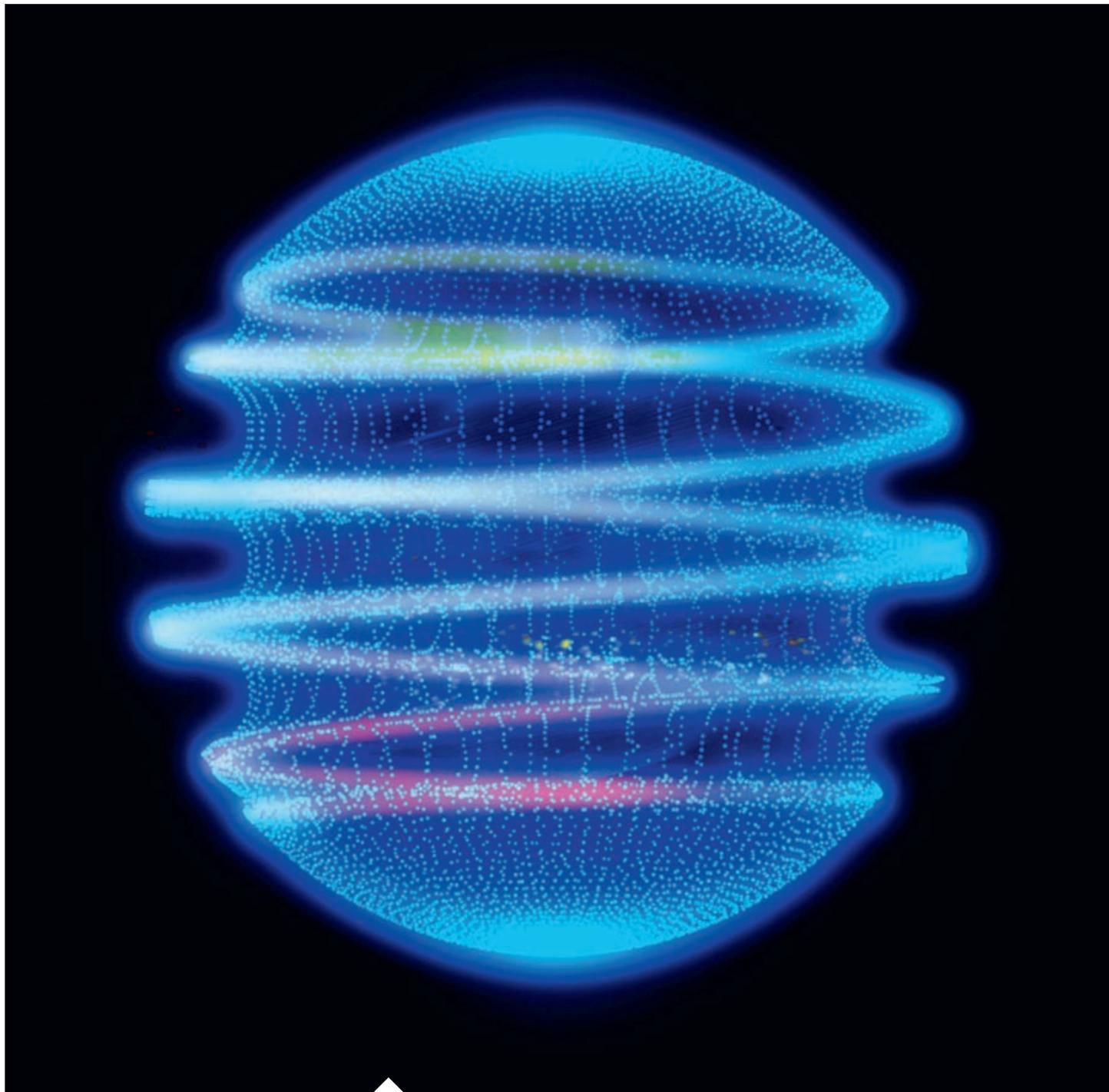


Trimestriel n° 313
SEPTEMBRE 2023

CNRS

LE JOURNAL



Sandra Lavorel,
Médaille d'or 2023
du CNRS

DOSSIER
Une année sous le
signe de **la physique**

Énergie : quand
l'hydrogène
passe au vert

Urbex Le grand
frisson de
l'exploration urbaine



EMPLOI & HANDICAP

Duoday 2023

23 novembre

Vous êtes agent CNRS ? Envie de vous impliquer en faveur de la diversité et de l'inclusion ? Accueillez, le temps d'une journée, une personne en situation de handicap et faites-lui découvrir votre métier.



Plus d'infos
sur l'intranet



Laissez-vous surprendre !

**LES
ÉCHAPPÉES
INATTENDUES**
La science racontée
par le CNRS

Du 6 au 8 octobre 2023
Cité des sciences
et de l'industrie

Vendredi réservé aux scolaires
Entrée libre samedi et dimanche

© Christophe Leterrier/NICN/CNRS Images



Plus d'infos sur :
echappéesinattendues.cnrs.fr
#ÉchappéesInattendues

cité
sciences
et industrie

**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**
Liberté
Égalité
Fraternité



Rédaction :

3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16

Téléphone : 01 44 96 40 00**E-mail :** lejourn@cnrs.fr**Le site Internet :** <https://lejournal.cnrs.fr>**Anciens numéros :**<https://lejournal.cnrs.fr/numeros-papiers>**Directeur de la publication :**

Antoine Petit

Directeur de la rédaction :

Jérôme Guilbert

Rédacteur en chef :

Saman Musacchio

Rédacteurs en chef adjoints :

Laure Caillou, Yaroslav Pigenet

Rédacteurs :

Sophie Félix, Maxime Lerolle, Laurence Stenvot

Ont participé à ce numéro :

Samuel Belaud, Kheira Bettayeb, Sebastián Escalón, Denis Guthleben, Mathieu Grousseau, Mehdi Harmi, Gaël Hautemulle, Martin Koppe, Carina Louart, Émilie Martin

Secrétaire de rédaction :

Émilie Silvoz

Direction artistique :

David Faure

Iconographes :

Anne-Emmanuelle Héry, Sophie Léonard et Valérie Delchambre

Gestionnaire :

Mathieu Chatellier

Assistant de direction :

Frédéric Roman

Illustrations :Paykhan/Colagene
Gianluca Foli/Colagene**Impression :**Groupe Morault, Imprimerie de Compiègne
2, avenue Berthelot – Zac de Mercières
BP 60524 – 60205 Compiègne Cedex
ISSN 2261-6446

Dépôt légal : à parution

Photos CNRS disponibles à :
contact-mediathèque@cnrs.fr
<https://images.cnrs.fr>La reproduction intégrale ou partielle des textes
et des illustrations doit faire obligatoirement l'objet
d'une demande auprès de la rédaction.**En couverture :**

Illustration d'un axion, candidat à la matière noire.

© JJCLAB/EXPÉRIENCE DELIGHT

**Vous travaillez au CNRS
et souhaitez recevoir
CNRS LE JOURNAL
dans votre boîte aux lettres ?**

Abonnez-vous gratuitement sur :
» lejournal.cnrs.fr/abojournal

Suivez l'actualité de la recherche avec le CNRS



Le 3 octobre 2023, la communauté des physiciennes et des physiciens issus du monde de la recherche et de celui de l'éducation sera réunie à la Cité des sciences autour d'Alain Aspect, prix Nobel 2022, pour inaugurer l'Année de la physique. Tout au long de l'année scolaire 2023-2024, nous aurons à cœur de montrer notre discipline sous son meilleur jour : une discipline multimillénaire mais toujours féconde, animée de grandes énigmes à résoudre qui vont de la nature intime de la matière jusqu'aux grandes structures de l'Univers. La physique offre des clés pour comprendre le monde naturel et technologique et contribue aux grands enjeux sociétaux que sont notamment la lutte contre le dérèglement climatique, la recherche de sources d'énergie décarbonées, la santé.

L'Année de la physique 2023-2024 sera l'occasion pour le CNRS d'aller à la rencontre des élèves, de leurs enseignants et plus largement du grand public. Nous avons beaucoup à montrer ! Des résultats de la recherche actuelle tout d'abord. Nous avons la volonté de dévoiler, d'expliquer les innombrables sujets qui mobilisent nos laboratoires, du cœur de la discipline jusqu'à ses frontières. Des résultats, mais aussi la démarche scientifique pour les obtenir : la physique est une science qui encourage la rigueur et la créativité, une science qui allie expériences et conceptualisation, construite sur l'observation et la mesure. Des résultats, mais aussi celles et ceux qui

les obtiennent : des femmes et des hommes aux profils divers, exerçant différents métiers au sein d'équipes plurielles.

En filigrane des actions portées pendant cette Année, il y a la volonté de montrer la recherche en physique telle qu'elle est réellement, loin des clichés d'une science inaccessible, élitiste voire hermétique. La volonté de convaincre la jeune génération que, oui, s'engager vers des études et des carrières scientifiques, en physique en particulier, a du sens. Qu'elle y trouvera un terrain pour relever des défis intellectuels, la conviction d'être utile

“La physique offre des clés pour comprendre le monde naturel et technologique et contribue aux grands enjeux sociétaux.”

à la société, ainsi qu'un milieu professionnel épanouissant et porteur. Notre monde fait face à des défis colossaux, dont la résolution a besoin de davantage de physiciennes et de physiciens engagés à les relever.

Dans ce cadre, ce numéro propose un dossier thématique, « La physique, science sans limite », avec l'interview de Thierry Dauxois, directeur de l'Institut de physique, qui revient sur les objectifs de cette Année et sur les principales actions prévues, ainsi que des articles sur ces recherches qui touchent les limites de notre connaissance : le vide, la matière noire et l'énergie sombre.



Séverine Martrenchard,
déléguée scientifique à l'Institut de physique du CNRS

© COLL. PERS.



28

GRAND FORMAT

13

La physique, science sans limite	14
Voici les plus anciens plans architecturaux !	28
Pandémies : l'éternel retour	34

© CROSSARD ET AL. 2023 FLOS ONE



06

Sandra Lavorel,
une écologue au sommet

© HUBERT BAGUET/TONIS IMAGES

EN PERSONNE 5

Sandra Lavorel, une écologue au sommet	6
Rapport Gillet, la vision d'Antoine Petit	8
Quatre innovateurs récompensés	10
Brèves	12



54

Pourquoi tant de
dauphins échoués
sur les plages ?

© F. SOURISSAULT

EN ACTION 41

L'ère de la cancérologie numérique	42
Néandertal était aussi un artiste	46
Audit interne CNRS, un dispositif « maison » au service de l'efficacité collective, entretien avec Éric Chareyre	48
L'hydrogène, gaz de la transition énergétique ?	50
Pourquoi tant de dauphins échoués sur les plages ?	54
« Les conditions de travail en France se dégradent depuis les années 1990 », entretien avec Dominique Méda	56



64

Un autre regard
sur les matériaux
anciens

© LAURENCE GODART / JONAS PAMIER / CNRS IMAGES

LES IDÉES 59

Urbex, le grand frisson de l'exploration urbaine	60
Brèves à lire	63
Un autre regard sur les matériaux anciens	64

LA CHRONIQUE

L'énergie de la recherche	66
---------------------------------	----

EN PERSONNE

An illustration of a woman with glasses and a backpack climbing a mountain peak. She is holding a magnifying glass. The scene is set against a backdrop of a large sun or moon, stylized clouds, and a red and blue striped banner. The foreground features stylized dandelions.

*Rencontre avec une écologue
en or et un quatuor qui atteint
les cimes de l'innovation.*

Sandra Lavorel, une écologue au sommet

VIVANT 

ÉVÉNEMENT Sandra Lavorel vient de décrocher la médaille d'or du CNRS pour ses travaux pionniers en écologie fonctionnelle. Son obsession : le fonctionnement des écosystèmes et des services qu'ils sont susceptibles de rendre aux sociétés humaines. Son terrain de jeu favori : les Alpes, où elle mime les effets du réchauffement climatique sur les prairies d'altitude.

PAR ÉMILIE MARTIN

“ On n'a aucune chance de résoudre la crise climatique actuelle si on ne travaille pas en proximité avec les gens. » Ce qui frappe d'emblée chez Sandra Lavorel, lauréate de la médaille d'or du CNRS 2023, c'est à la fois son amour de la nature et le profond respect qu'elle a pour son prochain. Elle passe d'ailleurs une bonne partie de son temps à faire dialoguer, fine ambassadrice, les humains avec les éléments. « *C'est une pionnière, au moins en France et en Europe, du travail à l'interface entre sciences de la nature et sciences humaines et sociales*, confirme Éric Garnier, du Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (Cefe) de Montpellier¹, avec qui elle a travaillé dans le passé. Elle est incroyablement brillante. »

Directrice de recherche CNRS à l'université Grenoble Alpes, Sandra Lavorel est spécialiste d'écologie fonctionnelle, c'est-à-dire du fonctionnement des écosystèmes et des services qu'ils sont susceptibles de rendre aux sociétés humaines. « *Un écosystème peut par exemple fournir de la nourriture, des combustibles, des matériaux, mais aussi réguler le climat en stockant du carbone, nettoyer les eaux, assurer la pollinisation des cultures, etc.*, détaille l'experte. Il offre aussi des avantages plus culturels : un beau paysage, comme une prairie fleurie par exemple, invite à la contemplation et procure un sentiment de bien-être. » Elle consacre spécifiquement ses recherches à l'étude de l'impact du changement climatique et de l'exploitation des sols sur ces contributions de

la nature aux humains. Son terrain de jeu favori : la montagne, et plus particulièrement, la vallée de la Haute-Romanche, au-dessus de Grenoble, où elle mime les effets du réchauffement climatique sur les prairies alpines.

Sa carrière d'écologue commence à la fin des années 1980. Après un diplôme d'ingénieur agronome², la chercheuse poursuit son parcours avec une thèse de doctorat en écologie et sciences de l'évolution à l'université de Montpellier 2. Quand elle soutient sa thèse en 1991, l'écologie fonctionnelle commence tout juste à émerger en tant que discipline : « *Durant mon postdoc de trois ans à Canberra, en Australie, j'ai eu la chance de travailler auprès de chercheurs qui classaient les plantes non pas selon leur identité, mais d'après leurs fonctions. Ce, dans le but de modéliser des écosystèmes entiers et d'analyser leur réponse au changement climatique. C'était une première* ». Et une réelle source d'inspiration pour la chercheuse qui a l'idée, avec des collègues, de déployer cette méthode d'écologie fonctionnelle en Europe, à l'échelle locale, pour suivre l'évolution des fonctions d'un écosystème selon l'exploitation des sols, le changement climatique, l'essor des espèces invasives...

La montagne pour terrain de jeu

Ses travaux pionniers, elle les mène dès 1994 sur les écosystèmes méditerranéens, au Cefe, où, à peine rentrée du bout du monde, elle obtient son premier poste CNRS. « *C'était très intéressant et formateur, mais mon truc à moi, c'est la montagne. Je le sais depuis que j'ai effectué des stages de jeunesse dans les parcs nationaux du Mercantour ou des Écrins* », raconte-t-elle.

En 2003 – enfin ! – elle arrive au Laboratoire d'écologie alpine³ (Leca) de Grenoble, où le CNRS lui donne les moyens de monter une équipe et de faire décoller la thématique de l'écologie fonctionnelle. Mais pour déterminer comment évoluent les écosystèmes et les services qu'ils rendent aux humains, il faut d'abord les connaître précisément. Avec

1. Unité CNRS/EPHE-PSL/IRD/Univ. de Montpellier. 2. Institut national agronomique Paris-Grignon. 3. Unité CNRS/Univ. Grenoble Alpes/Univ. Savoie Mont-Blanc.



Lire l'intégralité du portrait sur lejournald.cnrs.fr

lante écologue. Mais elle a fait le choix de sortir de sa zone de confort et de s'intéresser aux contributions de la nature aux sociétés locales dans les Alpes », souligne Isabelle Arpin, l'une de ses collègues proches à l'Inrae.

Réconcilier les hommes avec leur environnement

L'une des contributions majeures de Sandra Lavorel à la discipline, c'est en effet d'avoir réussi à mesurer précisément l'impact de l'utilisation des sols, par les habitants, sur les écosystèmes et les services qu'ils rendent à cette même communauté. Pour ce volet de recherches aussi, elle a développé des méthodes inédites : « Afin de déterminer comment exploiter les sols tout en préservant les services écosystémiques, nous impliquons les premiers intéressés, c'est-à-dire les acteurs locaux : les agriculteurs, mais aussi les instances départementales, les agences de planification urbaine, les services de l'environnement. Avec eux, nous organisons régulièrement des ateliers. Grâce à des jeux de plateau de notre conception, nous réfléchissons ensemble à l'impact de telle ou telle pratique : que se passe-t-il si l'on fertilise un peu moins, si l'on arrête de faucher, si l'on plante des arbres, si l'on pratique une agriculture extensive plutôt qu'intensive... Ces échanges réguliers avec les gens, ce travail sur le terrain, c'est capital pour mes recherches ».

Après plus de 300 articles publiés dans des revues de référence, la chercheuse s'est vu confier le pilotage des évaluations de la biodiversité au niveau national (Évaluation française des écosystèmes et des services

ses collègues, la chercheuse s'attelle donc à modéliser des pans entiers de territoires alpins : les milieux, plantes, insectes, animaux et les services qu'ils rendent aux humains sont finement cartographiés, puis toutes ces données sont entrées dans des modèles statistiques informatiques.

Une fois le terrain appréhendé dans les moindres détails, Sandra Lavorel n'a plus qu'à faire varier les paramètres. Comprenez : à accélérer le changement climatique, pour mieux mesurer son impact sur les écosystèmes et les services qu'ils rendent. Pour ce faire, la chercheuse a mis en place plusieurs projets innovants. Avec ses collègues du Leca par exemple, elle réchauffe, assèche ou déneige des parcelles entières de ses montagnes bien-aimées à la station scientifique du Lautaret, située juste au-dessous du célèbre col. « Sandra aurait pu se "contenter" d'être une bril-

► Sandra Lavorel à la station scientifique du Lautaret, dans les Alpes.

écosystémiques, Efese) comme au niveau international. Entre 2018 et 2022, elle a été membre du comité interdisciplinaire de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) – rien d'autre que le Giec de la biodiversité – pour laquelle elle a coédité le rapport paru en 2021. Cette figure de l'écologie de premier plan est désormais engagée dans la rédaction du prochain rapport à paraître en 2024. « Il est orienté non plus sur les simples constats, mais sur les solutions à mettre en place pour préserver les écosystèmes et les nombreux services qu'ils nous rendent », explique-t-elle. Qu'elle rédige d'expertes synthèses au niveau mondial, ou qu'elle imite les éléments, Sandra Lavorel œuvre finalement pour la même cause : réconcilier les hommes avec leur environnement. ||

© HUBERT FROGNET/ICMIS IMAGES

Rapport Gillet: la vision d'Antoine Petit

Rôle des différents acteurs, modernisation, simplification, temps pour la recherche... Avec 14 propositions fondées sur un principe de confiance et de responsabilité, le rapport dit « Gillet » envisage « les évolutions nécessaires pour mettre en œuvre une rénovation de l'écosystème de la recherche et de l'innovation ». Il a été remis le 15 juin 2023 à Sylvie Retailleau, ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, par la mission sur l'écosystème de la recherche et de l'innovation coordonnée par Philippe Gillet. Antoine Petit, président-directeur général du CNRS, revient pour nous sur les points clés du rapport.

PROPOS RECUEILLIS PAR SOPHIE FÉLIX

L'une des propositions du rapport Gillet est de « mettre en place les conditions et les évolutions nécessaires » pour que les organismes nationaux de recherche (ONR) puissent « assurer le rôle d'agences de programmes » : qu'est-ce que cela signifie pour le CNRS ?

Antoine Petit. Le rapport reflète bien les discussions que j'ai pu avoir avec la Mission portée par Philippe Gillet¹. Effectivement, il propose en particulier d'ajouter aux ONR un rôle d'agences de programmes qui viendrait compléter leurs missions actuelles d'opérateurs de recherche. L'idée est de confier à chacun des principaux ONR l'animation de communautés de recherche et la définition collective d'une stratégie scientifique nationale sur quelques thématiques en lien avec les priorités nationales de France 2030.

Chaque ONR en charge devra coordonner l'ensemble des acteurs concernés. L'articulation entre les communautés, les universités, organismes et autres partenaires, l'État et l'Agence nationale de la recherche sera primordiale.

Concernant notre établissement, nous pourrions avoir la responsabilité d'animer une agence sur le vaste champ « Climat, biodiversité et sociétés durables » (ce titre est encore en cours de discussion), par essence très pluridisciplinaire. Nous devrions être fixés à l'automne sur la répartition des agences entre les ONR, afin de commencer au plus vite le travail concret. Il est important de remarquer que si le périmètre de l'agence est transverse à celui des dix instituts du CNRS, il est très loin de couvrir l'ensemble de nos activités. C'est donc bien une mission complémentaire qui nous est confiée, et nullement une transformation de nos missions.

Le rapport pointe aussi la nécessité pour les agences de programmes de mener des analyses prospectives nationales. Est-ce un exercice nouveau pour le CNRS ?

A. P. Il est écrit que les agences de programmes devront mettre en place « une activité de veille et de prospective nationales, construite collectivement entre les ONR et les établissements d'enseignement supérieur ». Le CNRS suscite et pilote déjà ce type de prospectives depuis de nombreuses années dans les domaines des sciences de l'Univers, de la physique nucléaire et des particules, ou encore de l'écologie. Des exercices similaires sont en préparation dans d'autres secteurs, notamment en chimie et en physique.

Chaque prospective est le résultat d'un travail rigoureux et collectif auquel les communautés apportent le plus grand soin. Il s'agit d'identifier les enjeux scientifiques et les

1. Géophysicien, Philippe Gillet a dirigé l'Institut national des sciences de l'Univers du CNRS de 2001 à 2003 puis l'ENS Lyon et l'Agence nationale de la recherche avant de devenir directeur de cabinet de Valérie Pécresse, ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche (2007-2010). Depuis 2010, il est professeur à l'École polytechnique fédérale de Lausanne, dont il a été vice-président et président par intérim. Philippe Gillet est également président du conseil scientifique de la Région Île-de-France et président du conseil scientifique d'Inrae. Il a été membre du jury des Idex et il est directeur scientifique de l'entreprise Sicpa depuis 2017.



© R. PAK/CNRS IMAGES

thématiques émergentes et de connaître les besoins des scientifiques, de déterminer les priorités scientifiques à court, moyen et long terme, et les défis sociétaux qu'elles permettront de relever. Les agences devront alimenter la stratégie de recherche de notre pays, soutenir la prise de risque pour que la recherche contribue à l'acquisition de connaissances nouvelles déterminantes et à leur impact. Elles pourront aussi proposer de nouveaux programmes nationaux.

Les agences de programmes auront sans doute aussi un rôle de conseil auprès du gouvernement et des décideurs. L'appui à la décision publique est déjà un axe majeur de notre action publique ces dernières années. À cet égard, la Mission pour l'expertise scientifique du CNRS (MPES) – qui a commencé ses

travaux début 2022 et propose des expertises scientifiques collectives, indépendantes, plurielles et impartiales – sera, pour nous, un levier du dispositif.

Que signifie l'exercice de simplification recommandé et comment va-t-il se mettre en pratique ?

A. P. La simplification est un enjeu majeur depuis plusieurs années et tout le monde l'appelle, évidemment, de ses vœux. L'organisation même de l'ESR français, fondée sur la coopération et le management entre différentes tutelles au sein des unités mixtes de recherche (UMR), apporte une réelle plus-value. Mais il est vrai aussi qu'elle peut introduire une certaine complexité au quotidien. Les scientifiques et les agents des fonctions support ont donc des attentes fortes et légitimes, afin de simplifier

leur vie et d'être collectivement plus efficaces. Les propositions du rapport sont intéressantes et visent à diminuer la charge administrative des laboratoires. Elles insistent sur la nécessité de mieux partager l'information en temps réel et d'établir un socle commun de données et d'indicateurs de pilotage, de gestion et d'évaluation. Elles viennent prolonger les efforts faits ces dernières années par les différents acteurs.

Le CNRS a déjà beaucoup œuvré pour simplifier les tâches administratives dans les laboratoires : autorisations globales de dépenses au niveau des laboratoires permettant d'engager les crédits dès que le contrat est signé, dématérialisation progressive des processus de gestion récurrents, gestion des missions, cahier de laboratoire électronique, délégation de gestion, mise à disposition des outils CNRS ayant fait leurs preuves pour tous nos partenaires... C'est un long travail, souvent en coulisse et qui ne se voit pas toujours. Le seul objectif est de faciliter la tâche aux laboratoires et de libérer du temps pour la recherche. Le rapport laisse une grande latitude d'organisation et les ONR et les universités pourront faire du sur-mesure en fonction des contextes des unités, ce qui est très bien. Ensemble, nous avons proposé plusieurs sites pilotes pour mener les expérimentations d'ici à 18 mois. ||



+

Pour consulter
le rapport
au format PDF :



Quatre innovateurs

ÉVÉNEMENT Voici les lauréats de la médaille de l'innovation du CNRS 2023. Ils recevront cette distinction le 14 novembre prochain.

TEXTE MARTIN KOPPE PHOTO FRÉDÉRIQUE PLAS/CNRS IMAGES



Marc Antonini
LA MÉMOIRE SUR ADN

Auteur de treize brevets, Marc Antonini a contribué à l'innovation dès son doctorat. Les premiers travaux de cet expert en compression de données ont ainsi été inclus dans la norme mondialement utilisée JPEG 2000. Il a ensuite collaboré avec le Cnes, où il a développé un système d'encodage embarqué pour la constellation de satellites Pléiades. À présent directeur de recherche au CNRS, au Laboratoire d'informatique, signaux et systèmes de Sophia Antipolis¹ (I3S), il y dirige l'équipe MediaCoding qui coopère avec de nombreux industriels. Ses travaux lui ont permis de cofonder la start-up Cintoo, consacrée à la capture et à la visualisation de nuages de points 3D issus de scanners LiDAR, notamment pour

l'industrie et la construction. L'entreprise, qui compte aujourd'hui près de quarante employés et un second bureau aux États-Unis, a réussi trois levées de fonds pour un total de neuf millions d'euros. Marc Antonini s'est depuis focalisé sur une technique révolutionnaire. « *Mes travaux visent à obtenir un système de mémoire sur ADN synthétique fiable, automatisé et opérationnel d'ici au courant des années 2030.* » Le chercheur a ainsi cofondé la start-up PearCode, dont l'algorithme breveté facilite le codage et décodage d'informations binaires sur de l'ADN. Il dirige également le programme et équipement prioritaire de recherche MoleculArXiv, doté de vingt millions d'euros sur sept ans, et a participé au programme européen OligoArchive. Enfin, Marc Antonini préside l'équipe internationale qui façonne JPEG DNA, une norme de compression d'images adaptée à l'ADN. ■

1. Unité CNRS/Université Côte d'Azur.

Professeure à l'université de Bretagne occidentale et membre du Laboratoire des sciences de l'environnement marin¹ (Lemar), Claire Hellio dirige également la plateforme de bioprospection Biodimar. Elle y reçoit les problématiques et les besoins en R&D des industriels, auxquels les chercheurs apportent des solutions bioinspirées. Cette collaboration est allée jusqu'à prendre la forme du laboratoire commun BiotechALG, en partenariat avec l'entreprise Green Sea, leader européen de la production de micro-algues. À l'interface de la biologie, de la chimie et des sciences de l'environnement, Claire Hellio valorise en effet les biomasses marines, en particulier les algues et les micro-organismes. « *J'ai toujours habité au bord de la mer,*

Claire Hellio
LA CHIMIE DES ALGUES



son étude et sa protection sont mes passions depuis le plus jeune âge. » Très attachée aux approches biomimétiques et de chimie verte, elle extrait des composés actifs pour développer des produits innovants. Ils se destinent majoritairement aux revêtements antifouling, qui protègent les coques des bateaux de la formation de films d'algues et de coquillages, et à l'industrie cosmétique, avec des conservateurs et des antioxydants. Rodée au transfert de technologies, Claire Hellio a obtenu 2,5 millions d'euros de financement pour ses partenariats industriels, dont 1,5 million en tant que coordinatrice principale, depuis qu'elle est au Lemar. Ce qui représente quatorze projets avec des entreprises depuis 2015. ■

1. Unité CNRS/Ifremer/IRD/UBO.

récompensés



Patricia Rousselle

AUX PETITS SOINS DE LA PEAU

Avec plus de dix partenariats industriels et onze brevets, elle a décidément l'innovation et la recherche dans la peau.

Patricia Rousselle, directrice de recherche au CNRS, au Laboratoire de biologie tissulaire et d'ingénierie thérapeutique¹ (LBTI), est une pharmacobiologiste spécialisée dans la cicatrisation et la régénération de la peau. Une spécialité qui l'a amenée à collaborer avec les Laboratoires d'Anjou, BASF, Symatèse, 3-D Matrix, Dior, Chanel, Native et Nagase. « Je prends soin de développer de véritables partenariats dans un esprit de cocréation, précise la lauréate. L'innovation prend sa source dans la recherche fondamentale fondée sur l'exploration de pistes scientifiques nouvelles et originales. » Patricia Rousselle

étudie en effet le dialogue entre les cellules et leur micro-environnement. Ce milieu est riche en protéines dont la nature et l'organisation influencent le fonctionnement des cellules de la peau, y compris quand celui-ci devient pathologique. À partir de ces travaux fondamentaux, elle propose des solutions touchant aussi bien à la cicatrisation post-chirurgicale qu'au traitement des plaies chroniques et à la lutte contre le vieillissement de la peau. Patricia Rousselle a en particulier synthétisé une molécule biomimétique qui facilite la régénération tissulaire, aujourd'hui utilisée dans la gamme de baumes cicatrisants Cébélia commercialisée par les Laboratoires d'Anjou. ■

1. Unité CNRS/Université Claude Bernard.

Des premières phases expérimentales à l'appareillage final, Jacques Gierak est présent à chaque étape de l'innovation.

Cet ingénieur de recherche au CNRS, également responsable de la plateforme Instrumentation et sources d'ions au Centre de nanosciences et de nanotechnologies¹ (C2N), est mondialement reconnu dans la conception de sources pour faisceaux d'ions focalisés. « Grâce au CNRS, j'ai la chance de pouvoir sortir des sentiers battus et de bénéficier des équipements exceptionnels du C2N. » Son savoir-faire dans les sources d'ions extrêmement performantes lui a permis de collaborer avec les grandes entreprises de son domaine. Jacques Gierak a ainsi travaillé avec le Cnes et Airbus

Jacques Gierak

LE POUVOIR DES IONS



Defence and Space sur la projection d'ions rapides pour la propulsion spatiale. Sa capacité à lever des verrous techniques a abouti à la fondation de la start-up ION-X, dont le propulseur HALO-100X équipera le prochain satellite de la mission Edison de l'Agence spatiale européenne. Jacques Gierak a également travaillé sur des faisceaux d'ions focalisés (FIB) adaptés à la nanofabrication. En collaboration avec l'entreprise allemande Raith Nanofabrication GmbH, il a conçu le FIB Nanowriter, capable de structurer les surfaces de matériaux avancés comme le graphène, les films magnétiques ou les semiconducteurs. Les outils développés par Jacques Gierak reposent sur plusieurs de ses brevets et cumulent les records mondiaux de performance. Leur fiabilité décuple la vitesse d'exécution et permet d'obtenir des précisions nanométriques. ■

1. Unité CNRS/Université Paris-Saclay.



Robert Vautard

Un climatologue français élu au sein du Giec

Le directeur de recherche CNRS Robert Vautard a été élu à la coprésidence du groupe travaillant sur les bases physiques du changement climatique au sein du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec), succédant ainsi à Valérie Masson-Delmotte. Climatologue et directeur de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), Robert Vautard est spécialiste de l'influence du changement climatique sur la météorologie locale et les événements extrêmes. Il a été coordonnateur de la Convention nationale sur les services climatiques pour le ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires et le ministère de la Transition énergétique entre 2017 et 2021. Il a œuvré pour positionner les compétences de l'IPSL au service du Groupe régional d'expertise sur le changement climatique et la transition écologique francilien, qui vise à favoriser la prise en compte des recherches et connaissances scientifiques sur le climat et la biodiversité dans les décisions d'aménagement de la Région Île-de-France.



Éric Lanciaux nommé directeur des ressources humaines du CNRS

Expert des ressources humaines depuis plus de 30 ans, Éric Lanciaux a travaillé dans divers secteurs d'activité en France et à l'étranger. Président d'honneur de Mouvement Génération RH, il est titulaire d'un Master 2 en droit social et relations du travail de l'université Paris 2 Panthéon-Assas. Éric Lanciaux a pris ses nouvelles fonctions le 1^{er} juin 2023. Il succède à Marie Galloo Parcot qui avait assuré l'intérim depuis le 1^{er} février.



Claire Gouny en mission pour la transition écologique

Jusqu'à-là responsable de la communication interne et de la marque employeur CNRS, Claire Gouny a été nommée coordinatrice d'un projet visant la formation des cadres de l'État aux enjeux climat-biodiversité-ressources.

Le CNRS représente la France au pôle Sud



Philippe Hoest

Philippe Hoest, ingénieur CNRS au Centre d'immunophénomique (CNRS/Aix-Marseille Université/Inserm), et chargé de mission à l'Institut des sciences biologiques du CNRS, a été nommé chef de district de la base Port-aux-Français, l'une des cinq circonscriptions administratives des Terres australes et antarctiques françaises (TAAF), pour

la mission 2023-2024. Il a pour rôle de représenter l'État et de piloter la base, qui accueille notamment des scientifiques pour mettre en œuvre des programmes de recherche et des systèmes d'observation à long terme dans les sciences de la Terre et de l'Univers, les sciences du vivant, sur l'évolution du climat et la biodiversité. Extrêmement isolées, ne comptant aucun habitant permanent, les TAAF représentent la plus vaste réserve naturelle de France et gèrent la 4^e aire marine protégée la plus étendue au monde – un patrimoine naturel exceptionnel à protéger.

Un chercheur en cancérologie récompensé

Nicolas Aznar, chercheur CNRS dont les travaux portent sur les cellules souches et leur culture en 3D, est l'un des scientifiques du Centre de recherche en cancérologie de Lyon à être récompensé par un prix Descroix-Vernier EthicScience en 2023. Il a obtenu le Prix du jury pour son projet Nexpocan, qui vise à créer une nouvelle génération d'organoïdes dérivés de patients en vue d'une meilleure modélisation du cancer.



Nicolas Aznar

GRAND FORMAT



Les scientifiques se mobilisent pour l'Année de la physique, retrouvent des plans anciens et tentent de déjouer les prochaines pandémies.



La physique, science sans limite

UNIVERS

MATIÈRE

Souvent perçue comme complexe et abstraite, la physique est pourtant une discipline essentielle pour comprendre le monde, du fonctionnement des smartphones à l'évolution du cosmos. À l'occasion de l'Année de la physique, *CNRS le Journal* met à l'honneur cette science qui n'a pas fini de nous surprendre.



Créer du lien entre le monde scolaire et la recherche



© C. FRÉLILLON/CNRS IMAGES

L'Année de la physique débute à la rentrée 2023. Thierry Dauxois, directeur de l'Institut de physique du CNRS, revient sur ses objectifs et les principales actions prévues.

PROPOS RECUEILLIS PAR SOPHIE FÉLIX

À quelle ambition répond l'Année de la physique ?

Thierry Dauxois. L'objectif principal est de renouveler le regard du citoyen sur la physique, en particulier de la jeune génération. La physique est souvent perçue comme une discipline complexe, difficile à comprendre, abstraite. Elle reste associée à des termes techniques et parfois à des souvenirs scolaires déplaisants. Bien qu'elle soit reconnue comme une discipline fondamentale essentielle pour comprendre le monde, des grands astres aux phénomènes naturels terrestres, son importance dans le quotidien et sa contribution aux enjeux sociétaux (énergie, climat, santé, etc.) demeurent méconnues du grand public : qui connaît toute la physique qui se cache dans nos téléphones portables ? Il y a donc une fascination mais qui laisse le grand public à une certaine distance de la discipline et des spécialistes. Nous souhaitons vraiment réduire cette distance.

L'Année de la physique s'adresse en priorité aux lycéennes et lycéens. Pourquoi ?

T. D. Pour relever les défis sociétaux actuels, nous avons besoin de sciences, spécifiquement de chercheurs et d'ingénieurs formés en physique, capables

de comprendre les mécanismes, de faire des modélisations et de proposer des solutions nouvelles. Or, depuis la réforme du baccalauréat, la spécialité « physique » est moins choisie que ne l'était la voie S – un phénomène qui s'accroît d'année en année¹. C'est préoccupant : la population générale perd en connaissances de base sur la physique. Cela manquera aux générations futures.

l'infiniment grand et de l'infiniment petit, l'infiniment complexe qui nous entoure, à notre échelle. Mais c'est aussi utile à la société : la physique fournit des clés pour comprendre les sujets qui interpellent, comme le changement climatique, les événements extrêmes, la diminution des ressources en énergie, la pollution plastique, etc. Et le taux d'emploi est excellent.

“La proportion de femmes dans les études scientifiques post-bac reste faible, comme les taux d'ingénieures et chercheuses en physique.”

Nous avons donc décidé de nous concentrer sur le milieu scolaire afin de montrer à ces jeunes, au moment des choix auxquels ils font face, que faire de la physique est une orientation professionnelle sensée. Cela permet de mieux comprendre, au-delà de

Notre attention se porte particulièrement sur la nécessité d'encourager plus de jeunes filles à se tourner vers cette discipline. La proportion de femmes dans les études scientifiques post-bac reste faible, comme les taux d'ingénieures et chercheuses en

1. En 2019, 51,5% des candidats et candidates au baccalauréat de la filière générale concouraient en filière S. En 2020, 33,7% des élèves de la filière générale ont gardé la spécialité « physique » en terminale – un taux qui descend à 31,3% en 2021 et 30,1% en 2022. Source : Direction de l'évaluation, de la prospective et de la performance du MENJ. 2. 34,6% des filles et 52,1% des garçons choisissent la spécialité « physique-chimie » en classe de 1^{re}. 31,3% des filles poursuivent des études universitaires en sciences fondamentales et appliquées. Les femmes représentent 29,7% des étudiants en classes préparatoires scientifiques et 28% des étudiants en écoles d'ingénieurs (toutes filières). Les femmes ne représentent que 20% des personnels chercheurs de l'INP. 3. Institut de physique (INP), Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3), Institut national des sciences de l'Univers (Insu) et Institut des sciences de l'ingénierie et des systèmes (Insis).

physique². Pourtant, la science a besoin de femmes. Depuis mon arrivée à la direction de l'Institut de physique, nous essayons d'inverser cette tendance mais cela prendra du temps et il faut commencer au niveau scolaire. L'Année permettra aux lycéennes de rencontrer des femmes scientifiques, de les interroger sur leurs parcours, de trouver des opportunités de stages.

Pour répondre à ces enjeux, le CNRS a signé une convention avec le ministère de l'Éducation nationale et de la Jeunesse (MENJ). Pouvez-vous nous en dire plus ?

T. D. Les enseignants et enseignantes des filières générales, techniques et professionnelles sont des relais efficaces pour atteindre les élèves, générant un effet multiplicateur important. L'Année vise à former le corps enseignant à la recherche actuelle en physique, pour renouveler l'illustration de leurs cours et l'attrait des jeunes pour la discipline. À l'image des précédentes Années organisées par le CNRS et le MENJ, les quatre instituts qui portent l'Année de physique³ vont donc

déployer, avec les délégations régionales du CNRS, des formations dans trente-cinq villes à travers le pays, avec des conférences mais aussi des ateliers et des visites de laboratoires et plateformes scientifiques. L'objectif est de dévoiler la réalité d'un laboratoire de physique et le travail collectif qui s'y déroule, de donner à voir la recherche en marche et des expériences de pointe. Nous apporterons aussi des clés de médiation en physique aux chercheurs et enseignants-chercheurs, femmes et hommes, qui assureront ces formations.

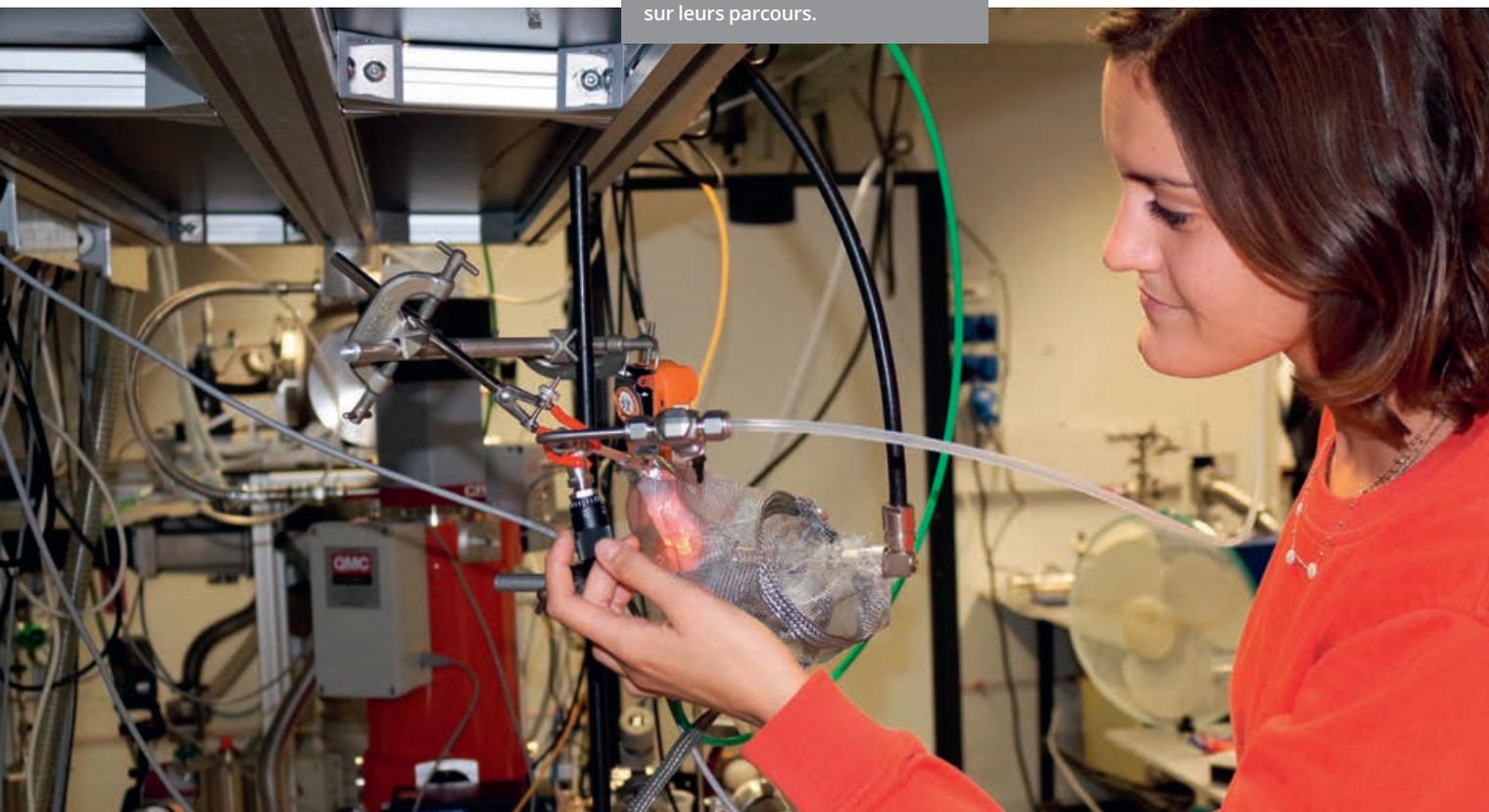
Le CNRS a donc proposé au MENJ de signer une convention pour intégrer nos actions dans le programme national officiel de formation du ministère. Le doyen de l'Inspection générale de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, membre du comité de pilotage de l'Année, et son équipe nous ont aidés à sélectionner des thématiques

appropriées. Des référents « Année de la physique » ont aussi été nommés dans chaque académie pour coordonner les actions. Le monde de l'Éducation nationale sera largement représenté lors de la journée de lancement, le 3 octobre – jour de l'annonce du prix Nobel de physique – à la Cité des sciences et de l'industrie à Paris. Cet événement accueillera des scientifiques renommés, tels que Alain Aspect, lauréat du prix Nobel en 2022, ou la climatologue Valérie Masson-Delmotte. Nous espérons que ce partenariat concret engagé pour l'Année entre recherche et enseignement en physique se prolongera au-delà de 2024 car il est essentiel.

Vos actions présentent aussi la diversité des métiers de la physique. C'était important pour vous ?

T. D. Tout à fait. Nous tenons à démontrer aux lycéens et lycéennes que la physique n'est pas réservée aux chercheurs : elle implique aussi des ingénieurs et des techniciens, hommes et femmes. Un laboratoire regroupe des compétences diverses travaillant en

L'Année de la physique permettra notamment aux lycéennes de rencontrer des femmes scientifiques et de les interroger sur leurs parcours.



équipe qui sont importantes et complémentaires. Par exemple, en nous inspirant de l'Institut de chimie, nous mettons en place une opération « grand oral » destinée aux élèves de 1^{re} et terminale de toutes les filières préparant cette épreuve du baccalauréat. Cette opération s'appuie sur les livres *Étonnants infinis*⁴ et *Étonnante physique* (lire p. 63) publiés par CNRS Éditions. Le second, qui paraîtra le 26 octobre, rassemble des textes de 70 médaillés du CNRS issus des quatre instituts concernés, couvrant des thématiques variées de la physique actuelle. Il sera notamment question de bulles de savon, de nanomédecine, de matière noire (lire p. 25), de télescopes (lire p. 19), de matériaux biosourcés, de volcans ou encore du monde quantique (lire p. 22). Ces auteurs et autrices sont répartis sur tout le territoire et dans tous les métiers de la recherche, et l'ouvrage respecte la parité.

Concrètement, les élèves prépareront un exposé sur le modèle du grand oral à partir d'articles extraits de ces livres. Au premier semestre 2024, lors d'une journée de restitution dans leur lycée, ces élèves présenteront leur travail devant les auteurs et leurs équipes, notamment des doctorants et doctorantes, avant une table ronde sur les métiers de la physique. Nous souhaitons ainsi créer du lien entre ces élèves et le monde de la recherche, et ouvrir leurs perspectives d'orientation professionnelle. Cela aura lieu dans de nombreuses académies, avec la volonté d'aller vers les zones rurales et défavorisées.

Autre exemple : l'INP prépare une bande dessinée qui mettra en lumière différents métiers en physique, sans



Classe préparatoire Mathématiques-physique (MP*), 2^e année, au lycée La Martinière Montplaisir de Lyon.

© LAURENT CERINO/REA

exhaustivité, par douze portraits de membres de nos laboratoires – six femmes et six hommes – de la main de l'illustratrice Hélène Bléhaut. Cette BD, à paraître début 2024, soulignera la diversité de ces personnes et de leur travail. Nous souhaitons qu'elle aide les jeunes à s'envisager à leur place, à se projeter dans une carrière au sein d'un laboratoire de physique.

Le grand public est-il aussi la cible de cette Année de la physique ?

T. D. Bien sûr. Même sans ambition de carrière en physique, acquérir une culture scientifique est important pour

prendre des décisions éclairées en tant que citoyen, notamment face à la prolifération des fake news. L'Année vise donc à sensibiliser le grand public à la démarche scientifique et à promouvoir l'esprit critique. Le livre *Étonnante physique* sera par exemple disponible en librairie. Nous encourageons aussi les laboratoires et leurs membres à mettre en œuvre leurs propres actions – conférences, expositions, spectacles, rencontres, productions multimédia, etc. – envers les scolaires mais aussi le grand public. Enfin, la Fête de la science à l'automne 2023 sera un autre moment fort de l'Année de la physique.

Pourquoi avoir voulu organiser cette Année en lien avec les partenaires du CNRS ?

T. D. L'Année de la physique est portée par le CNRS – via quatre instituts et les délégations régionales –, le CEA, France Universités, la Société française de physique et le MENJ. Mais elle rassemble de nombreux partenaires institutionnels (ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Académie des sciences), des sociétés savantes françaises et autres associations.

J'ai tenu à cette approche partenariale afin de faire de cette Année un élément fédérateur pour notre communauté de physiciennes et de physiciens. Il est parfois plus facile d'avancer tout seul, mais on va moins loin et les enjeux ici sont d'importance pour les physiciennes et les physiciens, mais aussi pour la société en général. Nos actions impliquent donc des scientifiques issus de l'ensemble des catégories de personnels de tous ces partenaires, qui organisent également leurs propres actions. Celles-ci seront mises en valeur sur le site web de l'Année de la physique, qui regroupera aussi des ressources accessibles à tous et toutes. **II**

“Acquérir une culture scientifique est important pour prendre des décisions éclairées en tant que citoyen, notamment face à la prolifération des fake news.”



+
Pour en savoir plus rendez-vous sur le site de l'Année de la physique.

4. *Étonnants infinis*, Ursula Bassler (dir.), CNRS Éditions, nov. 2022, 336 p.

Euclid, l'énergie noire en ligne de mire

Samedi 1^{er} juillet à 17 h 11 heure française, le télescope spatial Euclid de l'Agence spatiale européenne (ESA) a pris son envol à bord d'une fusée Falcon 9 depuis Cap Canaveral, en Floride, pour gagner son orbite d'observation à 1,5 million de kilomètres de la Terre. Pour les quelque 1 500 chercheurs, ingénieurs et techniciens impliqués dans cette aventure scientifique hors norme, après plus de dix ans de développement, ce lancement signifie le début de la phase opérationnelle. « *Nous sommes tous très excités, c'est un moment vraiment incroyable !* » confie Stéphanie Escoffier¹, responsable de Euclid-France. Objectif : observer en six ans près de 2 milliards de galaxies, dans le but d'établir la première carte 3D de l'Univers jusqu'à une distance de 10 milliards d'années-lumière. De quoi déterminer la cause de l'accélération de l'expansion du cosmos, que les scientifiques, faute de mieux, attribuent à une mystérieuse entité baptisée « énergie noire » dont ils ignorent tout.

L'énergie noire hante la cosmologie depuis 1998. À cette date, deux équipes indépendantes se demandent si l'Univers, sous l'effet de la gravitation, verra son expansion ralentir indéfiniment ou bien connaîtra dans le futur une phase de contraction le ramenant à son point de départ. Mais à la stupéfaction générale, les astrophysiciens

L'expansion de l'Univers accélère sous l'effet d'une entité mystérieuse baptisée énergie noire. Pour en découvrir la nature, le télescope spatial Euclid a décollé pour une mission d'observation de six ans qui a le potentiel de bouleverser notre vision du cosmos.

PAR MATHIEU GROUSSON

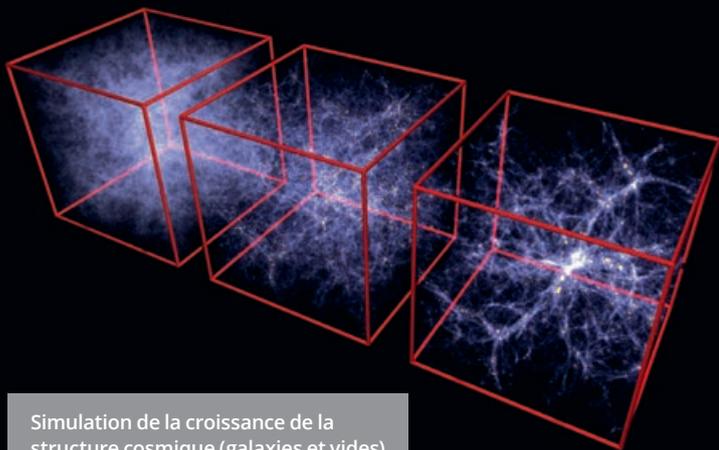
concluent que l'expansion, en réalité, est entrée dans une phase d'accélération impossible à expliquer. À force d'observations, une conclusion s'impose néanmoins : tout se passe comme si l'Univers était empli d'une forme d'énergie de nature inconnue qui, s'opposant à la gravitation, conduit le cosmos à se dilater toujours plus vite.

Au regard des données, cette entité, dont les propriétés déduites indirectement ne correspondent à aucune matière connue, compterait même pour 70 % du contenu total en énergie de l'Univers. Sans que l'on sache de quoi il s'agit. Précisément, l'énergie noire est invisible,



Le satellite a passé des tests de qualification thermique dans les locaux de Thales Alenia Space à Cannes, en France.

1. Directrice de recherche CNRS au Centre de physique des particules de Marseille (CPPM, unité CNRS/Aix-Marseille Université).



Simulation de la croissance de la structure cosmique (galaxies et vides) lorsque l'Univers avait 0,9 milliard d'années, puis 3,2 milliards et 13,7 milliards d'années (aujourd'hui).

insaisissable, impossible à observer directement ou à fixer sur la surface sensible d'un détecteur. En revanche, on peut en observer les effets sur la structuration de la matière à grande échelle dans l'Univers, à partir de quoi en déduire les propriétés, de la même manière que l'on peut établir les caractéristiques morphologiques d'un suspect à partir de ses empreintes de pas.

Toile cosmique et volutes de matière noire

Afin de donner un visage à l'énergie noire, concrètement, plusieurs observations sont possibles. D'une part, cartographier à l'échelle du cosmos la façon dont les galaxies s'organisent en longs filaments pour former ce que les spécialistes appellent la « toile cosmique » ; d'autre part, déterminer la structure des volutes de matière noire, cette fraction elle aussi invisible et de nature inconnue de la matière, dans lesquelles baigne la matière galactique. Comme le détaille Yannick Mellier², responsable du Consortium Euclid qui regroupe l'ensemble des scientifiques impliqués dans la mission, « aujourd'hui, les sondages les plus précis, qui regroupent quelques dizaines de millions de galaxies, permettent de contraindre les propriétés de l'énergie noire à 10 % près, ce qui est insuffisant pour en déterminer la nature. Pour y parvenir, il faut viser une précision de 1 %. C'est l'objectif d'Euclid qui devra pour ce faire observer plus de 1,5 milliard de galaxies. »

Si dans la classification de l'ESA, Euclid n'est qu'une mission de « taille moyenne », c'est en réalité un projet d'observation spatiale sans précédent par son ampleur et sa technicité. Et pour cause, le télescope n'atteindra son objectif qu'à la condition de réussir à la perfection la totalité des 40 000 pointés du ciel à partir desquels il doit réaliser près d'un million d'images couvrant la totalité du ciel nocturne non « pollué » par la lumière de la galaxie, soit un tiers du total, dans une logique de recensement du cosmos tout entier. Pour y parvenir, les éléments embarqués à bord du satellite ont été conçus à partir d'un cahier des charges absolument drastique. Et ont nécessité le travail d'une centaine de laboratoires, plus des industriels,

dans quatorze pays européens, plus les États-Unis, le Canada et le Japon. Ainsi, Euclid, c'est d'abord un télescope à la stabilité inégalée, dont la structure, en carbure de silicium, est aussi peu sensible aux écarts de température qu'elle est cassante et a été difficile à usiner.

Deux milliards de galaxies dans le viseur

Au foyer de ce télescope, deux instruments complémentaires ont été placés. D'une part le NISP³, soit le plus grand détecteur infrarouge jamais envoyé dans l'espace. Précisément, celui-ci est un spectrophotomètre dont l'objectif est de déterminer la distance de 2 milliards de galaxies : 30 millions avec une précision ultime à partir de leur spectre lumineux, les autres en observant leur lumière à travers différents filtres. Également en carbure de silicium, le NISP est doté d'un plan focal dont les détecteurs ont une qualité de détection uniquement limitée par le bruit quantique. Par ailleurs, ses lentilles chargées de focaliser les précieux photons sont les plus grandes jamais développées pour une application en astrophysique spatiale. Enfin, ses grisms, les composants optiques qui diffractent la lumière des galaxies, ont été élaborés selon un procédé qui n'existait tout simplement pas au début du projet.

L'autre instrument, le VIS⁴, est un imageur dont la résolution est la même que celle du télescope spatial Hubble mais présentant un champ 150 fois plus vaste. Son plan focal de 40 centimètres de côté, composé de 600 millions de pixels maintenus dans un plan dont les écarts ne dépassent pas 70 microns, est le deuxième plus grand jamais envoyé dans l'espace. Quant à sa sensibilité, elle est 20 % supérieure à celle des meilleurs instruments au sol. Grâce à ces spécifications, le VIS aura pour tâche de photographier 1,5 milliard de galaxies dont les déformations, provoquées par un effet de lentille gravitationnelle, permettront, via des méthodes statistiques, de déterminer la distribution de matière noire située entre elles et nous. Comme le résume Stéphanie Escoffier, « deux instruments d'une telle qualité embarqués sur le même satellite, c'est du jamais vu. »

Le plus vaste catalogue d'objets spatiaux

Jamais vu non plus, la chaîne de traitement des données d'Euclid qui aura pour tâche de récupérer les informations brutes envoyées quotidiennement depuis le satellite, les nettoyer, corriger les différents biais, en extraire les signaux pertinents, y ajouter les informations recueillies en complément par plusieurs observatoires au sol, calculer les distances nous séparant des galaxies et leur déformation, etc., dans le but de produire le plus vaste catalogue d'objets astrophysiques jamais conçu. Une mine à partir de laquelle les cosmologistes pourront ensuite déterminer les propriétés de l'énergie noire, se résumant à une poignée de paramètres ayant nécessité pour être calculés la production de 150 pétaoctets de produits scientifiques – une première en astrophysique – et la mise en place d'une infrastructure de calcul impliquant neuf centres de calculs à travers le monde.

© ASPRINGEL / AMPLECK / INSTITUTE FOR ASTROPHYSICS

2. Enseignant-chercheur à l'Institut d'astrophysique de Paris (IAP, unité CNRS/Sorbonne Université). 3. Pour Near Infrared Spectro Photometer. 4. Pour Visible Instrument.

Une fois parvenu sur son lieu d'observation, Euclid, après plusieurs semaines de tests de ses instruments, prendra ses « premières lumières » à l'automne avant d'entamer son programme d'observation en décembre. Prévu pour durer six ans, il sera ponctué par la publication des résultats à trois reprises : en 2025 à partir de 20 % des données, en 2027 après analyse de la moitié des observations, puis enfin en 2030 pour la totalité. Dans l'intervalle, la totalité des données disponibles auront par ailleurs été analysées plusieurs fois afin de tirer parti de l'amélioration de logiciels bénéficiant de plus en plus des progrès de l'intelligence artificielle, désormais incontournable en astrophysique.

Expliquer l'énergie noire

Qu'en sortira-t-il alors ? D'après certains scénarios théoriques, l'énergie noire correspondrait à une nouvelle forme de matière. Peut-être en lien avec le champ de Higgs, mis en évidence en 2012 auprès du LHC, l'accélérateur de particules du Cern, et qui confère leur masse à l'ensemble des particules de l'Univers ; et avec l'inflaton, une entité théorique possiblement responsable d'une phase de

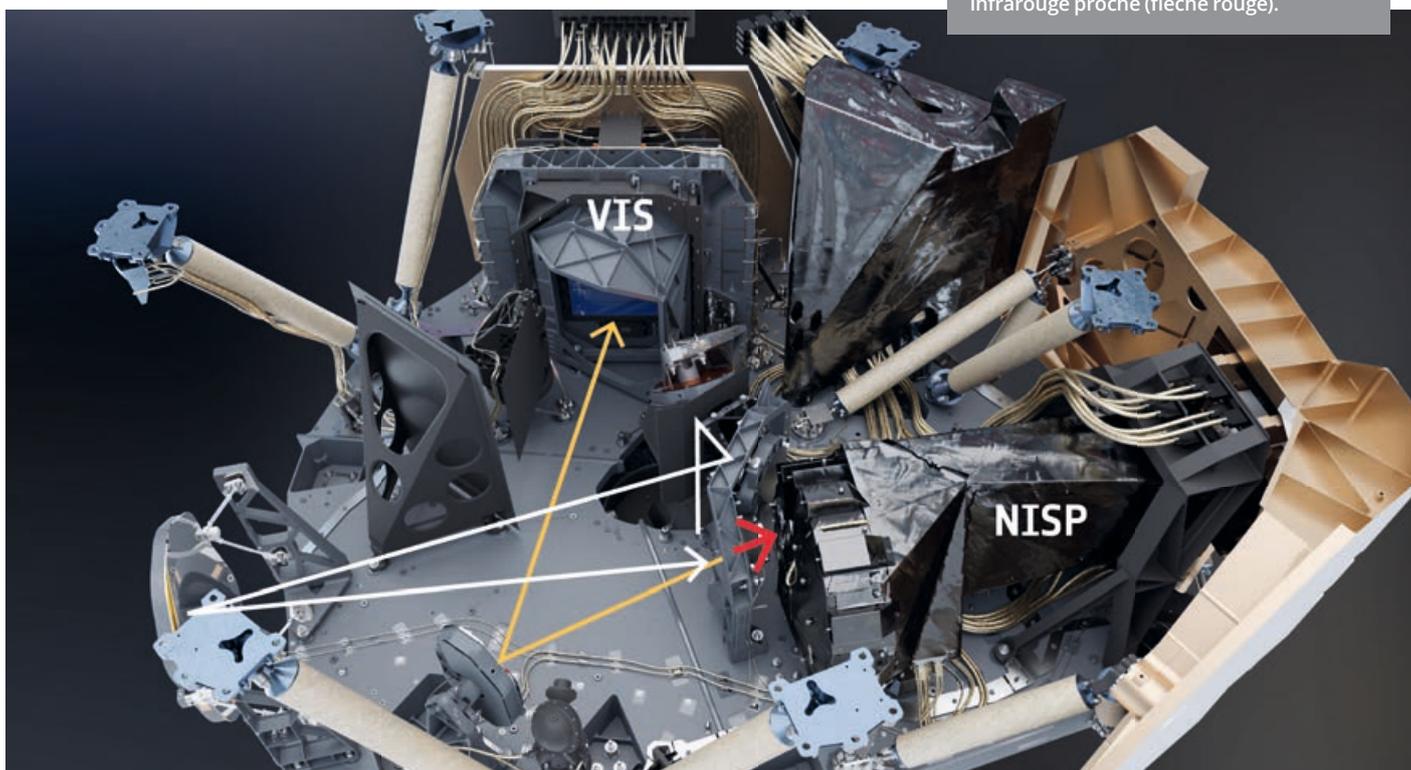
croissance exponentielle du cosmos dans ses toutes premières fractions de seconde. Pour d'autres, l'énergie noire pourrait également s'expliquer par une remise en cause de la théorie de la relativité générale qui sert de cadre conceptuel pour décrire l'évolution de l'Univers.

Enfin, selon une autre hypothèse, l'énergie noire pourrait n'être rien d'autre que l'énergie du vide telle qu'elle se manifeste dans la théorie quantique, soit comme la résultante d'un bouillonnement de particules dites « virtuelles » qui subsiste même en l'absence du moindre grain de matière ou de rayonnement. À ceci près que la valeur déduite de l'énergie du vide à partir des caractéristiques connues de l'accélération de l'expansion et celle calculée en mécanique quantique sont totalement incompatibles.

Une chose est sûre, « nous ne savons pas ce que nous allons trouver, mais Euclid a le potentiel de totalement bouleverser notre compréhension des lois de l'Univers », affirme Yannick Mellier. ■

“Deux instruments d'une telle qualité embarqués sur le même satellite, c'est du jamais vu.”

Euclid, dont on voit ici l'intérieur et le banc optique, alimentera en photons l'imageur visible (VIS) et le spectromètre infrarouge (NISIP). Tous deux observeront les mêmes champs en parallèle pendant 6 années. La lumière visible (flèche blanche) est séparée en lumière visible (flèche orange) et en lumière infrarouge proche (flèche rouge).



Toucher l'énergie du vide

Selon la théorie quantique, le vide est en réalité plein d'énergie. Une expérience s'apprête à démontrer qu'il peut même ralentir et dévier la lumière.

PAR MATHIEU GROUSSON

Selon le philosophe grec Aristote, le vide ne pouvait pas exister. Plus prosaïquement, on serait tenté d'affirmer que le vide est ce qui reste lorsqu'on a tout retiré, c'est-à-dire rien. Mais selon la mécanique quantique, même lorsque l'on a vidé un cube d'espace de tout son contenu matériel, il reste quand même quelque chose... Un concentré d'énergie qui, loin de n'être rien, a même des effets tangibles. L'un d'eux, prédit par Werner Heisenberg, l'un des pères de la théorie quantique, et son ancien doctorant Hans Heinrich Euler, dispose que soumis à un champ magnétique de forte intensité, le vide est susceptible de ralentir et de dévier la lumière... alors même que, dans le vide, la lumière est censée se propager en ligne droite et... à la vitesse de la lumière.

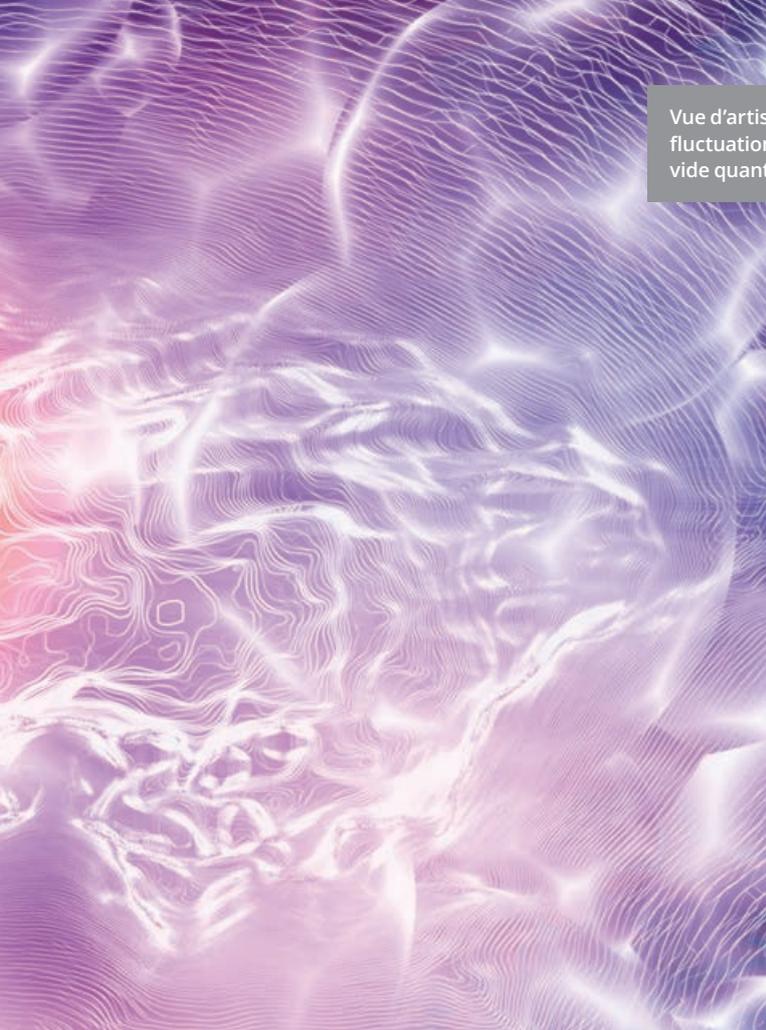
Pour déroutante que soit cette prédiction, une équipe de physiciens emmenée par Xavier Sarazin, au Laboratoire de physique des 2 infinis - Irène Joliot-Curie¹ (IJCLab), prépare actuellement l'expérience DeLLight dont l'objectif est de mettre en évidence le phénomène. En manifestant l'étrangeté du vide quantique, elle réaffirmera la centralité de ce « milieu » pour avancer sur l'ensemble des questions fondamentales que la physique peine encore à expliquer.

Une énergie paradoxale

Dès les premières versions de la mécanique quantique, au début du siècle dernier, les équations de la nouvelle théorie font apparaître des termes mathématiques qui intriguent les physiciens. En 1916, Walther H. Nernst est le premier à comprendre qu'ils correspondent à des situations où, même en l'absence de tout rayonnement, des

1. Unité CNRS/Univ. Paris-Saclay.

Vue d'artiste des fluctuations du vide quantique.



© SPL/IGROSCIENCE

fluctuations du champ électromagnétique pourtant nul en moyenne subsistent dans l'espace. Les décennies suivantes, avec l'avènement de l'électrodynamique quantique, les physiciens comprennent que même vidé de toute substance, l'espace demeure empli de particules dites « virtuelles » qui surgissent sans cesse des recoins de l'espace-temps avant de disparaître sans même s'être matérialisées. Pour virtuelles que soient ces particules, une énergie leur est néanmoins associée, l'énergie du vide, dont les effets sont, eux, bien réels. À dire vrai, sur le plan théorique, la situation est plus qu'inconfortable. Les calculs montrent en effet que l'énergie du vide est infinie ! Pour autant, expérimentalement, seule compte la différence d'énergie entre deux configurations. Si bien qu'en pratique, il est possible de mettre sous le tapis ce que les spécialistes appellent déjà la « crise du vide », tout simplement en ramenant arbitrairement l'énergie du vide à « 0 ».

Particules virtuelles, effets tangibles

Ainsi, dès les années 1940, calculs et expériences démontrent que la valeur du moment magnétique de l'électron est liée à la mer de particules virtuelles dans laquelle baignent les corpuscules matériels. Plus tangible, en 1948, Hendrik Casimir montre qu'entre deux miroirs se faisant face dans un vide intégral, de la même manière qu'une guitare ne vibre qu'à certaines fréquences, seules certaines fluctuations du vide sont possibles. En revanche, une telle limitation n'a pas cours en dehors de la cavité.

Conséquence : les miroirs subissent une pression telle qu'ils ont tendance à se rapprocher l'un de l'autre, ce qui a été confirmé dès 1958.

Mais c'est sans doute l'effet du vide prédit par Heisenberg et Euler dès 1936 qui demeure le plus étonnant. En présence d'un champ magnétique de très forte intensité, tout se passe comme si le vide acquerrait une forme de matérialité : en s'y propageant, la lumière voit sa vitesse ralentir et sa trajectoire déviée, exactement comme si elle passait à travers une lentille. « *De manière imagée, c'est un peu comme si le vide, sous l'effet d'un champ magnétique intense, devenait plus dense* », explique Xavier Sarazin. Dans le langage de la physique, on dit que son indice optique est modifié. Dans une lentille, c'est le résultat de la présence de charges électriques bien réelles. Dans le cas du vide, c'est une manifestation de la polarisation sous l'effet du champ des particules virtuelles.

Un laser intense pour surmonter les bruits résiduels

L'effet dont il est question est néanmoins infinitésimal. Dans les années 1960, le physicien anglais Reginald V. Jones a tenté de le mettre en évidence avec un champ de 1 tesla, sans résultat. « *C'était une très belle expérience, mais très exploratoire* », commente Xavier Sarazin. À la suite, d'autres expériences ont été menées jusqu'à récemment. Mais à ce jour, les bruits résiduels demeurent dix fois plus intenses que le signal attendu.

Pour aller plus loin, plutôt que de travailler avec des champs magnétiques continus dont l'intensité demeure limitée, le physicien français et ses collègues de DeLLight proposent d'utiliser le champ magnétique produit par une impulsion lumineuse ultra brève et très énergétique. Précisément, en utilisant les impulsions produites par l'installation Laserix qui délivre des impulsions de 50 femtosecondes et de 2 joules, et en les focalisant dans un volume d'une dizaine de microns de côté, les calculs montrent qu'il est possible d'engendrer un champ magnétique de 105 teslas. Si on parvient alors à y faire passer juste au bon moment une autre impulsion, cette dernière verra sa trajectoire déviée, comme si elle traversait une minuscule lentille.

Minuscule, c'est peu dire : la déviation attendue est de 10^{-10} mètre (la taille d'un atome) après 1 kilomètre de propagation. Impossible à mettre en œuvre et à mesurer ! D'où la seconde idée des expérimentateurs : amplifier le signal en faisant interférer une impulsion déviée avec une autre qui ne l'aura pas été. Ce faisant, on réalise une expérience de franges d'interférence dont les caractéristiques sont reliées à la déviation originelle. De cette manière, « *l'intensité du signal doit être multipliée par un facteur 250, de quoi engendrer une déviation d'un centième de nanomètre sur une distance de quelques dizaines de centimètres* », détaille l'expérimentateur. C'est peu, mais en répétant l'expérience toute une journée, à raison de dix impulsions par

seconde, les estimations montrent que l'on doit pouvoir accumuler assez de signal pour l'extirper du bruit expérimental.

Le vide supraconducteur ?

Pour l'heure, l'expérience est en cours de préparation. « Entre 2019 et 2022, nous avons réalisé les premiers prototypes de notre interféromètre, et après avoir caractérisé l'ensemble des bruits expérimentaux, nous avons observé une déviation telle qu'attendue dans l'air, explique Xavier Sarazin qui ajoute : nous devons désormais installer notre interféromètre dans une salle dédiée afin de diminuer encore les vibrations, et par ailleurs augmenter la focalisation des impulsions. » Objectif : acquérir de premières données dans le vide en 2025.

Pour Maxim Chernodub, à l'Institut Denis Poisson², à Tours, « dans le cas du moment magnétique de l'électron, la mise en évidence des effets du vide est indirecte. Par ailleurs, dans le cas de l'effet Casimir³, on met en jeu un élément matériel à travers les plaques réfléchissantes. Mais là, il n'y a que de la lumière et du vide, ce qui confère à cette expérience une très grande profondeur. En cas de succès, elle nous placerait face à toute l'étrangeté du vide quantique ». En l'occurrence face au fait que le vide, sous certaines conditions, acquiert des propriétés qui sont normalement celles de la matière. Plus étrange encore, Maxim Chernodub a calculé il y a une dizaine d'années que sous l'effet d'un champ magnétique d'environ de 1 020 teslas,

Faisceaux laser de l'interféromètre de l'expérience DeLLight. L'installation LASERIX permet de produire des impulsions laser de très haute intensité.



le vide devrait se comporter comme un solide supraconducteur, c'est-à-dire un matériau dans lequel un courant électrique se propage sans aucune résistance. « C'est déroutant, commente le théoricien. Car en même temps, le vide n'a rien d'un objet ordinaire. En particulier, lorsqu'on se déplace dans le vide, celui-ci demeure d'une certaine manière immobile, ce qui a pour conséquence que la vitesse de la lumière dans le vide est la même pour tous les observateurs, quelle que soit leur vitesse, un constat aux fondements de la théorie de la relativité d'Einstein. »

Le vide, ombre de notre ignorance

Sans que cela interdise que la vitesse de la lumière puisse varier quand on fait interagir deux impulsions de lumière se propageant en sens inverse, ce que Xavier Sarazin s'apprête justement à démontrer... « Notre objectif est de montrer à quel point, dès lors que l'on s'intéresse au vide, on touche aux fondements de même qu'aux limites de notre compréhension de l'univers matériel », prolonge l'expérimentateur. Et pour cause, si l'on se souvient que la valeur de l'énergie du vide donnée par la théorie quantique est infinie, « c'est un signe de l'incomplétude de cette dernière », analyse Maxim Chernodub.

Et de fait, les physiciens savent depuis des décennies qu'elle est notamment incompatible avec la relativité générale, théorie qui décrit l'évolution de l'Univers à grande échelle. La crise a même pris en 1998 une tournure quasi dramatique. Cette année-là, deux équipes indépendantes d'astrophysiciens ont montré que l'expansion de l'Univers accélère. On ne sait pas pourquoi, si ce n'est que tout se passe comme si le vide lui-même était le moteur de cette accélération. À ceci près que la valeur de l'énergie du vide déduite des observations astrophysiques est au minimum 10^{115} ordres de grandeur plus faible que celle obtenue théoriquement dans le cadre de la théorie quantique, dès lors qu'on parvient à régulariser en partie la catastrophe des infinis. Comme si l'infiniment petit d'un côté et l'infiniment grand de l'autre renvoyaient chacun à des réalités totalement irréconciliables.

Ainsi, le vide est bien le signe que de l'univers matériel, quelque chose nous échappe complètement. Il y a une quinzaine d'années, Álvaro de Rujula, au service de physique théorique du Cern, à Genève, nous avait confié en plaisantant que la crise du vide est à ce point sévère que « chaque physicien qui ne consacre pas au moins une heure par jour à ce problème devrait être jeté en prison ! ». De leur côté, les physiciens de DeLLight s'apprêtent à explorer l'un des interstices d'où pourrait surgir une piste permettant de sortir de l'ornière. Une chose est certaine, contre Aristote, il est définitivement impossible d'affirmer que le vide n'existe pas, bien au contraire. II

2. Unité CNRS/Univ. d'Orléans/Univ. de Tours. 3. L'effet Casimir, tel que prédit par le physicien néerlandais Hendrik Casimir en 1948, est une force attractive entre deux plaques parallèles conductrices et non chargées.

Illustration d'un axion, candidat à la matière noire.

Matière noire : la recherche passe à l'axion

Face aux résultats décevants d'autres candidats pour expliquer la matière noire, une particule conceptualisée il y a plus de 40 ans revient sur le devant de la scène : l'axion.

PAR SOPHIE FÉLIX

C'est un voyage qui nous mène à la croisée des chemins entre la cosmologie, l'astrophysique et la physique des particules. Il démarre en 1933 avec une observation astrophysique : la matière visible ne suffit pas à rendre compte des mouvements des étoiles dans les galaxies et des galaxies dans les amas galactiques. Il faut ajouter une matière « noire », invisible, interagissant très peu avec la matière ordinaire. Bien qu'elle représenterait 84 % de la densité totale de matière de l'Univers, cette matière noire demeure aujourd'hui hypothétique et sa nature encore mystérieuse : « si l'on ne sait pas de quoi est faite la matière noire, on sait maintenant que ce n'est rien de ce qui est déjà connu », résume Fabrice Hubaut, directeur de recherche CNRS au Centre de physique des particules de Marseille¹. Parmi les candidats, figure une particule appelée « axion ». Elle avait été proposée, au départ, pour résoudre un tout autre défi, cette fois-ci en physique des particules.

Des paramètres trop ajustés

Le modèle standard de la physique des particules est une théorie qui décrit l'ensemble des particules observées et leurs interactions : il n'a jamais été mis en défaut à ce jour

par les expériences, mais sa formulation contient quelques limitations. En particulier, les observations contraignent la valeur de certains paramètres sans explication théorique sous-jacente. On remarque par exemple dans les années 1970 qu'un paramètre de la théorie qui régit la structure et la stabilité des atomes prend une valeur extrêmement petite. Or ce paramètre a deux contributions : l'une liée à l'interaction forte qui structure le noyau des atomes, l'autre à la force électrofaible – qui unifie électromagnétisme et force responsable de la désintégration radioactive des particules. « Dans le modèle standard, ces deux forces n'ont aucun lien apparent. Mais, pour que le paramètre soit proche de zéro, il faut que ces deux contributions se compensent exactement », relève Jérémie Quevillon, théoricien CNRS au Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie².

Deux physiciens, l'italien Roberto Peccei et l'australienne Helen Quinn, proposent alors un mécanisme permettant de résoudre ce problème dit « CP fort ». Steven Weinberg et Frank Wilczek, qui recevront le prix Nobel de physique pour d'autres travaux, en déduisent l'existence

1. Unité CNRS/Aix-Marseille Université. 2. Unité CNRS/Université Grenoble Alpes.

d'une particule baptisée « axion » – du nom d'une marque de lessive, car son existence « nettoyait » le problème ! Mais l'histoire ne s'arrête pas là. La particule ainsi modélisée possède des couplages très élevés avec les autres particules du modèle standard et aurait donc pu être observée dans les accélérateurs de particules de l'époque. « *Cet axion est exclu par les données dès les années 1980*, raconte Julien Laval, du Laboratoire Univers et particules de Montpellier³. *On passe alors au modèle de l'axion invisible avec un mécanisme réduisant ces couplages problématiques tout en gardant les propriétés qui répondent au problème CP fort.* » L'axion devient alors arbitrairement léger... ce qui en fait un excellent candidat à la matière noire pour des masses de l'ordre du millionième de milliardième de la masse du proton. Mais ces propriétés le rendent difficile à détecter.

« *Les axions sont des candidats sérieux depuis 40 ans pour expliquer la matière noire* », appuie Julien Laval. Mais d'autres particules candidates existent. En particulier, les *Weakly interacting massive particles* (WIMPs) ont été proposées suite à une histoire similaire à celle des axions, sur la base d'un autre problème de physique des particules, et possèdent des propriétés intéressantes pour l'observation. Contrairement aux axions, les WIMPs seraient produites plus communément à partir du plasma primordial à la naissance de l'Univers, au même titre que la matière ordinaire. « *Les recherches se sont donc d'abord concentrées sur les WIMPs, mais aucune n'a encore mené à une observation fiable. Il y a donc un regain d'intérêt pour les axions aujourd'hui* », conclut le chercheur. D'autant plus que les avancées technologiques permettent aujourd'hui d'envisager la découverte de matière noire sous forme d'axions.

Des méthodes directes et indirectes

Quand on cherche un axion, avec sa toute petite masse, utiliser un accélérateur de particules en espérant faire interagir la particule avec un atome d'un détecteur – méthode très utilisée pour les WIMPs – ne fonctionne pas. Mais cette légèreté implique aussi que les axions doivent être présents en bien plus grand nombre que les WIMPs pour donner la même masse de matière noire. Il y aurait ainsi plusieurs centaines de milliards de particules par centimètre cube. Ils ont dès lors un comportement plus proche de l'onde que de la particule individuelle, ce qui permet d'envisager d'autres méthodes de détection.

“ Si l'on ne sait pas de quoi est faite la matière noire, on sait maintenant que ce n'est rien de ce qui est déjà connu. ”



Intérieur du détecteur de matière noire XENONnT.

La principale utilise le couplage des axions aux photons, ces particules élémentaires qui transportent l'énergie de la lumière. Une méthode « paradoxale », s'amuse Jérémie Quevillon, « *puisque par définition on ne voit pas la matière noire* ». Grâce à l'application d'un champ magnétique, il serait possible de convertir des axions en photons, que l'on sait étudier. Et ce grâce à un appareil appelé « haloscope ». « *Pour faire un bon haloscope, il faut trois ingrédients majeurs : un fort champ magnétique, un milieu résonant à très basse température (inférieure à 50 millikelvin) pour éviter tout bruit thermique, et une bonne amplification du signal* », liste le chercheur. Or, les laboratoires situés à Grenoble cumulent des expertises mondialement reconnues dans ces trois domaines. L'expérience GrAHal (pour Grenoble Axion Haloscopes) qui s'y trouve prend en ce moment ses premières données sur un prototype avancé. À terme, une plateforme intégrera de nombreux haloscopes fonctionnant en parallèle. En effet, l'amplification du signal est réalisée grâce à des cavités résonantes qui ont l'inconvénient de devoir être réglées sur la masse supposée de l'axion. Cela nécessite soit de multiplier les haloscopes, soit d'effectuer des réglages constants pour scanner l'ensemble des masses possibles.

« *L'idée de l'expérience MadMax⁴, dont je suis responsable en France, est d'aller au-delà de ces limitations* », explique Fabrice Hubaut. Ce nouveau type de résonateur se base sur un enchaînement de miroirs semi-transparents qui vont à la fois laisser passer et réfléchir l'onde électromagnétique qu'est la lumière : en superposant ainsi les ondes, on amplifie le signal. Pour tester plusieurs masses, il suffit alors de déplacer les miroirs les uns par rapport aux



© COLLABORATION XENON

autres. « Nous sommes encore dans une phase de R&D avec de nombreux défis à tous les niveaux : les miroirs doivent être bien lisses, le champ magnétique intense, l'appareillage pour déplacer les miroirs très précis, le tout à très faibles températures », prévient le physicien. MadMax est une des expériences en cours de développement au sein du Dark Matter Lab, officiellement lancé en juin 2023. Cet International Research Laboratory associe le CNRS à trois institutions de recherche parmi les plus importantes et prestigieuses en Allemagne⁵. Il testera plusieurs méthodes de détection de différents composants possibles de la matière noire.

De son côté, au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique⁶, Francesca Calore étudie les signatures des particules proches de l'axion dans les données de l'astrophysique à haute énergie. Une approche indirecte basée sur les données collectées par des télescopes terrestres ou spatiaux. « Nous cherchons des signaux inexplicables qui pourraient traduire la conversion d'axions en photons, par exemple dans le halo de notre galaxie où doit se trouver de la matière noire », détaille la chercheuse qui s'intéresse aussi au cas où l'axion existerait sans entrer dans la composition de la matière noire.

Le mystère reste entier

En effet, d'autres expériences cherchent par exemple des axions qui pourraient être produits au cœur d'étoiles comme le Soleil ou lors de la fin de vie explosive d'étoiles massives (les supernovae). « Toute la difficulté consiste à avoir une compréhension complète et fine de l'ensemble des autres phénomènes astrophysiques qui composent le fond

des données, afin d'isoler un véritable signal. C'est un défi théorique et technique fascinant ! » témoigne Francesca Calore.

À ce jour, aucune recherche directe ou indirecte, ni même les quelques expériences de laboratoire tentant de produire des axions à partir de photons (le couplage fonctionnant dans les deux sens), n'ont donné de résultat. Mais chaque expérience permet de restreindre l'espace de paramètres possibles et de poser des contraintes sur le modèle de la particule axion. « Je suis agnostique, dans la vie mais aussi dans la recherche, confie Francesca Calore. Bien que les motivations théoriques pour les axions soient très convaincantes, il faut garder en tête qu'ils pourraient ne pas composer la matière noire, voire ne pas exister. Mais nous avons des données intéressantes qu'il faut explorer. »

« Faire un test qui n'a jamais été fait auparavant, même si le résultat est négatif, reste une avancée majeure : on crée de la connaissance », confirme Fabrice Hubaut qui tient à préciser que la matière noire pourrait aussi bien être des trous noirs primordiaux, une gravité modifiée ou encore un mélange de différents types de particules, déjà envisagées ou encore à conceptualiser. Le mystère reste entier, mais le voyage continue : les scientifiques envisagent déjà d'autres expériences. Car la matière noire fait toujours briller leurs yeux. ||

Image composite montrant l'amas de galaxies 1E 0657-56, aussi connu sous le nom d'amas du Boulet.



© NASA/COSMOS WEISS - CHANDRA X-RAY OBSERVATORY



À voir CNRS Images vous invite à découvrir les thématiques de l'Année de la physique.

3. Unité CNRS/Univ. de Montpellier. 4. Pour MAgnitized Disc and Mirror Axion eXperiment. 5. Deutsches Elektronen-Synchrotron (Synchrotron allemand à électrons, DESY), Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH (Centre de recherche sur les ions lourds, GSI), Karlsruher Institut für Technologie (Institut de technologie de Karlsruhe, KIT). 6. Unité CNRS/Univ. Savoie Mont Blanc.

Voici les plus anciens plans architecturaux !

SOCIÉTÉS

Gravés dans la pierre et datés de 8 000 et 9 000 ans, les plus anciens plans à l'échelle connus ont été découverts dans les déserts jordanien et saoudien¹ par des chercheurs du laboratoire Archéorient² et leurs collègues. Ces plans cartographient de gigantesques structures préhistoriques conçues pour piéger des animaux sauvages, les « desert kites ».

TEXTES PAR KHEIRA BETTAYEB ET LA RÉDACTION

1 et 2.

L'un des sites de fouille se trouve dans le sud-est de la Jordanie, sur le plateau de Jibal al-Khashabiyeh, contrée aride et reculée. C'est sur ce monolithe (ci-contre) que les chercheurs y ont identifié le plan architectural le plus ancien jamais découvert. Gravé il y a environ 9 000 ans sur ce bloc de calcaire de 92 kg et de près de 80 cm de haut, son tracé a très probablement été réalisé avec un outil en pierre comme un burin ou un éclat de silex.



CI CONTRE © SEBAP & O. BARGE/CNRS
© SEBAP & CRASSARD ET AL. 2023 PLOS ONE

1. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre de plusieurs fouilles internationales comprenant le projet Globalkites, dirigé par Rémy Crassard depuis 2013, et qui ont permis l'analyse publiée le 17 mai 2023 dans la revue *PLOS ONE* (<https://urlz.fr/nuVS>). 2. Le laboratoire Archéorient est une unité CNRS/Univ. Lumière Lyon 2.



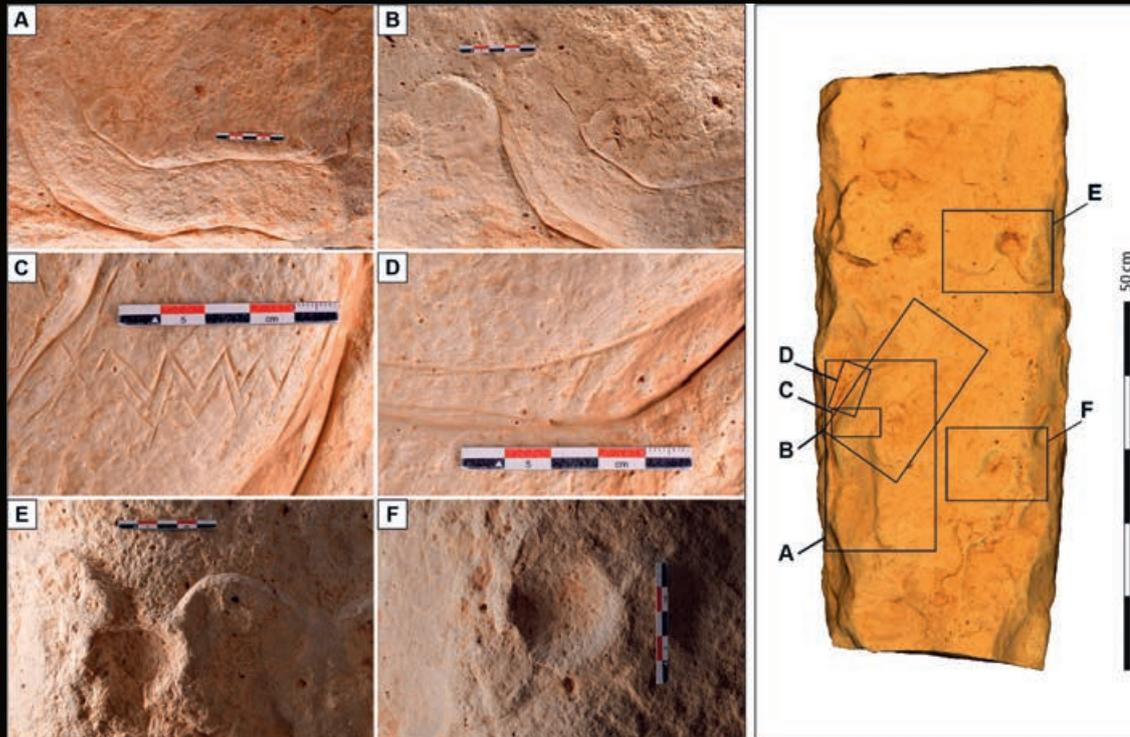
3.

Sur cette modélisation 3D, les chercheurs ont tracé un dessin interprétatif. Celui-ci représente le plan d'une gigantesque structure préhistorique conçue pour piéger des animaux sauvages. Ces structures, appelées desert kites, soit « cerfs-volants du désert » en raison de leurs formes, ont généralement trois caractéristiques comme sur ce tracé : un couloir (ici en bas) remontant jusqu'à un large enclos qui donne sur plusieurs fosses (petites formes rondes du tracé).



© SEBAP & CHASSARD ET AL. 2023 PLOS ONE

© SEBAP & O. BARGE / CNRS



4.

En plus d'être à l'échelle, le plan gravé sur le monolithe (à droite) comprend plusieurs détails très précis creusés en bas-relief à une profondeur de 0,5 à 1 cm (vignettes de gauche). On y voit de fines incisions (notamment pour délimiter les contours), du raclage et du piquetage.

© SEBAP & CHASSARD ET AL. 2023 PLOS ONE



5.

Cette vue aérienne montre une partie du vaste enclos et, en périphérie, les petites fosses du kite dont le plan est gravé sur le monolithe. Selon les chercheurs, la capacité de transposer un espace aussi grand sur une petite surface représente une étape importante dans le développement intellectuel humain.

6.

Ici, l'archéologue Wael Abu-Azizeh, co-auteur de la publication, observe une fosse excavée du desert kite jordanien. Au nombre d'une dizaine dans le cas des enclos de la région, ces fosses, dont la paroi interne était renforcée par un parement de pierres, étaient creusées parfois jusqu'à deux mètres sous la surface.



© SEBASTIEN O. BARCEZ / L'ATLAS



7.

Sur cet autre desert kite jordanien, on peut voir à droite une sorte de chemin, aboutissement de murs longs de plusieurs kilomètres, que les animaux suivaient jusqu'au grand enclos. Ils se précipitaient ensuite vers les fosses disposées tout autour.

8.

Les archéologues ont aussi travaillé sur un site au nord de l'Arabie. Et c'est là, dans le lit d'une rivière asséchée découpant le plateau de Jebel az-Zilliyat, qu'ils ont trouvé un autre bloc du plus grand intérêt. Tombé depuis le bord de la falaise en surplomb, il porte une gravure également décrite par les chercheurs, qu'ils datent d'environ 8 000 ans.

Beaucoup plus grande que celle trouvée en Jordanie, elle est tracée sur une surface plane d'un bloc de grès massif de près de 4 mètres de long.



9. La gravure saoudienne représente en fait deux kites dont l'un est ici montré en vue aérienne. Plus de 6 600 desert kites ont été découverts à ce jour dans des régions allant du Kazakhstan à l'Arabie.



© E. REGAIGNON/CNRS

© O. BARGE/CNRS



© O. BARGE/CNRS

10.

On ne connaissait jusqu'alors que quelques représentations schématiques de desert kites. Celles qui viennent d'être analysées par Rémy Crassard (ici à droite), Jacques Élie Brochier (à gauche), Wael Abu-Azizeh, Olivier Barge et leurs collègues, ont été gravées avec une très grande précision. Elles témoignent d'une capacité insoupçonnée de représentation de l'espace dès la Préhistoire, alors que ni l'écriture ni les mathématiques n'existaient encore...



Pandémies: l'éternel retour



Des passants devant un mur peint incitant à la vigilance face au Covid-19 (Chennai, Inde, 16 décembre 2021).

VIVANT  SOCIÉTÉS 

BIOLOGIE Les conditions restent propices à l'émergence de nouveaux pathogènes capables de causer des pandémies. La dégradation environnementale et l'accélération des mouvements de personnes et de marchandises s'ajoutent à l'extraordinaire capacité d'adaptation des bactéries, virus et champignons.

PAR SEBASTIÁN ESCALÓN

Les épidémiologistes sont à nouveau sur le qui-vive. Au cours des derniers mois, des milliers d'otaries ont été retrouvées mortes sur les plages du Chili et du Pérou. La cause : H5N1, la grippe aviaire, un virus que l'on surveille comme du lait sur le feu depuis vingt ans. Depuis sa réémergence en Chine en 2003, on craint qu'il ne soit à l'origine d'une pandémie de grande ampleur. Pour ce faire, il ne manque au virus qu'une chose : la capacité à se transmettre d'humain à humain de manière efficace. Jusqu'à présent, la plupart des infections humaines par cette souche provenaient de contacts avec des oiseaux contaminés.

C'est pourquoi la mort soudaine de tant d'otaries inquiète : une telle mortalité pourrait être le signe que la grippe aviaire s'est propagée d'un individu à l'autre. « *Si cela se confirme, ce serait un fait de la plus haute importance*, indique Martin Blackledge, directeur adjoint de l'Institut de biologie structurale¹. *Cela voudrait dire que le virus est en train de s'adapter aux mammifères.* » Et voilà que nos souvenirs de l'atroce année 2020 reviennent nous hanter.

La fin de l'optimisme

Qu'elle semble loin cette époque dorée, les années 1950 et 1960, lorsque les médecins et les autorités sanitaires des pays développés pensaient que la menace des maladies infectieuses serait bientôt du passé. « *On voyait les progrès de l'hygiène, de l'infrastructure hospitalière, des vaccins et des antibiotiques. On venait d'un énorme succès contre la polio. C'était bon, on avait tout compris, il était temps de passer à autre chose* », ironise Serge Morand, directeur de recherche au laboratoire Maladies infectieuses et vecteurs : écologie, génétique, évolution et contrôle².

1. Unité CNRS/CEA/Université Grenoble Alpes. 2. Unité CNRS/IRD/Univ. de Montpellier.

Il a fallu déchanter très vite. Une série de bactéries et virus inconnus, VIH, *Legionella pneumophila*, Ebola, Nipah, SRAS, a tordu le cou à cet optimisme béat. Les experts avaient oublié l'incroyable capacité d'adaptation des micro-organismes à toute intervention humaine. Ils avaient aussi laissé de côté d'importants facteurs qui rendent possible l'émergence de nouveaux pathogènes comme le développement des échanges commerciaux et du transport aérien, ou encore l'inexorable dégradation des écosystèmes de la planète.

Emprise agricole et pandémie

L'émergence du virus Nipah est un cas d'école. Il contient, en effet, les principaux facteurs qui, au cours des dernières décennies, ont augmenté le risque de pandémie : la progression de la frontière agricole, l'élevage intensif et l'accélération des mouvements de personnes et de marchandises. Voici son histoire.

En 1998, à Nipah, un village malaisien, un groupe de chauves-souris s'installe près d'un élevage de porcs. De nouvelles plantations de palmiers à huile les ont privées de leur habitat et de leur source de nourriture. Les manguiers autour des enclos à cochons sont désormais leur garde-manger. Or, ces chauves-souris, des renards volants, constituent le réservoir naturel d'un Henipavirus inconnu jusqu'alors. Leurs déjections contaminent les porcs qui à leur tour contaminent les travailleurs de l'élevage. Un foyer épidémique s'allume, avec quelque 300 cas et plus de 100 décès précédés d'encéphalites foudroyantes. Les expor-



Les élèves de maternelle de l'école Saint Vibiana à Los Angeles sont parmi les premiers à être vaccinés contre la polio avec le nouveau vaccin de Salk en avril 1955.

tations de viande et d'animaux vivants permettent ensuite au virus Nipah, comme on l'a appelé plus tard, de se répandre dans toute l'Asie du Sud-Est. Heureusement pour nous, Nipah ne se transmet pas très efficacement d'humain à humain. Il tue tout de même quelques dizaines de personnes par an.

Cet événement montre bien le danger que posent les zoonoses, les maladies animales. 75 % des pathogènes émergents proviennent des animaux. Le VIH (chimpanzés, gorilles et mangabeyes), le syndrome respiratoire du Moyen-Orient (chameaux), Ebola, le Sars-CoV-1 et Sars-CoV-2 (chauves-souris) sont d'autres exemples récents.

L'élevage intensif accélérateur de zoonoses

Et c'est ici qu'intervient l'élevage. « *Les animaux de rente constituent des hôtes intermédiaires qui fonctionnent comme amplificateurs des pathogènes* », explique Serge Morand. En effet, les batteries d'animaux tous semblables génétiquement et souvent en stress à cause de leurs piètres conditions de vie constituent d'immenses bioréacteurs où la sélection naturelle s'adonne à d'étonnantes expériences biologiques.

Cas paradigmatique ? La grippe mexicaine, ou grippe porcine, qui a fait trembler le monde en 2009. Tout porte à croire que cette souche a émergé d'un élevage de porcs au Mexique. Hautement contagieuse, elle présente une caractéristique étonnante : son génome contient des éléments de souches aviaires, humaines et porcines. Pour que cette étrange chimère voie le jour, il a fallu une série d'infections et de surinfections qui n'auraient pu survenir ailleurs que dans un milieu concentrant de milliers de bêtes.

“Le virus Nipah est un cas d'école. Il contient les principaux facteurs qui, au cours des dernières décennies, ont augmenté le risque de pandémie.”

Le passage des animaux vers les humains devient alors plus aisé. Les souches « perfectionnées » dans les élevages peuvent aussi passer dans la faune sauvage et se répandre dans le monde entier au gré des migrations. Or, l'élevage n'a cessé de se développer au cours des dernières décennies. Il y a aujourd'hui dans le monde 1,4 milliard de vaches, 1,5 milliard de cochons et environ 40 milliards de poulets. Pour nourrir tout ce beau monde, il a fallu étendre les cultures aux dépens des forêts et autres zones sauvages. Ce changement d'usage des terres favorise aussi les pandémies. « *La déforestation, l'expansion des cultures et la simplification des paysages rendent plus fréquents les contacts entre la faune sauvage et la faune domestique* », rappelle Serge Morand. Nipah en est bien la preuve.

Mais un autre phénomène est à l'œuvre. Dans les écosystèmes sains et riches en biodiversité, les équilibres écologiques comme la prédation ou la compétition font qu'aucune espèce animale ne peut voir sa population augmenter de façon soudaine. La propagation des pathogènes est plus difficile lorsque les hôtes sont éparpillés et peu nombreux. Tout change lorsque l'écosystème entre en crise. « *Lorsqu'un environnement est dégradé, on perd des prédateurs et des compétiteurs, et certaines espèces explosent* », explique Serge Morand. Ces espèces devenues invasives, ainsi que leurs pathogènes, se répandent et entrent inévitablement en contact avec l'humain et ses bêtes domestiquées.

Élevage intensif de porcs. Le nombre et la proximité favorisent la propagation des pathogènes.



“*La grippe mexicaine, ou grippe porcine, hautement contagieuse, présente une caractéristique étonnante : son génome contient des éléments de souches aviaires, humaines et porcines.*”

Un autre facteur qui favorise les émergences de pathogènes est le changement climatique. Celui-ci met les écosystèmes sous pression, pousse les espèces sauvages hors de leurs habitats naturels et étend les aires endémiques de vecteurs de pathogènes tels que les moustiques ou les tiques.

La fragile barrière des espèces

Pour un pathogène animal, s'adapter à l'humain n'est pas sans difficultés. « *Il est obligé de muter pour s'adapter et exploiter les cellules humaines. Il doit "convaincre" les protéines de son hôte de travailler pour lui* », explique Martin Blackledge. Mais la barrière des espèces n'est pas insurmontable. Martin Blackledge s'intéresse aux mutations qui permettent au virus de la grippe aviaire H5N1 d'infecter les cellules humaines.

Lors d'une collaboration avec l'Institut Pasteur et le Laboratoire européen de biologie moléculaire, il étudie en détail les interactions avec l'hôte d'une protéine virale clé : la polymérase. Celle-ci permet de multiplier les copies de l'ARN du virus et de lancer la fabrication de protéines virales. L'équipe s'intéresse aux mécanismes par lesquels la substitution d'un unique acide aminé dans la polymérase permet au virus aviaire de se multiplier dans les cellules humaines.

La mutation à l'origine de cette substitution existe bel et bien dans la nature. Nécessaire pour que le virus infecte les humains, elle n'est toutefois pas suffisante pour faire de H5N1 un pathogène humain. « *La question de savoir pourquoi H5N1 ne se transmet pas d'humain à humain reste ouverte* », indique Martin Blackledge. Au vu de l'incident avec les otaries, il reste à voir si cette incapacité va perdurer.

« *Depuis l'apparition de l'Homme moderne, il s'est écoulé environ 7 500 générations. Le même nombre de générations est atteint par le VIH au sein d'une personne porteuse après 20 ans d'infection sans traitement* », rappelle Samuel Alizon, directeur de recherche au Centre interdiscipli-

naire de recherche en biologie³ (CIRB) dans son livre *C'est grave, Dr Darwin ?*⁴. Chaque nouvelle génération est, bien sûr, une nouvelle opportunité pour que les mutations génétiques produisent du nouveau.

Course aux armements chez les microbes

Cette agilité fait que les pathogènes constituent une cible mouvante, une cible réactive : toute intervention humaine pour lutter contre un virus, une bactérie ou un champignon sélectionne les variants les plus aptes à résister à cette intervention. Une souche peut ainsi devenir plus virulente, ou plus contagieuse, ou peut acquérir des résistances qui la rendent très difficile à combattre. Elle peut aussi devenir invisible au système immunitaire, ou encore, réduire le temps qu'il lui faut pour se reproduire. Tout cela, grâce à la puissance aveugle de la sélection naturelle qui choisit, parmi les variants, ceux qui se reproduisent le plus efficacement.

Difficile, bien souvent, de prévoir comment chaque trait va évoluer. Prenons par exemple, la virulence. « *La virulence est liée au fait qu'un pathogène exploite les ressources de son hôte, et que cette exploitation a un coût pour ce dernier. Généralement, les variants qui exploitent le mieux la ressource se reproduisent le mieux* », explique Samuel Alizon. La virulence est le résultat d'un équilibre farouchement darwinien.

Une souche qui exploite son hôte moins bien que la souche voisine risque fort d'être remplacée. En même temps, si elle tue son bonhomme trop vite, elle ne se propagera pas.

Pour les scientifiques, le Covid-19 a constitué un extraordinaire observatoire de l'évolution d'un pathogène. « *On a vu à quel point l'adaptation du virus était fondamentale dans le processus épidémique* », explique François Blanquart, chercheur au CIRB. La succession des variants a été particulièrement riche en enseignements. « *Avec les variants, on a observé une dynamique de balayage sélectif extraordinaire.*

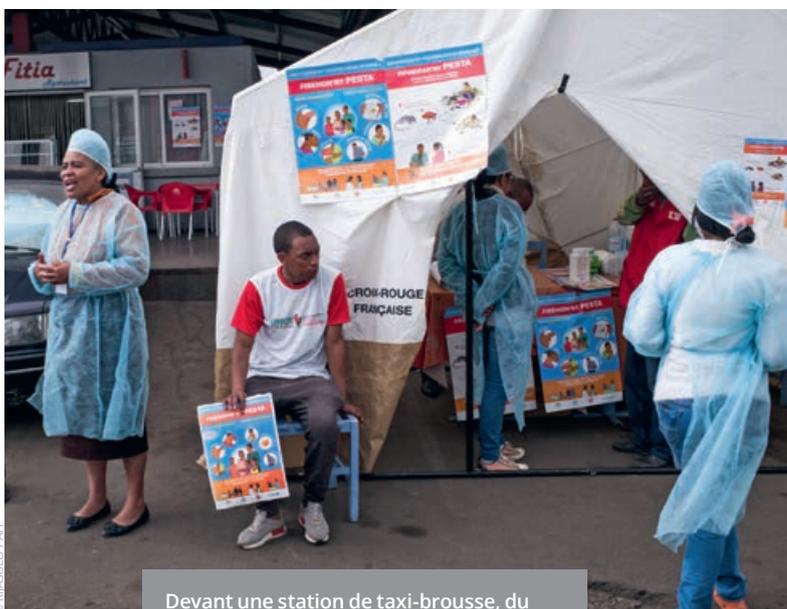
“Depuis une dizaine d'années, on voit émerger de nouvelles espèces, ce qui pourrait être lié au changement climatique entraînant également une modification des zones de répartition de certains champignons connus.”

Modèle informatique du stade levure de champignons de type *Candida*.



© KATERINA KONOSPL

3. Unité CNRS/Inserm/Collège de France. 4. *C'est grave, Dr Darwin ? L'évolution, les microbes et nous*, Samuel Alizon, Seuil, février 2016.



Devant une station de taxi-brousse, du personnel de santé informe les passagers de l'épidémie de peste en cours et détecte les cas potentiels (Antananarivo, Madagascar, 5 octobre 2017).

Peste: la menace continue

Yersinia pestis n'a pas fini de nous faire peur. Le bacille de la peste, celui-là même qui, au XIV^e siècle, a tué entre 30 et 50 % des Européens, fait partie des 16 pathogènes à surveiller en priorité selon l'ANRS/Maladies émergentes, une agence autonome de l'Inserm. « La peste a une grande capacité à réapparaître là où on la croyait disparue », explique Sébastien Bontemps-Gallo, chercheur au Centre d'infection et d'immunité de Lille*, qui s'intéresse aux mécanismes moléculaires de l'adaptation de la bactérie à son vecteur, la puce, afin d'identifier des cibles thérapeutiques pour un éventuel vaccin ou un médicament. « Elle est revenue récemment en Algérie et en Libye. Aux États-Unis, elle cause quelques dizaines d'infections tous les ans. En Chine, elle réapparaît de temps en temps, ce qui oblige au confinement de villes entières. » Mais c'est à Madagascar où elle reste la plus dangereuse. Elle y a trouvé chez les rats des rizières et leurs puces un réservoir naturel grâce auquel elle circule à bas bruit. Elle peut cependant y redevenir épidémique, comme en 2017, lorsqu'elle a tué 171 personnes en quelques mois. Comme tous les pathogènes, *Yersinia pestis* évolue. « À Madagascar, on a trouvé des souches multirésistantes aux antibiotiques », avertit le chercheur. Une raison de poids pour ne pas perdre le pathogène de vue. II

* Unité CNRS/CHU Lille/Inserm/Institut Pasteur/Université de Lille.

Chaque nouveau variant remplaçait les précédents en un temps record. » Ainsi, le variant Alpha, plus virulent et plus transmissible que son prédécesseur, a balayé la souche originale de Wuhan. Peu après, c'est Delta, encore plus virulent et transmissible qu'Alpha, qui a poussé ses concurrents à l'extinction.

L'arrivée des vaccins a changé le cours de l'évolution du virus. « Omicron a éliminé les variants antérieurs en partie parce qu'il se propageait très bien parmi la population vaccinée », explique François Blanquart. Les scientifiques pensent qu'à l'avenir, ce coronavirus, comme la grippe, présentera de nombreux variants en même temps, qui évolueront dans un paysage immunitaire hétérogène. Il sera impossible en tout cas de s'en débarrasser. *Homo sapiens* est désormais son réservoir naturel.

Les champignons font de la résistance

En octobre 2022, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) lançait l'alerte sur une menace croissante : les champignons. L'organisation internationale publiait une liste des 19 espèces à surveiller en priorité et appelait à une intensification de la recherche scientifique sur ces pathogènes trop souvent négligés. « Depuis une dizaine d'années, on voit émerger de nouvelles espèces, ce qui pourrait être lié au changement climatique entraînant également une modification des zones de répartition de certains champignons connus », explique Sarah Dellière, chercheuse à l'Institut Pasteur et médecin microbiologiste à l'hôpital Saint-Louis AP-HP. Parmi ces émergences, celle de *Candida auris* a de quoi attirer l'attention. Cette levure découverte en 2009 est inoffensive lorsqu'elle colonise la peau. Mais lorsqu'elle passe dans le sang, souvent à la suite d'une intervention médicale, elle tue les patients une fois sur deux.

L'habitat naturel de *Candida auris* semble être le rivage des estuaires et les mangroves. Elle est extrêmement résistante à la chaleur, aux agents chimiques comme le chlore et à la plupart des antifongiques. Ces traits laissent penser qu'avant de devenir un pathogène hospitalier, elle a dû apprendre à supporter la pollution, les antifongiques azolés déversés par l'agriculture et l'augmentation des températures liée au changement climatique. Elle est si robuste que, lorsqu'elle apparaît dans un hôpital, comme en 2015 à Valence, en Espagne, il est très difficile de s'en débarrasser.

Un autre exemple de champignon dont la résistance inquiète le monde hospitalier est *Aspergillus fumigatus*, une moisissure ubiquitaire dans l'environnement et qui constitue un danger pour les personnes au système immunitaire affaibli. « Au Pays-Bas, où les champs de tulipes sont arrosés avec des antifongiques, 10 % des patients qui arrivent à l'hôpital avec une infection par *Aspergillus* présentent des souches résistantes », explique Sarah Dellière. Pour les traiter, les médecins doivent recourir à un antifongique de dernière ligne particulièrement toxique pour les patients. Encore une fois, l'extraordinaire capacité d'adaptation des micro-organismes



Un technicien travaille avec un costume de protection dans le laboratoire ultrasécurisé du Robert Koch Institute, à Berlin, en Allemagne.

et la dégradation environnementale font croître les menaces sur la santé. Et il en est de même pour les bactéries : exposées sans cesse aux antibiotiques utilisés en milieu hospitalier et par les éleveurs, elles ont appris à s'en déjouer. Ou plutôt, pour être précis, cette exposition a sélectionné les souches résistantes. Qualifiée de pandémie silencieuse, l'antibiorésistance des bactéries pathogènes risque de renvoyer l'humanité aux temps d'avant la pénicilline, lorsque des infections courantes tuaient à tour de bras.

Se protéger de la prochaine vague

Pourra-t-on éviter que la tragédie de 2020 se répète ? Peut-on imaginer un monde sans pandémies ? Bill Gates, l'ex-PDG de Microsoft devenu philanthrope pense que oui, à condition de mettre en place sa nouvelle grande idée : une équipe de chasseurs de virus hyperspécialisée prête à débarquer n'importe où dès l'apparition du moindre foyer épidémique. Si seulement c'était aussi simple... « *On pense aux épidémies comme quelque chose qui émerge et se propage rapidement. C'était le cas du Sars-CoV-2. Mais il y a aussi des propagations beaucoup plus lentes, comme les antibiorésistances. Certaines infections sont chroniques, comme le VIH, et il faut des années*

“L'antibiorésistance des bactéries pathogènes risque de renvoyer l'humanité aux temps d'avant la pénicilline.”

avant de voir apparaître les symptômes. Quand on les détecte, c'est loin des foyers initiaux », explique Samuel Alizon.

Pour réduire les risques pandémiques, il faut plutôt se tourner vers les bonnes vieilles politiques publiques. Cela passe par l'amélioration des systèmes de santé, en particulier ceux des pays du Sud où l'accès au soin n'est pas toujours acquis. « *Les conditions socio-économiques jouent sur l'impact des pandémies. Par exemple, des analyses ont pointé que l'appauvrissement des systèmes de soin en Chine a pu faciliter la propagation du Sars-CoV-2* », prévient Samuel Alizon.

Il faudra aussi améliorer la sécurité des laboratoires classés L3 et L4, ceux qui manipulent des pathogènes dangereux. On sait que les fuites sont possibles. « *L'exemple le plus connu est celui de la grippe "russe" de 1977 qui a tué environ 700 000 personnes. Ce variant est si proche de celui de la grippe espagnole de 1918 que la piste de l'erreur humaine fait peu de doute* », rappelle le chercheur. Pour le Sars-CoV-2, il y a un consensus scientifique pour dire que la pandémie est partie du marché de Wuhan. Quant à savoir comment le virus y est arrivé, la majorité des scientifiques penche pour une origine naturelle mais pour d'autres, l'hypothèse de la fuite du laboratoire ne peut pour l'instant être écartée.

Côté prévention, une autre approche prend de l'ampleur. Il s'agit de l'approche One Health (une seule santé). Promue par de grandes organisations internationales comme l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) ou l'OMS, elle provient de ce constat : la santé des populations humaines est intimement liée à la santé des écosystèmes et à celle des animaux d'élevage. Tout dommage fait à l'un est une menace sur l'autre.

Serge Morand voudrait démontrer que le corollaire est tout aussi vrai : une action en faveur de l'environnement aura un impact positif sur la santé humaine. Pour cela, il étudie l'impact sanitaire sur la population de 14 communautés de la reforestation des marges d'un parc national de la province de Nan, en Thaïlande⁵. « *Nos résultats préliminaires montrent que les espèces sauvages qui s'adaptent à l'homme, comme les rongeurs, sont en recul. Il semble que l'incidence de la leptospirose et du typhus des broussailles soit en diminution* », indique Serge Morand.

Ainsi, la meilleure façon de réduire les risques de pandémie est d'entreprendre les actions qui permettront de freiner l'érosion de la biodiversité, de réduire la pollution, de limiter l'impact des systèmes agricoles et de mitiger le changement climatique. ▮

5. Dans ce cadre, le CNRS, l'université Mahidol et l'université Kasetsart ont créé en juillet l'International Research Laboratory (IRL) Health, Disease Ecology, Environment, and Policy (HealthDEEP) à Bangkok.

EN ACTION



*L'hydrogène passe au vert,
le numérique prête main forte
à la cancérologie et Néandertal
se révèle un artiste.*



L'ère de la cancérologie numérique

VIVANT

NUMÉRIQUE

MÉDECINE À Toulouse, une équipe réunit des chercheurs en informatique et en oncologie pour développer des logiciels d'aide à une meilleure prise en charge des patients et accélérer la recherche. **PAR CARINA LOUART**

Comment mieux détecter certaines tumeurs ? Peut-on prédire leur évolution ou leur réponse à un traitement ? Quel est le mécanisme de prolifération des cellules cancéreuses ? Voici quelques-unes des questions sur lesquelles planche l'équipe de cancérologie numérique Michel Laudet. Officiellement créée en avril 2022, cette structure est le fruit d'une collaboration de plusieurs années entre l'Institut de recherche en informatique de Toulouse¹ (Irit) et le Centre de recherche en cancérologie de Toulouse² (CRCT).

« L'abondance des données biomédicales et médicales est devenue telle qu'elle ne peut plus être traitée par le cerveau humain. Seule l'intelligence artificielle (IA), associée à l'expertise des médecins, est aujourd'hui capable de trier, classer, et surtout d'exploiter cette masse d'informations », souligne Jean-Marc Alliot, directeur scientifique pour les données et l'intelligence artificielle au CHU de Toulouse. Un constat partagé par le professeur membre de l'Académie de

médecine Pierre Brousset, directeur du Labex Toucan (Toulouse Cancer) et chef du département d'anatomie et cytologie pathologiques à l'IUCT-Oncopole³, pour lequel il ne fait aucun doute : « L'oncologie est aujourd'hui sous dépendance absolue des informaticiens et non l'inverse ! Que ce soit la biostatistique, la bio-informatique à travers le séquençage haut débit des génomes tumoraux ou l'intelligence artificielle, ce sont autant d'outils numériques qui enrichissent en permanence nos connaissances sur le cancer et renouvellent les stratégies thérapeutiques. »

Hébergée au 4^e étage de l'imposant bâtiment du CRCT, la dizaine de chercheurs de l'Irit sont spécialisés dans la conception d'algorithmes bio-inspirés (reproduisant le vivant), les logiciels d'apprentissage automatique (*machine learning*) et le traitement et l'analyse des signaux (images et sons). « La plupart avait déjà mené des projets dans le domaine de la recherche médicale, précise Sylvain Cussat-Blanc, chercheur à l'Irit et membre de l'Aniti⁴. L'avantage



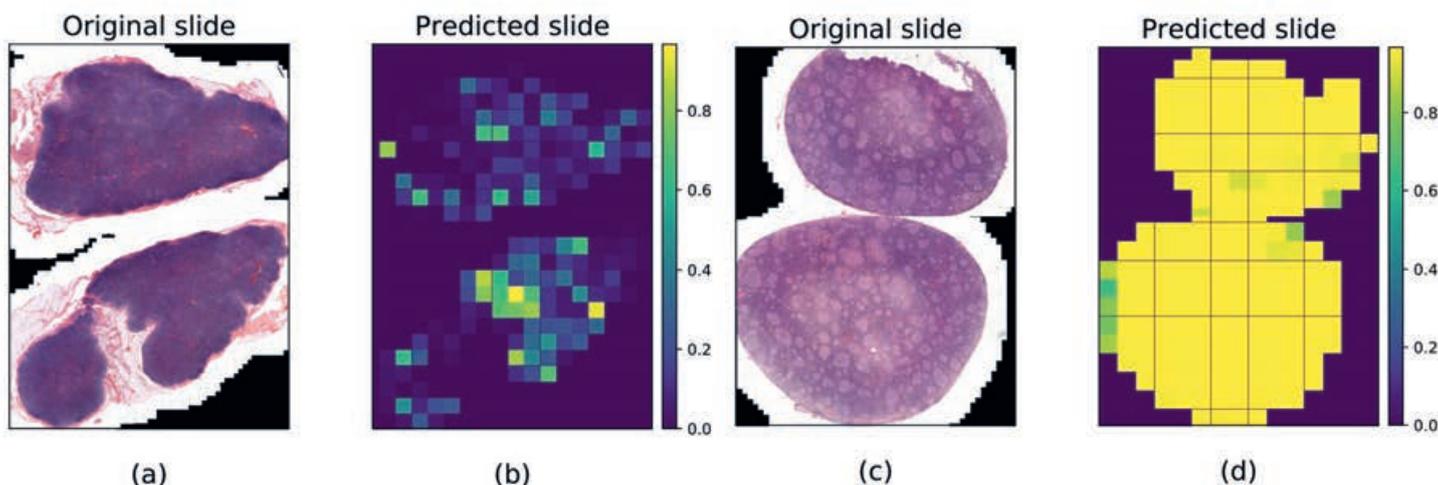
“ L’abondance des données biomédicales et médicales est devenue telle qu’elle ne peut plus être traitée par le cerveau humain. ”

ici, c’est de pouvoir travailler en constante interface avec les chercheurs, ce qui a pour effet de dynamiser et d’accélérer les projets. » Depuis la création de l’équipe de cancérologie numérique Michel Laudet, près d’une quinzaine de projets ont été lancés ou sont en cours. Tous s’effectuent en binôme avec un informaticien et un médecin ou chercheur. « Comme dans toute recherche pluridisciplinaire, le principal défi consiste à trouver un langage commun pour bien définir la question à laquelle le chercheur souhaite que nous répondions, et pour bien expliciter les possibilités et les contraintes de l’intelligence artificielle », détaille Jean-Marc Alliot.

Des outils pour aider au diagnostic

Les algorithmes d’apprentissage sont les plus sollicités par les médecins-chercheurs et en particulier par les anatomo-pathologistes, pour lesquels la question de l’aide au diagnostic est centrale. « La prise en charge du cancer repose en grande partie sur l’examen microscopique des lames de tissus biologiques réalisé par l’anatomo-pathologiste, rappelle Pierre Brousset, spécialiste des lymphomes. Or, certaines lésions sont complexes, difficiles à caractériser, ce qui peut induire des erreurs graves de diagnostic. »

▲ Comparaison histopathologique entre des cellules atteintes par l’hyperplasie folliculaire (A), une maladie bénigne, et d’autres atteintes par un lymphome folliculaire (C), un cancer qui touche les lymphocytes et les ganglions. Les figures B et D représentent les transcriptions prédictives des lésions correspondantes dans l’IA.



1. Unité CNRS/Institut national polytechnique de Toulouse/Université Toulouse Paul Sabatier. 2. Unité CNRS/Inserm/Université Toulouse Paul Sabatier. 3. L’Institut universitaire du cancer de Toulouse Oncopole regroupe les services d’oncologie du CHU-Toulouse et l’Institut Claudius Regaud. 4. Artificial and Natural Intelligence Toulouse Institute. 5. « Accurate diagnosis of lymphoma on whole-slide histopathology images using deep learning », Charlotte Syrykh *et al.*, npj/Digital Medicine, 1^{er} mai 2020. <https://doi.org/10.1038/s41746-020-0272-0>

En 2020, le chercheur a contribué à la création d'un algorithme d'apprentissage⁵ pour différencier le lymphome folliculaire – un cancer des lymphocytes dans les ganglions – de l'hyperplasie folliculaire – une maladie bénigne –, ces deux lésions présentant souvent des caractéristiques similaires. Pour entraîner l'algorithme à les reconnaître, 378 images de lames entières provenant du CHU de Toulouse ont été utilisées, qui présentaient pour une moitié des tissus de ganglion lymphatique infiltrés par le lymphome folliculaire, et pour l'autre moitié par l'hyperplasie folliculaire. Résultat, dans 99 % des cas, le logiciel a effectué un diagnostic précis des lésions, « *ce qui surpasse les performances d'un pathologiste aidé de son seul microscope* », admet Pierre Brousset.

L'algorithme entraîné a ensuite été testé sur des images des CHU de Dijon et de Montpellier mais avec un taux de réussite de 65 %. « *Cet écart ne nous surprend pas, note Jean-Marc Alliot. Tant que les données médicales des hôpitaux ne seront pas produites pour l'usage spécifique des algorithmes, avec des méthodes et des formats uniformisés, il y aura des biais qui modifieront les performances de l'IA.* » L'application pourrait toutefois entrer en phase expérimentale au CHU de Toulouse dans les prochains mois.

Guider la décision thérapeutique

Plusieurs projets similaires d'aide au diagnostic sont actuellement en cours. Ils portent sur l'identification et la reconnaissance des lésions buccales potentiellement cancéreuses mais aussi certaines tumeurs du sein difficiles à caractériser. Aux côtés de Camille Franchet, anatomo-pathologiste à l'IUCT-Oncopole, l'équipe Michel Laudet participe au projet Apprentissage profond renforcé par l'immunohistochimie pour la requalification d'images de cancers du sein (Apriorics)⁶ visant à utiliser l'intelligence artificielle pour décrire les tumeurs le plus précisément possible, à partir de très nombreux paramètres. L'objectif étant de concevoir des modèles prédictifs afin d'optimiser le diagnostic.

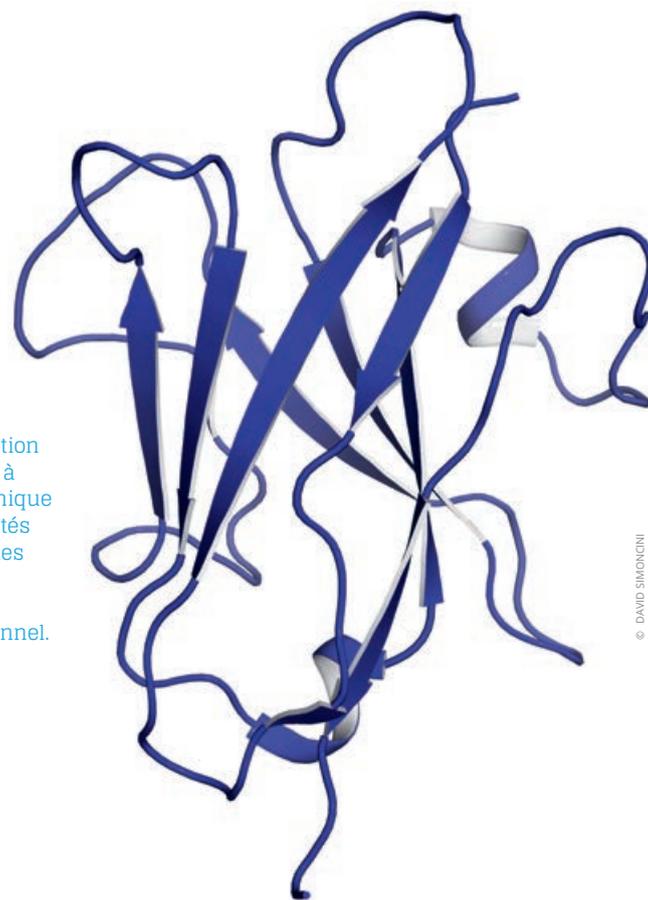
En 2021, un algorithme a été conçu avec l'hématologue Sarah Bertoli pour prédire la survie des patients atteints par la leucémie myéloïde aiguë. Dans ce cancer qui se développe dans la moelle osseuse, la question était de pronostiquer la survie des patients à un temps donné pour les deux traitements les plus utilisés. Pour entraîner le logiciel, les données cliniques, génomiques et thérapeutiques de 5 000 patients suivis durant vingt ans aux CHU de Bordeaux et de Toulouse ont été homogénéisées et traitées. Les résultats⁷ ont montré que dans près de 70 % des cas, le pronostic de survie s'avérait exact. Dans 90 % des cas, l'algorithme d'apprentissage était capable, à partir des données médicales au moment du diagnostic, de choisir le même traitement que celui préconisé par un hématologue expert.

Une nouvelle étude vient d'être lancée avec le professeur Marlène Pasquet, hémato-immunologiste au CHU de Toulouse et chercheuse au CRCT, pour cette fois prédire l'évolution d'une forme rare de la leucémie myéloïde aiguë chez les jeunes patients et définir la meilleure option thérapeutique en fonction de leur profil moléculaire. « *Ces algorithmes n'ont pas vocation à se substituer au médecin, rappelle le professeur Pierre Brousset, mais à terme, d'être une aide à la prise en charge personnalisée des patients.* »

Décrire les processus biologiques

« *L'intelligence artificielle ne se résume pas aux algorithmes d'apprentissage, insiste l'informaticien David Simoncini, chercheur à l'Irit, spécialisé dans la modélisation de nouvelles protéines thérapeutiques. Il existe toute une branche de l'IA basée sur la logique. Ce sont les modèles de simulation et d'optimisation utilisés lorsqu'un chercheur souhaite clarifier des phénomènes biologiques complexes. Ils sont particulièrement puissants pour mettre en lumière certaines interactions, tester ou suggérer des hypothèses.* »

Ces modèles sont capables de simuler la prolifération des cellules cancéreuses et de prédire leur évolution ou leur réponse à un anticancéreux. En reproduisant les



▼ Modélisation d'anticorps à domaine unique aux propriétés biochimiques améliorées par design computationnel.

© DAVID SIMONCINI

6. <https://vu.fr/oNoC> 7. <https://doi.org/10.1182/blood-2021-145122> 8. « Sequential adjustment of cytotoxic T lymphocyte densities improves efficacy in controlling tumor growth », Roxana Khazen et al., *Scientific Reports*, 23 août 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48711-2> 9. « A checkpoint-oriented cell cycle simulation model », David Bernard et al., *Cell Cycle*, 4 avril 2019. <https://doi.org/10.1080/15384101.2019.1591125>

En bref

PROGRAMMES NATIONAUX

Cinq Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR) d'accélération, pilotés ou copilotés par le CNRS, ont été officiellement lancés depuis fin mai : Technologies avancées des systèmes énergétiques (TASE) avec le CEA ; Ville durable et bâtiments innovants (VDBI) avec l'université Gustave-Eiffel ; Recyclage, recyclabilité et réutilisation des matières (Recyclage) ; Décarbonation de l'industrie (SPLEEN) avec IFP Énergies nouvelles ; 5G et réseaux du futur avec le CEA et l'IMT. En parallèle, un autre PEPR exploratoire a été lancé : Gestion intégrée des risques (IRIMA), copiloté avec le BRGM et l'université Grenoble Alpes.

CONCOURS D'INNOVATION

De nombreux projets d'innovation issus de laboratoires du CNRS et de ses partenaires se sont distingués, avec respectivement 17, 31 et 20 lauréats pour les concours i-PhD, i-Lab et i-Nov (vagues 9 et 10).

DANS LE MONDE

Le CNRS s'associe à l'université d'État du Michigan aux États-Unis, au laboratoire KEK au Japon et aux universités Mahidol et Kasetsart en Thaïlande pour créer trois nouveaux laboratoires internationaux de pointe dédiés à la physique du noyau atomique, à la physique des particules et aux liens entre biodiversité et santé.

PARTENARIATS

Le 21 juin 2023, le CNRS a renouvelé deux conventions partenariales, avec l'université d'Angers et l'établissement expérimental Nantes Université. Ces conventions engageant, pour les six années à venir, les établissements signataires à conduire ensemble une politique scientifique commune au sein des laboratoires partagés. Un mois plus tard, l'Onera et le CNRS ont renouvelé leur accord-cadre pour une recherche aérospatiale de pointe et une convention de partenariat a été signée avec Sciences Po.

DYNAMISER LES START-UP

En juillet, le CNRS a lancé Rise +, un programme dans la continuité des précédents dédiés à la valorisation des résultats de recherche. Celui-ci vise à renforcer le soutien apporté aux start-up issues des laboratoires placés sous sa tutelle et à dynamiser leur croissance, en s'alliant à des spécialistes des marchés. Les cinq start-up studios aujourd'hui partenaires sont spécialisés dans la santé, les technologies quantiques ou des domaines industriels comme l'agriculture, la chimie verte et les matériaux.

“Des modèles d'IA basés sur la logique sont capables de simuler la prolifération des cellules cancéreuses et de prédire leur évolution ou leur réponse à un anticancéreux.”

mécanismes d'attaque des lymphocytes T cytotoxiques⁸ (utilisés en immunothérapie) à l'encontre des cellules cancéreuses, Sylvain Cussat-Blanc a ainsi pu modéliser l'action du traitement à différents dosages afin d'optimiser son efficacité sur les cellules tumorales. Il a aussi mis en évidence⁹ l'effet du Nocodazole (un anticancéreux) sur les cellules cancéreuses du colon et révélé certains effets sur le cycle de vie cellulaire, jusque-là inconnus.

Sylvain Cussat-Blanc collabore depuis plusieurs années avec Pierre Cordelier, directeur adjoint du CRCT et spécialiste des virus oncolytiques dans le cancer du pancréas (l'un des plus meurtriers). « *Non seulement, les virus oncolytiques ciblent les cellules cancéreuses tout en épargnant les cellules saines, détaille le chercheur, mais ils ont aussi la capacité de stimuler le système immunitaire, ce qui pourrait laisser présager qu'en combinant la virothérapie avec l'immunothérapie, l'effet oncologique final serait plus important.* »

Des algorithmes plus explicables

Contrairement aux algorithmes d'apprentissage dont il est souvent impossible de comprendre les détails précis de leurs décisions, et donc d'où provient le résultat, les modèles de simulation présentent un atout considérable : ils sont fiables et explicables. Tous les résultats obtenus lors des différentes étapes de la modélisation font en effet l'objet d'une vérification in vitro en laboratoire pour valider les hypothèses. « *Notre objectif, c'est de développer des algorithmes les plus transparents possibles, explicables et traçables de façon à fournir au praticien des outils d'IA dont les résultats permettent d'expliquer au patient ce qui l'a conduit à établir ce diagnostic ou cette option thérapeutique* », souligne Sylvain Cussat-Blanc.

Pour contrer l'effet « boîte noire » des algorithmes d'apprentissage, lui et son collègue Simon Simoncini ont conçu une nouvelle méthode de *machine learning* capable de fonctionner avec peu de données et transparente sur sa façon de raisonner. Le logiciel est actuellement en cours d'expérimentation au sein de l'équipe et le brevet d'ores et déjà déposé. ||

Néandertal était aussi un artiste

VIVANT



SOCIÉTÉS



ARCHÉOLOGIE Des gravures découvertes dans une grotte en Touraine seraient l'œuvre de néandertaliens. Ceci confirme que notre lointain cousin n'était cognitivement pas inférieur aux humains modernes de son époque...

PAR KHEIRA BETTAYEB

Un être rustre et stupide. Une version primitive d'*Homo sapiens*, capable uniquement d'assurer sa survie matérielle et dénuée de tout attrait pour les activités de l'esprit, comme l'art... Voici le cliché qui a longtemps traîné concernant Néandertal (*Homo neanderthalensis*), qui a vécu en Europe jusqu'à il y a environ 40 000 ans. Or, une minutieuse analyse de gravures découvertes dans une grotte en Touraine a permis d'attribuer « sans ambiguïté » ces productions à ce lointain cousin¹!

« Nous avons daté ces tracés rupestres à plus de 57 000 ans, ce qui en fait les plus anciens connus en France », souligne Guillaume Guérin, chercheur en archéologie préhistorique au laboratoire Géosciences Rennes² et co-auteur de ces travaux. « Exceptionnelles, ces productions confirment que Néandertal n'avait rien à envier à *Homo sapiens* sur le plan des compétences culturelles », s'enthousiasme Jacques Jaubert, préhistorien au laboratoire De la Préhistoire à l'actuel : culture, environnement et anthropologie³, également co-auteur de ces travaux.

Une découverte fortuite

Les gravures en question ont été découvertes dans une grotte sur le site préhistorique de la Roche-Cotard, à environ 30 km au sud-ouest de Tours. Classée monument historique en 2021, « cette cavité aurait pu ne jamais être découverte », estime Jean-Claude Marquet, coordinateur des récents travaux, chercheur associé à l'unité Cités, territoires, environnement et sociétés⁴ dans le laboratoire Archéologie et territoires, et associé au laboratoire GéoHydrosystèmes continentaux de l'université de Tours.



© UGC YM - FRANCE 2 CINÉMA/«AO LE DERNIER NÉANDERTAL» DE J. MALATERRE (2010)/COLL. CHRISTOPHEL

C'est que « située à flanc de coteau et à 500 mètres environ des berges de la Loire, l'entrée est longtemps restée enfouie sous 8 à 10 mètres de sédiments », précise-t-il. Mais en 1846, de grandes quantités de sédiments sont extraites lors de travaux, dégageant ainsi l'entrée de la grotte. Il faudra ensuite attendre 1912 pour que François d'Achon la découvre par hasard sur sa propriété... en cherchant son chien qui s'y était engouffré !

En excavant la grotte, il met à jour quatre salles en enfilade ainsi que de nombreux ossements d'animaux et une centaine d'objets en silex. Décrits dans un article de 1913⁵, « ces objets – aujourd'hui hélas tous égarés – ont permis de dater la grotte à l'époque des Néandertaliens », précise Jean-Claude Marquet. Mais c'est seulement en 1976, alors qu'il y dirige de nouvelles fouilles, que l'archéologue remarque les gravures. Il doit cependant suspendre l'exploration du site en 1978 et ne la reprendra que trente ans plus tard. En 2015, il monte une équipe de spécialistes avec un objectif précis : analyser, relever et dater les gravures.

« Des créations indéniablement intentionnelles »

Pour ce faire, les chercheurs ont utilisé pléthore de techniques : photographie, photogrammétrie haute résolution pour reconstruire chaque gravure en 3D, imagerie par

1. "The earliest unambiguous Neanderthal engravings on cave walls: La Roche-Cotard, Loire Valley, France", J.-C. Marquet *et al.*, *PLOS ONE*, 21 juin 2023. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286568> 2. Unité CNRS/Université de Rennes. 3. Unité CNRS/Université de Bordeaux/Ministère de la Culture. 4. Unité CNRS/Université de Tours. 5. « La Préhistoire en Touraine », J.-C. Marquet, préface de Yves Coppens, Presses Universitaires François Rabelais, 2011. 6. A. Balzeau *et al.* *Sci Rep.* 9 décembre 2020. doi: 10.1038/s41598-020-77611-z.

transformation de la réflectance afin de révéler des reliefs invisibles à l'œil nu, etc. Au final, ils ont répertorié pas moins de huit panneaux, tous localisés dans la troisième salle de la grotte, sur la partie supérieure de la paroi. Laquelle est recouverte d'une fine couche brunâtre de roche chimiquement altérée. D'après les analyses, quasiment toutes les gravures auraient été effectuées au doigt. « Une seule semble avoir été gravée à l'aide d'un outil, peut-être en silex : le "panneau rectangulaire", baptisé ainsi car réalisé sur une saillie de la paroi en forme de rectangle », précise Jean-Claude Marquet.

Les tracés pariétaux qui apparaissent dès l'entrée de la troisième salle semblent se succéder sur toute la paroi, allant des plus simples aux plus élaborés. Trois retiennent l'attention car de composition plus structurée : le panneau ondulé, qui comprend – entre autres – deux longs tracés longitudinaux ondulés ; le panneau circulaire, composé dans sa partie centrale de tracés courbés, formant une ovale ; et le panneau triangulaire, constitué de vingt-cinq sillons parallèles entre eux. « L'attention qui semble avoir été portée à l'emplacement, à la succession et à la structuration de ces gravures témoigne d'un processus de création indéniablement intentionnel », analyse Jean-Claude Marquet.

Datation par luminescence

Les chercheurs ont été confrontés à une difficulté majeure : « aucune des techniques de datation disponibles, dont le carbone 14, n'est applicable à ces tracés », explique Guillaume Guérin, qui a contribué à cette partie de l'étude. Aussi, les chercheurs ont eu l'idée de dater l'âge de la fermeture de la grotte pour approcher la période de réalisation des gravures. En pratique, ils ont prélevé cinquante échantillons de sédiments l'ayant obstruée. Puis ils les ont analysés avec une nouvelle technique qui permet de dater le moment où un objet a été enfoui : la luminescence stimulée optiquement ou OSL (de l'anglais *Optical Stimulated Luminescence dating*). Finalement, l'OSL a permis de situer la fermeture de l'entrée de la grotte vers 57 000 ans avant le présent. Or à cette époque, *Homo sapiens* n'était pas encore présent

en Europe occidentale, la date la plus communément acceptée pour cet événement étant -45 000 ans.

Mais subsistait cette question : les tracés n'auraient-ils pas pu être effectués après l'ouverture de la grotte en 1912 ? Aussi, les chercheurs ont comparé les gravures à d'autres traces présentes sur la paroi de la caverne, connues pour dater du XX^e siècle, dont des traces d'outils de fouilles. Cela, notamment en analysant les couleurs des deux types de tracés avec un nuancier de couleurs pour archéologues et via une technique physique (spectrophotomètre CM-600d). Et bingo : « selon nos résultats, il est exclu que les gravures soient l'œuvre d'*Homo sapiens* », résume Jean-Claude Marquet.

La réhabilitation de Néandertal continue

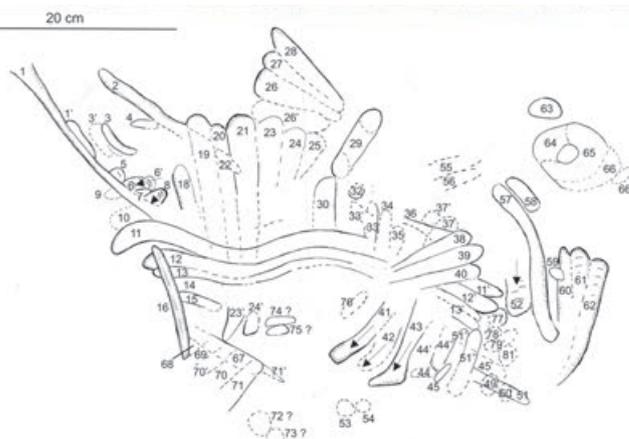
D'où la conclusion que les gravures de la grotte de la Roche-Cotard ne peuvent être que l'œuvre de Néandertal ! « Le sens de ces tracés nous échappe ; et pour cause, ce sont des productions non figuratives. Cependant, ils constituent des exemples non ambigus de dessins abstraits néandertaliens », assure Jacques Jaubert. De fait, ces deux dernières décennies plusieurs études ont montré que Néandertal présentait certains comportements « sophistiqués », révélateurs de capacités cognitives « modernes ». Notamment, fin 2020 ⁶, une équipe européenne incluant Guillaume Guérin a démontré, pour la première fois en Europe, qu'un enfant néandertalien avait été inhumé avec soin par les siens il y a près de 41 000 ans sur le site de la Ferrassie en Dordogne ; ce qui a prouvé que ce comportement n'était pas une « innovation » propre à notre espèce. « *S'inscrivant dans ce type de recherches, nos travaux sur les gravures de la Roche-Cotard contribuent à réhabiliter un peu plus Néandertal* », conclut Jacques Jaubert. II

▲ Le tracé pariétal dit « panneau ondulé » (à gauche), et le relevé des traces qu'il comporte (à droite).

✚ Lire l'intégralité de l'article sur lejournal.cnrs.fr



© MARQUET J.-C., FREIESLEBEN TH., THOMSEN KJ., MURRAY AS., CALLIGARO M., MACAIRE J.J., ET AL. (2023)



Audit interne CNRS

un dispositif « maison » au service de l'efficacité collective



ENTRETIEN De l'examen des processus internes à l'optimisation des opérations, la Direction de l'audit interne (DAI) joue un rôle essentiel dans le bon fonctionnement du CNRS.

Son directeur Éric Chareyre nous en expose les principales missions.

PROPOS RECUEILLIS PAR LAURENCE STENVOT

Pouvez-vous nous présenter le travail de la Direction de l'audit interne (DAI) ?

Éric Chareyre. Cette direction, créée en 2007 suite à une décision du Conseil d'administration, joue un rôle clé dans le fonctionnement de l'organisme. Elle opère selon des normes internationales qui régissent la profession et observe la charte de l'audit interne du CNRS qui impose à chaque auditeur une déontologie fondée sur des valeurs de compétence, d'objectivité, d'intégrité et de confidentialité.

Il s'agit donc d'un cadre très structuré.

E. C. Un cadre exigeant, mais aussi très engageant. En tant qu'établissement public de recherche, le CNRS est très exposé sur le plan sociétal et médiatique. Il est donc primordial de garantir l'exemplarité. La DAI est l'un des organes réflexifs chargés de ce rôle, évaluant les processus et fonctionnements de support et soutien à la recherche pour répondre aux exigences de transparence publique et d'excellence. C'est un peu comme un médecin qui établit un diagnostic et propose un traitement. Il identifie les risques, formule des recommandations pour atteindre ou retrouver une situation de contrôle ou d'efficacité des processus examinés. C'est une activité indépendante et objective qui donne à l'établissement une assurance raisonnable sur le degré de maîtrise de ses opérations. De plus, l'audit apporte des conseils pour créer de la valeur ajoutée et aider à maîtriser les risques liés aux activités du CNRS.

Combien êtes-vous ?

E. C. L'équipe compte cinq auditeurs internes permanents, une assistante de direction et des chargés de mission à temps partiel, qui ont une expertise reconnue au sein de l'établissement et qui peuvent s'adapter aux besoins. La DAI est directement rattachée au PDG et rend compte de ses travaux au Comité d'audit interne, émanation du Conseil d'administration. Son rôle est d'indiquer si les activités de l'établissement se déploient en conformité avec le cadre réglementaire applicable ou dans le cadre idoine, en éclairant ainsi la prise de décision.

Comment sont organisés et menés ces audits ?

E. C. Il s'agit d'un processus rigoureux et stratégique, qui opère en dehors du champ de l'activité scientifique, celle-ci étant déjà évaluée par le Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (HCERES). L'audit se focalise sur les processus de soutien¹ et de support à notre activité scientifique. Les missions d'audit sont définies dans un plan annuel, axé sur une approche par les risques auxquels l'établissement est exposé et dans le cadre d'un dialogue permanent sur les enjeux à investiguer avec la direction générale et les acteurs internes. Cette planification est discutée et approuvée en Comité d'audit interne, puis validée par la direction générale.

“ Sur une année, notre direction mène en moyenne six à huit missions, assurant ainsi une supervision continue et rigoureuse de l'organisme. ”

1. À l'exclusion du périmètre d'audit du comptable public compte tenu du principe fondamental de séparation entre l'ordonnateur (qui décide de la dépense) et du comptable (qui l'exécute). Cette séparation offre une garantie à notre organisme, qui bénéficie d'une vérification des dépenses avant qu'elles soient réalisées. Elle offre aussi une garantie au contribuable, qui bénéficie d'une vérification de l'exactitude de la recette à percevoir. 2. Pour *Human resources strategy for researchers*. Cette stratégie vise à améliorer les pratiques des organismes et établissements œuvrant dans le domaine de la recherche en matière de recrutement et de conditions de travail des chercheurs.

Quels sont les types de missions ?

E. C. Nous avons des missions d'assurance et de conseil. Les premières visent à vérifier la conformité d'un processus ou du fonctionnement d'une structure. En cas d'écarts significatifs entre ce qui est constaté et la règle à appliquer, l'équipe d'audit identifie les risques potentiels et formule des recommandations en vue d'un plan d'actions correctives. Les missions de conseil, quant à elles, ont pour objectifs de dresser un état des lieux d'une situation, d'un dysfonctionnement, etc., proposer des pistes d'amélioration et faciliter la prise de décision. Chaque mission comporte une phase de terrain, durant laquelle des entretiens et des tests sur site sont réalisés, suivie d'un rapport adressé au PDG, au référent de la mission et au bénéficiaire de l'audit. En général, deux auditeurs sont affectés à chaque mission, qui dure environ quatre mois. Sur une année, notre direction mène en moyenne six à huit missions, assurant ainsi une supervision continue et rigoureuse de l'organisme.

Quels types d'audits sont menés et quels impacts ont-ils sur le fonctionnement de l'institution ?

E. C. Cela varie énormément. Prenons l'exemple d'un audit d'une délégation régionale, structure déconcentrée du CNRS qui représente l'institution en régions. Ce type d'audit peut être soit un audit d'assurance, qui examine toutes les activités pour s'assurer qu'elles sont conformes à la réglementation applicable, soit un audit de conseil (audit organisationnel), qui étudie comment la délégation fonctionne, ses relations interservices, son offre de services. Nous évaluons également les processus, comme le processus de recrutement par exemple, pour en mesurer la mise en œuvre. En tant qu'organisation labellisée par la stratégie européenne de ressources humaines pour les chercheurs (HRS4R²), il est essentiel que le CNRS respecte ses obligations de transparence s'agissant de la publicité de ses offres d'emploi.

Coté recommandations, les dernières étaient destinées à accroître ou améliorer la tarification auditable des plateformes de recherche, la mise en place de contrôles internes RH ou encore la sécurité informatique. Une autre de nos missions est de concourir à la simplification des processus. Nous identifions ceux qui pourraient être allégés ou automatisés. Par exemple, nous avons suggéré plusieurs mesures d'automatisation pour une application de gestion de contrats (Webcontrat) et milité pour une meilleure interopérabilité des systèmes d'information. Nous veillons enfin à ce que des pratiques ne viennent pas se surajouter aux exigences réglementaires, par exemple dans la liste de pièces justificatives à fournir.

Quel que soit l'audit que nous menons, la finalité de notre Direction est d'optimiser les processus et d'aider à la prise de décision. Grâce à notre neutralité, nous sommes tout simplement une équipe de collègues qui aidons d'autres à prendre du recul pour davantage d'efficacité. Portés par une volonté au plus haut niveau du CNRS, nous sommes en mesure d'impulser de nombreux changements ; nous l'avons fait, contribuant ainsi à l'amélioration continue du CNRS. **II**

En bref

Des liens forts avec les décideurs

Le 28 juin, le CNRS a accueilli la réunion de la Commission des affaires culturelles et de l'éducation de l'Assemblée nationale, qui s'intéresse notamment à l'enseignement supérieur et à la recherche. Les membres de la commission ont rencontré le collège de direction du CNRS pour échanger sur la valorisation de la recherche, l'interdisciplinarité et l'ouverture internationale du CNRS, ou encore l'aide à la décision qu'il peut offrir. Très appréciée, cette rencontre a jeté les bases de collaborations futures.

Europe de la recherche

Le G6, réseau d'influence regroupant les principaux organismes pluridisciplinaires de recherche européens dont le CNRS, a présenté le 13 juin sept recommandations communes quant au prochain programme-cadre de recherche et d'innovation de l'Union européenne « FP10 », qui prendra la suite d'Horizon Europe en 2028.

Collaboration avec Michelin

Le 13 juin à Montpellier, à l'occasion de l'inauguration du bâtiment Chimie Balard Recherche, le CNRS et Michelin ont officiellement lancé le laboratoire commun HydrogenLab qui vise à développer de nouveaux matériaux de cœur de pile à combustible et d'électrolyseur, en utilisant des procédés innovants d'élaboration et de mise en forme.

De nouveaux lauréats à l'Europe

Sur les six lauréats français de la deuxième vague de l'appel « Proof of concept 2023 » du Conseil européen de la recherche (ERC), deux sont hébergés au CNRS. Le CNRS est aussi l'institution hôte pour 20 bourses « Starting » qui financent de manière importante les projets de jeunes chercheurs et chercheuses.

39

C'est le nombre de start-up valorisant des résultats de recherche issus des laboratoires dont le CNRS assure une tutelle, qui figurent parmi les 125 start-up lauréates du nouveau programme French Tech 2030. Celui-ci vise les enjeux ciblés par France 2030 avec une attention particulière portée aux solutions renforçant la souveraineté industrielle et technologique du pays.

L'hydrogène, gaz de la transition énergétique ?

MATIÈRE

TERRE

Vecteur idéal pour stocker et transporter proprement de l'énergie, l'hydrogène était jusqu'ici produit par des procédés polluants. La découverte de gisements et le recours aux énergies renouvelables pourraient désormais changer la donne.

© VIKS_JIN/STOCK.ADOBE.COM

Un gisement géant en Lorraine ?

Des chercheurs ont découvert un gisement potentiel d'hydrogène naturel dans le bassin houiller lorrain... Lequel pourrait être le plus gros réservoir mondial de ce gaz !

PAR KHEIRA BETTAYEB

Le bassin minier lorrain s'apprête-t-il à écrire un nouveau chapitre de son histoire ? Jusqu'ici, cette région située à la frontière franco-allemande était surtout connue pour ses puits de mines de charbon, dont le dernier a fermé il y a vingt ans. Mais à l'avenir, elle pourrait devenir mondialement célèbre pour une autre source d'énergie majeure cachée dans son sous-sol : l'hydrogène, ou plus exactement le dihydrogène (H₂). Ceci, grâce à des travaux menés par Philippe de Donato et Jacques Pironon, directeurs de recherche au laboratoire GeoRessources de Nancy¹. « Nos données indiquent que le sous-sol du bassin minier lorrain est très riche en hydrogène blanc. Si elle est validée, cette découverte pourrait grandement aider à assurer la transition vers des sources d'énergie propre, protectrices du climat », se réjouit Philippe de Donato.

De manière générale, l'hydrogène est considéré par beaucoup comme un levier essentiel pour accélérer l'abandon des combustibles fossiles tels le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Contrairement à ces derniers, sa combustion n'émet pas de dioxyde de carbone (CO₂), le gaz à effet de serre (GES) le plus fortement impliqué dans le

changement climatique. Aussi, l'espoir est grand de le voir devenir le carburant des véhicules de demain dotés de piles à combustible (un système qui utilise l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité). Il pourrait aussi servir de combustible propre dans toutes les industries qui dépendent actuellement du méthane : les cimenteries, la sidérurgie, la métallurgie, etc.

L'hydrogène blanc plus vert que l'hydrogène vert...

Concernant spécifiquement l'hydrogène « blanc », il s'agit de dihydrogène qui se forme naturellement dans le sous-sol terrestre. « Il est dit "blanc", car sa production n'émet pas de gaz à effet de serre », précise Jacques Pironon. En effet, « contrairement à l'hydrogène "noir" et "gris", produits en usine par transformation, respectivement, du charbon et du gaz naturel, l'hydrogène blanc est directement disponible ».

De fait, continue le chercheur, « cet hydrogène est même plus écologique que l'hydrogène "vert", fabriqué par électrolyse de l'eau à partir d'électricité provenant d'énergies renouvelables, solaire ou éolienne, qui ne sont pas neutres en émissions

de CO₂, ce gaz étant produit par l'ensemble de leur chaîne de production et lors de leur transport ».

Enthousiasmante, « notre découverte a été faite un peu par hasard », raconte Philippe de Donato. À l'origine, les géologues cherchaient du méthane (CH₄) issu de l'évolution thermique du charbon au fil des temps géologiques. « Menés dans le cadre du projet Regalar², lancé en 2018 avec la Française de l'énergie, un producteur indépendant d'énergie, nos travaux visaient à confirmer une expertise réalisée en 2012 par l'Institut français du pétrole et des énergies nouvelles (Ifpen) : après l'analyse d'un échantillon de sous-sol du bassin minier lorrain, celle-ci avait permis de conclure à la présence de 370 milliards de mètres cubes de méthane ; ce qui représente huit ans de notre consommation nationale de gaz », détaille Philippe de Donato.

Pour valider cette estimation, il était indispensable de mesurer en continu et in situ (directement dans le sous-sol), à plus de 1 000 mètres de profondeur, la concentration des gaz dissous dans l'eau de l'aquifère, la couche souterraine de roches perméables à l'eau. Pour relever ce défi, les chercheurs ont dû développer, en collaboration avec la société Solexperts, une sonde innovante adaptée. Baptisé SysMoG™, ce système a été breveté en avril 2023. Fin 2022, cette sonde a permis d'établir un profil des concentrations en gaz à différentes profondeurs dans un puits sur la commune de Folschviller, à 50 km de Metz. Les analyses au niveau des couches de charbon à 600 et 800 m ont révélé que le mélange gazeux présent à ces niveaux est constitué à plus de 96 % de méthane, soit du méthane quasiment pur.

15 % d'hydrogène à 1 100 mètres de profondeur

Confirmant les premières estimations de l'Ifpen, « ces données sont extrêmement intéressantes car elles indiquent que le méthane dans le sous-sol n'est pas contaminé par un gaz pénalisant, toxique ou corrosif, comme c'était le cas pour le gaz de Lacq (le plus grand gisement de gaz naturel de France, dans les Pyrénées-Atlantiques, Ndlr). Donc il n'y aura pas besoin de le traiter pour le purifier, ce qui diminuera fortement son empreinte carbone », analyse Philippe de Donato.

Mais encore plus intéressant, lors de leurs mesures, les chercheurs ont également détecté la présence du fameux hydrogène blanc ! « À 200 m, la teneur en ce composé était très faible, de l'ordre de 0,1 %, comme dans beaucoup de forages à cette profondeur. Donc cette première mesure ne nous a pas surpris », raconte Philippe de Donato. Mais plus la sonde descendait le long du puits, plus la concentration en hydrogène augmentait... « Nous avons commencé à sérieusement nous interroger quand, entre 600 et 800 m, elle est passée de 1 % à 6 %. C'était la première fois dans le monde que l'on trouvait une teneur en ce gaz aussi importante dans un sous-sol. » Et ce n'était là qu'un début. Car à 1 100 m de profondeur, ce taux dépassait les 15 %. « Alors, nous avons compris que nous avions potentiellement trouvé un gisement insoupçonné d'hydrogène blanc ! » s'exclame Philippe de Donato.

Les chercheurs pensent que le précieux gaz serait produit en continu via une véritable usine à hydrogène cachée

sous nos pieds, qui utilise pour matières premières des molécules d'eau et des minéraux composés de carbonates de fer (FeCO₃ et Ca(Fe,Mg,Mn)(CO₃)₂). En effet, « le sous-sol dans la région du puits de Folschviller est riche en ces deux types de composés. Or, lorsque ceux-ci sont en contact, il se produit une réaction physico-chimique dite d'oxydoréduction, où les minéraux dissocient les molécules d'eau (H₂O) en oxygène (O₂) et en hydrogène (H₂) », éclaire Jacques Pironon.

Des perspectives radieuses

Selon les géologues, l'hydrogène détecté à 1 100 m serait produit à un niveau plus profond, d'où il remonterait par diffusion. Or, cette hypothèse laisse penser qu'à des profondeurs plus grandes, l'hydrogène serait encore plus concentré. « Selon de premières simulations, à 3 000 m de profondeur, ces teneurs pourraient dépasser 90 % », chiffre Philippe de Donato. Si les chercheurs voient juste, au total, le possible gisement lorrain pourrait contenir environ 46 millions de tonnes d'hydrogène naturel... ce qui correspondrait à plus de la moitié de la production annuelle mondiale d'hydrogène gris aujourd'hui !

Reste toutefois à confirmer ces conjectures. « Dans les prochaines semaines, nous mesurerons la teneur en hydrogène à 800-1 000 m de profondeur dans trois autres puits situés dans un rayon de 40 km autour du puits déjà étudié, pour s'assurer que ce gaz est présent dans tout ce périmètre. Ensuite, il nous faudra aussi valider nos estimations concernant la teneur en ce gaz à 3 000 m de profondeur. Et pour cela, nous entourer d'industriels pour réaliser un forage à cette profondeur », explique Philippe de Donato. Enfin, il faudra développer des techniques d'extraction de l'hydrogène adaptées. Ce à quoi, les chercheurs réfléchissent déjà...

“ Contrairement à l'hydrogène “noir” et “gris”, l'hydrogène blanc est directement disponible. ”

De son côté, la Française de l'énergie a déposé une demande de permis de recherche d'hydrogène naturel et d'exploitation. Et ce, « dès mars 2023 », précise Romain Chenillot, responsable Géosciences – Gaz de mine de la compagnie. C'est que les perspectives suscitées par cette découverte sont radieuses. Car outre son caractère « propre », l'hydrogène lorrain présenterait un autre atout de taille : « il pourrait remplir le pipeline du projet “mosaHYc”³, lequel a pour ambition de mettre en service en 2026 un réseau de transport européen d'hydrogène qui reliera la Sarre (Allemagne), le Grand Est (France) et la frontière luxembourgeoise », relève Jacques Pironon. De quoi faire de la France un futur eldorado de l'hydrogène naturel ? ||

1. Unité CNRS/Université de Lorraine. 2. Pour REssources GAZières de LORraine. 3. Pour Moselle Sarre HYdrogène Conversion.

Des nanofils pour booster l'hydrogène propre

Pour optimiser la méthode de production d'hydrogène dit « solaire », un carburant propre et renouvelable, des scientifiques explorent les propriétés physiques de structures d'échelle nanométrique : les nanofils.

PAR SAMUEL BELAUD

Intermittentes, coûteuses, dépendantes des conditions météorologiques, consommatrices d'espaces naturels...

Les énergies fossiles représentaient encore plus de 81 % du mix énergétique primaire mondial en 2021, selon l'Agence internationale de l'énergie. Pour répondre à ces défis, les scientifiques travaillent à consolider les technologies de production décarbonée d'énergie et à accélérer leur développement. Dans cette perspective, José Penuelas, enseignant-chercheur à l'Institut des nanotechnologies de Lyon ¹ et une équipe de scientifiques ² se sont fixé pour objectif d'optimiser la méthode de production d'hydrogène dit « solaire » grâce à l'adjonction de structures d'échelle nanométrique : les nanofils.

▲ Image par microscopie électronique à balayage de nanofils d'arséniure de gallium épitaxiés sur substrat de silicium.

Mieux piéger la lumière solaire

L'hydrogène solaire est obtenu par photo-électrolyse de l'eau, une méthode qui permet de séparer les molécules d'eau en dihydrogène (H₂) et dioxygène (O₂), à l'aide d'un courant électrique généré par l'exposition d'électrodes à la lumière du soleil. « Il s'agit de convertir efficacement l'énergie solaire en un carburant propre, stockable et facilement pilotable », explique José Penuelas. Pour ce faire, il faut parvenir à dépasser deux contraintes majeures : d'une part, le coût important de certains composants nécessaires à la photo-électrolyse de l'eau ; de l'autre, la faible efficacité de ces électrodes en termes de rendement énergétique.

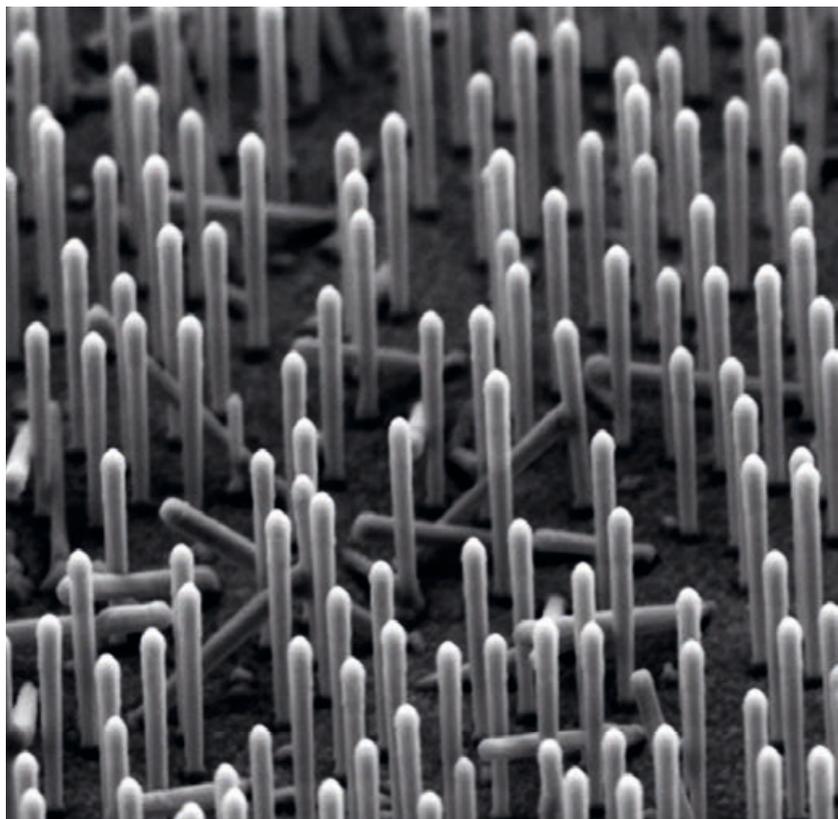
Le groupe de chercheurs a ainsi pris le pari d'ajouter une couche de nanofils sur les électrodes. Ces objets sont dotés de propriétés physiques remarquables et sont facilement intégrables sur le matériau de base utilisé pour la photo-électrolyse de l'eau, ou encore pour le photo-voltaïque : le silicium (l'élément chimique le plus abondant sur Terre après l'oxygène). « Il faut imaginer ces nanofils comme des brins qu'on va faire croître verticalement sur la

surface des électrodes, précise José Penuelas. Ce faisant, nous augmentons jusqu'à dix fois la surface des électrodes, ce qui amplifie leur capacité à absorber de la lumière et donc à générer les électrons nécessaires à la photo-électrolyse de l'eau. »

L'usage de nanofils présente un autre avantage non négligeable en raison de leur capacité à « piéger les photons ». Autrement dit, leur morphologie leur confère une capacité supérieure à absorber la lumière solaire par rapport aux éléments semi-conducteurs. Par exemple, sous forme planaire, le silicium « réfléchit jusqu'à 60 % de la lumière qu'il reçoit », indique le chercheur. C'est une importante perte d'énergie potentielle, que nos nanofils permettent d'éviter puisqu'ils peuvent capter plus de 99 % des rayons solaires ».

Éviter la corrosion

Cependant, les chercheurs ont dû faire preuve d'ingéniosité pour s'affranchir d'une problématique de taille dès lors que l'eau entre dans l'équation : la corrosion. « Au contact de l'eau, nos nanofils ont tendance à s'abîmer et



© PHILIPPE BÉGINNY

1. Unité CNRS/Centrale Lyon/CPE Lyon/Insa Lyon/Univ. Claude Bernard.

2. Institut des nanotechnologies de Lyon (CNRS/ Centrale Lyon/Insa-Lyon, Univ. Claude Bernard/CPE Lyon) ; Laboratoire de chimie et biologie des métaux (Univ. Grenoble Alpes/CNRS/CEA) ; Service de physique de l'état condensé (CEA Saclay) ; Laboratoire Matériaux, Ingénierie et Science (CNRS/Insa-Lyon, Univ. Claude Bernard) ; Institut Camille Jordan (Univ. Claude Bernard/CNRS/Univ. Jean-Monnet/Insa-Lyon/Centrale Lyon).

à s'oxyder assez rapidement [...] et cette dégradation intervient parfois en l'espace de quelques secondes », constate José Penuelas. Pour résoudre ce problème, les chercheurs ont mis au point une surcouche à déposer sur la surface du nanofil. « En plus d'être protectrice, explique-t-il, cette "coquille" est également transparente pour laisser passer les photons ; et partiellement conductrice pour permettre (dans le cas de la photocathode) aux électrons générés de sortir du nanofil. »

Les chercheurs ont trouvé dans le dioxyde de titane (TiO_2) le matériau répondant à ces trois caractéristiques. Ils sont parvenus à l'adapter aux nanofils, augmentant ainsi la durée de vie globale des électrodes sans compromettre significativement leur efficacité. Après le dépôt de ces catalyseurs pour accélérer la production d'hydrogène, la photo-électrode s'avère fonctionnelle. Toutefois, José Penuelas souligne avec exigence que « la qualité de l'interface entre le nanofil et sa coquille doit encore être améliorée, pour permettre aux charges de bien circuler entre ces couches ».

Contrôler la fabrication

Afin de pouvoir contrôler la fabrication à l'échelle nanométrique de ces semi-conducteurs, les chercheurs ont besoin de travailler dans les conditions très spécifiques de l'ultravide. Pour y parvenir, ils disposent d'un équipement sophistiqué, une machine MBE (pour *Molecular Beam Epitaxy*, épitaxie par jets moléculaires) qui permet de déposer la matière atome par atome, sans la moindre contamination.

« Ce réacteur crée un environnement d'une extrême pureté, caractérisé par une pression inférieure de 1 013 fois à celle de la pression atmosphérique », s'enthousiasme le chercheur. Son utilisation demeure relativement coûteuse et rend difficilement envisageable son transfert – en l'état – à l'échelle industrielle. « Nous adoptons ce procédé particulièrement minutieux parce que nous concevons des matériaux semi-conducteurs modèles, argumente José Penuelas. C'est grâce à notre capacité à contrôler les conditions de nano-fabrication sous ultravide que nous sommes en mesure de proposer un prototype idéal de photo-électrolyse de l'eau. » L'émergence d'une filière de production d'hydrogène solaire par nanofils nécessitera, malgré tout, d'adapter ces méthodes de fabrication « vers quelque chose de plus simple et moins coûteux », prédit le chercheur. ▮



À voir :

Notre vidéo « Quand l'hydrogène passe au vert »



Une équipe de l'Institut Néel reçoit le prix de l'Inventeur européen 2023



© EUROPEAN PATENT OFFICE

▀ De gauche à droite : Albin Chaise, Daniel Fruchart, Michel Jehan, Patricia de Rango et Nataliya Skryabina présentent leur dispositif de stockage de l'hydrogène.

Un moyen sécurisé et pratique pour stocker de l'hydrogène sous forme solide. Voilà ce qu'ont inventé les cinq scientifiques et industriels récompensés le 4 juillet 2023 par le prix de l'Inventeur européen dans la catégorie « Recherche », mais aussi par le prix du Public, attribué suite au vote des internautes. Sélectionnée parmi plus de 600 candidats et candidates, l'équipe française a mis au point une structure atomique et un procédé qui permettent de stocker l'hydrogène sous forme d'un disque solide à base d'hydrure de magnésium (MgH_2) et de graphite. Directrice de recherche CNRS à l'Institut Néel, Patricia de Rango a notamment conçu les réservoirs de stockage du disque et analysé les processus de développement ainsi que les caractéristiques des composés chimiques concernés. Comparée au stockage de l'hydrogène sous forme liquide ou de gaz à très haute pression, cette solution est plus sûre et facilite le stockage à long terme et le

transport. Elle nécessite aussi moins d'énergie, facteur déterminant dans la lutte contre le changement climatique. De quoi répondre aux demandes du secteur qui pourrait davantage utiliser l'hydrogène, trois fois plus énergétique que les combustibles fossiles. « La recherche d'une énergie verte, renouvelable et abondante est l'une des principales préoccupations de l'humanité. Le potentiel de l'hydrogène est considérable, mais son stockage et sa distribution posent des problèmes de logistique et de sécurité. Ce prix nous met sur la voie d'un avenir décarboné, en appliquant notre solution de stockage de l'hydrogène à l'échelle industrielle », a déclaré l'équipe lauréate dans le communiqué de presse de l'Office. L'invention a ainsi déjà été commercialisée en Europe, en Australie et au Japon. ▮

Pourquoi tant de dauphins échoués sur les plages ?

▼ Un dauphin commun retrouvé mort sur les plages de l'île de Ré durant l'hiver 2022-2023.

© F. SOURISSEAU

1482 C'est le nombre de petits cétacés découverts morts sur les plages, les grèves ou au pied des falaises de l'Atlantique entre le 1^{er} décembre 2022 et le 30 avril 2023. Chaque année, entre novembre et avril, ce sont des centaines de dauphins communs qui s'échouent sur la côte atlantique française, du Pays basque à la pointe de la Bretagne. « *Les premiers échouages multiples de dauphins communs se sont produits à la toute fin des années 1980*, raconte Olivier Van Canneyt, biologiste à l'observatoire Pelagis de La Rochelle, LE centre de recherche français dédié aux mammifères marins¹. *Depuis, ces événements ont été observés presque chaque année de manière plus ou moins intense et connaissent une nouvelle et forte accélération depuis 2016.* »

Entre 5 000 et 10 000 morts en mer chaque année

Pour près de 90 % des dauphins communs retrouvés sur le littoral atlantique, la cause de la mort ne fait aucun doute. « *Avant de venir s'échouer sur la côte, les mammifères ont été piégés dans l'un des nombreux filets de pêche déployés dans le golfe de Gascogne*, explique Olivier Van Canneyt. *Faute de pouvoir s'en libérer, ils n'ont pu remonter à la surface et sont morts asphyxiés.* » Les carcasses échouées sur les

VIVANT



SOCIÉTÉS



ÉCOLOGIE Près de 1 500 petits cétacés ont été retrouvés morts sur la côte atlantique française au cours de l'année écoulée, dont une grande majorité de dauphins communs. Le phénomène, qui désormais se produit aussi l'été, mobilise les scientifiques.

PAR GAËL HAUTEMULLE

côtes portent d'ailleurs les marques évidentes de ces captures accidentelles.

Déjà considérables, les échouages de dauphins communs sur les côtes françaises ne sont pourtant que la partie émergée de l'iceberg. « *Quand un mammifère marin meurt en mer, il ne va pas forcément s'échouer sur le littoral*, explique le biologiste. *Il coule à pic, le plus souvent.* » Grâce aux travaux de modélisation des scientifiques de Pelagis, qui mêlent de savants calculs de coefficient de dérive des carcasses aux conditions de vent et de courant des périodes concernées, on sait que pour le millier d'échouages recensés en moyenne chaque année sur la côte atlantique française, entre 5 000 et 10 000 dauphins

¹. Observatoire pour la conservation de la mégafaune marine (Pelagis), unité CNRS/La Rochelle Université.

sont en réalité morts en mer. Soit cinq à dix fois plus. Résultat : les captures accidentelles de pêche sont devenues la première cause de mortalité des dauphins communs dans le golfe de Gascogne et un vrai motif d'inquiétude pour la communauté scientifique.

Avec une population de dauphins communs estimée à environ 200 000 individus sur le plateau du golfe de Gascogne, en hiver, ces morts correspondent à un taux annuel de prélèvement anthropique de 1 à 5 %. Bien au-dessus du seuil communément admis de 1 % de mortalité additionnelle, et dépassant très largement la recommandation du Conseil international pour l'exploration de la mer, soit 985 dauphins communs pour les captures accidentelles dans l'Atlantique Nord-Est.

Des mesures d'urgence demandées

« Ces mortalités, depuis six à sept ans, ne sont plus soutenables, alerte Olivier Van Canneyt. Le taux de reproduction de ces petits mammifères marins est en effet très faible. Si leur durée de vie varie de 25 à 40 ans, ils ne sont actifs sexuellement qu'entre les âges de 8 et 15 ans. Et la femelle ne donne naissance qu'à un petit à la fois, après une gestation de dix mois... » Le scientifique cite l'exemple du marsouin de la Baltique et du dauphin de Maui, en Nouvelle-Zélande, tous deux en voie d'extinction, ou bien encore du marsouin de Californie, dont il ne resterait qu'une dizaine d'individus. Presque éteint, donc.

Sans pour autant remettre en cause la pêche en tant que système économique, le biologiste est formel : « Des mesures d'urgence sont devenues indispensables ». C'est aussi l'avis de la Commission européenne, qui a déjà mis la France en demeure d'agir, à deux reprises, et lui a instamment demandé le 15 juillet 2022 de mettre en œuvre « des mesures concernant la protection des espèces marines protégées et les captures accidentelles de cétacés ».

Sans contester la réalité de ces captures, et malgré les alertes des scientifiques et de nombreuses associations de protection de l'environnement, l'État français n'a pas souhaité jusqu'à présent prendre des mesures contraignantes pour la filière pêche, avançant le manque de connaissances sur l'interaction entre les bateaux de pêche et les cétacés. Plusieurs mesures ont donc été mises en place pour mieux comprendre le phénomène des captures accidentelles ces dernières années : déclaration obligatoire des captures accidentelles de cétacés pour tous les bateaux de pêche, présence d'observateurs sur les bateaux de pêche volontaires, pose de caméras sur les navires volontaires... Mais les résultats tardent à arriver.

En parallèle, des dispositifs destinés à éloigner les dauphins des bateaux de pêche ont commencé à être testés. Des systèmes acoustiques répulsifs, appelés « pingings », sont ainsi obligatoires pour tous les chalutiers pélagiques et posés sur les chaluts (*les filets coniques traînés par les bateaux, Ndlr*) depuis novembre 2020. Aucune solution

n'est en revanche disponible à ce jour pour les 400 fileyeurs qui opèrent dans le golfe de Gascogne et posent leurs filets au fond de l'océan : « *il est impossible d'équiper de répulsifs sonores des milliers de kilomètres de filets, au risque de créer de vastes zones d'exclusion pour ces animaux* », explique Olivier Van Canneyt.

Vers des fermetures de pêche

Une chose est sûre : le temps presse, et les tensions montent autour des échouages de dauphins. Lundi 13 mars 2023, des membres de l'ONG Sea Shepherd France ont exposé devant le Parlement européen, à Strasbourg, sept cadavres de dauphins échoués les jours précédents sur les plages de Vendée. Une semaine plus tard, lundi 20 mars 2023, le Conseil d'État a ordonné au gouvernement français de procéder à des fermetures de zones de pêche dans le golfe de Gascogne pour y garantir la conservation des dauphins. Saisie en 2019 par trois associations de défense de l'environnement, la plus haute juridiction administrative du pays estime que les dispositifs de dissuasion acoustique ne permettent pas de

garantir un état de conservation favorable des espèces de petits cétacés dont deux, le dauphin commun et le marsouin commun, sont menacées d'extinction, « au moins régionalement ». Le juge administratif a enjoint l'État de mettre en place, dans un délai de six mois, « des fermetures spatiales et temporelles des pratiques de pêche responsables des captures de dauphins dans le golfe de Gascogne, en complément de dispositifs de répulsion acoustique et de caméras embarquées sur les navires concernés ». Soit avant l'automne.

Depuis, d'autres échouages ont encore alourdi le bilan de l'année. Car l'été, jusqu'ici épargné, n'est plus une période de répit pour les cétacés : ils viennent désormais s'échouer sur des plages fréquentées par des vacanciers. Un choc pour les estivants et un vrai problème sanitaire, car les carcasses de dauphins peuvent transmettre des maladies. II

“Les captures accidentelles de pêche sont devenues la première cause de mortalité des dauphins communs dans le golfe de Gascogne.”



Lire l'intégralité de l'article sur lejournal.cnrs.fr

+ À savoir

En cas de découverte d'une carcasse de dauphin sur la plage, ne surtout pas toucher l'animal et contacter le Réseau national échouages au 05 46 44 99 10.

« Les conditions de travail se dégradent depuis les années 1990 »

Vous dirigez l'Institut de recherche interdisciplinaire en sciences sociales¹. Avant cela, vous avez travaillé durant douze ans à la Dares, le service de recherche et de statistiques du ministère du Travail. Que vous inspire la dernière enquête sur les conditions de travail divulguée par ce service² ?

Dominique Méda. Le résultat majeur de cette enquête tient en un chiffre : 37 % des actifs occupés disent ne pas se sentir capables de tenir dans leur travail jusqu'à la retraite, et considèrent que celui-ci n'est pas « soutenable ». Ce jugement concerne toutes les catégories professionnelles : 39 % des ouvriers et des employés jugent leur travail insoutenable, mais aussi 32 % des cadres. Autre élément intéressant : 41 % des femmes, et notamment les femmes avec enfants, disent qu'elles ne tiendront pas jusqu'à la retraite, contre 34 % des hommes.

Ces résultats sont tout sauf une surprise : depuis des années, les enquêtes documentent la crise majeure du travail en France. Que ce soit celle menée par le ministère du Travail depuis 1978 auprès de 25 000 actifs



SOCIÉTÉS

ENTRETIEN Intensification du travail, alourdissement des contraintes physiques et psychologiques, manque d'autonomie... conduisent un tiers des actifs français à juger leur travail « insoutenable ». Explications avec la sociologue du travail Dominique Méda.

PROPOS RECUEILLIS PAR LAURE CAILLOCE

occupés, que nous venons d'évoquer, ou l'enquête Eurofound³, conduite auprès de 71 000 actifs dans 36 pays européens.

Depuis quand les conditions de travail se dégradent-elles ?

D. M. Il y a une tendance générale à l'intensification du travail en France, qui a commencé dans les années 1990 et joue un rôle majeur dans la dégradation des conditions de travail. Le phénomène a connu une courte pause sur la période 1998-2005, lors de la mise en place des 35 heures, pour mieux repartir ensuite. Cette intensification, qui rime avec délais courts et rythme de travail plus élevé, donne aux actifs le sentiment d'être empêchés de fournir un travail de qualité. Lors de l'enquête

française de 2013, nous avons été alertés sur les conditions de travail à l'hôpital, où plus d'un tiers des personnes interrogées disaient ne pas être fières de leur travail, et être obligées de le faire moins bien. Mais ce modèle de la hâte, que les chercheurs Corinne Gaudart et Serge Volkoff nomment « le travail pressé⁴ », s'est imposé dans tous les secteurs professionnels : aujourd'hui, plus de la moitié des actifs occupés indiquent devoir travailler toujours ou souvent dans des délais très stricts et très courts.

Que recouvre la dégradation des conditions de travail ?

D. M. On est face à un cocktail de contraintes – contraintes physiques, contraintes psychiques et contraintes

1. Irisso, unité CNRS/Inrae/Université Paris Dauphine-PSL. 2. <https://dares.travail-emploi.gouv.fr/> 3. <https://www.eurofound.europa.eu/fr/data/european-working-conditions-telephone-survey-2021-data-visualisation> 4. *Le Travail pressé. Pour une écologie des temps du travail*, par Corinne Gaudart et Serge Volkoff, Éditions Les Petits matins, 2022.



© JEAN-CLAUDE MOSCHETTI / REA

► Manifestation à Rennes, en mai 2021.
À l'hôpital, un tiers des soignants disent ne pas être fiers de leur travail, faute de temps pour l'effectuer correctement.

psycho-sociales –, qui s'accumulent et placent la France en queue de peloton sur la question des conditions de travail en Europe. Notre pays est particulièrement mal classé sur les contraintes physiques. Ainsi, selon l'enquête Conditions de travail d'Eurofound, 33,9 % des actifs occupés français subissent des postures de travail douloureuses et 25,4 % portent des charges lourdes, tandis que 17,7 % sont exposés à des produits toxiques. Pour rappel, il s'agit là de trois des quatre critères de pénibilité supprimés par les ordonnances travail de septembre 2017 (sur les dix risques professionnels reconnus auparavant).

Aux contraintes physiques, qui ont peu diminué ces vingt dernières années, s'ajoutent des contraintes émotionnelles particulièrement fortes. Ainsi, un quart des actifs français déclarent être confrontés à des situations perturbantes sur le plan émotionnel, et ce alors qu'ils sont seulement 36,7 % à pouvoir compter sur l'aide et le soutien de leurs collègues. Il faut noter que sur tous les critères étudiés par l'enquête européenne, la France se situe systématiquement derrière l'Allemagne, le

Danemark et les Pays-Bas, mais aussi derrière la moyenne de l'Europe des Vingt-Sept. Dans l'index de qualité de l'emploi qui synthétise ces résultats, et qui met en regard les exigences imposées aux travailleurs et les ressources et soutiens dont ils disposent pour y faire face, la France figure parmi les trois derniers avec la Slovaquie et la Pologne, avec une proportion de 39 % de Français se trouvant dans un emploi « tendu » – contre 22 % au Danemark, 22,7 % aux Pays-Bas, 23,9 % en Allemagne et 30,3 % dans l'Europe des Vingt-Sept.

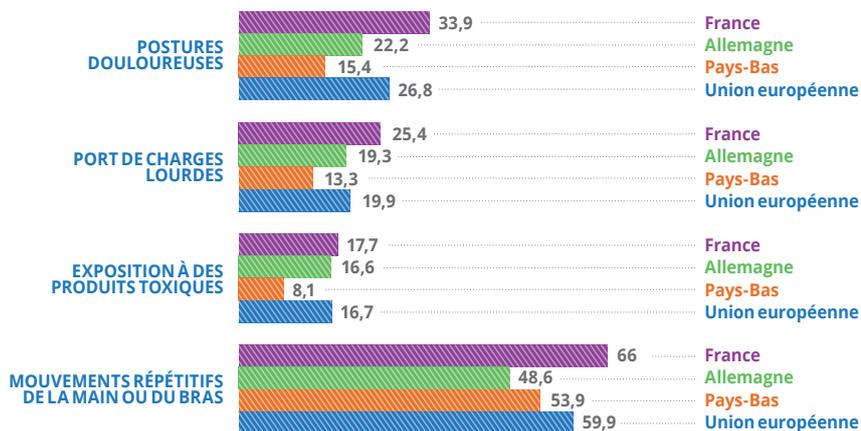
“Le “travail pressé” s'est imposé dans tous les secteurs professionnels. Aujourd'hui, plus d'un actif sur deux travaille dans des délais courts.”

Une caractéristique intéressante est le manque de consultation des actifs français dans leur vie professionnelle...

D. M. Cela fait partie intégrante de la dégradation des conditions de travail que j'évoquais. La moitié des actifs français disent ne pas être consultés avant que des objectifs de travail leur soient fixés, et considèrent ne pas pouvoir influencer les décisions importantes pour leur travail. C'est très caractéristique du manque d'autonomie dont se plaignent en général les Français, et ce alors même que les exigences auxquelles ils font face sont élevées. Mais le plus grand des paradoxes, tout du moins en apparence, c'est que la France, malgré des conditions de travail difficiles, est l'un des pays européens où les attentes par rapport au travail sont les plus élevées : au-delà du salaire, les Français attendent de celui-ci qu'il soit intéressant et leur fournisse un cadre fort de sociabilité. Ces attentes, plus élevées qu'ailleurs, se fracassent sur la réalité des conditions de travail.

La France, mauvaise élève de la pénibilité

Part en % de salariés exposés toujours ou souvent à différents types de contraintes physiques



Qu'est-ce que ces résultats disent de l'organisation du travail en France ?

D. M. Des exigences élevées, couplées à une faible autonomie, sont la caractéristique des organisations en *lean-management* massivement adoptées par la France depuis quarante ans. Thomas Coutrot et un certain nombre d'autres chercheurs l'expliquent bien : dans les années 1980, on a voulu sortir du taylorisme – c'est-à-dire, du travail prescrit – et importer les méthodes japonaises déployées notamment par des industriels comme Toyota. Le principe du toyotisme, c'est de fixer des objectifs aux équipes et de les laisser les atteindre par leurs propres moyens. Mais au lieu d'un bon management par objectif, tout s'est rigidifié : on a mis en place des indicateurs de performance, du reporting permanent, qui ont signé la fin de l'autonomie et compliqué la vie des salariés. C'est vrai dans le privé comme dans le public, où l'on voit des actifs passer plus de temps à effectuer des tâches administratives de reporting qu'à se concentrer sur leur cœur de métier.

C'est tout l'inverse des organisations dites « apprenantes » déployées dans les pays du nord de l'Europe, avec le succès que l'on sait puisque les salariés de ces pays, on l'a vu, sont majoritairement satisfaits de leurs conditions de travail.

Pouvez-vous nous en dire plus sur ces organisations apprenantes qui expliqueraient les bons résultats de l'Europe du Nord ?

D. M. Une organisation apprenante, c'est une organisation dans laquelle les salariés participent activement à l'élaboration des objectifs avec la hiérarchie, apprennent en continu et disposent de l'autonomie qui leur permet de réellement déployer leurs compétences, au lieu que tout leur soit dicté de l'extérieur. C'est un mode d'organisation associé à plus de bien-être au travail.

Ce que l'on constate, c'est que ces organisations apprenantes sont systématiquement associées à une présence forte des syndicats dans l'entreprise. C'est le cas en Allemagne, où le taux de syndicalisation tourne autour de 18 %, et c'est surtout le cas au Danemark et aux Pays-Bas, notamment, où il flirte avec les 70 % et où les syndicats sont étroitement associés à la prise des décisions qui concernent les travailleurs.

Comment sortir de cette crise du travail en France ?

D. M. La priorité est de s'occuper des conditions de travail. Il faut prendre la question à bras le corps et lancer un grand plan, en mettant à contribution l'Agence nationale pour l'amélioration des conditions de travail (Anact), qui avait accompagné les entreprises et l'ensemble des acteurs lors de la mise

en place de la réduction du temps de travail. Avant cela, il est nécessaire de redonner la parole aux salariés, en établissant des diagnostics partagés dans l'entreprise.

D'une manière générale, il me paraît important de redonner du pouvoir aux salariés, et de faire plus de place à leurs représentants. L'entreprise étant constituée de deux parties – les apporteurs de capital (les actionnaires) et les investisseurs en travail (les salariés) –, il faut que les deux puissent avoir voix au chapitre. La meilleure chose à faire, selon nous, est de s'engager résolument sur la voie de la codétermination, comme cela se passe dans les pays du nord de l'Europe. Là-bas, les salariés sont présents dans les conseils d'entreprise, mais aussi dans les conseils de surveillance où au moins un tiers des membres sont des salariés ou des représentants de salariés. Tout le monde y gagnera.

Et dans l'immédiat, que peut-on faire ?

D. M. Plusieurs décisions issues des ordonnances travail de 2017 ont eu des conséquences néfastes pour les conditions de travail, et sont à remettre d'urgence sur le métier. C'est le cas de la suppression des Comités hygiène sécurité et conditions de travail (CHSCT), qui a affaibli le dialogue social dans l'entreprise. Il me paraît essentiel également de revenir sur la suppression des quatre critères de pénibilité évoqués plus haut. Il faut sortir d'une approche individuelle de la pénibilité et faire une liste exhaustive des professions concernées avec une idée simple : que le temps passé dans ces métiers fasse gagner des trimestres de retraite. Ces ordonnances avaient également supprimé une petite cotisation payée par les entreprises et destinée à la prévention, qu'il serait judicieux de rétablir.

Plus généralement, il faut conditionner les aides publiques accordées aux entreprises – elles représentent près de 200 milliards d'euros chaque année, contre 30 milliards à peine dans les années 1980 – à leurs pratiques sociales et environnementales. On ne peut plus distribuer cet argent sans exiger de contreparties. **II**

LES IDÉES



*Quand l'exploration des ruines
urbaines offre de nouveaux
espaces de liberté et que la chimie
irrigue le patrimoine.*

Urbex, le grand frisson de l'exploration urbaine



SOCIÉTÉS

ENTRETIEN Explorer des lieux abandonnés tels qu'usines, casernes ou anciens sanatoriums, au mépris du danger et des interdits, est devenu un véritable phénomène de société. L'historien Nicolas Offenstadt, spécialiste de l'urbex et pratiquant lui-même, a enquêté sur cette passion mondiale.

PROPOS RECUEILLIS PAR LAURE CAILLOCE

Vous avez publié il y a peu un ouvrage sur le phénomène de l'urbex. De quoi s'agit-il exactement ?

Nicolas Offenstadt ¹. L'urbex, ou exploration urbaine, est la visite approfondie de lieux marginaux, délaissés, dans lesquels on pénètre généralement sans autorisation : usines fermées, casernes abandonnées, anciens sanatoriums... Le développement de ce phénomène coïncide avec un abandon massif de bâtiments publics ou privés, lié notamment à deux événements majeurs dans nos sociétés occidentales : la désindustrialisation et la chute du bloc de l'Est. L'urbex est pratiqué aujourd'hui par des milliers de personnes et en fascine des centaines de milliers. Le nombre important de sites internet consacrés au phénomène parle de lui-même. Les réseaux sociaux, sur lesquels le terme « urbex » s'est répandu à partir du début des années 2000, jouent d'ailleurs un rôle clef dans ce phénomène, car qui dit urbex dit échange, partage. On parle ici d'un véritable mouvement, pas de pratiques individuelles isolées.

Pourquoi un tel engouement pour les ruines urbaines ?

N. O. Il y a plusieurs raisons à cela. La première, assez classique, est le goût pour l'aventure. Pénétrer dans ces

plus en plus organisées, de plus en plus policées, où les friches et les marges se font rares et où la liberté de circuler est extrêmement contrainte... Dans ce cadre très limitant, l'urbex offre un nouvel espace de liberté.

Y a-t-il des hauts lieux de l'urbex, des endroits qu'il faut absolument avoir visités ?

N. O. Oui, il existe une hiérarchie et des lieux particulièrement emblématiques. Jusqu'à la guerre en Ukraine, la zone abandonnée de la centrale nucléaire de Tchernobyl était un « must ». On trouve aussi l'ancien siège du parti communiste bulgare à Bouzloudja, véritable ovni posé sur un sommet rocheux, ou encore l'ancien sanatorium (et hôpital) de Beelitz en Allemagne. Aux États-Unis, les usines abandonnées de la ville de Détroit, ancien fleuron de l'industrie automobile, comme l'usine Packard, sont devenues des icônes... Tous ces endroits font l'objet de milliers de vidéos et de photos, partagées sur des centaines de sites spécialisés.

En France aussi, il y a des « spots » plus faciles ou plus connus que d'autres, certains châteaux par exemple, des usines fermées... Les sites délaissés se trouvent souvent – mais pas toujours – dans des régions à la démographie stagnante, où

lieux condamnés s'avère généralement assez sportif, voire acrobatique. On passe par les toits, par des trous dans les clôtures... sans oublier le petit côté « Club des 5 », car tout cela fait un peu peur. La deuxième raison, c'est la photographie. On assiste à un véritable engouement pour les photos de ruines et lieux oubliés, au point que c'est devenu un genre en soi.

La passion du patrimoine est une autre explication. Nous sommes dans une époque de « boom patrimonial », qui s'incarne naturellement dans cette exploration des ruines et des friches. Je vois une dernière explication à l'essor de l'urbex, qui est le besoin de liberté. Nous vivons dans des villes de

1. Historien à l'Institut d'histoire moderne et contemporaine (CNRS/ENS - PSL/Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne).



© NICOLAS OFFENSTADT

l'absence de pression foncière explique pourquoi ils n'ont pas été rasés ou réhabilités.

Qui sont les urbexeurs ?

N. O. Tout dépend de la motivation qui les anime. On voit aussi bien des jeunes en quête d'aventure que des photographes professionnels qui se sont spécialisés dans les ruines urbaines, ou des passionnés du patrimoine local, qui peuvent être plus ou moins militants. J'ai rencontré un prof d'histoire à Amiens, Louis Teyssedou, qui s'est mué en sauveteur du patrimoine industriel de sa ville. Avec ses élèves lycéens, il a réalisé tout un travail sur l'ancienne usine de velours Cosserrat, un fleuron de la ville fermé en 2012. Cette exploration a donné lieu à un livre, à des expositions...

Si certains hommes mettent en avant une dimension viriliste de l'urbex, liée au côté sportif et risqué de cette activité, cela n'empêche pas de nombreuses femmes de pratiquer, avec parfois des spécificités : elles ne partent pas seules en exploration et

sont davantage soucieuses de leur sécurité et des mauvaises rencontres que l'on peut faire, mais elles développent aussi tout un ensemble de stratégies propres pour y faire face.

L'urbex est par définition une pratique sauvage, souvent illégale. Y a-t-il néanmoins des règles qui se sont mises en place ?

N. O. Il existe un code officieux de l'urbex, oui. On ne casse pas pour entrer, on ne touche à rien ni ne dégrade rien, on ne donne pas l'adresse du lieu et on n'emporte rien. Les sites d'urbex sur Internet ne communiquent d'ailleurs pas l'adresse des ruines dont on voit les photos. Il peut cependant y avoir des relations de confiance qui s'instaurent, et des gens expérimentés qui échangent leurs bons plans. Des réseaux mondiaux structurés se sont d'ailleurs mis en place, qui se réunissent régulièrement pour échanger et dont j'ai pu interroger plusieurs membres. Ma propre pratique de l'urbex est un peu différente. L'aspect historique et

► La désindustrialisation et la chute du bloc de l'Est ont provoqué un abandon massif de bâtiments.

patrimonial est pour moi central. Je relie l'urbex à des recherches plus classiques, avec un travail de documentation. Et je ne m'interdis pas d'emporter des choses...

C'est la particularité de votre travail de recherche sur l'urbex : vous êtes vous-même historien ET urbexeur. Comment êtes-vous venu à cette pratique ?

N. O. J'ai commencé à visiter des ruines industrielles avant que l'urbex existe, surtout dans le Nord minier, dans les années 1990, à côté de mon travail de thèse sur la guerre de Cent Ans. Tout au long de ma carrière, j'ai beaucoup travaillé sur le patrimoine et la mémoire, car l'histoire des lieux m'intéresse. Mais j'ai véritablement systématisé ma pratique de l'urbex il y a un peu plus de dix ans. À l'occasion d'un voyage de tourisme en ex-RDA (République démocratique allemande), j'ai été frappé par le nombre de sites en déshérence. Je suis entré dans une brasserie abandonnée à Schwerin, par curiosité, et j'ai été



À lire :

Urbex : le phénomène de l'exploration urbaine décrypté,
Nicolas Offenstadt,
Albin Michel,
mars 2022, 192 pages,
14,90 €.

Urbex RDA : l'Allemagne de l'Est racontée par ses lieux abandonnés,
Nicolas Offenstadt,
Albin Michel,
sept. 2019, 258 pages,
34,90 € (version numérique 9,99 €).

“Ces lieux apparaissent comme des territoires nouveaux, qui offrent des libertés nouvelles dans un monde un peu contraint.”

étonné par le nombre de documents qui y avaient été laissés. Je me suis demandé si c'était une exception, ou si tous ces sites abandonnés regorgeaient d'objets. J'ai fini par bâtir tout un projet de recherche autour de ces lieux délaissés de l'ex-Allemagne de l'Est.

Combien de lieux avez-vous « urbexés » sur ce terrain de l'ex-RDA ?

N. O. J'ai exploré 350 lieux : usines, maisons de la culture, casernes, ateliers abandonnés – toute une forme de civilisation socialiste laissée à l'abandon. La règle morale veut que l'on n'emporte rien et que l'on se contente de photographier ce que l'on trouve sur place. Mais ces lieux sont en complète déréliction et j'avoue avoir fait un peu d'échantillonnage sauvage parmi les nombreuses archives que j'ai pu trouver lors de ces visites. J'assume mes actes : certaines de ces usines et de ces dossiers ont été détruits peu de temps après mon passage, sans que rien ne soit sauvegardé.

Dans une usine de Saxe, j'ai par exemple trouvé un gros dossier sur les travailleurs cubains accueillis dans l'entreprise, qui montrait toute l'ambiguïté des liens entre l'Allemagne de l'Est et la République de Cuba. J'ai utilisé certains de ces documents dans mes livres sur l'histoire de la RDA. Cela ne m'a jamais causé de problèmes, car tout le monde sur place semble s'en désintéresser. Tous ces bâtiments, ces archives, sont souvent vus comme les traces matérielles d'un échec politique

et économique, comme un symptôme d'un passé dont on ne veut plus.

Quel genre d'urbexeur êtes-vous ?

N. O. Je suis un urbexeur assez tonique, qui ne se donne pas de limites a priori. J'escalade, je rampe, j'entre par des conduits d'aération... Pour moi, c'est le seul moyen si l'on veut découvrir des endroits, dans la limite du raisonnable bien sûr, car je suis aujourd'hui dans la cinquantaine. Je pratique souvent seul, mais de jeunes historiens ou collègues avec qui je travaille deviennent aussi des compagnons d'expédition, au fil du temps. La pratique solitaire est néanmoins déconseillée par certains urbexeurs, dans le cas où il arriverait quelque chose. De fait, il y a des morts tous les ans. Une fois, alors que j'étais en exploration avec une autre personne, l'escalier s'est dérobé sous nos pieds et la personne a fait une chute de cinq mètres.

Pour éviter les ennuis, j'évalue les risques à chaque étape de l'expédition. Et bien sûr, je m'équipe en conséquence : chaussures de sécurité – qui n'empêchent pas parfois des clous d'un bon centimètre et demi de percer les semelles –, gros jean, bonnet, gants anti-coupures, de l'eau en

quantité pour tenir en cas de problème ou de visite prolongée, une mini trousse de sécurité... Une chose est sûre : l'urbex doit toujours être une activité réfléchie. Ces explorations sont dangereuses, risquées, et assez spéciales. Elles nécessitent du sang-froid, de l'endurance et le sens de ses propres limites.

Pourquoi ces lieux fascinent-ils autant, malgré les risques ?

N. O. Cette question mérite encore des enquêtes, mais disons déjà que ces lieux apparaissent comme des territoires nouveaux, qui offrent des libertés nouvelles dans un monde un peu contraint. Cette attirance s'inscrit également dans un retour très fort vers le passé, face à un avenir souvent perçu comme plus opaque. Ces sites apparaissent enfin comme des métaphores de la disparition et illustrent la façon dont la nature semble prendre sa revanche au temps de l'anthropocène : la revégétalisation est partout, on voit des plantes pousser sur les bureaux, entre les livres... La crise écologique, les questions autour de l'artificialisation des sols interrogent aussi les friches et leur usage d'une manière renouvelée, et leur promet un nouvel avenir. ||

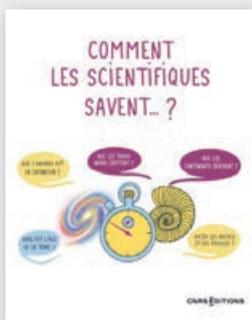
▲ Des urbexeurs explorent un ancien sanatorium en Isère.



À lire

Méthode scientifique

Comment les scientifiques savent que l'Univers est en expansion ? Que les trous noirs existent ? Que les continents dérivent ?... Autant de questions auxquelles ce petit livre illustré répond avec pédagogie et un objectif clairement affirmé : montrer, à l'heure où les croyances peuvent être mises sur un pied d'égalité avec le savoir scientifique, que c'est grâce à une démarche rigoureuse que la science décrit, explique et éclaire le monde.



Comment les scientifiques savent... ?
ouvrage collectif
mis en images par
Claire Marc, CNRS
Éditions, mai 2023,
70 p., 14 €.

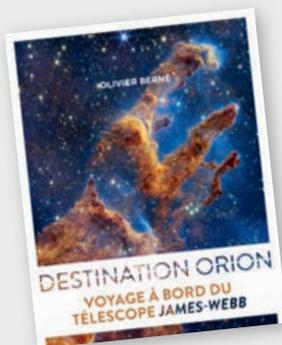
Seuls au monde ?

Cela fait des millénaires que la question de la présence d'êtres vivants en dehors de la Terre taraude notre espèce. Ce livre publié en collaboration avec *Le Monde* propose de faire le point sur la question. Comment la vie est-elle apparue sur Terre ? Existe-t-il un ancêtre commun

à tout le vivant ?
Pourrons-nous un jour communiquer avec des formes de vie apparues au-delà du Système solaire ? Et bien d'autres interrogations auxquelles l'ouvrage s'efforce de répondre en

s'appuyant sur les avancées les plus récentes en astrophysique et en cosmobiologie.

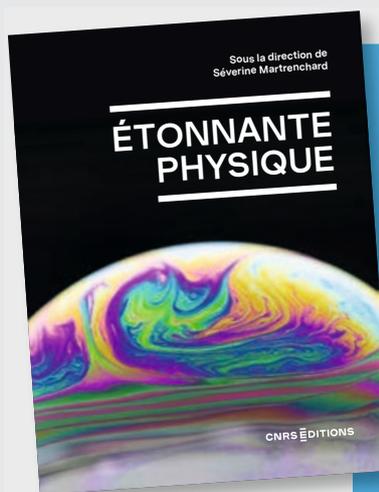
La vie dans le cosmos. Sommes-nous seuls dans l'Univers ? Juan Antonio Aguilera Mochon, préface de Jean-Pierre Luminet, Glénat, coll. « Référence », sept 2023, 320 p., 35,50 €.



Exploration spatiale

Lancée en 1989 par la Nasa – alors que Hubble n'était même pas encore opérationnel –, l'aventure du télescope James-Webb est la mission spatiale la plus coûteuse et la plus complexe jamais conçue. Et les premières images livrées sont d'ores et déjà à la hauteur des espérances de ses initiateurs. Dans cet ouvrage, l'astrophysicien Olivier Berné – responsable d'un des programmes d'observation de la nébuleuse d'Orion – nous fait partager les joies, les surprises mais aussi les craintes de cette mission hors norme.

Destination Orion. Voyage à bord du télescope James-Webb, Olivier Berné, Dunod, août 2023, 200 p., 17,90 €.



Année de la physique

Pour montrer toute la richesse de ce domaine de recherche, 70 physiciennes et physiciens récemment récompensés pour l'originalité et l'importance de leurs travaux par une médaille du CNRS apportent leur contribution. Abondamment illustré, accessible à tout amateur de science, cet ouvrage lève un voile sur les dernières recherches en physique, discipline mise à l'honneur cette année (lire p. 14).

Étonnante Physique, Séverine Martrenchard (dir.), CNRS Éditions, coll. « Étonnant », à paraître en oct. 2023, 424 p., 24 €.

Quand la science décrypte le sport

Pourquoi la balle de golf a-t-elle des alvéoles ? Pourquoi serrer les bras pour faire une pirouette ? Pourquoi, en rugby, vaut-il mieux reculer pour transformer l'essai ? À 40 questions, la directrice de recherche au CNRS Amandine Aftalion répond en s'appuyant sur des notions de physique et de mathématiques, qui permettent de mieux comprendre la pratique sportive. Éclairant, à un an des JO de Paris.

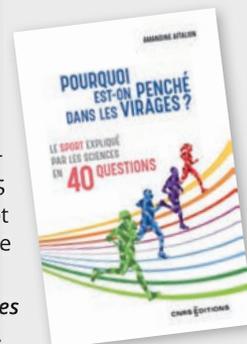
Pourquoi est-on penché dans les virages ? Le sport expliqué par les sciences en 40 questions, Amandine Aftalion, CNRS Éditions, août 2023, 166 p., 20 €.

Patrimoine à protéger

Sous la forme d'un atlas illustré, des scientifiques proposent un tour du monde du patrimoine

archéologique mondial en danger, des bouddhas de Bamiyan au dolmen de Roquefort, de la cité romaine de Palmyre à la grotte Cosquer... À travers 35 sites menacés par la guerre, les conséquences du changement climatique (inondations, montée des eaux, incendies...) ou encore l'urbanisation galopante, ils nous emmènent au cœur des vestiges mondiaux les plus représentatifs et dévoilent les acquis récents en matière de conservation du patrimoine.

Atlas des sites archéologiques menacés. Patrimoine à protéger, ouvrage collectif, Éditions du Cherche-Midi, sept. 2023, 176 p., 35 €.



Un autre regard sur les matériaux anciens



Est-ce l'atelier de Vulcain ?

Presque. Ici, un verre en fusion coule dans un moule en graphite dans un laboratoire. Contrairement à une idée reçue, le verre n'est pas éternel. De nombreuses recherches étudient notamment les altérations de vitraux médiévaux, très réactifs aux

agents atmosphériques, pour mieux en comprendre les processus physico-chimiques en jeu. Le projet Brume (pour Brunissement de vitraux médiévaux : facteurs d'influence et mécanismes élémentaires) tente ainsi de reproduire en laboratoire leur brunissement, dont pourraient être responsables des micro-organismes.

Est-ce de l'or ?

Non, c'est un os de dinosaure ! Ce dernier est composé de phosphates de calcium, transformés en cristaux de phosphates d'argent pour mieux les étudier. Le projet PACé (pour Paléo-écosystème d'Angéac-Charente au Crétacé) analyse des éléments chimiques du Crétacé inférieur (140 millions d'années) présents dans les fossiles, qui permettent de caractériser le climat et l'environnement dans lesquels évoluaient la faune et la flore, afin de comprendre les interactions dans cet écosystème.



MATIÈRE

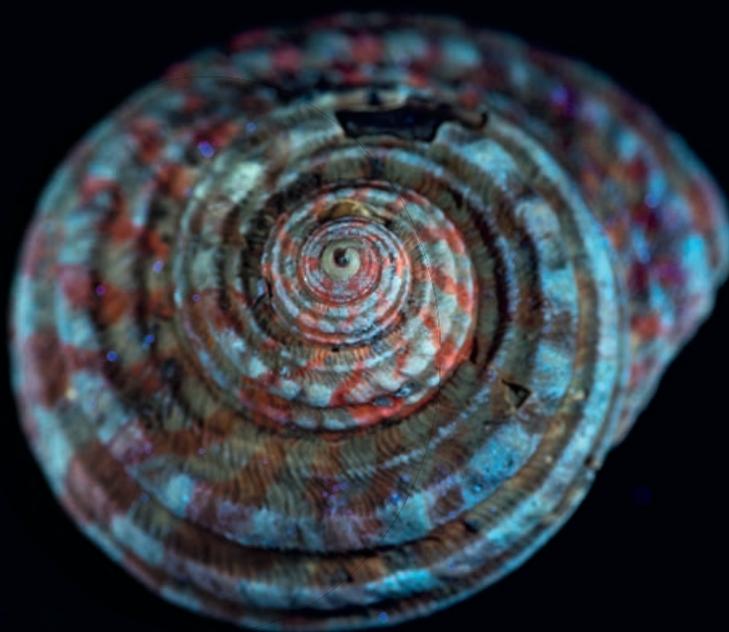
SOCIÉTÉS

CHIMIE Quel est le point commun entre un verre médiéval, un os de dinosaure, un micro-organisme marin et un coquillage préhistorique ? Le patrimoine, bien sûr, et la chimie ! En effet, celle-ci met en lumière les processus naturels à l'œuvre dans la conservation ou l'altération d'objets patrimoniaux. En témoignent ces photos tirées de l'exposition « Objets de culture, matériaux et diversité », proposée au printemps et à l'été 2023 par le réseau PAMIR du CNRS et SNCF Gares & Connexions dans cinq gares d'Île-de-France, qui illustrent la richesse des études réalisées dans le cadre de vingt-cinq projets de recherche soutenus par le DIM Matériaux anciens et patrimoniaux et la Région Île-de-France.

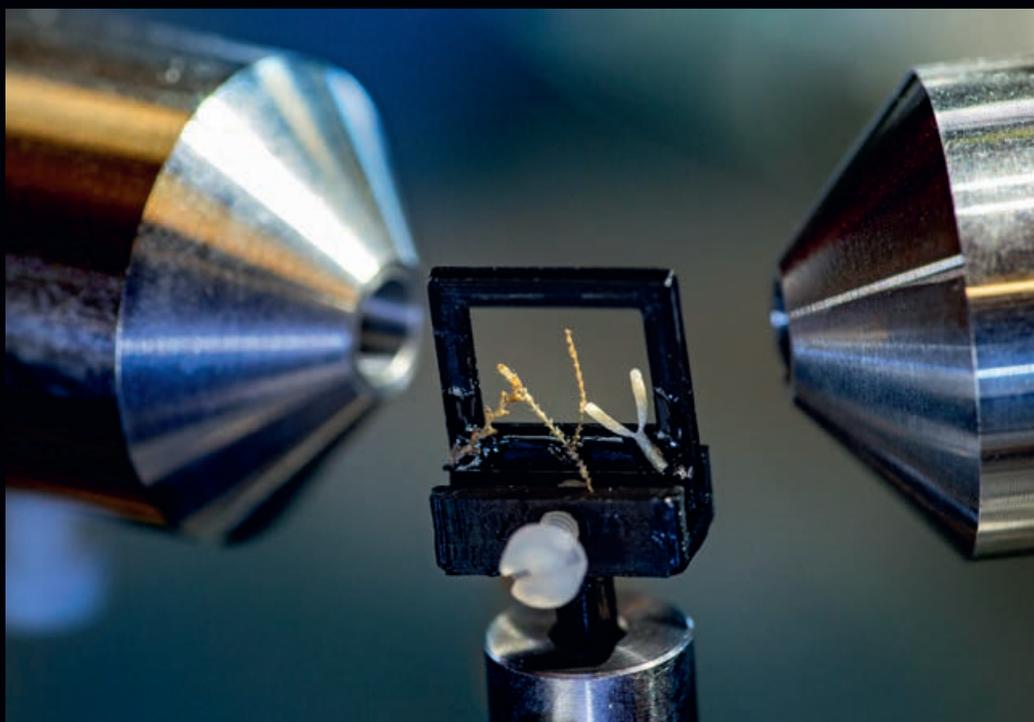
PHOTO LAURENCE GODART / DIM PAMIR / CNRS IMAGES

Qui a peint ce coquillage ?

Lui-même ! Ces motifs, révélés par une lumière ultraviolette, distinguent parmi 70 000 espèces de mollusques cet escargot de mer âgé de 30 millions d'années. Le projet PRESERV (pour Photoluminescence des porphyrines utilisée pour révéler des marqueurs colorés préservés chez les Vétigastéropodes post-paléozoïques) se sert de ces traces pour comprendre l'histoire évolutive des coquilles. Il s'intègre dans une thématique émergente visant à comprendre l'évolution des relations biochrome/couleur/vision dans le monde vivant.



POUR EN SAVOIR PLUS sur le domaine de recherche et d'innovation majeur (DIM) Patrimoines matériels - innovation, expérimentation et résilience (PAMIR), le réseau de recherche francilien dédié à l'étude des sciences du patrimoine :



Que font ces deux pointes de métal ?

Elles braquent un rayon X sur un échantillon de taille nanométrique, issu d'un carbonate de calcium formé par le bryzoaire *Cellaria fistulosa*. Celui-ci convertit en calcaire le gaz carbonique dissous dans l'eau de mer : c'est la biominéralisation des carbonates. Le projet POLIMO (pour Projet d'Observation aux Limites des Interactions Minéral/Organique à l'échelle cellulaire) utilise ces techniques de pointe pour observer les processus cellulaires et enzymatiques impliqués.



de Denis Guthleben,
historien au CNRS

L'énergie de la recherche

« Tout va être plus cher. » La prophétie s'étale à la une d'un grand quotidien régional, *Centre-Presse*. En dépit de son apparente actualité, elle ne date pas d'hier : ce cri d'alarme a retenti il y a cinquante ans, au lendemain du premier choc pétrolier. L'événement a, comme chacun sait, contribué à sonner le glas des Trente Glorieuses. Mais il a aussi, on l'ignore plus souvent, suscité une mobilisation d'ampleur de la communauté scientifique. En France, ce beau pays où « on n'a pas de pétrole, mais on a des idées », le CNRS n'a pas tardé à se ranger en ordre de bataille.

Flambée de l'or noir

Octobre 1973. Alors que la guerre du Kippour fait rage, les pays du Golfe membres de l'OPEP réduisent leur production de pétrole, tandis que l'Arabie saoudite, en représailles au soutien que Washington apporte à Israël, interrompt en prime toute exportation vers les États-Unis. Le prix de l'or noir flambe, prenant les prévisionnistes de court : deux ans plus tôt, les experts réunis par le Commissariat général au Plan en France avaient suggéré de réduire « d'une façon extrêmement sensible en valeur relative les crédits affectés au secteur de l'énergie » – on ne manque certes pas d'idées, mais ce ne sont pas toujours les bonnes !

“ Le choc pétrolier a été un révélateur de la force de frappe d'un CNRS ancré au cœur de la société. ”

Dans l'urgence, plusieurs décisions sont prises dans notre pays, où selon une coutume ancestrale les difficultés exceptionnelles engendrent des institutions nouvelles : des structures fleurissent, un comité consultatif de recherche et développement sur l'énergie, une agence pour les économies d'énergie, une délégation aux énergies nouvelles... Dans ce contexte un peu confus, où les prérogatives des unes empiètent sur les attributions des autres, le CNRS fait le choix de la simplicité : la désignation d'un délégué pour l'énergie,

le physicien Jean Lagasse, fondateur du Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (Laas) de Toulouse, avec pour tâche de faire l'état des lieux des travaux en cours dans les laboratoires, et de définir les recherches prioritaires.

Les énergies nouvelles du CNRS

Dès février 1974, des assises sur le thème « recherche fondamentale et énergie » sont organisées sur tout le territoire. Responsables politiques et acteurs de l'économie y sont conviés à échanger avec des scientifiques de toutes les disciplines, y compris les sciences humaines et sociales – le directeur des sciences sociales du CNRS, Edmond Lisle, assure le pilotage d'un projet dédié à l'économie de l'énergie. Géothermie, énergie marine, éolienne ou solaire, avec dans ce dernier cas le lancement d'un ambitieux programme interdisciplinaire de recherche pour le développement de l'énergie solaire, le Pirdes, qui contribuera à faire de la France l'un des leaders de ce secteur à la fin des années 1970 : le CNRS a révélé une fois encore son souci de répondre aux grands défis qui se posent à la société.

Il a aussi assumé son rôle d'espace de réflexion et de débats face aux décisions prises par les pouvoirs publics : le choix d'accélérer le programme électronucléaire a été questionné en toute liberté au sein de l'établissement. Antinucléaire, le CNRS ? Non : il a appelé à étudier de près toutes les conséquences, économiques, environnementales, sanitaires d'une telle orientation sur le long terme, et a surtout milité en faveur d'une diversification des réponses à la crise : « Des crédits équivalents d'une fraction, même faible, de ceux consacrés au développement du programme nucléaire devraient être affectés aux recherches pour le développement d'énergies nouvelles », lit-on – à l'époque déjà ! – dans un rapport rendu public dans le *Courrier du CNRS* en janvier 1976.

Capacité à lancer des recherches tambour battant, à dialoguer avec tous les acteurs privés et publics, à discuter les grandes orientations stratégiques nationales... le choc pétrolier a été un révélateur de la force de frappe d'un CNRS ancré au cœur de la société. Tellement ancré d'ailleurs que les laboratoires ont à l'époque peiné eux aussi à régler leurs factures énergétiques, et réclamé à cor et à cri des rallonges budgétaires qui ont donné des sueurs froides au directeur administratif et financier de l'organisme. Toute ressemblance avec une période plus proche de nous n'est bien sûr pas fortuite !

SOUTENEZ LA RECHERCHE

FAITES UN DON À LA FONDATION CNRS



© Frédérique Pias/CNRS Photothèque

Le CNRS développe une recherche libre, dans tous les domaines, au meilleur niveau international et sur le long terme. Pour contribuer à faire avancer les connaissances, répondre aux grands défis de notre société et innover : soutenez la recherche, faites un don à la fondation CNRS.

fondation-cnrs.org 

CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS

#14 actuellement
en vente
en librairie et Relay
200 pages / 14 €



Entrez dans
les coulisses
de la recherche



CNRS ÉDITIONS

www.carnetsdescience-larevue.fr