

Trimestriel n° 317  
OCTOBRE 2024

# CNRS

## LE JOURNAL



**Edith Heard,**  
Médaille d'or du  
CNRS 2024

**DOSSIER**  
Un monde  
de bruit

À la recherche  
de la mystérieuse  
**Planète 9**

Mieux comprendre  
**les troubles de  
l'odorat**

FONDATION 



**Donnons** à la recherche  
les moyens de ses ambitions.

**SOUTENEZ-NOUS**

Site web : [fondation-cnrs.org](http://fondation-cnrs.org)  
Par courrier à la Fondation CNRS : 3, rue Michel-Ange - 75016 Paris

**CONTACTS**

Téléphone : 01 44 96 44 49  
E-mail : [contact@fondation-cnrs.org](mailto:contact@fondation-cnrs.org)

# CNRS LE JOURNAL

## 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 Cailloce, Yaroslav Pigenet

## Rédacteurs :

Sophie Félix, Mehdi Harmi, Marina Julienne

Maxime Lerolle, Laurence Stenvot

## Ont participé à ce numéro :

Rahma Adjadj, Anne-Sophie Boutaud, Laure

Dasinieres, Évrard-Ouicem Eljaouhari, Grégory

Fléchet, Denis Guthleben, Martin Koppe, Émilie

Martin du Fou, Marie Privé, Nidal Taibi

## 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 :

Jekaterina Budryt (Agent 002), Stéphane Soularuc

## 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-mediatheque@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 :

© Sebastian Kaulitzki / Stock.adobe.com

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

Abonnez-vous gratuitement sur :

» [lejournal.cnrs.fr/abojournal](https://lejournal.cnrs.fr/abojournal)

Suivez l'actualité de la recherche avec le CNRS



Notre pays n'a jamais eu autant besoin de science. Pour continuer à être un pays de savoirs, à la pointe des révolutions technologiques de demain. Pour jouer un rôle majeur dans la compréhension des transitions climatique, énergétique, numérique, sanitaire et à notre nécessaire adaptation (je n'ai pas écrit acceptation, nous devons bien sûr lutter pour que ces changements soient le moins impactants possible sur les populations). Pour se ré-industrialiser en faisant le pari de la formation, de l'intelligence, des compétences, des emplois à forte valeur ajoutée et en encourageant les relations public-privé, les ponts entre le monde académique et le monde économique. Et aussi, pour fournir à ses citoyens, à ses décideurs, les connaissances pour comprendre le monde qui les entoure, prendre des décisions éclairées et se faire des opinions personnelles, en toute liberté mais sans se laisser abuser par les *fake news*, les complotistes en tout genre, et celles et ceux qui prétendent apporter des solutions simples à des questions compliquées, par démagogie et populisme.

Nous devons mettre fin à la lente mais constante dégradation de notre dépense intérieure de recherche et développement (DIRD). En 1996, la DIRD de la France s'élevait à 2,2 % de son PIB, au-dessus de celle de l'Allemagne et de la moyenne des pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), à 2,1. Celle des États-Unis était à 2,4 % et celle de la Chine à un « petit » 0,6 %. Qu'en est-il aujourd'hui, plus de vingt-cinq ans après ? La France stagne à 2,2 %. Dans le même temps, l'Allemagne a dépassé les 3,1 %,

les États-Unis sont à 3,4 % et la Chine a fait un bond extraordinaire à 2,4 %. Enfin, nous sommes maintenant à la traîne des pays de l'OCDE dont la DIRD moyenne est de 2,7 %.

Dans ce contexte, un des objectifs de la loi de programmation de la recherche, votée en décembre 2020, est d'augmenter progressivement la part publique de la DIRD. Depuis son adoption, un très large consensus, y compris politique, semble s'être fait sur la nécessité d'investir davantage et d'accélérer la mise en place de la loi. Cela ne signifie pas que tout le monde soit d'accord sur toutes les modalités ou mesures prévues, mais sur le

*“ La France est un grand pays scientifique, elle ne le restera pas si elle ne fait pas un effort particulier d'investissements, publics comme privés. ”*

principe, ce qui n'est pas si courant. Cela devrait être l'essentiel et garantir que la marche prévue en 2025, plus de 500 millions d'euros, soit *a minima* franchie, voire augmentée.

La France est un grand pays scientifique, elle ne le restera pas si elle ne fait pas un effort particulier d'investissements, publics comme privés. La compétition internationale pour attirer et garder les talents, en leur fournissant des conditions de travail scientifiquement attractives, est en effet de plus en plus féroce, avec de plus en plus d'acteurs, publics et privés. Et ne pas être un grand pays scientifique, c'est aujourd'hui, et encore plus demain, ne pas être un grand pays du tout !



Antoine Petit,  
président-directeur général du CNRS

FRÉBÉRIQUE PLUS / CNRS IMAGES



# GRAND FORMAT

# 13

Un monde de bruit .....	14
La plus grande caméra numérique jamais conçue ! .....	28
À la recherche du risque .....	34

© PASCAL STOCK/ADOBÉ.COM

## 06

Edith Heard,  
passion épigénétique



© FRÉDÉRIQUE BLAS / CNRS IMAGES

## EN PERSONNE 5

Edith Heard, passion épigénétique .....	6
Trio gagnant pour l'innovation .....	10
Brèves .....	12

## 40

On a retrouvé  
le sarcophage  
de Ramsès II



© CHRISTOPHER RYDRIK/IZUMA/REA

## EN ACTION 39

On a retrouvé le sarcophage de Ramsès II .....	40
Mieux comprendre les troubles de l'odorat .....	42
Pourquoi les oiseaux ne tombent pas en dormant .....	46
Faut-il naître pour être ? .....	48
Planète 9, y es-tu ? .....	52
Les technologies single cell révolutionnent la recherche en biologie .....	54
Un vent de tempête solaire souffle sur la Terre .....	56

Une anthropologie  
de l'invisible



© TALLANDIER / BIRDCEMAN IMAGES

## 64

## LES IDÉES 59

Les États dans le viseur du droit international .....	60
Brèves à lire .....	62
Une anthropologie de l'invisible .....	64

## LA CHRONIQUE

40 ans de fonction publique .....	66
-----------------------------------	----

# EN PERSONNE



*Où l'on récompense une spécialiste  
de l'expression des gènes et un trio  
phare de l'innovation.*

ILLUSTRATION : JEKATERINA BUDRYTE POUR CNRS LE JOURNAL

# Edith Heard, passion épigénétique



*Je n'étais pas le genre d'enfant qui capture des insectes pour les observer dans un bocal. Mais j'étais curieuse de tout, et j'avais soif de tout comprendre jusqu'au bout. »*

Très tôt, la jeune Edith Heard, née au Royaume-Uni en 1965 d'un père anglais et d'une mère grecque, se révèle passionnée par les sciences, et les mathématiques en particulier. Sa brillante scolarité l'emmène tout droit à la prestigieuse université de Cambridge, où elle arrive avec le projet de devenir astrophysicienne. *« Ça me semblait naturel à l'époque : j'étais forte en maths et en physique et très intéressée par l'astronomie. »*

Mais très vite, Edith Heard troque les astres contre la biologie. Elle y voit l'influence de sa mère : *« Elle accueillait régulièrement des Grecs qui venaient se faire soigner à Londres. J'ai donc grandi dans le monde de la maladie à combattre. Et dans une maison toujours ouverte aux autres. »* C'est de là que doit venir la générosité que l'on perçoit chez elle, dans son regard bleu clair, dans chacun de ses sourires bienveillants. *« Dès que je me suis prise de passion pour la biologie à l'université, j'ai eu envie d'aider à soigner, j'ai même hésité à devenir médecin. Mais ma grande soif de comprendre les choses l'a emporté. Je me suis dit que décrypter le vivant contribuerait à mieux combattre les maladies. »*

## Des « post-it » sur la molécule d'ADN

Ce décryptage, elle l'amorce avec une thèse de doctorat en biochimie à l'Imperial Cancer Research Fund, à Londres. C'est là que, un peu par hasard, elle tombe nez à nez avec l'épigénétique. Afin de caractériser le génome d'une lignée cellulaire cancéreuse, elle a besoin de couper l'ADN avec ce que l'on appelle des enzymes de restriction provenant de bactéries. Problème : certaines de ces enzymes ne fonctionnent pas lorsque les brins d'ADN à couper sont sujets à la méthylation : un changement chimique qui n'est autre que l'une des marques de l'épigénétique. En se documentant pour trouver le moyen d'éliminer cette méthylation, elle découvre tout un pan effervescent et fascinant de la recherche, alors en plein essor.

VIVANT

**PORTRAIT** La biologiste vient de décrocher la médaille d'or du CNRS, l'une des plus hautes distinctions scientifiques, pour ses remarquables travaux sur l'épigénétique et l'inactivation du chromosome X.

PAR EMILIE MARTIN DU FOU

Un peu comme des post-it qui seraient positionnés sur la molécule d'ADN, les marques épigénétiques participent à l'expression ou au contraire à la répression des gènes, via des modifications chimiques – comme la méthylation. Mais contrairement aux mutations génétiques, les marques épigénétiques n'altèrent pas la séquence ADN et sont réversibles.

L'épigénome, cette couche d'information complémentaire au génome, se révèle indispensable à la différenciation des cellules et joue un rôle clef dans l'embryogenèse. Chaque cellule portant en elle l'intégralité du code ADN, c'est notamment grâce aux marques épigénétiques qu'elle se spécialise, devenant une cellule de foie, de cœur, ou de muscle... Les marques épigénétiques lui permettent aussi et surtout de mémoriser son état, et de le transmettre aux générations suivantes de cellules. *« L'épigénétique est donc une sorte de mémoire cellulaire »,* résume la chercheuse. S'il n'a jamais été établi que les modifications épigénétiques

*“ Je me suis dit que décrypter le vivant contribuerait à mieux combattre les maladies. ”*



se transmettaient des parents aux enfants chez les mammifères – « *Imaginez si les individus portaient toutes les marques épigénétiques induites par les événements subis par tous leurs aïeux, ce serait une catastrophe pour le fonctionnement de l'organisme !* » –, certaines marques peuvent en revanche être induites sous l'influence de l'environnement (stress, tabac, pollution...) et se révéler délétères pour la santé des individus, sans pour autant être transmises à leurs descendants.

1990. Sa thèse en poche, Edith Heard embraye avec un postdoctorat à l'Institut Pasteur sur l'un des sujets phares de l'épigénétique : l'inactivation du chromosome X. « *Chez*

*les mammifères, alors que les cellules mâles comptent un chromosome X, accompagné d'un Y, celles des femelles comptent quant à elles deux X, rappelle la chercheuse. Or, cette double dose de X est très problématique. Chez les humains, la seule "surdose" de chromosomes qui soit viable, c'est la trisomie 21, où le chromosome 21 est en trois exemplaires au lieu de deux. Mais ce chromosome est petit, alors que l'X est particulièrement grand, il compte 1 000 gènes ! Chez une femelle mammifère, si les deux X s'expriment, l'embryon meurt rapidement. L'évolution a donc trouvé le moyen ingénieux de rendre l'un des deux X silencieux.* » Grâce aux fameux post-it épigénétiques.

### Expérience américaine

Avide de tout comprendre jusqu'au bout, comme à son habitude, la jeune chercheuse entend élucider les mystères qui entourent l'inactivation du X. Comment une cellule « sait-elle » qu'elle est femelle ? se demande-t-elle. Comment choisit-elle le X à inactiver et sur lequel poser des post-it épigénétiques ? Et selon quels mécanismes précis cette mise sous silence se déroule-t-elle ? Recrutée au CNRS à l'issue de son postdoc, elle entreprend, pour répondre aux nombreuses questions qui la taraudent, de décrypter le fonctionnement du centre d'inactivation du X. Un dessein ambitieux qui la pousse à se former à de nouvelles technologies innovantes.

En l'an 2000, elle s'envole au laboratoire Cold Spring Harbor, à Long Island, près de New York, avec son compagnon Vincent Colot – directeur de recherche à l'École normale supérieure, lui-même épigénéticien des plantes –, et leurs deux enfants. « *C'est avec lui, aujourd'hui mon mari, que j'ai construit ma carrière, confie-t-elle ; avec lui que je partage les joies et les secrets de l'épigénétique.* » Outre-

Atlantique, elle apprend, grâce à la microscopie de pointe, à visualiser au sein des cellules les toutes premières étapes de ce processus d'inactivation.

Armée de sa curiosité et de ses nouvelles compétences techniques acquises en Amérique, elle intègre l'Institut Curie en 2001, dès son retour en France. Elle y officiera en tout dix-sept ans, de cheffe d'équipe junior à directrice du Département de biologie du développement et de génétique. « *Ça a été la période la plus intéressante de toute ma vie scientifique, confie-t-elle, toujours avec ce français parfait, teinté d'un mélodieux accent britannique. J'y ai fait de la recherche fondamentale, ce qui nourrissait ma passion de comprendre, et en parallèle, mon équipe collaborait étroite-*

© FREDÉRIQUE PLASCINIS/IMAGES

ment avec des collègues merveilleux ainsi que des médecins de l'hôpital Curie, afin de mieux cerner les changements épigénétiques, surtout au niveau du chromosome X, pouvant être liés au développement de différents types de cancers chez l'humain ».

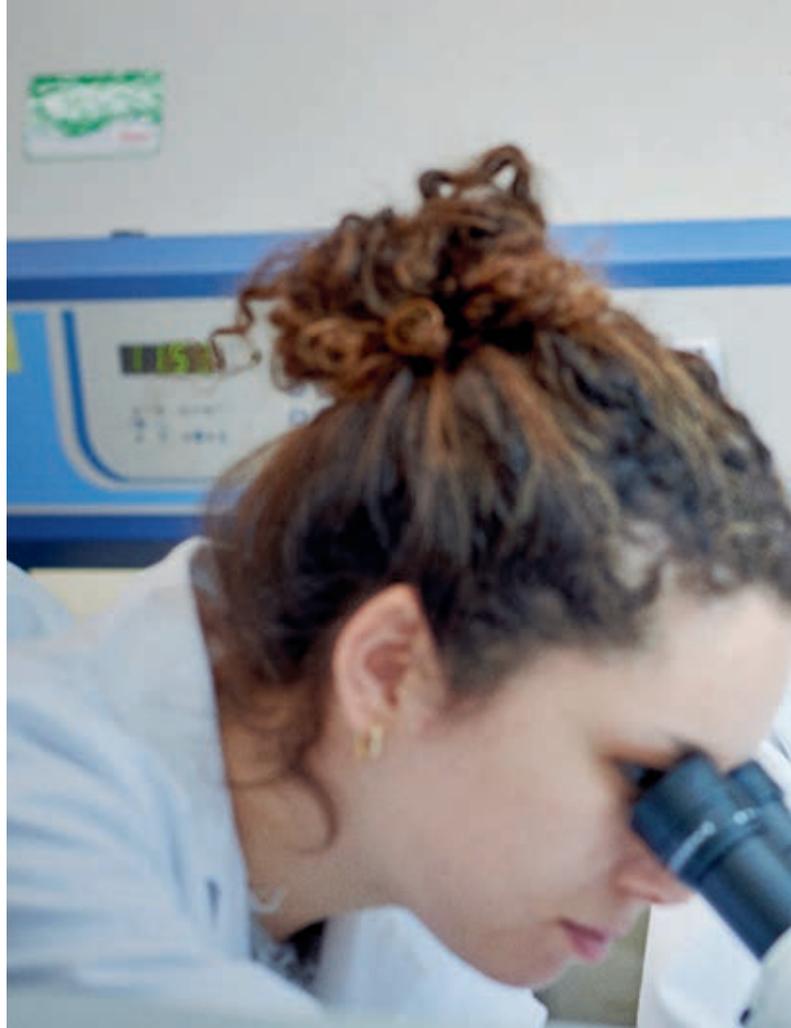
La chercheuse participe même aux réflexions sur des stratégies thérapeutiques *via* les « épi-médicaments » qui, basés sur la réversibilité des mécanismes épigénétiques, visent à éliminer les marques anormales. « Mais je ne crois pas à une recherche qui ne serait vouée qu'aux applications médicales, déclare-t-elle. Je suis une fervente défenseuse de la recherche fondamentale, qui permet de faire des bonds en avant dans la connaissance, ces derniers pouvant ensuite donner lieu à des applications. »

### Quand la nature « bricole »

Des bonds en avant, elle en a provoqué plus d'un. En 2004, son équipe est ainsi l'une des premières à reconstituer les étapes de l'inactivation du chromosome X chez la souris. La chercheuse et ses collaborateurs, en particulier Ikuhiro Okamoto, un chercheur postdoc qu'elle qualifie d'« *extraordinairement talentueux* », montrent qu'au stade d'un embryon à 4 cellules, c'est systématiquement le X paternel qui est inactivé, avant d'être réactivé au stade 120 cellules – après quoi l'inactivation se fait sur l'un des deux X (paternel ou maternel), de façon aléatoire<sup>1</sup>.

« Cette dynamique épigénétique que nous avons mise en lumière n'était pas du tout attendue », raconte-t-elle. Dans la communauté scientifique, elle fait donc grand bruit. Tout comme la percée suivante, quelques années plus tard. Avec le Dr Okamoto et d'autres collaborateurs, elle décortique le même processus chez l'humain et le lapin. Et surprise, pour ces deux espèces, la dynamique est très différente de celle observée chez la souris : les deux X sont d'abord inactivés simultanément, puis l'un est pour ainsi dire « rallumé » tandis que l'autre continue de s'éteindre. « On s'attendait à ce qu'un processus aussi central à la biologie ait été conservé par l'évolution, et soit similaire d'une espèce à l'autre. Mais ce n'est pas le cas. En réalité, la nature fait avec ce qu'elle a "sous la main", et s'adapte aux nécessités et contraintes développementales de chaque espèce. »

► Paires de chromosomes sexuels de mammifères (XX femelles et XY mâles). L'inactivation d'un des deux X chez la femelle est au cœur des travaux d'Edith Heard.



Ce nouveau résultat est publié dans la revue *Nature*, en 2011. À l'époque, Edith Heard est déjà une chercheuse de renommée internationale, lauréate de nombreuses distinctions, dont la médaille d'argent du CNRS en 2008, l'ERC *Advanced Investigator Award* du Conseil européen de la recherche en 2010 et le Grand Prix de la Fondation pour la recherche médicale en 2011. En 2012, elle est nommée professeure au Collège de France. La même année, elle publie un article qui fera date. « Avec mon brillant étudiant de l'époque, Elphège Nora, nous voulions comprendre comment démarre le processus d'inactivation, en sachant qu'avant nous, des équipes avaient mis en évidence le rôle prépondérant joué par un gène particulier, appelé *Xist*<sup>2</sup>, dans ce processus, raconte la chercheuse. Nous avons collaboré avec le scientifique américain Job Dekker qui avait développé de nouvelles techniques permettant de restituer l'organisation du génome en 3D. Nous avons cherché comment ce gène spécifique était mobilisé, et plus précisément par quelle partie du génome il était commandé. »

### Une percée majeure en génétique

Ce faisant, les chercheurs font une découverte inattendue : ils révèlent une architecture du génome jusqu'alors inconnue. Leurs travaux montrent en effet que les chromosomes sont organisés en régions qui dialoguent préférentiellement



1. Okamoto *et al*, *Science*, 2004. 2. « X-inactive-specific-transcript » 3. Une collaboration entre l'EMBL, la Fondation Tara et l'EMBRIC.



► Edith Heard, ici au Laboratoire européen de biologie moléculaire (EMBL), à Heidelberg en Allemagne, en 2020.

pour fabriquer les protéines dont elles ont besoin, Ndlr) qui vient littéralement couvrir l'ensemble du chromosome X, comme s'il le décorait. Ceci permet à ce dernier de recruter les marques épigénétiques qui vont non seulement éteindre les gènes, mais aussi leur faire mémoriser cette extinction ».

### Profondément européenne

Avant même la publication de cette nouvelle découverte en 2020, la renommée d'Edith Heard dans la communauté des biologistes lui a encore ouvert de nouveaux horizons. En 2019, en effet, elle est nommée directrice générale de l'European Molecular Biology Laboratory (EMBL), à Heidelberg en Allemagne, un organisme intergouvernemental unique en son genre, établi il y a tout juste cinquante ans dans le but de promouvoir la recherche fondamentale en biologie moléculaire et de garder les scientifiques sur le sol européen. Profondément européenne (en plus d'être gréco-britannique, elle est depuis peu française), elle accepte le poste et se voit confier la mission de mettre en place un nouveau programme pluri-annuel ambitieux, « *Molecules to ecosystems* », pour la période 2021-2026.

« *Nous, scientifiques, avons tendance à vouloir contrôler au maximum l'environnement dans lequel nous menons nos expériences, afin de ne pas les perturber. Mais dans la réalité, c'est tout l'inverse qui se produit : la vie n'est jamais isolée, elle interagit constamment dans un écosystème, participe à des communautés, en symbiose... L'idée de ce nouveau programme est d'étudier la vie dans son contexte naturel. Dans ce cadre, nous avons notamment mis sur pied une mission nommée Trec<sup>3</sup> (Traversing European Coastlines), centrée sur la dynamique des écosystèmes marins et terrestres des côtes européennes.* »

Si, pour assurer ses fonctions à l'EMBL, elle avait quitté Paris pour l'Allemagne, où se trouve le siège de l'organisme, elle s'apprête désormais à s'envoler pour une nouvelle destination : Londres, où elle prendra en 2025 la direction du Francis Crick Institute, un prestigieux organisme de biomédecine – tout en poursuivant en parallèle ses recherches et ses cours au Collège de France, ainsi que son engagement pour aider autrui. Depuis 2017, elle est en effet marraine du programme Pause (programme d'accueil en urgence des scientifiques et artistes en exil). Créé en 2017 sous l'égide du Collège de France, il vise à accueillir les chercheurs étrangers en danger dans leur pays et à leur donner les moyens de poursuivre leurs recherches. « *Nous recevons sans cesse des demandes, et cherchons les instituts susceptibles de les accueillir* », précise la chercheuse, à la curiosité et la générosité intactes. ||

les unes avec les autres ; que cette structuration est sans doute indispensable au bon fonctionnement du génome et que cette organisation semble être commune à tous les mammifères. Une illustration parfaite de la sérendipité en science : l'art de faire des découvertes « par hasard » en travaillant sur un tout autre sujet...

Après cette découverte fracassante, qui a ouvert plusieurs voies importantes dans la recherche sur le génome, la chercheuse reprend ses enquêtes épigénétiques. Toujours grâce aux techniques de microscopie high-tech apprises outre-Atlantique, elle parvient à visualiser la chorégraphie moléculaire qui mène tout droit à l'inactivation du X : « *Le gène Xist produit un ARN (l'ARN ou acide ribonucléique est une molécule, plus simple que ne l'est l'ADN, utilisée dans les cellules comme intermédiaire des gènes*

“Avec les marques épigénétiques, l'évolution a trouvé le moyen ingénieux de rendre l'un des deux chromosomes X silencieux chez les femelles.”

# Trio gagnant pour l'innovation



**Cyril Aymonier**

RECYCLER EN CONDITIONS SUPERCRITIQUES

**De l'eau miscible avec de l'huile et qui ne solubilise plus les sels ?** C'est ce qui se produit dans l'eau dans des conditions particulières de température et de pression, appelées « supercritiques ». D'une manière générale, les solvants en conditions supercritiques adoptent un comportement entre gaz et liquide. Ce comportement hybride permet notamment la synthèse, la mise en forme et le recyclage de matériaux inatteignables par des approches conventionnelles. Dès lors, « *les technologies liées aux fluides supercritiques s'inscrivent dans la démarche de l'économie circulaire et du développement durable*, précise Cyril Aymonier. *Elles permettent entre autres d'augmenter la part de matières premières recyclées dans les nouveaux matériaux* ».

Ce chimiste, directeur de recherche au CNRS, est un expert mondialement reconnu de ces milieux fluides supercritiques. Depuis l'Institut de chimie de la matière condensée de Bordeaux\* qu'il dirige, il conçoit de nouveaux matériaux et matières premières de

recyclage, tout en développant des procédés adaptés aux conditions supercritiques. Ses recherches ont abouti au dépôt de près d'une cinquantaine de brevets, dont plus de trente issus de contrats de collaboration avec des partenaires industriels comme Safran, Arkerma, Imerys, Renault, Essilor, L'Électrolyse, etc. Des partenariats qui ont donné lieu à des applications aussi variées que la synthèse de minéraux artificiels, de matériaux pour la catalyse et l'aéronautique, mais aussi le recyclage de cellules photovoltaïques, d'aimants, d'emballages alimentaires et de thermoplastiques. Les travaux de Cyril Aymonier sont aussi à l'origine de la création, en 2019, de la start-up IDELAM, qui exploite une technologie unique de délaminage pour le recyclage de matériaux complexes multicomposants.

Très impliqué dans la formation par la recherche, il a encadré plus de soixante-dix thèses et postdoctorats, dont plus de la moitié en partenariat avec des entreprises. Un choix qu'il justifie par le fait que la majeure partie des questionnements industriels peuvent se traduire en problématique scientifique, « *c'est pourquoi mes activités vont d'études très fondamentales au transfert de technologie avec des partenaires industriels* ». Il pourra accrocher sa médaille de l'innovation à côté de sa médaille de bronze du CNRS, obtenue en 2011. ■

\*. Unité CNRS/Bordeaux INP/Université de Bordeaux.



**Lydéric Bocquet**

MAÎTRISER DES FLUIDES AUX NANO-ÉCHELLES

**L'or bleu n'en finit plus de nous surprendre.**

De récents travaux en nanofluidique ont révélé qu'à des échelles nanométriques, comme lorsqu'ils traversent des nanotubes de carbone, les flux d'eau acquièrent des propriétés qui débouchent sur des applications inattendues. Produire de l'électricité, écrire aux nano-échelles, retirer l'alcool des boissons et bientôt dessaler de l'eau de mer... Autant de valorisations tirées des recherches fondamentales de Lydéric Bocquet, directeur de recherche CNRS au Laboratoire de physique de l'École normale supérieure\*. Ce physicien a ainsi déposé douze brevets, no-

**DISTINCTION** Le chimiste Cyril Aymonier, le physicien Lydéric Bocquet et la spécialiste de physique quantique Eleni Diamanti sont les lauréats 2024 de la médaille de l'innovation du CNRS. Voici leurs portraits.

TEXTES MARTIN KOPPE

PHOTOS FRÉDÉRIQUE PLAS/CNRS IMAGES

tamment sur des membranes, et fondé quatre start-up. Ainsi, depuis 2015, Sweetch Energy tire de l'énergie renouvelable des différences de salinité entre l'eau de mer et l'eau douce. Une « *énergie décarbonée et non intermittente* » au potentiel incroyable, que détaille Lydéric Bocquet : « *Le réservoir possible au niveau mondial est estimé entre 1 000 et 2 000 GW, soit l'équivalent de 1 000 à 2 000 réacteurs nucléaires, sachant qu'il n'y a actuellement que 400 réacteurs nucléaires sur la planète* ».

Tout juste lancée, Ilion puise aussi sa force de l'océan en proposant une technique innovante de dessalement de l'eau de mer. Hummink fournit de son côté, depuis 2020, une technologie d'impression nanométrique fonctionnant sur de larges surfaces et ce sans avoir besoin de disposer d'une salle blanche. Altr, enfin, utilise des membranes en oxyde de graphène pour retirer l'alcool de boissons telles que le vin ou la bière. Une grande variété d'applications, renforcée par le fait que Lydéric Bocquet est par ailleurs consultant scientifique pour diverses entreprises, comme Saint-Gobain ou Plastic Omnium.

Une forte implication industrielle qui ne détourne pas le chercheur de ses missions académiques. Il est en effet membre de l'Académie des sciences, professeur attaché à l'ENS Paris et médaillé d'argent du CNRS en 2017. Outre son travail sur l'innovation, Lydéric Bocquet poursuit ses travaux en nanofluidique, autour de l'ingénierie quantique des flux aux échelles nanométriques, et la conception de nanomachines ioniques qui imitent différentes fonctions biologiques, dont celles des neurones. Ces circuits sont capables de certaines tâches élémentaires d'apprentissage. ■

\* Unité CNRS/ENS-PSL/Sorbonne Université/Université Paris Cité.



**Eleni Diamanti**

RÉVOLUTIONNER LA  
COMMUNICATION QUANTIQUE

**Et si la lumière aidait la révolution de l'informatique quantique à atteindre son plein potentiel ?** C'est ce à quoi œuvre Eleni Diamanti, directrice de recherche CNRS au laboratoire LIP6\*. Pour ce faire, elle utilise les photons comme porteurs d'information quantique et développe différentes solutions technologiques pour les réseaux de communication quantique. Elle a aussi mis au point des protocoles cryptographiques, qui permettent notamment un échange de clés robustes face aux futures attaques par des ordinateurs quantiques.

Au-delà de ses travaux académiques, la physicienne s'est rapprochée des acteurs de l'innovation. Celle qui « *n'aime pas les choses figées* » et apprécie « *les nouvelles idées et directions qu'offre l'écosystème collaboratif de la recherche* » a cofondé, en 2022, la start-up Welinq. Ce fleuron français des technologies quantiques propose des solutions basées sur des mémoires quantiques pour connecter plusieurs processeurs quantiques, afin de dépasser les limites en puissance de calcul imposées par des processeurs individuels. Welinq déploie aussi sa technologie dans des infrastructures de communication quantique à longue distance. Eleni Diamanti dirige également le Paris Centre for Quantum Techno-

logies, qui réunit vingt-trois laboratoires autour de technologies quantiques.

L'expertise de la chercheuse lui a valu de nombreux partenariats industriels, comme avec Airbus, Deutsche Telekom, Orange ou Thales Alenia Space, ainsi qu'avec des institutions telles que l'Agence spatiale européenne et l'Office national d'études et de recherches aérospatiales. Une situation qu'elle juge intéressante : « *J'ai vu l'évolution de mon domaine qui, parti d'une niche particulièrement pointue, attire à présent énormément d'attention, y compris de la part de grands groupes industriels et des gouvernements* ». Signe de l'attention autour des travaux d'Eleni Diamanti, elle a également reçu cette année la médaille d'argent du CNRS. ■

\*Unité CNRS/Sorbonne Université.

© PASCAL LEVY / PANTHÉON-SORBONNE



## Elsa Supiot, référente déontologue

Professeure de droit et de sciences criminelles à l'université d'Angers, détachée au CNRS à l'Institut des sciences juridique et philosophique de la Sorbonne, Elsa Supiot a été nommée le 1<sup>er</sup> septembre 2024 référente déontologue, référente lanceur d'alertes du CNRS. Elle succède ainsi à Joël Moret-Bailly, qui assurait cette fonction depuis septembre 2018.



© ELISABETH LINCOT

## Daniel Lincot, Prix Edmond Becquerel

Daniel Lincot, directeur de recherche émérite au CNRS, à Chimie ParisTech-PSL, et ancien directeur scientifique de l'Institut photovoltaïque d'Ile-de-France (2013-2019), a reçu le prix Edmond Becquerel 2024 pour son engagement dans la recherche et l'innovation photovoltaïque, ainsi que la diffusion et la promotion de l'énergie solaire. Ce prix européen lui a été décerné à la Conférence photovoltaïque européenne à Vienne, le 23 septembre. Daniel Lincot en est le premier lauréat français depuis sa création, en 1989.

© COLLECTION PERSONNELLE



## Claudine Pique, référente à l'intégrité scientifique

Directrice de recherche au CNRS, biologiste, Claudine Pique a été nommée le 1<sup>er</sup> septembre 2024 référente à l'intégrité scientifique du CNRS, succédant à Rémi Mosseri. Cette spécialiste des rétrovirus humains a participé à de nombreuses actions de sensibilisation à la démarche scientifique à destination des élèves et du grand public. En parallèle, elle a été membre du comité national du CNRS de 2009 à 2012.

## Nomination en Région

Physicien de formation, délégué régional de la circonscription Hauts-de-France de 2019 à 2024, Christophe J. Muller est nommé délégué régional de la circonscription Alpes du CNRS, à compter du 1<sup>er</sup> septembre 2024.

© GREGORY HAU



## Nominations à l'international

Benoit Hazard a pris officiellement ses fonctions à la tête du Bureau du CNRS de Nairobi, au Kenya, le 1<sup>er</sup> octobre 2024. Anthropologue au CNRS, il a mené des recherches approfondies sur les migrations en Afrique de l'Ouest et en Europe, avant de se concentrer sur le devenir du pastoralisme en Afrique de l'Est à l'ère de l'Anthropocène. Fermin Cuevas, physicien, directeur de recherche au CNRS, expert en matériaux pour le stockage de l'énergie, est quant à lui nommé directeur du Bureau du CNRS à Pékin, en Chine, où il prendra ses fonctions à partir du 15 octobre 2024.

## Victor Gysembergh, Prix A3 du Rayonnement scientifique

L'Association des anciens et des amis du CNRS a attribué le 21 juin dernier son prix A3 du Rayonnement scientifique 2024 à Victor Gysembergh, historien des idées et des sciences au Centre Léon Robin de recherche sur la pensée antique (CNRS/Sorbonne Université). Déjà lauréat de la médaille de bronze du CNRS 2023, le chercheur s'attèle à révéler des textes et des fragments antiques conservés sous forme de palimpsestes (feuillettes de parchemin qui ont été effacés et réutilisés) dans des manuscrits médiévaux.



© SABRINA NEHMAR

# GRAND FORMAT

A stylized illustration of a futuristic building on a floating island in space, surrounded by planets and stars. The scene is set against a dark blue background with various celestial bodies, including a ringed planet, a large orange planet, and a smaller planet with a ring. The building is white with a grid of windows and is situated on a brown, rocky island. The overall aesthetic is modern and artistic.

*Quand les scientifiques mettent  
la planète sur écoute et éclairent les  
zones sombres de l'Univers.*

ILLUSTRATION : JEKATERINA BUDRYTE POUR CNRS LE JOURNAL





# Un monde de bruit

MATIÈRE ◀

VIVANT ○

Dans nos sociétés industrielles, le bruit est de plus en plus présent, occasionnant gêne mais aussi risques pour la santé. L'acoustique, la science du son, voit son influence s'étendre à des domaines toujours plus larges.

PAR MARIE PRIVÉ ET LAURE CAILLOCE  
ILLUSTRATIONS STÉPHANE SOULARUE

À l'intérieur de nos maisons, dans les rues de nos villes, dans les forêts ou même sous les mers, le son est partout... Cette profusion de sons extrêmement divers et complexes, c'est le domaine de l'acoustique, une science dont les premiers résultats expérimentaux remontent au XVII<sup>e</sup> siècle, avec l'étude des vibrations des cordes de violon, qui donnèrent lieu un siècle plus tard à la toute première équation décrivant un phénomène physique, l'équation de D'Alembert. « *L'acoustique, c'est l'analyse physique de ce phénomène ondulatoire qu'est le son : comment une onde sonore est générée, comment elle se propage et interagit avec les différents obstacles qu'elle peut rencontrer au cours de sa propagation, et comment elle est reçue par le récepteur – qu'il s'agisse d'un microphone ou de notre système auditif* », explique Adrien Pelat, enseignant-chercheur au Laboratoire d'acoustique de l'université du Mans<sup>1</sup>.

Aujourd'hui, l'acoustique s'avère fondamentale dans de nombreux domaines, de la santé à l'environnement en passant par les télécommunications et l'art : « *L'acoustique est utilisée en médecine pour les outils d'auscultation et d'imagerie, en ingénierie pour l'insonorisation d'un bâtiment, en traitement du signal pour l'identification des sources sonores en présence, en géophysique pour la propagation des ondes*

1. Unité CNRS/Le Mans Université.

sismiques, en biologie pour comprendre la communication animale... », énumère Judicaël Picaut, directeur de l'Unité mixte de recherche en acoustique environnementale<sup>2</sup> (Umrae), co-organisateur avec Adrien Pelat du congrès international d'acoustique InterNoise qui s'est tenu fin août 2024 à Nantes.

Si la nature elle-même peut se révéler très bruyante – les orages ou le tumulte d'un torrent en sont une bonne illustration –, les technologies modernes ont multiplié les sources de bruit d'origine anthropique. « *En dehors de l'industrie, les principales sources de bruit en extérieur proviennent des transports routiers, aériens et ferroviaires*, précise Judicaël Picaut. *Ces bruits peuvent avoir des composantes basse fréquence qui pénètrent également à l'intérieur des bâtiments et s'ajoutent aux nuisances sonores engendrées par les appareils domestiques et les bruits de voisinage.* »

Ces bruits basse fréquence, les plus difficiles à atténuer, sont un défi pour les acousticiens. « *Les méta-matériaux, ces nouveaux matériaux auxquels on confère des propriétés physiques particulières, pourraient changer la donne en acoustique. Ainsi, les scientifiques travaillent aujourd'hui sur des matériaux capables de filtrer des fréquences définies, de les masquer ou au contraire de les guider*, explique Adrien Pelat. *Utilisés dans les transports ou dans la construction d'habitats collectifs, ils pourraient s'avérer précieux alors que la densification des villes risque d'occasionner toujours plus de bruit.* »

### Des risques pour la santé

D'autres innovent pour limiter le bruit émis par les parcs éoliens, appelés à se multiplier en France dans le cadre de la transition énergétique. « *Le bruit éolien, particulièrement riche en basses fréquences et en infrasons, provient avant tout de l'écoulement de l'air autour des pales*, explique David Écotière, directeur adjoint de l'Umrae. *Dans le cadre du projet Pibe (« Prévoir l'impact du bruit des éoliennes », lire aussi p. 25), un nouveau type de solutions ont été testées en soufflerie à l'aide de modèles réduits de pales, avec un réel effet de réduction du bruit généré. La première est déjà étudiée dans le milieu aéronautique : il s'agit d'ondulations bioinspirées (que l'on trouve notamment sur le bord des nageoires des baleines à bosse), qui agissent sur les fréquences créées par le bord d'at-*

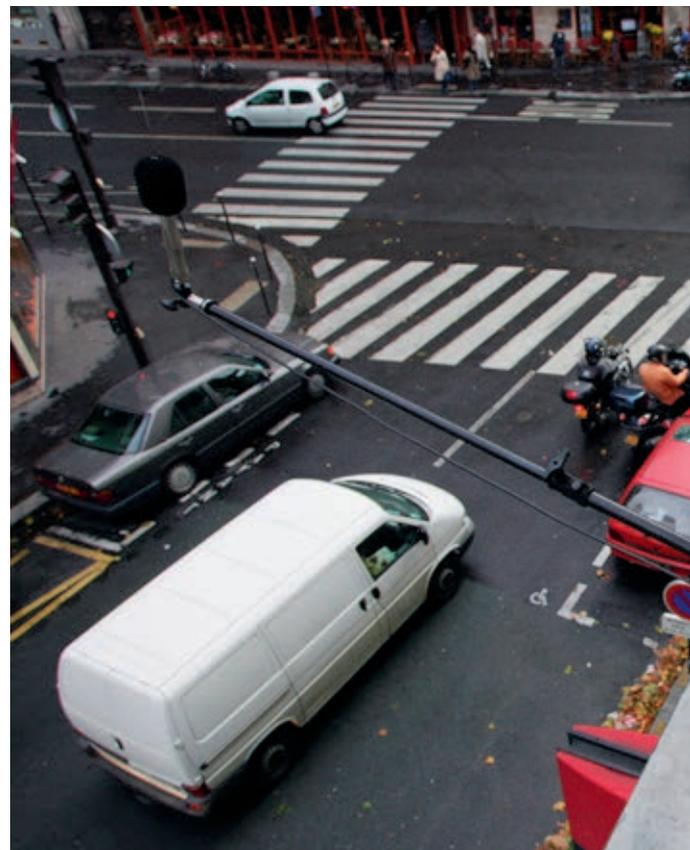
*taque de la pale. Pour le bord de fuite, un dispositif inspiré des ailes des rapaces nocturnes dont le vol est particulièrement silencieux grâce aux plumes plus longues situées au bout de leurs ailes – et déjà déployé dans certains parcs éoliens – a confirmé son efficacité.* » Très prometteurs, ces deux dispositifs présentent l'avantage de pouvoir être installés sur des éoliennes déjà en fonctionnement.

Car le bruit n'est pas qu'un simple désagrément. Il constitue un risque majeur pour la santé selon l'Organisation mondiale de la santé : parmi les facteurs de risques environnementaux, il s'agit de la deuxième cause de morbidité en Europe derrière la pollution atmosphérique, occasionnant pertes d'audition, acouphènes, troubles du sommeil, stress, mais aussi maladies cardiovasculaires et, plus surprenant, baisse des performances cognitives. « *On sait aujourd'hui qu'un enfant soumis à une exposition au bruit relativement importante – que ce soit à l'école, chez lui, ou à l'extérieur – peut développer des troubles de l'apprentissage* », signale Judicaël Picaut.

Avec l'essor du numérique, des affections inédites apparaissent, occasionnées notamment par le recours excessif aux plateformes de visioconférence. « *Face aux troubles auditifs signalés par un certain nombre d'interprètes travaillant presque exclusivement en ligne suite à la crise du Covid, des chercheurs ont découvert que l'écoute intensive de sons très compressés*

### SONS COMPRESSÉS

Compresser un son consiste à réduire les écarts entre les sons forts et les sons faibles, afin d'obtenir une meilleure qualité et un son audible malgré le bruit ambiant.



“Les scientifiques travaillent aujourd’hui sur des matériaux capables de filtrer des fréquences définies, de les masquer ou au contraire de les guider.”

2. Unité Université Gustave Eiffel/Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema).

pouvait entraîner des dommages auditifs irréversibles, explique ainsi Jean-Dominique Polack, professeur d'acoustique à Sorbonne Université et président de la Société française d'acoustique. *La plateforme Zoom a réagi à cette annonce en proposant depuis quelques mois un son amélioré.* »

Les humains ne sont pas les seuls à être impactés par le bruit. La biodiversité souffre elle aussi d'un environnement de plus en plus sonore (lire p. 26), à terre comme en mer où le transport maritime est identifié comme une source majeure de bruit. « *La construction des parcs éoliens offshore constitués de centaines de machines occasionne des nuisances majeures lors du battage des pieux, impactant l'activité de la biodiversité sous-marine, notamment en matière de reproduction et de recherche de nourriture pour les mammifères marins* », poursuit Judaël Picaut. Mais l'acoustique peut aussi venir en aide aux écosystèmes. Depuis quelques années, elle se révèle une auxiliaire précieuse pour réaliser des inventaires de biodiversité, en mettant littéralement les écosystèmes sur écoute. Le nom de cette toute nouvelle discipline : l'éco-acoustique. ||

Une technicienne de l'Observatoire du bruit en Ile-de-France mesure le bruit au niveau d'une façade d'immeuble.



© GILLES ROLLE / RÉA

Le test d'oto-émission permet d'enregistrer la réponse de l'oreille après une stimulation sonore.



© PEARSTOCK / STOCK-ADOBIE.COM

## Comment nous percevons le son

Plus récente que l'acoustique, la psycho-acoustique s'intéresse à la perception des sons par l'être humain, c'est-à-dire à la façon dont le système auditif reçoit et traite le signal sonore. Car la perception d'un son n'est pas seulement liée aux propriétés de celui-ci, comme la fréquence ou l'intensité. Elle dépend aussi du fonctionnement de l'oreille humaine. Ainsi, le pavillon et le conduit auditif amplifient les fréquences comprises entre 1 000 et 5 000 hertz, de sorte que le son qui excite le tympan est plus fort que celui qui arrive devant notre oreille ; de même, certains sons proches en fréquence sont pour ainsi dire « fusionnés » par notre système auditif... On sait également que la perception du bruit varie selon les individus

et que certains peuvent être plus sensibles que d'autres à certaines fréquences – une donnée qui fait aujourd'hui consensus au niveau international. « *Pendant longtemps, la sensibilité au bruit a été vue comme un état psychologique augmentant la réactivité au bruit en général*, raconte Catherine Marquis-Favre<sup>3</sup>, chercheuse en gêne sonore au Laboratoire de tribologie et dynamique des systèmes<sup>4</sup>. *Mais ces dernières années, on a pu montrer qu'elle était associée à un état physiologique observable : plus grande réactivité de la conduction thermique de la peau, modifications neuro-anatomiques visibles par imagerie cérébrale dans des zones spécifiques du cerveau, etc.* » ||

3. Catherine Marquis-Favre est également partie prenante du projet Ribeiloh (Recherche des impacts du bruit des éoliennes sur la santé humaine) et coordonne un projet sur la sensibilité au bruit. 4. Unité CNRS/École centrale de Lyon/École nationale des travaux publics d'État.



# *Mystérieux infrasons*

Quel est le point commun entre une éolienne, la houle océanique et une éruption volcanique ? Toutes trois sont émettrices d'infrasons, des sons dont la fréquence est inférieure à 20 hertz. Connues pour se propager sur de longues distances, ces ondes acoustiques réputées, à tort, inaudibles suscitent de plus en plus de recherches.

PAR LAURE CAILLOCE

Indonésie, 26 août 1883. Le Krakatoa se réveille dans une puissante explosion. L'onde acoustique générée par le volcan est si intense qu'elle est enregistrée par les baromètres des stations météorologiques londoniennes à plus de 10 000 kilomètres de là. « *C'est la première mesure infrasonore jamais réalisée*, relate François Coulouvrat, physicien spécialiste d'acoustique à l'Institut Jean le Rond d'Alembert<sup>1</sup>. À Londres, l'onde sera d'ailleurs enregistrée deux fois, ce qui signifie qu'elle a fait au moins deux fois le tour de la Terre. » Une vingtaine d'années plus tard, en 1908, l'entrée dans l'atmosphère de la grande météorite de Sibérie et sa formidable déflagration, mille fois plus puissante que celle de la bombe d'Hiroshima, est à nouveau détectée à des milliers de kilomètres. Ainsi naît l'intérêt des scientifiques pour les ondes infrasonores : des ondes acoustiques de très basses fréquences, inférieures à 20 hertz (Hz), capables de se propager sur de grandes distances.

Nulle magie à cela. Une onde acoustique est une onde de pression, une onde mécanique donc<sup>2</sup>, qui se propage de manière longitudinale en faisant osciller les molécules d'oxygène et d'azote de l'air, créant de légères surprises

et dépressions à son passage. La longueur d'onde correspond à la distance entre deux maximums (ou entre deux minimums) de pression. Or plus la fréquence d'une onde sonore est petite, comme c'est le cas dans les très basses fréquences, plus sa longueur d'onde est grande et plus l'onde voyagera loin. Elle aura également tendance à être « aveugle » aux obstacles plus petits que sa longueur d'onde. Inversement, plus une fréquence est haute (sons plus aigus), plus sa longueur d'onde sera petite, et plus rapidement elle sera absorbée par l'atmosphère et affectée par les obstacles. Cette relation entre fréquence et longueur d'onde s'incarne dans une équation simple :

$$\text{Longueur d'onde (en mètres)} = \frac{\text{vitesse du son (340 mètres par seconde au niveau du sol)}}{\text{fréquence (en hertz)}}$$

### Des sources naturelles et industrielles

« *Tous les phénomènes géophysiques sont émetteurs d'infrasons : éruptions volcaniques, séismes, chutes de météorites, tornades, éclairs, aurores boréales...* », confirme Roberto Sabatini, enseignant-chercheur au Laboratoire de mécanique des fluides et d'acoustique de Lyon<sup>3</sup>. *Une explosion volcanique générant dans la partie basse de son spectre sonore des ondes d'une fréquence de 1 millihertz (0,001 Hz) aura une longueur d'onde de 34 km, plus ou moins équivalente à la taille de l'objet émetteur. La houle océanique, source permanente d'infrasons, génère des ondes autour de 0,5 Hz, ce qui correspond à une longueur d'onde de l'ordre du kilomètre.* » À noter que si la fréquence et la longueur d'onde sont liées, l'intensité des ondes sonores produites dépend de la nature et de la puissance de la source.

Mais l'émission d'infrasons n'est pas cantonnée aux seuls phénomènes géophysiques. « *On sait aujourd'hui que de nombreuses sources artificielles produisent des ondes acoustiques infrasonores : les explosions nucléaires ou chimiques, le bang des avions supersoniques, mais aussi tous types d'installations industrielles susceptibles de mettre l'air en mouvement* », poursuit Roberto Sabatini. Pompes, systèmes de ventilation, générateurs... et autres éoliennes émettent des infrasons dans des gammes de fréquences qui auront tendance à être plus proches du seuil des 20 Hz.

Une autre propriété des ondes très basses fréquences a très tôt intrigué les scientifiques : leur propension à « jouer les Arlésiennes ». « *Durant la Première Guerre mondiale, l'état-major de l'armée française a mobilisé des scientifiques pour l'aider à localiser les énormes batteries allemandes, en calculant la direction des tirs, leur temps d'arrivée, etc.*, poursuit François Coulouvrat. *C'est ainsi qu'on a fait une drôle de découverte : à proximité des batteries, on entendait*

---

*“Tous les phénomènes géophysiques sont émetteurs d'infrasons: éruptions volcaniques, séismes, chutes de météorites, tornades, éclairs, aurores boréales...”*

---

1. Unité CNRS/Sorbonne Université. 2. Contrairement aux ondes électromagnétiques capables, elles, de se propager dans le vide. 3. Unité CNRS/Centrale Lyon/Insa Lyon/Université Claude Bernard Lyon 1.



© KIRILL SMIRNOV/STOCK.ADOBE.COM

Éruption au mont Agung, à Bali, le 29 juin 2018. Les infrasons générés par les éruptions volcaniques peuvent faire plusieurs fois le tour de la Terre.

*les tirs, puis plus rien quand on s'éloignait de plusieurs dizaines de kilomètres, puis les tirs se refaisaient entendre à nouveau... De sorte que le fracas de la guerre était audible jusque sur les côtes anglaises, sans que les habitants comprennent d'où ces bruits sourds pouvaient bien provenir. »*

Brisons tout de suite un mythe : il n'y a pas que les éléphants ou les baleines qui entendent les infrasons. Réputées inaudibles par l'humain, les ondes infrasonores sont bel et bien perceptibles par chacun d'entre nous, à condition d'atteindre des niveaux d'intensité suffisamment forts (lire plus loin). « *Le grondement du tonnerre qu'on entend à plusieurs kilomètres de l'éclair n'est autre que la partie infrasonore du spectre sonore produit par l'éclair : les fréquences les plus hautes ayant été absorbées, il ne reste que les fréquences les plus basses* », explique François Coulouvrat.

*“Comment une onde acoustique peut-elle se faire entendre, puis sembler disparaître, pour être à nouveau audible à mesure que la distance grandit ?”*

Mais comment une onde acoustique peut-elle se faire entendre, puis sembler disparaître, pour être à nouveau audible à mesure que la distance grandit ? La fin du XX<sup>e</sup> siècle a vu un regain d'intérêt de la recherche pour le domaine des infrasons, qui a permis de mettre en évidence un deuxième phénomène, essentiel pour comprendre pourquoi les ondes infrasonores semblent varier en intensité sur de grandes distances : la réfraction avec l'altitude.

#### **Une propagation jusqu'à 100 kilomètres d'altitude**

« *Si le bang supersonique du Concorde<sup>4</sup>, riche en infrasons, a suscité pas mal d'études, le vrai bond dans la recherche sur les infrasons vient du réseau mondial de stations de surveillance déployé suite à la signature en 1996 du Traité d'interdiction des essais nucléaires (Tice), explique Roberto Sabatini : au total, 60 stations d'enregistrement infrasonores (l'une des dernières en date a été mise en service en Guadeloupe en 2020), sont capables de détecter les essais nucléaires clandestins n'importe où sur la planète grâce aux infrasons que ceux-ci émettent. »*

4. Le Concorde est l'avion de ligne supersonique exploité par Air France et British Airways entre 1976 et 2003. Le bang lié à son déplacement lui a valu une interdiction de survol du territoire des États-Unis.

Grâce à la quantité d'observations accumulées – les stations infrasonores, qui enregistrent en continu, détectent également tous les phénomènes géophysiques cités plus haut –, les chercheurs ont mis en lumière le rôle des différentes couches de l'atmosphère dans la propagation des infrasons. Explications. Quand une source située au sol émet une onde acoustique, celle-ci part dans toutes les directions, proches du sol, mais aussi vers le ciel, où elle peut monter jusqu'à une altitude d'une centaine de kilomètres pour les fréquences les plus basses. En voyageant dans l'atmosphère, les ondes infrasonores rencontrent un milieu non homogène, où la température et le régime des vents varient en permanence. Ainsi, jusqu'à 11 km d'altitude (troposphère), la température diminue, puis augmente à nouveau entre 11 et 50 km d'altitude (stratosphère) avant de diminuer à nouveau dans la mésosphère, pour réaugmenter brutalement à partir de 90 km (thermosphère).

Or, la température agit directement sur la vitesse de propagation du son, mais aussi sur sa direction. « *Quand l'air se réchauffe, cela augmente la vitesse du son et le dévie vers la verticale, explique François Coulouvrat. Quand il se refroidit, cela diminue la vitesse du son et le rapproche de l'horizontale. Le vent aussi a son influence : suivant qu'il est porteur ou contraire, il va accélérer ou ralentir l'onde sonore, et dévier sa trajectoire.* » Résultat : à force de changements de direction, une partie des ondes sonores envoyées vers l'atmosphère finissent ainsi par retomber vers le sol.

Le grondement du tonnerre qu'on entend à plusieurs kilomètres de l'éclair n'est autre que la partie infrasonore du spectre sonore produit par l'éclair (Darwin, Australie).

*“Quand l'air se réchauffe, cela augmente la vitesse du son et le dévie vers la verticale, quand il se refroidit, cela diminue la vitesse du son et le rapproche de l'horizontale.”*

« *On peut parler de paquets d'ondes sonores, explique Roberto Sabatini. À 250 km de la source, une distance caractéristique pour les infrasons émis dans l'atmosphère, on va d'abord recevoir l'onde acoustique directe, puis un paquet d'ondes venues de la stratosphère (50 km), suivi d'un paquet d'ondes renvoyées de la thermosphère (100 km).* » D'où des émergences plus fortes du son à des distances clefs.

#### Les infrasons comme alerte aux tsunamis

Si le phénomène de réfraction avec l'altitude explique les variations d'intensité sonore dans l'espace et dans le temps, il ouvre aussi à des applications inattendues. « *Le signal qu'on reçoit à une station infrasonore particulière va dépendre de la source et des caractéristiques de l'atmosphère, explique Roberto Sabatini. Or chaque source a une signature acoustique particulière. Donc si l'on connaît la source, telle éruption volcanique ou tel séisme par exemple, on va pouvoir en déduire des informations sur les caractéristiques de l'atmosphère – notamment la vitesse et la direction des vents stratosphériques, des vents qu'on ne sait pas aujourd'hui mesurer directement et qui sont capitaux pour améliorer les modèles climatiques.* »

Les informations infrasonores reçues par les stations du réseau Tice pourraient également permettre une meilleure caractérisation des séismes et, même, constituer des signaux d'alerte. « *Dans le cas des tremblements de terre sous-marins susceptibles de générer des tsunamis, on sait que l'onde du tsunami va moins vite que l'onde sonore dans l'atmosphère, cette dernière pourrait donc être détectée avant que le tsunami ne touche les côtes, ce qui permettrait de prévenir les habitants de l'imminence de la vague, poursuit le scientifique. En réalité, nous commençons à peine à explorer toutes les exploitations possibles de ces signaux infrasonores...* »





Cette station infrasonore située en Antarctique permet de surveiller les essais nucléaires clandestins.

© CTBTO

Mais si les infrasons constituent un outil de recherche prometteur pour les physiciens spécialistes de l'atmosphère, ils génèrent aussi des inquiétudes sur la terre ferme, alors que la multiplication des sources industrielles potentiellement émettrices – et notamment l'essor de l'éolien – pose la question de la perception par l'humain des ondes infrasonores, mais aussi celle de leurs effets potentiels sur la santé.

#### Un dispositif pour étudier la perception humaine

Un terme, notamment, fait régulièrement irruption dans les médias planétaires depuis une vingtaine d'années : le « hum », mystérieux vrombissement que seule une fraction de la population percevait. « Des confrères ORL me contactent parfois pour des patients se plaignant d'entendre à leur domicile des bruits basse fréquence dont ils n'arrivent pas à identifier l'origine et que rien ne semble arrêter, pas même l'usage de bouchons d'oreille », rapporte Paul Avan, médecin, directeur du Centre de recherche et d'innovation en audiologie humaine de l'Institut Pasteur (Ceriah).

À ce jour, il existe peu d'études sur la perception des infrasons par l'être humain, mais il est au moins un fait formellement établi par les scientifiques : contrairement à ce que leur nom laisse supposer (le préfixe « infra » prend pour référence l'audition humaine), les infrasons peuvent bel et bien être perçus par l'oreille humaine. « Il est couramment admis que l'humain entend dans une bande de fré-

#### PSYCHO-ACOUSTIQUE

Discipline qui étudie les relations entre un signal acoustique et la perception que l'on en a : forte ou pas, désagréable ou pas...

quences comprise entre 20 Hz et 20 000 Hz, avec une sensibilité extrême aux alentours de 100-200 Hz correspondant à la fréquence fondamentale de la voix humaine et jusqu'à 4000 Hz, explique Sabine Meunier, spécialiste de psychoacoustique au Laboratoire de mécanique et d'acoustique de Marseille<sup>5</sup> (LMA). Mais ces seuils ont été établis à une époque où on savait peu de choses sur les très basses fréquences. En réalité, nous pouvons tous entendre les fréquences au-dessous de 20 Hz, à des niveaux relativement forts qu'on rencontre rarement dans la vie courante, notre oreille étant beaucoup moins sensible dans les très basses fréquences. »

---

*“Des confrères ORL me contactent parfois pour des patients se plaignant d'entendre à leur domicile des bruits basse fréquence dont ils n'arrivent pas à identifier l'origine.”*

Paul Avan, directeur du Ceriah

---



Nous en faisons l'expérience dans la cabine infrasonore dont l'équipe de Sabine Meunier vient tout juste de terminer la construction à Marseille, dans le cadre du projet Ribeolh (Recherche des impacts du bruit des éoliennes sur la santé humaine). Cette « boîte » de 40 mètres cubes, tapissée de haut-parleurs du sol au plafond, a été spécialement conçue pour reproduire des bruits très basses fréquences de forte intensité, jusqu'à 110 décibels. « En tout, 72 haut-parleurs ont été installés, qui peuvent diffuser sur 36 canaux en simultané des fréquences allant de 4 Hz à 3 000 Hz », détaille Ossen El Sawaf, post-doctorant au LMA. « Grâce à ce dispositif, nous allons pouvoir diffuser des bruits d'éoliennes, qu'on sait très riches en infrasons<sup>6</sup>, et plus largement approfondir nos connaissances fondamentales sur la perception des très basses fréquences »,

explique Sabine Meunier.

Pour l'heure, ce sont trois infrasons purs qui nous sont diffusés, à 20 Hz, 12 Hz, et 8 Hz, à différents niveaux d'intensité. La sensation est surprenante : à ces fréquences, très basses, on ne perçoit plus un son continu (une « tonalité », disent les acousticiens), juste un battement régulier. « Pour qu'un infrason soit audible, il faut qu'il ait une intensité minimum, ce qu'on appelle le seuil d'audibilité, explique Sabine Meunier. Ce seuil se situe à 88-90 décibels (dB) pour un son de 20 Hz, à 100 dB pour 12 Hz, et à 110 dB pour 8 Hz... » Des niveaux d'intensité qui seraient perçus comme très forts par l'oreille pour des sons émis dans de plus hautes fréquences : 110 dB, c'est par exemple le bruit ressenti dans le cockpit d'une voiture de course !

Autre particularité que nous expérimentons dans la cabine : dans la gamme infrasonore, il suffit de quelques décibels à peine pour passer d'un son à peine audible à un son perçu comme très fort. « Dans la gamme de fréquences que l'oreille humaine entend le mieux, un son sera perçu comme faible à 20 dB et très fort à 80 dB. Mais à 20 Hz, il suffira de passer de 90 dB à 100 dB pour avoir cette impression de forte augmentation », poursuit Sabine Meunier. Grâce à la cabine et à la trentaine de volontaires qu'elle s'apprête à recevoir, la chercheuse espère en apprendre davantage sur les mécanismes auditifs liés à la perception des infra-

sons. « Il est établi par exemple qu'un son plus large en fréquences a tendance à être perçu comme plus fort qu'un son pur... Est-ce la même chose avec les infrasons ? On sait aussi qu'un son modulé en amplitude est perçu comme plus gênant qu'un son continu, indépendamment de son intensité... »

### Des personnes plus sensibles que d'autres

Partie prenante du projet Ribeolh, Paul Avan cherche, lui, à comprendre la réaction du système auditif lorsqu'il est exposé aux infrasons. « Je vais mesurer les changements physiologiques qui pourraient se produire dans l'oreille interne après une exposition aux infrasons. Aussi bien dans le vestibule, l'organe chargé d'assurer notre équilibre, que dans la cochlée dédiée à l'audition. » Pour rappel, la cochlée, c'est l'organe en forme de spirale logé derrière le tympan, sur lequel se trouvent les cellules auditives : les cellules ciliées externes chargées d'amplifier le son reçu, et les cellules ciliées internes qui le transforment en signal électrique, transmis au cerveau. « La cochlée, c'est un peu comme un piano. Les sons aigus vont exciter seulement le bas de la cochlée, quand les sons graves, les basses fréquences, vont l'exciter sur toute sa longueur, soit deux tours et demi de spire chez l'humain », explique Paul Avan, qui cherche notamment à établir si un infrason reçu par l'oreille interne, mais resté inaudible, excite la cochlée de la même façon qu'un infrason entendu par le sujet<sup>7</sup>.

Le médecin prévoit, dans un deuxième volet de l'étude, de se focaliser sur les personnes plus sensibles aux infra-

Afin d'étudier la perception des infrasons, l'équipe du LMA, à Marseille, a mis au point cette cabine sonore, équipée de 72 haut-parleurs.



© LAURE GAILLOCE

5. Unité CNRS/Aix-Marseille Université/Centrale Méditerranée. 6. Le bruit éolien est un bruit à large bande de fréquences, qui va de moins de 10 Hz à plus de 3 000 Hz. C'est un bruit « rose », qui a plus d'intensité dans les infrasons et les basses fréquences que dans les hautes fréquences. 7. Dans le cadre du projet Ribeolh, une étude de gêne et une étude épidémiologique seront également conduites afin de déterminer si le bruit éolien a un impact sur la santé.

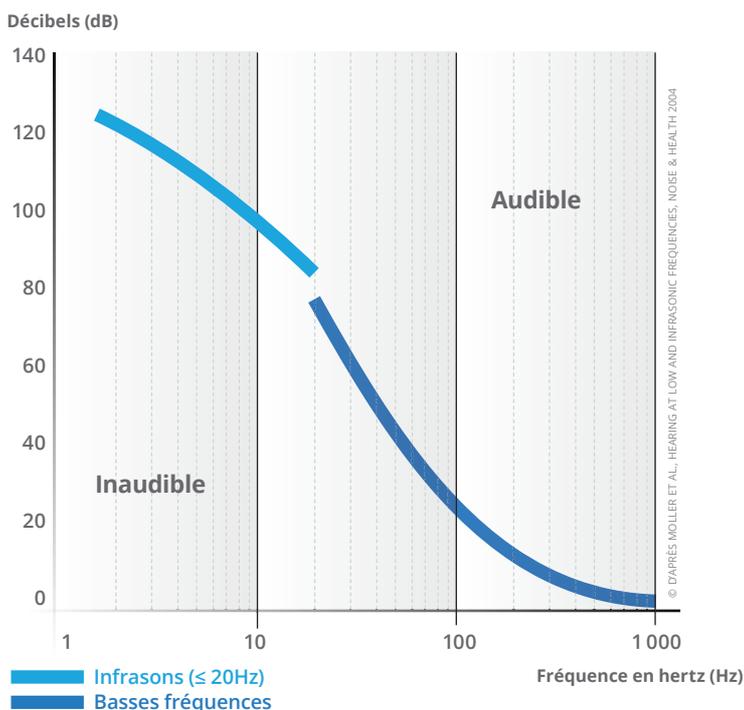
sons, celles dont on pense que le seuil d'audibilité est un peu plus bas que la moyenne de la population, et qui ressentent une gêne quand d'autres n'entendent tout simplement rien. « *Nous aimerions identifier les facteurs à l'origine de cette différence de perception : une particularité anatomique, par exemple une cochlée un peu plus longue, en est-elle la cause ? Une perturbation de l'endolymphe, le liquide qui baigne l'oreille interne, pourrait aussi expliquer cette plus grande sensibilité* », avance le scientifique.

### Mieux prédire le bruit des installations industrielles

Problème : les infrasons sont aujourd'hui l'angle mort de la réglementation sur le bruit dans de nombreux pays, dont la France. « *En France, le bruit environnemental est essentiellement mesuré en décibels "pondérés" A (dB A). Ce système de pondération permet de tenir compte de la plus grande sensibilité de l'oreille à certaines fréquences, en leur donnant un plus grand poids, afin d'évaluer la gêne réelle occasionnée par des bruits comme le trafic routier, la circulation des trains, un concert... Or cette pondération A n'est pas adaptée aux fréquences situées au-dessous de 125 Hz, car elle applique un filtre qui les atténue fortement* », explique David Ecotière, directeur adjoint de l'Unité mixte de recherche en acoustique environnementale<sup>8</sup> (Umrae) et spécialiste de la propagation du son en milieu extérieur. « *Généralement, quand nous, chercheurs, faisons des mesures d'infrasons, nous présentons nos résultats en décibels non pondérés.* » Le scientifique pointe également le matériel

### SEUILS D'AUDITION DANS LES BASSES FRÉQUENCES

L'oreille humaine entend moins bien les sons dans les très basses fréquences. Ainsi, les infrasons sont audibles seulement à des intensités très fortes, au-dessus de 80-90 décibels (dB).



© SIMON BIANCHETTI/CEREMA

souvent inadapté des bureaux d'étude sollicités pour réaliser les études de bruit environnemental, qui n'a pas la sensibilité requise dans les très basses fréquences.

Autre maillon faible, selon le scientifique : la variabilité des niveaux sonores est mal prise en compte lors des études préalables à l'implantation de nouvelles installations industrielles, notamment les parcs éoliens. « *Or on sait combien la topographie du lieu, mais aussi les conditions atmosphériques locales, vent, gradient de température, et enfin la nature du sol (dur ou pas, mouillé ou pas...), peuvent influencer sur le niveau de bruit perçu par les riverains de ces installations.* » Et de citer l'exemple de ce circuit de karting, où une mission d'expertise a été conduite : des mesures faites chez un riverain habitant à 800 m du circuit ont mis en évidence une différence de 15 dBA en fonction des conditions de vent et de température, à émission sonore équivalente.

« *Le vent contraire a tendance à dévier les ondes sonores vers le ciel, quand un vent porteur les rabattra vers le sol et augmentera le niveau de bruit. Le gradient de température, c'est-à-dire la différence de température entre le sol et l'air,*

8. Unité Université Gustave Eiffel/Cerema. 9. Un outil sera prochainement mis en ligne sur le site du projet Pibe (<https://www.anr-pibe.com/>) pour estimer la variabilité sonore d'un projet éolien.



Les scientifiques du projet Pibe ont mesuré le bruit généré par ce champ d'éoliennes d'Eure-et-Loir durant 410 jours.

*aura aussi pour effet de dévier l'onde sonore ou au contraire de la rabattre*», détaille David Ecotièrre. Ainsi la nuit, propice aux inversions thermiques entre le sol et l'air, a généralement pour effet de rabattre les sons vers le sol et d'augmenter le niveau de bruit autour de la source sonore. « *Cela vaut pour les hautes fréquences comme pour les infrasons* », précise le scientifique.

Avec leurs pales de 50 m de long – soit une envergure totale de 100 m – les éoliennes se trouvent dans un cas particulier : du fait de ses dimensions, un dispositif de ce type peut se trouver simultanément exposé à des conditions de vent et de température différentes, ce qui rend les modèles de prédiction de bruit particulièrement difficiles

---

*“S’il s’avérait que les infrasons ont un impact sur la santé, alors la législation sur le bruit et les normes en vigueur devraient fortement évoluer.”*

---

à établir, témoigne le scientifique, qui coordonne depuis 2019 un vaste projet sur le bruit éolien : Pibe (pour Prévoir l'impact du bruit des éoliennes). « *Nous avons enregistré en continu un champ de huit éoliennes durant 410 jours, à différentes distances, et dans toutes les configurations atmosphériques possibles* », raconte le chercheur. Une base de données unique au monde, qui va notamment permettre de mieux prévoir le niveau de bruit d'un projet éolien, en y intégrant la notion de variabilité (tel niveau sonore envisagé, à + ou – tant de décibels)<sup>9</sup>, et sera également mise à disposition de toute la communauté scientifique.

En attendant, ces enregistrements réalisés *in situ* ont été fournis à Sabine Meunier et ses collègues, et seront diffusés dans la cabine infrasonore du LMA à Marseille afin de faire progresser la connaissance sur la perception des infrasons et très basses fréquences. Et d'y voir plus clair sur ces ondes acoustiques trop peu étudiées. « *Les infrasons suscitent beaucoup de fantasmes. On ne les voit pas, la plupart du temps on ne les entend pas, et leur propagation sur de longues distances rend l'identification de leur source parfois difficile*, résume David Ecotièrre. *Mais s'il s'avérait qu'ils ont un impact sur la santé, alors la législation sur le bruit et les normes en vigueur devraient fortement évoluer.* » ||

**D**u parc national des Pyrénées au parc naturel régional de la Baie de Somme, en passant par les forêts du Doubs ou d'Armorique, des micros fixés aux arbres enregistrent depuis le mois de mars les sons de 101 forêts protégées en France. Oiseaux, mammifères, insectes... mais aussi tronçonneuses, voix humaines, moteurs d'avions : aucun son ne peut leur échapper ! Objectif de ces enregistrements, réalisés dans le cadre du projet Sonosylva<sup>1</sup> : dresser un inventaire des espèces animales présentes en forêt et en suivre l'évolution sur le temps long, mais aussi évaluer le niveau de pollution sonore d'origine humaine et son impact sur ces écosystèmes.

Alors que la biodiversité d'un territoire est traditionnellement évaluée à partir d'observations visuelles, ou en capturant (pour les relâcher ensuite) les différentes espèces qui y vivent, Jérôme Sueur, chercheur à l'Institut de systématique, évolution, biodiversité<sup>2</sup> et initiateur du projet, part de l'hypothèse que la complexité sonore d'un paysage est le reflet de sa biodiversité : plus un enregistrement est riche en sons, plus on peut supposer que le nombre d'espèces animales présentes est important. Avantage de ces enregistrements sur les méthodes plus classiques de recensement : « *Ils permettent de dépasser les observations très informatives mais souvent ponctuelles des inventaires classiques de la biodiversité*, explique Jérôme Sueur, *et offrent des possibilités de suivi des écosystèmes sur un temps plus long et des territoires plus vastes. Non invasifs, ils permettent d'observer sans perturber le milieu.* »

### 101 magnétophones installés

Le scientifique est l'un des pionniers en France de l'éco-acoustique, une discipline récente qui, comme la bio-acoustique, étudie les manifestations sonores des animaux, mais qui à la différence de celle-ci ne se focalise pas sur une seule espèce : « *Par exemple, quand la bio-acoustique enregistre uniquement les sons produits par le pinson, l'éco-acoustique prendra en compte toute la "forêt" du pinson, c'est-à-dire l'ensemble des sons présents dans son environnement.* » Les 101 magnétophones installés – un par forêt, donc – enregistrent une minute de son tous les quarts d'heure, un jour sur deux, de mars à septembre, trois saisons d'enregistrement étant prévues entre 2024 et 2026.

Centré à la fois sur les sons de la nature et ceux d'origine humaine, le projet Sonosylva devra notamment confirmer l'impact de la pollution sonore sur les écosystèmes écoutés. Les enregistrements seront ainsi classés parmi quatre grandes catégories de sons : la « biophonie », qui regroupe les sons émanant du vivant (chant des oiseaux, stridulations des insectes), la « géophonie », qui comprend les sons naturels non liés à des corps vivants



# Écouter les paysages forestiers

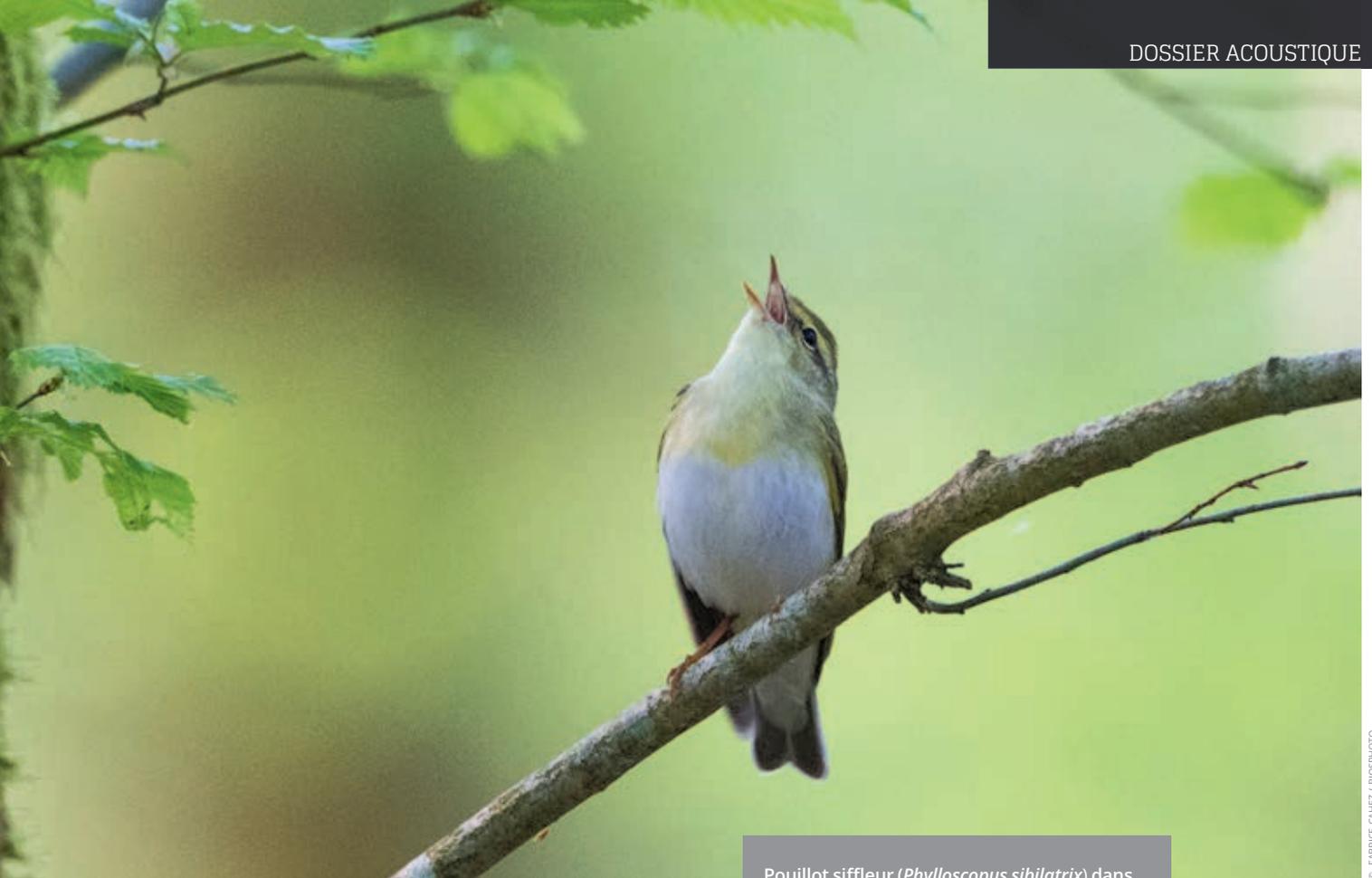
Poser des micros dans les forêts françaises pour y recenser la biodiversité : c'est l'ambition du projet Sonosylva, qui a démarré au printemps. Ou comment les paysages sonores révèlent la présence des espèces animales, mais aussi l'impact des activités humaines dans un milieu déjà sous pression.

PAR MARIE PRIVÉ

(vent, pluie...), la « technophonie », qui correspond aux sons produits par les activités humaines (transports, agriculture...), et enfin « l'anthropophonie », qui rassemble les voix humaines, que les chercheurs rendront inintelligibles par souci d'anonymisation.

C'est que la pollution sonore n'est pas sans conséquence pour les espèces animales. Les chants d'oiseaux, les stridulations d'insectes, les coassements de grenouilles et autres vocalisations émises sont essentielles à leur survie. Or, les bruits d'origine humaine brouillent les messages en cassant les modulations d'amplitude, de temps et de fréquence. « *Briser la communication, c'est potentiellement rompre un lien de survie entre des parents et des jeunes affamés, c'est empêcher la reproduction, nuire aux liens familiaux et sociaux* », explique Jérôme Sueur. Pour déterminer si, et comment le bruit d'origine humaine perturbe les espèces dans les forêts étudiées par Sonosylva, les chercheurs devront traiter les informations contenues

1. Le projet Sonosylva s'inscrit dans le programme national de surveillance de la biodiversité terrestre. Il est porté par l'Office français de la biodiversité et le Muséum national d'histoire naturelle de Paris. Pour en savoir plus : [sonosylva.cnrs.fr](http://sonosylva.cnrs.fr) 2. Unité CNRS/EPHE-PSL/MNHN/Sorbonne Université.



Pouillot siffleur (*Phylloscopus sibilatrix*) dans une hêtraie vosgienne. La complexité sonore d'un paysage est le reflet de sa biodiversité.

© FABRICE GANEZ / BICOPHOTO

dans les milliers d'heures d'enregistrements réalisées. Un défi en soi, qui fait partie intégrante des objectifs scientifiques du projet, les logiciels de traitement de l'information sonore étant aujourd'hui encore balbutiants.

### À chaque espèce sa niche acoustique

Plusieurs indices acoustiques seront tout particulièrement traqués dans les enregistrements. Calculée en décibels, la dose de bruit totale reçue sur un temps déterminé permettra ainsi d'estimer le nombre de sources sonores. « Plus elle est élevée, plus il y a de sources sonores dans l'enregistrement, et inversement, indique Sylvain Hauptert, éco-acousticien du projet Sonosylva. On peut calculer cet indice pour différentes gammes de fréquences. Par exemple, on sait qu'entre 0 hertz et 1 000 hertz, on trouvera surtout des sons de la technophonie (moteurs de voiture, d'avion,) ou de la géophonie (bruit du vent, de la pluie...) alors que dans les fréquences plus aiguës, au-delà de 1 000 hertz, on retrouvera des sons de la biophonie comme les chants d'oiseaux. »

Le spectre des fréquences enregistrées sera aussi examiné avec attention. « Plus le nombre d'espèces augmente, plus le spectre des fréquences sur les enregistrements est large », explique Sylvain Hauptert. Une dispersion fréquentielle liée à l'hypothèse de la « niche acoustique », théorisée par l'acousticien américain Bernie Krause : chaque espèce occuperait un canal de communication qui lui est propre et se placerait sur des fréquences plus ou moins aiguës ou graves, permettant de ne pas brouiller le signal des espèces voisines.

Établis pour chaque minute d'enregistrement, ces divers indices permettront de réaliser des cartes sonores faisant apparaître le nombre d'espèces présentes et leur niveau sonore, ainsi que la pollution sonore due aux activités humaines, et d'effectuer des comparaisons entre forêts. Mais il faudra attendre encore avant de pouvoir identifier formellement chaque espèce. « L'application BirdNET développée par l'université de Cornell (États-Unis) et l'université technologique de Chemnitz (Allemagne) répond en partie à ce besoin, explique Sylvain Hauptert. Elle permet d'identifier environ 6 000 espèces animales, oiseaux essentiellement, mais elle n'est pas totalement fiable. » C'est pourquoi un outil d'intelligence artificielle est en cours de développement par le scientifique et son équipe, qui devrait permettre de discriminer les quatre grandes catégories de sons – biophonie, géophonie, technophonie, anthropophonie – et de distinguer des sous-groupes à l'intérieur de chacune.

Couplées aux données météo fournies par Météo-France, les cartes établies par le projet devraient enfin permettre de voir comment les conditions climatiques, crues, canicules, tempêtes, etc., affectent les espèces animales forestières. Une donnée cruciale à l'heure du bouleversement climatique . II



Lire l'intégralité de l'article sur [lejournald.cnrs.fr](http://lejournald.cnrs.fr)

1. De la taille d'une petite voiture pour un poids de près de trois tonnes, cette caméra hors norme produira quotidiennement un volume de données sans précédent. En effet, les scientifiques s'attendent à collecter chaque nuit l'équivalent de 20 téraoctets de données sous la forme d'images. Trois centres de traitement participeront à leur analyse : l'un, géré par CNRS Nucléaire & Particules, est situé à Lyon alors que les deux autres sont basés aux États-Unis et au Royaume-Uni.



# La plus grande caméra numérique jamais conçue !

## UNIVERS

Après avoir mobilisé des centaines de scientifiques au niveau international, dont plusieurs équipes du CNRS, la caméra LSST (pour *Legacy Survey of Space and Time*), plus grande caméra numérique au monde, vient d'arriver au Chili. Installée sur le télescope de l'observatoire Vera-C.-Rubin, elle permettra de quadriller le ciel austral pour étudier et cartographier l'Univers, déterminer la nature de l'énergie noire et de la matière noire, ou encore détecter d'éventuels astéroïdes qui pourraient s'avérer dangereux pour notre planète.

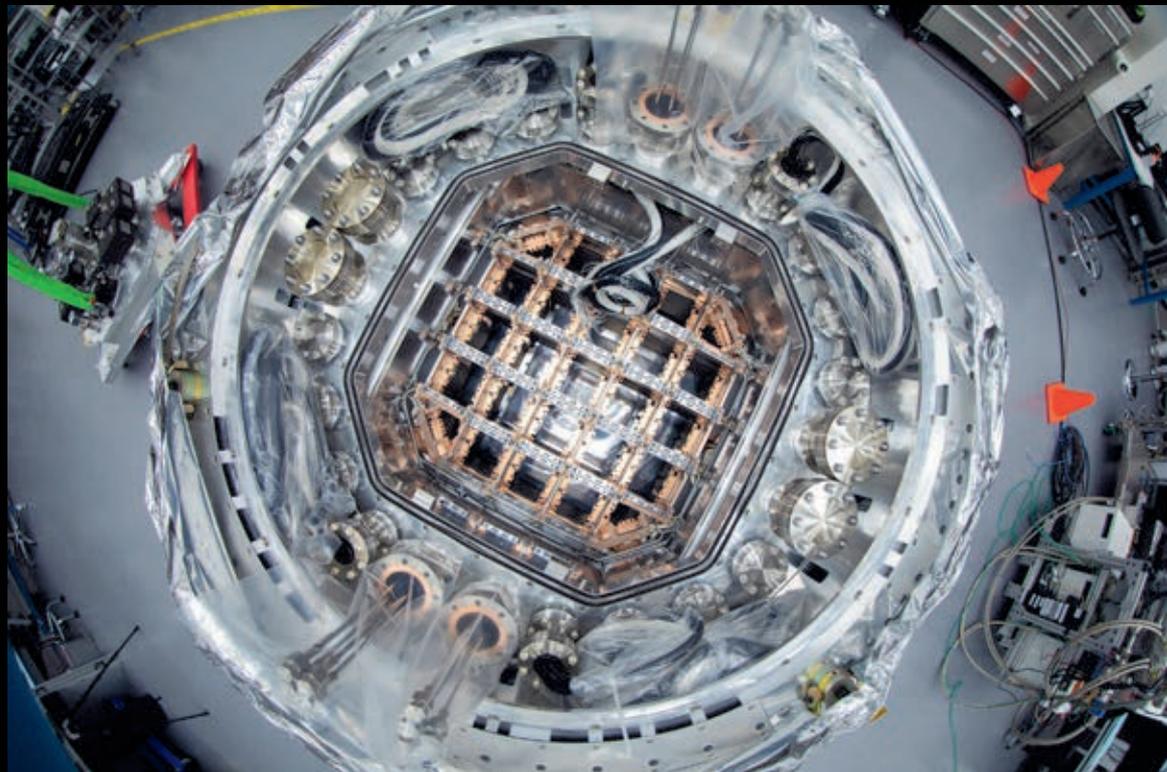
TEXTE PAR MEHDI HARMİ



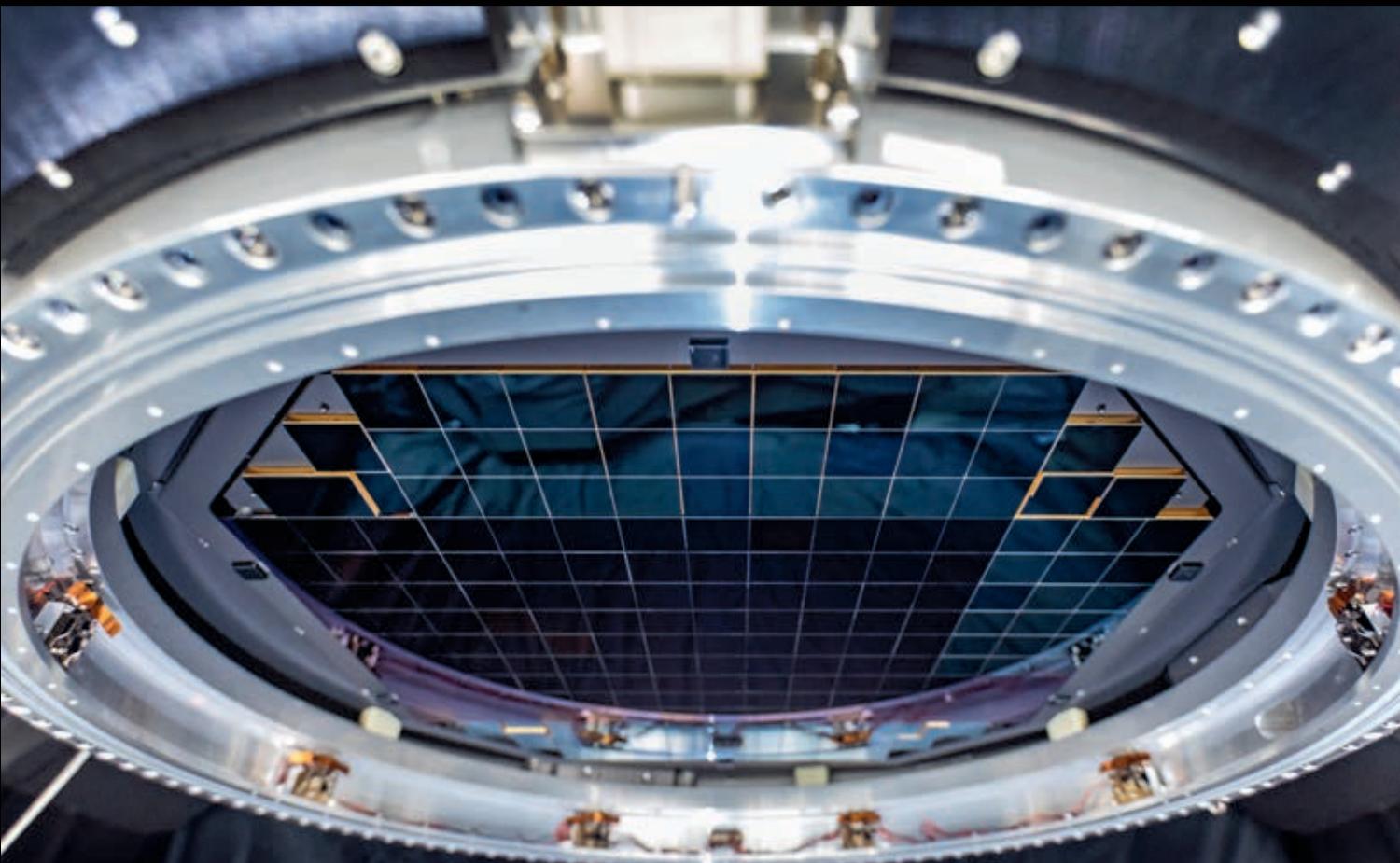
**2.** Le 16 mai 2024, après quelques dizaines de kilomètres de piste à travers la cordillère des Andes, la plus grande caméra numérique jamais assemblée atteint sa destination finale, l'observatoire Vera-C.-Rubin, niché sur le mont Cerro Pachón, au Chili.

© TRAVIS LANGE / SLAC NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY

**3.** Dans les entrailles de la caméra LSST, on découvre l'intérieur du cryostat qui permet de maintenir les différents éléments à une basse température afin d'éviter le bruit parasite sur les images capturées. Sur la grille seront ensuite installés les capteurs qui composeront le plan focal de la caméra.



© ANDY FREEBERG / SLAC NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY



© JACQUELINE RAMSBERGER ORRELL / SLAC NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY

**4.** Le plan focal de la caméra, pourvu d'une mosaïque de 189 capteurs CCD (de 16 mégapixels chacun), permettra de prendre des images composées chacune de 3,2 milliards de pixels. Toutes les 40 secondes, soit 800 fois par nuit, une prise de vue du ciel d'un champ équivalent à la surface de 40 pleines lunes sera effectuée. La qualité des clichés sera telle qu'elle permettra aux scientifiques d'observer des objets astronomiques très peu lumineux et donc très lointains avec une précision sans précédent.

**5.** Une dizaine de laboratoires du CNRS sont impliqués dans la conception de l'instrument géant, et notamment de son changeur de filtres. Ce système robotisé permettra de prendre des images du ciel au travers de différents filtres de couleur, allant de l'ultraviolet à l'infrarouge. L'étude des flux de lumière émis par les objets célestes dans ces six couleurs permettra de déterminer leur distance par rapport à la Terre.



© OLIVIER BONIN / SLAC NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY



© OLIVIER BONIN / SLAC NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY

**6.** L'ensemble des composants de la caméra ont été assemblés au SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) en Californie (États-Unis). Après de longs mois de tests, ils ont été soigneusement emballés puis harnachés dans un conteneur, avant d'embarquer dans un avion-cargo de la compagnie Atlas Air. Pensé pour déplacer des objets hors norme sur de longues distances, il a été affrété spécialement pour transporter la caméra géante jusqu'à Santiago, la capitale du Chili.

© OLIVIER BONIN / SLAC NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY



**7.** Protégée par un étui, la caméra arrive enfin à l'observatoire Vera-C.-Rubin. Immédiatement prise en charge par les ingénieurs sur place, elle fait l'objet d'intenses vérifications afin de s'assurer qu'elle n'a subi aucun dommage durant le transport.



© ALEXANDRE BOUCAUD / CNRS

**8.** Les scientifiques commenceront prochainement à connecter la caméra à la pièce majeure de l'infrastructure : un télescope équipé d'un miroir de 8,4 mètres de diamètre. Ensemble, ils dénicheront et révéleront les corps sombres qui orbitent aux confins de notre Système solaire et tenteront de nous en apprendre plus sur l'énergie noire et la matière noire.

**9.** Le calibrage de l'ensemble des instruments de l'observatoire durera quelques mois avant que ne commence réellement le relevé astronomique, à l'automne 2025. La première lumière captée par le télescope Vera-C.-Rubin (soit le moment où le télescope percevra ses premiers photons) est prévue pour le printemps de la même année.



© OLIVIER BONIN / SLAC NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY

Dans le cadre du plan France 2030, le CNRS dévoile la mise en place de son nouveau programme qui vise à détecter et soutenir des projets scientifiques audacieux, capables de provoquer des avancées technologiques majeures.

PAR LAURENCE STENVOT

# À la recherche du risque

Avec le CEA, Inrae, Inria et l'Inserm, le CNRS fait partie des cinq organismes de recherche à déployer un programme « Recherche à risque » de France 2030<sup>1</sup>, impulsé par l'État depuis janvier 2024. Le CNRS a lancé le programme « Recherche à risque et à impact » – ou « (RI)<sup>2</sup> » – avec l'objectif de détecter très en amont les recherches fondamentales ou innovantes qui pourraient générer des ruptures, conceptuelles ou technologiques, stratégiques pour la France dans la compétition internationale des prochaines décennies. Douze projets ont été sélectionnés au CNRS dans le cadre de ce programme (lire encadré p. 37). « *Le CNRS a toujours souligné l'importance de la recherche fondamentale, socle de la recherche à risque, à l'origine des connaissances qui ont bâti nos sociétés. Ce nouveau programme confirme et réaffirme qu'il n'y a pas d'opposition entre recherche fondamentale et recherche à impact. Bien au contraire* », explique Antoine Petit, président-directeur général du CNRS.

## Financer une recherche « risquée et osée »

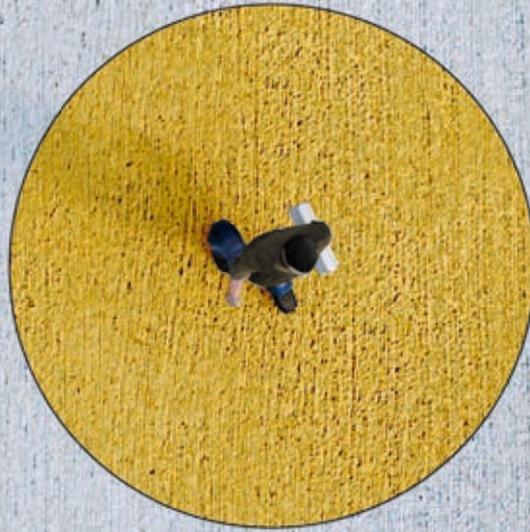
Le programme « Recherche à risque », doté d'un budget de 150 millions d'euros, dont 40 millions d'euros alloués au CNRS, vient notamment compléter les programmes nationaux, par exemple, les Programmes et équipements prioritaires de recherche<sup>2</sup> (PEPR), mais également ouvrir de nouvelles thématiques. Car si les PEPR ont une notion de programme – avec un thème central et des verrous identifiés –, « Recherche à risque » se focalise sur une idée d'un ou d'une scientifique, ou d'un groupe de scientifiques, qui apporterait une réponse inédite à une question précise.

« *Le CNRS a repéré notre équipe après des discussions autour d'un programme sur les fluides, pour déposer quelque chose de plus risqué* », rapporte Bérengère Dubrulle, directrice de

recherche au CNRS, au Service de physique de l'état condensé<sup>3</sup>, et récente lauréate du programme (RI)<sup>2</sup>. Pour son projet, cette spécialiste de la turbulence, élue Femme scientifique de l'année 2022, est repartie d'une question vieille de vingt ans sur les bifurcations spontanées<sup>4</sup>. Son objectif ? Être capable de prédire l'imprévisible dans des phénomènes en particulier climatiques, extrêmes, rares et sur des échelles de temps généralement très longues par rapport aux temps caractéristiques de la dynamique des fluides : « *ce genre de questions est tellement risqué et osé que je n'ai jamais pu financer des recherches par les moyens actuels*. » Car l'objectif du programme « Recherche à risque et à impact » du CNRS est bien

*“Le CNRS a toujours souligné l'importance de la recherche fondamentale, socle de la recherche à risque, à l'origine des connaissances qui ont bâti nos sociétés.”*

Antoine Petit, président-directeur général du CNRS



© EONEREN / STOCK.ADOBE.COM

de se positionner en avant-garde et de financer des projets qui n'auraient pas trouvé preneur au niveau national ou européen. À l'image de Jérôme Casas et de son projet de nez bioinspiré (lire p. 37), refusé en 2019 par le dispositif européen du Conseil européen de la recherche (ERC). « *Il existe un vrai risque scientifique et technologique... L'idée des phéromones sexuelles semblait tirée par les cheveux* », explique l'écologue dont le projet étudie comment les animaux, notamment les insectes, détectent des molécules en très petite concentration dans l'air, un processus encore mal compris.

### « Un format idéal pour les scientifiques »

Le CNRS a donc fait le choix de destiner ces moyens à des projets qui pourraient faire sauter des verrous et révolutionner un ou plusieurs domaines, mais dont le soutien financier est, en quelque sorte, un pari scientifique. « *Ce sont des projets que nous n'arrivions pas à financer avec les instruments existants. Nous permettons d'ouvrir de nouvelles voies avec ces projets* », explique Frédéric Villiéras, directeur de la Mission programmes nationaux (MiPN) du CNRS.

La spécificité du programme réside également dans sa simplification. Pour repérer et sélectionner les projets (RI)<sup>2</sup>, il n'y a pas d'appel à projets. On se base sur l'expérience des

responsables scientifiques nationaux de l'organisme qui sillonnent la France toute l'année pour parler science, accompagner et soutenir les équipes en laboratoires, repérer les futures pépites. « *Un format idéal pour les scientifiques à plusieurs égards et où il n'est question que de science* », rapporte Bérengère Dubrulle. Le dispositif est également simplifié en termes de suivi car qui dit recherche à risque, dit agilité. L'esprit ici est très différent des programmes d'investissements d'avenir<sup>5</sup> où l'usage des moyens doit être justifié en détail. (RI)<sup>2</sup> fonctionne de manière expérimentale sur un format forfaitaire, axé uniquement sur le suivi scientifique. « *C'était une demande des établissements et cela va soulager les équipes* », indique le directeur de la MiPN. Un modèle de simplification qui pourrait être appliqué à d'autres programmes de recherche...

Le CNRS financera donc des projets d'envergure, d'environ 2 à 3 millions d'euros chacun. Le programme est prévu en deux étapes. Pendant la première, la phase de démonstration, l'idée ou l'intuition est testée et évaluée, avec un « go/no go » à mi-parcours, soit deux ans. Si la démonstration est positive, place à la seconde phase qui permet de mener le projet à son terme (à 5 ans). « *Cela signifie une dizaine de projets lauréats pour plus de 100 000 chercheurs et chercheuses – car le*

1. Plan d'investissement lancé en 2021 par le président Emmanuel Macron pour répondre aux grands défis de notre temps. 2. Les PEPR concernent des domaines prioritaires sélectionnés et financés par l'État avec un budget de 3 milliards d'euros. Le CNRS copilote les trois quarts de la cinquantaine de programmes lancés, notamment la totalité des PEPR dit « exploratoires » qui visent à accompagner une transformation qui commence à émerger. 3. Unité CNRS/CEA. 4. Une bifurcation intervient lorsqu'un petit changement d'un paramètre physique produit un changement majeur dans l'organisation du système. Lors d'une bifurcation spontanée, l'organisation du système se modifie sans paramètre extérieur de changement. 5. Le PIA est une initiative lancée par l'État français en 2010 dans le but de financer des projets innovants et stratégiques pour l'avenir du pays.

programme a été monté en s'appuyant sur tous les laboratoires du CNRS et n'est pas réservé aux seuls scientifiques CNRS, explique Alain Schuhl, directeur général délégué à la science du CNRS. Les décisions de pré-sélection ont été volontairement prises au travers des dix instituts du CNRS, pour capitaliser notamment sur le travail de prospective mené au sein du CNRS et les travaux des Commissions spécialisées inter-organismes, et avec nos partenaires universitaires dans nos unités mixtes de recherche communes. »

### Douze projets annonçant des révolutions

Pour renforcer les chances de lever des verrous scientifiques ou industriels sur des sujets émergents, les douze projets sélectionnés sont portés par des « scientifiques, femmes ou hommes déjà repérés et ayant marqué l'histoire de la recherche en France, décrit Alain Schuhl. Ces projets sont menés par des chercheuses et des chercheurs qui ont acquis une expérience et une expertise mondialement reconnues dans leur domaine. »

Si le CNRS a cherché le risque dans ses sélections, il a aussi voulu privilégier des projets à impact scientifique, technologique ou sociétal. Et les projets lauréats annoncent des révolutions ! Par exemple, celui coordonné par Bérengère Dubrulle pourrait permettre le développement de nouvelles intelligences artificielles (IA) neuromorphologiques. Celles-ci

Bérengère Dubrulle, ici au Service de physique de l'état condensé, mène le projet « Turbulence extrême : prédire l'imprévisible ».



© FRÉDÉRIQUE PLAS/CNRS IMAGES



© PHOTO ANDREW PASTUZANDORF/ADMIS, CC BY-SA 3.0

L'Interface Message Processor (IMP) est au cœur du premier réseau informatique américain Arpanet en 1969.

## La Darpa, quintessence de la recherche à risque

La Darpa a été créée en pleine course à l'armement, en février 1958, par le président Eisenhower en réponse au lancement soviétique du satellite Spoutnik 1. Célèbre pour ses projets audacieux et sa capacité à transformer des idées innovantes en réalités concrètes, comme internet ou le Système mondial de positionnement (GPS), elle semble l'exemple parfait de la recherche à risque réussie. L'indicateur même qu'aime à donner la Darpa est son pourcentage de projets qui n'aboutissent pas : 80 %.

« C'est cela la recherche à risque. La notion d'échec fait partie du jeu. L'idée est d'être prêt à investir des millions de dollars car ce que l'on cherche c'est l'innovation qui va transformer la société », explique Mireille Guyader, conseillère science et technologie à l'ambassade de France aux États-Unis. Et Jérôme Casas, porteur du projet « Innover en agroécologie et dans la lutte anti-terroriste », d'ajouter : « En plus du produit fini, c'est l'idée de mobiliser et maintenir à flot des esprits brillants qui intéresse la Darpa ».

fonctionneraient à partir des différences ou des liens entre les objets, créant ainsi une nouvelle forme d'IA plus proche du fonctionnement neuronal.

Sur le plan sociétal, le transfert de connaissances dans les sciences du climat et de l'environnement pourrait aboutir à un système de prédiction d'événements extrêmes. « Il se dit que certains oiseaux marins détectent les tempêtes avant les systèmes de prévision classiques comme Météo France, grâce à leur capacité à détecter des changements infimes de leur environnement », cite en exemple Bérengère Dubrulle. Exploiter cette idée pourrait révolutionner notre approche de la prévision climatique et environnementale. Pour Jean-Luc

6. Jean-Luc Moullet a été nommé directeur de cabinet auprès de Patrick Hetzel, ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, le 23 septembre 2024. 7. Agence du Département de la Défense des États-Unis, chargée de la recherche et développement des nouvelles technologies destinées à un usage militaire. 8. Ces bourses permettent à des scientifiques, reconnus dans leur domaine aux niveaux national et international, de mener des projets novateurs à haut risque qui ouvrent de nouvelles voies dans leur discipline ou dans d'autres domaines.



Thomas Ebbesen, ici en 2019 en compagnie de Kripa Joseph, porte le projet « Chimie polaritonique et matériaux polaritoniques ».

Moulet<sup>6</sup>, directeur général délégué à l'innovation du CNRS, « le programme "Recherche à risque et à impact" permet un vrai continuum entre recherche et innovation ». Et alors que les recherches du programme (RI)<sup>2</sup> ne sont « pas des projets de recherche appliquée », rappelle Alain Schuhl, le CNRS met en place un chemin de valorisation pour transférer vers l'industrie les résultats de ces recherches si elles aboutissent.

### L'ERC, moulin de la recherche à risque ?

Car ce dispositif fait partie d'une nouvelle dynamique voulue par l'État et inspirée des États-Unis et de la Darpa<sup>7</sup> (pour *Defense Advanced Research Projects Agency*, lire encadré), peut-être la plus célèbre des agences de projets de recherche avancés américaines (Arpa). Le projet porté par Thomas Ebbesen, lauréat du programme (RI)<sup>2</sup> du CNRS, symbolise un domaine émergent qui a déjà attiré l'intérêt de l'agence stratégique américaine. « La Darpa m'a contacté dès la parution, en 2012, de notre première démonstration que les principes de l'électrodynamique quantique pouvaient être utilisés pour influencer la chimie. J'ai été impressionné par leur capacité de veille hors norme. Puis en 2021, cette agence a lancé un programme de recherche pour encourager les chercheurs américains à explorer ce nouveau domaine », souligne le chimiste, qui a reçu la médaille d'or du CNRS 2019, réaffirmant l'importance de ne pas laisser s'échapper de France son idée qui vise à modifier les propriétés de la matière.

Et si l'Europe permettait de rivaliser avec les budgets états-uniens ? Pour Thomas Ebbesen, dont le projet a obtenu en 2008 et 2018 deux bourses ERC *Advanced*<sup>8</sup>, le Conseil européen de la recherche (ERC) est « le moulin de la recherche à risque européen ». Pilier de la recherche fondamentale du programme de recherche et d'innovation de l'Union européenne au taux d'acceptation très faible, l'ERC vise à financer des projets de recherche exploratoire, aux frontières de la connaissance. « J'ai en partie "dériské" les idées derrière mon projet avec mes ERC. À l'époque, on ne se savait pas si nos re-

## Les 12 projets du programme (RI)<sup>2</sup> du CNRS

### TURBULENCE EXTRÊME : PRÉDIRE L'IMPRÉVISIBLE

Utiliser une approche neuro-morphologique pour détecter et modéliser les signaux faibles annonçant des événements extrêmes, visant à améliorer la prédiction climatique et la compréhension des systèmes complexes.  
Porteurs : Bérengère Dubrulle, Guillaume Balarac, Mickaël Bourgoïn.

### CHIMIE POLARITONIQUE ET MATÉRIAUX POLARITONIQUES

Explorer l'impact du couplage vibratoire fort sur la réactivité chimique et les propriétés des matériaux, offrant un nouveau moyen de transformer les propriétés fondamentales des matériaux.  
Porteurs : Thomas Ebbesen, Cristiano Ciuti, Cyriaque Genet.

### TRANSITION EDGE SENSOR FOR DARK MATTER

Un détecteur innovant au Laboratoire souterrain de Modane cherche à traquer la matière noire avec une sensibilité accrue, étendant la recherche sur plus de 12 ordres de grandeur en masse et pouvant également

détecter les antineutrinos de réacteurs nucléaires.

Porteurs : Julien Billard, Stefanos Marnieros, Silvia Scorza.

### NOUVELLES APPROCHES MATHÉMATIQUES POUR DES SYSTÈMES QUANTIQUES EN INTERACTION

Accélérer le transfert des idées mathématiques vers la chimie et la physique, avec des impacts notables sur les technologies quantiques et la simulation à l'échelle moléculaire.

Porteurs : Mathieu Lewin, Éric Cancès, Julien Toulouse.

### INNOVER EN AGROÉCOLOGIE ET DANS LA LUTTE ANTI-TERRORISTE

Explorer les mécanismes de transport et de surface cuticulaire de l'olfaction pour améliorer la détection des explosifs et optimiser l'utilisation des phéromones dans la gestion des ravageurs agricoles.

Porteur : Jérôme Casas

### DÉVELOPPER LA PROTÉOMIQUE SPATIALE SUR CELLULE UNIQUE

Développer une méthode d'analyse des protéines ...

“Les douze projets sélectionnés sont menés par des chercheuses et des chercheurs qui ont acquis une expérience et une expertise mondialement reconnues dans leur domaine.”

Alain Schuhl, directeur général délégué à la science du CNRS

cherches allaient donner des résultats», explique le chimiste. Car en effet, l'ERC a un critère de sélection : l'excellence scientifique. Point essentiel : ces bourses ne sont pas fléchées sur des thématiques et sont sans attente de résultats à horizon court.

### Vers une Darpa européenne ?

« Le CNRS est le principal bénéficiaire des programmes-cadres européens et plus particulièrement des bourses ERC », décrit Jean-Stéphane Dhersin, directeur du Bureau du CNRS de Bruxelles. Depuis 2007, 14 000 projets ERC dits « blancs<sup>9</sup> » ont été financés et 1 900 sont devenus des ERC *Proof of Concept* (des bourses qui valorisent des résultats de recherche ERC), soit 13 % d'entre eux. « C'est bien la preuve que l'Europe a un système qui sait transformer des projets risqués », ajoute le directeur. Mais peut-être faudrait-il aller plus loin, alors que le président de la République, lors de son discours sur l'Europe à la Sorbonne en avril dernier, affirmait la nécessité « d'aller jusqu'à cette Darpa européenne dont nous ne sommes pas encore pleinement dotés ». Le Conseil européen de l'innovation (EIC), initiative clé d'Horizon Europe et son budget de 10 milliards d'euros pour 2021-2027 qui vise à développer des technologies et innovations de rupture, serait-il une réponse ? Pas en l'état. « Contrairement aux Arpa, qui se concentrent sur les preuves de concept (TRL 3-4)<sup>10</sup>, l'EIC consacre la moitié de son budget à son programme Accélérateur pour des projets de niveau TRL 5 et plus », explique Jean-Stéphane Dhersin. En effet, selon un rapport récent, seulement 5 % du budget total d'Horizon Europe soutient des innovations de rupture éloignées de l'application commerciale<sup>11</sup>.

Les discussions autour du futur programme-cadre pour la recherche et l'innovation FP10 (10<sup>th</sup> Framework Program), successeur de l'actuel Horizon Europe à partir de 2028, seront déterminantes pour l'avenir de l'innovation en Europe. « Le CNRS a affirmé l'importance de projets à plus bas TRL et donc plus risqués au sein des trois piliers<sup>12</sup> du futur programme », souligne Jean-Stéphane Dhersin. II

...

cellulaires qui conserve les informations de leur micro-environnement, avec des applications potentielles en médecine et recherche en virologie, neurobiologie, et au-delà...

Porteurs : Raphael Gaudin, Myriam Ferro, Jean-Christophe Olivo-Marin.

### DÉMONSTRATION D'UN ACCÉLÉRATEUR DE PARTICULES DE FORTE PUISSANCE À BASSE CONSOMMATION D'ÉNERGIE

Développer un accélérateur linéaire d'électrons à récupération d'énergie (ERL) à Orsay : avec une consommation électrique considérablement réduite, ce démonstrateur offre à la France le leadership européen.

Porteurs : Maud Baylac, Walid Kaabi.

### AUTO-ASSEMBLAGE HIÉRARCHIQUE ET FONCTIONNEL POUR LA CATALYSE HÉTÉROGÈNE ET DYNAMIQUE AUX INTERFACES LIQUIDES CONFINÉES

Développer des fluides complexes (mousses, émulsions) fonctionnalisés par des enzymes, afin de tirer profit de la synergie entre les propriétés physiques de tels fluides et l'activité (bio) chimique des enzymes. Il s'agit de varier les caractéristiques du couple fluide complexe/enzyme pour éliminer des biofilms bactériens ou dégrader/valoriser des microplastiques.

Porteurs : Wiebke Drenckhan, Christophe Chassenieux.

### LA MESURE DISTRIBUÉE PAR FIBRE OPTIQUE HAUTE RÉOLUTION POUR LE SUIVI ENVIRONNEMENTAL

Développer un système avancé de suivi in situ des circulations de fluides dans les milieux souterrains et océaniques afin de

caractériser leur dynamique et les effets liés au changement climatique et/ou aux pressions anthropiques.

Porteurs : Olivier Bour, Anthony Sladen.

### HÉRITAGES LINGUISTIQUES, CULTURES ORALES, ÉDUCATION EN OCÉANIE

Décrire la diversité des langues du Pacifique – langues de l'oralité, aujourd'hui vulnérables – et étudier leur transmission en contexte multilingue, tout en les situant parmi les tendances universelles du langage.

Porteurs : Jacques Vernaudo, Alejandrina Cristia, Alexandre François, Marie Salaun.

### L'ÉCOCATALYSE AU PALLADIUM

Le projet consiste en une approche interdisciplinaire, intégrée et durable de la synthèse des principes actifs de l'industrie pharmaceutique, avec des applications potentielles dans le domaine de l'oncologie.

Porteurs : Claude Grison, Peter Hesemann.

### CALCUL MOLÉCULAIRE : DES CIRCUITS MOLÉCULAIRES À L'ORDINATEUR SUR ADN

Explorer le calcul moléculaire sur ADN, permettant de faire des requêtes sur des grandes masses de données structurées. L'objectif est de réaliser une preuve de concept d'un ordinateur moléculaire – codage de données, implémentation d'instructions agissant sur les données et lecture des résultats – et d'en mesurer l'impact environnemental. Il s'agit en particulier d'implémenter des algorithmes manipulant des graphes de métadonnées 100 fois plus grands que l'état de l'art.

Porteurs : Anthony Genot, Nicolas Schabanel.

9. Ces ERC regroupent les bourses *Starting*, *Consolidator*, *Advanced* et *Synergy* qui financent des projets de recherche fondamentale, non fléchés sur des thématiques et sans attente de résultat de court terme. 10. L'échelle TRL vise à évaluer sur une grille allant de 1 à 9 (stade le plus élevé) le niveau de maturité technologique d'un projet. L'appel *Accelerator* a pour objectif de soutenir des start-up et petites entreprises afin de développer leurs innovations de premier ordre. 11. Selon le rapport "EU Innovation policy, how to escape the middle technology trap du European Policy Analysis Group". 12. Trois piliers composent Horizon Europe : le premier, « Excellence scientifique », consacré à la recherche fondamentale, avec l'ERC, les actions Marie Skłodowska-Curie et les Infrastructures de recherche ; le deuxième, « Problématiques mondiales et compétitivité industrielle européenne », pour soutenir de grands projets collaboratifs, avec une organisation en « clusters », centralise la plus grosse part des financements avec 53,5 milliards d'euros ; le troisième pilier est le Conseil européen de l'innovation (EIC).

# EN ACTION



*À la recherche d'un sens perdu,  
d'une planète manquante et d'un  
sarcophage pharaonique.*

ILLUSTRATION : JEKATERINA BUDRYTE POUR CNRS LE JOURNAL



# On a retrouvé le sarcophage de Ramsès II

SOCIÉTÉS

**ARCHÉOLOGIE** Mystère irrésolu jusqu'ici, le sarcophage du célèbre pharaon a finalement été identifié grâce à un fragment de granit découvert à Abydos, en Égypte... en 2009. Le réexamen de cette pièce énigmatique par l'égyptologue Frédéric Payraudeau atteste qu'elle appartient bel et bien au sarcophage tant recherché.

PAR MARIE PRIVÉ

Si l'exposition événement « Ramsès et l'or des pharaons » présentée en 2023 à Paris a permis aux visiteurs d'admirer le cercueil de Ramsès II (sa momie est exposée au Caire, au musée national de la civilisation égyptienne), ses sarcophages, eux, n'avaient jamais été présentés au public. Et pour cause : les quelques éléments du sarcophage d'albâtre retrouvés dans la tombe de Ramsès II dans la vallée des Rois, près de Louxor, avaient été fracassés par les pillards, ne laissant intacts que de minuscules morceaux semblables à des pièces de puzzle. Quant au sarcophage de granit qui aurait dû le contenir, il était introuvable...

C'est bel et bien un élément de ce deuxième sarcophage qui vient d'être identifié, et pas des moindres, puisqu'il s'agit d'un fragment de granit gravé et décoré, mesurant

1,70 mètre de long pour 8 centimètres d'épaisseur. « C'est quasiment un côté entier du sarcophage, auquel il manque juste les courbures que les pillards ont dû casser, sans doute à la fin de l'Antiquité, pour ne garder que la partie plate et le réutiliser comme dallage », explique Frédéric Payraudeau, égyptologue au laboratoire Orient et Méditerranée<sup>1</sup>, qui a formellement identifié le fragment.

## Un sarcophage réutilisé

Cette découverte s'est faite d'une manière inhabituelle : en effet, l'égyptologue n'a pas lui-même trouvé le sarcophage. C'est un archéologue égyptien, Ayman Damrani, qui l'a découvert en 2009 dans le sol d'un monastère copte de la région d'Abydos, au centre de l'Égypte. Avec l'aide d'un collègue américain, Kevin Cahail, ils ont publié

► Le cercueil en bois de Ramsès II lors de l'exposition « Ramsès. L'or des pharaons », en Australie, en novembre 2023.



© KEVIN CAHILL

en 2017 les résultats de l'examen des textes et du décor du fragment, concluant qu'il s'agissait d'un sarcophage ayant été utilisé plusieurs fois, notamment pour un grand prêtre de la XXI<sup>e</sup> dynastie, Menkheperre. Son propriétaire originel était quant à lui qualifié de « prince inconnu ».

« En lisant ces résultats, j'ai été pris d'un doute, raconte Frédéric Payraudeau. J'ai demandé à mon collègue américain si je pouvais réétudier le dossier, ce qu'il a accepté étant donné la complexité de ce cas. » En examinant les hiéroglyphes et les différents niveaux d'inscription, le chercheur a étayé la thèse de la réutilisation du sarcophage pour le grand prêtre Menkheperre, mais surtout, il a identifié ce « prince inconnu »... qui n'est autre qu'un roi, en la personne de Ramsès II. « Mes collègues ont cru que le cartouche précédé du mot "roi" désignait le grand prêtre Menkheperre qui gouvernait le sud de l'Égypte vers 1 000 av. J.-C. Or, ce cartouche datait en réalité de la précédente gravure et désignait donc son premier propriétaire. »

Frédéric Payraudeau a également remarqué un décor qui l'a interpellé : « On y voit le Livre des Portes, un récit initiatique réservé aux rois sous l'époque des Ramsès, ce qui ne pouvait qu'indiquer un sarcophage royal. » Un dernier indice a mis fin au suspens : « Le cartouche royal comporte le nom de couronnement de Ramsès II, qui lui est propre, mais celui-ci était masqué par l'état de la pierre et par une deuxième gravure, ajoutée lors du remploi. »

### La vallée des Rois, cible de nombreux pillages

Le règne de Ramsès II (1279-1213 av. J.-C.), pharaon de la XIX<sup>e</sup> dynastie, se situe au début de la seconde moitié du Nouvel Empire, la dernière période de gloire et de prospérité de l'Égypte ancienne. Le pharaon a gouverné pendant près de soixante-sept ans – le règne le plus long de l'époque –, lui donnant largement le temps de laisser son empreinte. Surnommé le « pharaon bâtisseur », il a construit de nombreux temples partout en Égypte. « C'est très rare, sur un site antique, de ne pas retrouver le nom de Ramsès II, remarque Frédéric Payraudeau. Même sur les monuments plus anciens, il ajoutait son nom. Il a soigné la mémoire de son règne, et ça a marché. »

► C'est ce côté de sarcophage en granit long de 1,70 mètre qui a été formellement identifié comme appartenant au sarcophage originel de Ramsès II.

Ainsi, on sait désormais que Ramsès II a été enterré dans un cercueil en or, volé dans l'Antiquité, placé dans un premier sarcophage en albâtre (celui retrouvé en mille morceaux dans sa tombe), le tout inséré dans ce grand sarcophage en granit, qui fut pillé deux cents ans plus tard par Menkheperre pour le remployer. « Une preuve de plus que la vallée des Rois était la cible de nombreux pillages, particulièrement au moment de la XIX<sup>e</sup> dynastie, époque marquée par une crise économique et sociale ayant entraîné un grand manque de matériaux, durant laquelle même les souverains réutilisaient les objets funéraires de leurs prédécesseurs », commente Frédéric Payraudeau.

Le fragment du sarcophage de Ramsès II est actuellement entreposé à Abydos. « J'ai prévenu mes collègues américains, conclut l'égyptologue. C'est maintenant à eux de voir avec les Égyptiens pour qu'il soit mis en valeur, dans un musée par exemple. » ▮

► Les sarcophages du successeur de Ramsès II, Mérenptah, dans sa tombe de la vallée des Rois. L'un d'entre eux a été remployé à Tanis, comme celui de Ramsès II le fut à Abydos.



© FRÉDÉRIC PAYRAUDEAU

# Mieux comprendre les troubles de l'odorat

VIVANT



SOCIÉTÉS



**NEUROSCIENCES** En les privant plus ou moins temporairement de leur odorat, la pandémie de Covid-19 a révélé à des milliers de personnes l'importance de leur système olfactif. La recherche s'efforce maintenant de mieux comprendre les causes de l'anosmie pour en améliorer les traitements. **PAR LAURE DASINIERES**

Chez l'humain, l'odorat est souvent considéré, à tort, comme un sens secondaire. Il est pourtant omniprésent. « À chaque fois que nous inspirons, nous échantillons des molécules odorantes dans l'environnement pour nous permettre de détecter la présence d'objets odorants qui pourraient être intéressants du point de vue de notre protection, de notre alimentation ou de notre relation aux autres, explique Moustafa Bensafi, directeur de recherche CNRS au Centre de recherche en neurosciences de Lyon<sup>1</sup> (CNRL, équipe Neuropop). L'odorat nous permet de détecter des fumées, des aliments avariés, ou encore la présence d'un animal qui pourrait être dangereux ou qui pourrait être familier. Elles sont aussi caractérisées d'une composante affective et émotionnelle très forte. »

Indispensable à notre sécurité et à notre plaisir, l'odorat peut dysfonctionner. La proportion de personnes présentant des troubles de l'olfaction est évaluée entre 5 et 20 % dans le monde selon les études et selon les pays.



En France, une étude<sup>2</sup> menée pour le CNRS par Moustafa Bensafi sur plus de 4 000 participants a révélé, en 2015, qu'environ 10 % de la population française présenterait un déficit olfactif, soit plus de 6 millions de personnes ! Des troubles dont les manifestations et les causes sont variées.

## 50 nuances de troubles olfactifs

« Le terme "déficit olfactif" est assez générique dans la mesure où il couvre des altérations à la fois quantitatives et qualitatives de l'odorat, note le chercheur. D'un point de vue quantitatif, le déficit olfactif peut relever d'une perte totale, qu'on appelle anosmie, ou d'une perte partielle qu'on appelle hyposmie (l'état normal étant appelé normosmie) ». Plus rarement, on constate une hyperosmie, c'est-à-dire une sensibilité accrue aux odeurs. « Il peut aussi exister des altérations qualitatives. Par exemple, percevoir une odeur de poulet rôti quand on est en réalité exposé à une odeur de cacahuète s'appelle une parosmie ». Quand cette parosmie est associée à une perception émotionnelle désagréable,

on parle alors de cacosmie. Enfin, il arrive que l'on perçoive des odeurs « fantômes », souvent désagréables, qui ne sont le résultat d'aucun stimulus externe : c'est la fantosmie. Mais une fois ces troubles identifiés, pour pouvoir les traiter, il est crucial de comprendre ce qui les a déclenchés.

### Le rôle des infections

Si les traumatismes crâniens sont une cause évidente d'anosmie, notamment par lésion du nerf olfactif qui relie le nez au cerveau, la pandémie de Covid-19 a mis en évidence le rôle que peuvent jouer les infections virales dans la survenue de troubles de l'odorat. Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer l'impact d'une infection au SARS-CoV-2 sur le système olfactif. La première est que l'infection provoque une inflammation et un œdème qui empêche l'air d'atteindre la partie supérieure de la cavité nasale, celle où se situe la zone de l'odorat. C'est d'ailleurs ce qui se passe lors d'autres affections ORL touchant la cavité nasale (polypes, sinusite chronique, etc.) qui peuvent causer des troubles olfactifs.

Une autre possibilité est que le virus s'attaque directement aux cellules de l'olfaction. « Dans l'épithélium olfactif, il y a trois familles de cellules : les neurones récepteurs olfactifs, des cellules basales qui garantissent un renouvellement des neurones, et des cellules de soutien qui garantissent un bon fonctionnement du neurone, note Moustafa Bensafi. Le virus pourrait se fixer sur les cellules de soutien et/ou les cellules basales et affecter les neurones de manière indirecte. » Enfin, quelques études suggèrent que le virus pourrait infecter le bulbe olfactif, situé dans le cerveau. Moustafa Bensafi souligne que ces différentes hypothèses ne s'excluent pas mutuellement.

### Cancer, Alzheimer et troubles métaboliques

Plusieurs pathologies non infectieuses peuvent également être impliquées dans l'étiologie des troubles de l'olfaction. C'est le cas de certains cancers, du fait même de la maladie ou bien en raison des effets secondaires des chimiothérapies qui inhibent le renouvellement des neurones olfactifs. On constate également des pertes olfactives profondes dans la maladie d'Alzheimer. De fait, 80 % des patients Alzheimer souffrent d'un trouble olfactif, ce qui en fait un signal précoce de la maladie. « Dans le cas d'Alzheimer, on pense que ce sont les zones cérébrales situées dans la région ventrale du cerveau (l'hippocampe, le cortex entorhinal, le cortex olfactif) qui sont affectées », indique Moustafa Bensafi.

Plus récemment, des corrélations entre diabète, obésité et troubles de l'olfaction ont été mises en évidence. « En étudiant les interactions entre l'olfaction et la régulation du métabolisme énergétique, nous avons découvert un nouveau

circuit nerveux reliant le système olfactif cérébral et le pancréas capable de réguler la quantité d'insuline libérée dans le sang, précise Hirc Gurden, neuroscientifique, directeur de recherche au CNRS dans l'unité de Biologie fonctionnelle et adaptative<sup>3</sup>. Nous savons ainsi qu'une personne qui développe une obésité ou un diabète est à fort risque de développer une anosmie. » On sait que dans l'obésité, l'accumulation de tissu adipeux engendre une souffrance métabolique qui se manifeste par des dysfonctionnements multiples au niveau hépatique, intestinal et pancréatique mais aussi cérébral. Ainsi, une consommation excessive de nourriture très grasse, très sucrée ou très salée peut mettre les tissus cérébraux, notamment le système olfactif, en souffrance.



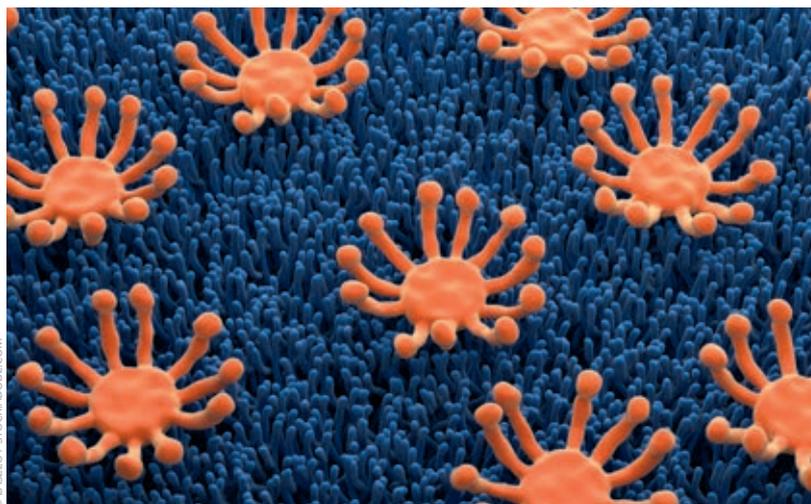
À lire :

**Sentir. Comment les odeurs agissent sur notre cerveau**, Hirc Gurden, Les Arènes, 2024, 256 p.

### Les effets de la dépression et du vieillissement

« La valeur hédonique est une dimension essentielle de la perception des odeurs, affirme Nathalie Mandairon, directrice de recherche au CNRS, au CRNL et directrice du groupement de recherche Odorant-Odeur-Olfaction (GDRO3). Si l'on demande à des gens de sentir une odeur, leur première réaction, avant même d'essayer d'identifier, c'est de dire "J'aime" ou "Je n'aime pas". Nous nous sommes intéressés à ce qui code cette valeur hédonique dans le cerveau et nous avons découvert que cette valeur est codée dès le premier relai cortical de l'information olfactive, le bulbe olfactif. Nous avons également montré que les odeurs plaisantes engendrent un comportement motivé, d'approche de l'odeur, qui fait appel au circuit de la récompense. » La chercheuse et son équipe ont également démontré l'effet du stress précoce sur la perception des odeurs. En effet, les traumatismes de la jeune enfance induisent très souvent

▲ Illustration 3D de la paroi nasale, où affleurent les cils (orange) des neurones olfactifs entourés de cellules de soutien (bleu). Les particules virales du coronavirus détruisent ces cils.



1. Unité CNRS/Inserm/Université Claude Bernard/Université Jean-Monnet.  
2. Lire « Un Français sur dix souffre de troubles de l'odorat » sur lejournal.cnrs.fr 3. Unité CNRS/Université Paris Cité.

▼ Durant les quatre premiers mois, les bébés voient flou et ce sont les odeurs qui les guident.



© BASTAN NATALIA / STOCKADOBÉ.COM

des dépressions à l'âge adulte. Or, la dépression est fréquemment associée à des perturbations de la perception des odeurs, perturbations qui, en retour, ont tendance à aggraver les symptômes dépressifs. « *Chez les souris, nous avons constaté que les petits qui ont eu une mère maltraitante développent à l'âge adulte une anhédonie (perte de la capacité à ressentir du plaisir, Ndlr), caractéristique du syndrome dépressif. Or, ces petits présentent également une altération de la perception des odeurs plaisantes, ressenties comme déplaisantes* », précise Nathalie Mandairon.

Le vieillissement peut aussi être responsable d'un trouble olfactif appelé presbyosmie. Assez fréquemment, les personnes âgées modifient leur alimentation car leur perception des odeurs plaisantes est altérée. « *Chez les souris, avec l'âge, de plus en plus d'odeurs plaisantes deviennent déplaisantes et sont de moins en moins explorées. Cette altération au cours du vieillissement est liée à un défaut de recrutement du circuit de la récompense* », explique la chercheuse.

### De lourdes conséquences dans la vie quotidienne

La perte du plaisir alimentaire et la dénutrition ne sont pas les seules conséquences d'un déficit olfactif. « *Selon une définition biomédicale, les déficits olfactifs sont des handicaps sensoriels. Ils constituent l'altération ou la perte d'un sens, l'odorat, qui nous permet de nous protéger et qui participe à notre bien-être et à notre plaisir. Si ce sens disparaît, nous sommes en insécurité constante et de multiples façons* », explique Hircac Gurden. De fait, privées de ce détecteur de danger, les personnes anosmiques peuvent être confrontées à de graves accidents domestiques ou sanitaires, par exemple en ne sentant pas l'odeur de brûlé ou celle d'un aliment avarié.

En outre, précise le chercheur, « *l'odorat joue un rôle majeur dans l'intimité avec nos partenaires et primordial dans les échanges sensoriels entre parents et enfants. Durant ses quatre premiers mois, le bébé voit flou et ses interactions sociales sont, pour beaucoup, d'ordre olfactif. [...] Ce sont les odeurs qui guident sa vie.* » L'odorat participe ainsi à notre bien-être et à notre équilibre mental. Il n'est donc pas étonnant que les troubles olfactifs affectent la santé mentale

et les interactions sociales. « *Lorsque l'odorat est altéré, la relation avec autrui est perturbée. La personne n'a plus de contrôle sur son odeur corporelle. Elle met trop de parfum ou plus du tout, on se douche trop ou pas assez. Cela est source d'anxiété, et de stress* », insiste Moustafa Bensafi. L'estime de soi est affectée et le retrait social est fréquent avec, souvent, des arrêts de travail et un isolement familial et amical, isolement d'autant plus marqué que lorsque la saveur des aliments disparaît, les personnes mangent seules.

### Rééduquer l'odorat

La rééducation olfactive est désormais largement utilisée. Elle s'adresse à toutes les personnes qui souffrent de troubles de l'odorat, que ceux-ci soient causés par des infections virales, des traumatismes crâniens ou dus au vieillissement naturel. « *On estime à 80 % le taux de récupération chez les personnes qui démarrent une rééducation olfactive et qui la poursuivent pendant au moins trois mois sans interruption* », explique Hircac Gurden. Le protocole de rééducation est basé sur l'utilisation de quatre huiles essentielles : rose, citron, clou de girofle et eucalyptus, qui permettent de stimuler un maximum de familles de récepteurs olfactifs différents. Il s'agit de « renifler » quotidiennement, durant au moins trois mois, quatre odeurs à l'aveugle ; l'objectif est de stimuler l'attention olfactive et de rétablir une connexion entre nez et cerveau. Dans un second temps, on doit lire le nom de l'huile essentielle tout en la sentant, ce qui vise à stimuler la mémoire olfactive. « *Il est primordial d'expliquer au patient que l'entraînement est basé sur l'idée que stimuler le système olfactif de façon répétée tous les jours, à la manière d'un footing olfactif, permet d'accélérer la récupération* », relève Moustafa Bensafi.

Au sein de Anosmie.org, association française de patients souffrant de troubles olfactifs, Hircac Gurden et son équipe ont développé une application web<sup>4</sup>, une sorte de « coach électronique » pour smartphone qui

4. covidanosmie.fr

## En bref

permet de visualiser sa progression. Parfois, le protocole ne fonctionne pas. Dans ce cas, la rééducation va exploiter le fait que les aliments peuvent aussi être perçus par le système gustatif et par le système trigéminal (*composé du nerf trijumeau qui se divise en trois branches dans la bouche, le nez et les yeux, Ndlr*), sensible aux épices, au picotement, à la fraîcheur et à plusieurs molécules volatiles.

« Nous nous efforçons d'amener le patient à prendre conscience qu'il peut reconstruire sa bibliothèque à odeurs en sollicitant d'autres systèmes sensoriels, explique Moustafa Bensafi. En incitant le patient à faire la cuisine, en l'invitant à "garder le nez sur la marmite", on lui permet de récupérer une compétence olfactive de manière naturelle et de lutter contre son isolement social. » Outre les interventions chirurgicales telles que la polypectomie (l'ablation des polypes qui obstruent les fosses nasales), des traitements médicamenteux à base de stéroïdes et/ou d'antihistaminiques en spray nasal permettent d'améliorer l'olfaction chez les patients souffrant d'affections nasales inflammatoires.

### Un nez artificiel

Une piste thérapeutique prometteuse est actuellement développée dans le cadre du projet de recherche européen Rose (*Restoring Odorant Detection and Recognition in Smell Deficit*) : la mise au point d'un « nez artificiel », une prothèse olfactive permettant de restaurer la perception des odeurs chez les patients anosmiques. « Ce consortium international combine l'expertise de sept laboratoires européens et de l'entreprise française Aryballe Technologies afin de concevoir ce dispositif inédit, précise Moustafa Bensafi qui coordonne le projet Rose. Les premiers résultats sont encourageants et nous permettent de penser que nous aurons une première preuve de concept dans deux à cinq ans. »

Cette solution ne devrait toutefois pas être accessible aux patients avant une dizaine d'années, mais elle est porteuse d'espoir pour toutes les personnes dont l'anosmie ne cède pas aux traitements traditionnels. En outre, elle ouvrira la porte à de nouvelles possibilités scientifiques et technologiques pour la miniaturisation des capteurs d'affinité, utiles pour d'autres applications telles que le contrôle de qualité pour les aliments, les arômes et les parfums. **II**



À voir

Notre reportage vidéo  
« Les confidences de l'odorat »  
sur [lejournal.cnrs.fr](https://lejournal.cnrs.fr)

### UN NOUVEAU PROGRAMME-CADRE EUROPÉEN

À l'approche de la dernière phase de programmation stratégique du programme-cadre de l'Union européenne pour la recherche et l'innovation, Horizon Europe, la Commission européenne prépare son successeur, FP10 (10<sup>e</sup> programme cadre). Le CNRS prend position sur les orientations souhaitées par ce dernier, mettant l'accent sur la recherche fondamentale, l'attractivité européenne, la mobilité et la nécessité d'un véritable continuum de la recherche fondamentale à l'innovation.

### COLLABORATION INTERNATIONALE

Une délégation du CNRS s'est rendue à Pékin et Canton, en Chine, du 23 au 26 juin. Un déplacement qui a marqué le lancement de quatre Réseaux internationaux de recherche avec l'Académie des sciences de Chine et d'un appel à projets avec la National Natural Science Foundation of China, centré sur les thématiques de la biodiversité et de l'impact du changement climatique.

### UN NOUVEAU LABORATOIRE COMMUN

En quête perpétuelle d'innovation dans le secteur du naval de défense, l'entreprise Naval Group entretient des liens étroits avec le CNRS, à travers les laboratoires sous sa tutelle. Cette collaboration au long cours s'est dernièrement prolongée par la création d'un nouveau laboratoire commun en juillet, baptisé NEL, autour des problématiques de discrétion électromagnétique.

### PEPR

Deux nouveaux Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR), pilotés ou copilotés par le CNRS, ont été officiellement lancés depuis juin 2024 : Interaction Lumière Matière (LUMA) lancé le 6 juin avec le CEA, et Industries culturelles et créatives (ICCARE) inauguré le 19 juin.

### CONCOURS PHOTO ONEWATER 2024

Lancée le 22 mars pour la Journée mondiale de l'eau, la première édition du concours photo OneWater 2024, sur le thème « Regards sur l'eau : entre pressions, usages et durabilité », a récompensé trois lauréats avec le Grand Prix du Jury, le Prix du Jury et le Prix du Public. Pour en savoir plus : <https://urls.fr/Y1CpxT>



# Pourquoi les oiseaux ne tombent pas en dormant

VIVANT 

**BIOLOGIE** Seuls bipèdes permanents du règne animal, avec les humains, les oiseaux possèdent un sens de l'équilibre hors du commun. Comment ces descendants directs des dinosaures maintiennent-ils cette stabilité, notamment pendant leur sommeil ? Des scientifiques ont récemment réussi à percer le mystère.

PAR MEHDI HARMI

Une histoire à dormir debout ? C'est plus ou moins celle d'une publication récente d'une équipe de scientifiques du Muséum national d'histoire naturelle (MNHN) et du CNRS, qui explique dans les colonnes de la revue *Journal of the Royal Society Interface*<sup>1</sup> comment les oiseaux réussissent à dormir et à se tenir debout sans perdre leur équilibre. Une prouesse dont on sait les chevaux ou les bovins capables car

munis de quatre pattes, mais qui à première vue n'était pas si évidente chez les oiseaux. Alors d'où vient cette stabilité ? De la tenségrité, répondent d'une seule voix les scientifiques. Née de la contraction entre les mots « tension » et « intégrité », la tenségrité n'est autre que la propriété d'une structure à rester stable et équilibrée grâce à un subtil jeu entre tension et compression des éléments qui la constituent.

« Le point de départ de cette recherche a été de comprendre les mécanismes de l'évolution en passant par la morphologie fonctionnelle, qui est l'étude des relations entre la forme des organismes et leur fonctionnement, raconte Anick Abourachid, spécialiste de biologie évolutive et directrice-adjointe de l'unité Mécanismes adaptatifs et évolution<sup>2</sup> au Muséum national d'histoire naturelle. On s'est notamment intéressé de très près aux pattes des oiseaux. » L'intérêt ? Les volatiles constituent un groupe particulièrement homogène d'un point de vue de leur structure :

► Groupe de flamants roses au repos, en Namibie.

« Ils sont tous des dinosaures bipèdes volants qui partagent depuis l'origine du groupe une structure construite pour l'aérodynamisme. Ils possèdent sans exception un tronc rigide, un train d'atterrissage et de décollage ainsi que des ailes », explique la chercheuse. Ce plan d'organisation extrêmement conservé est de surcroît efficace partout puisqu'on retrouve des oiseaux dans tous les milieux.

### Un modèle numérique pour étudier la stabilité

Il faut rappeler que les pattes des oiseaux sont particulières bien que proches, d'un point de vue structurel, des jambes des humains. « Les oiseaux sont des bipèdes fléchis, lorsqu'ils sont debout l'ensemble de leur corps est plié. Pour nous cela correspondrait à la posture accroupie sur la pointe de pieds », éclaire la chercheuse. Une posture peu confortable de prime abord, mais dans laquelle les oiseaux se détendent et peuvent même dormir debout. En somme, ils se reposent et par conséquent dépensent moins d'énergie. Pour comprendre comment les oiseaux gèrent cet équilibre, les scientifiques ont imaginé un modèle numérique, basé sur l'anatomie d'un petit oiseau, le Diamant mandarin (*Taeniopygia guttata*), une espèce appartenant à la famille des passereaux. « C'est en hypersimplifiant le système du corps, pour ne garder que ce qui concerne la posture debout, qu'on a trouvé de la stabilité posturale », révèle Anick Abourachid.

En effet, dans ce modèle, le corps et les os des pattes ont été remplacés par des barres, et les muscles et tendons par des câbles plus ou moins rigides. Les articulations entre chaque os des pattes ont quant à elles été remplacées par des poulies. « On a commencé les expériences en n'utilisant qu'un seul câble qui partait du bassin de l'"oiseau" jusqu'à ses pieds, passant par toutes les articulations (hanche, genou, cheville) et donc par toutes les poulies », explique la biologiste. Résultat ? Les chercheurs ont bien réussi à reproduire la posture debout générique des oiseaux, en revanche ils n'étaient absolument pas stables. « Notre oiseau modèle n'était en équilibre qu'en un seul point dans l'espace alors que naturellement, ils le sont dans une multitude de positions. On a donc amélioré leur stabilité en utilisant plusieurs câbles au

lieu d'un seul. Notamment un qui passe à l'arrière du genou plutôt qu'à l'avant comme c'était le cas dans le modèle initial », livre Anick Abourachid.

### Raideur et réactivité

Or, chez les oiseaux, il y a bel et bien un tendon qui passe à l'arrière du genou à travers une boucle ligamentaire de sorte à le maintenir dans son axe. Une particularité anatomique unique. Ainsi, avec quatre câbles, dont un passant à l'arrière du genou, le modèle est devenu stable ; même avec une petite perturbation, le système était capable de revenir à l'équilibre seul, passivement, comme un culbuto. De plus, les scientifiques ont compris que la qualité des câbles, et donc des tendons, jouait un rôle prépondérant. « En effet, les oiseaux font partie des seuls animaux à posséder des tendons calcifiés quasi ossifiés, détaille Christine Chevallereau, directrice de recherche au Laboratoire des sciences du numérique à Nantes<sup>3</sup> (LS2N). Dans notre modèle, on a compris qu'il fallait prendre en compte cette propriété pour obtenir un équilibre stable. L'oiseau a besoin de ces tendons raides car lorsqu'il se pose, il doit contrebalancer l'effet de la gravité pour ne pas basculer d'un côté ou de l'autre de la branche. Bien que cette faible élasticité semble ne pas jouer en faveur de la stabilité, il n'en est rien car elle permet d'amoindrir l'effet des perturbations auxquelles l'oiseau est soumis. Cela permet aussi une réponse beaucoup plus rapide du système car il aura moins tendance à se déformer avant de revenir à la position d'équilibre. »

Qu'il neige, qu'il pleuve ou qu'il vente, les oiseaux, grâce à ce système de tenségrité, peuvent continuer de dormir sans crainte de tomber de leur perchoir. « A priori, l'avantage que les oiseaux tirent de la tenségrité dans leurs pattes repose sur la nature passive du mécanisme. Par conséquent, rester debout pour un oiseau ne lui demande pas de réflexion ni de concentration. Tout tient à l'élasticité du système. C'est une forme d'intelligence incarnée où c'est uniquement le corps qui résout le problème sans l'intervention du cerveau, et donc sans utilisation d'énergie », partage Christine Chevallereau.

### Inspiration pour la robotique

Le caractère passif du mécanisme est à la fois surprenant et synonyme de mise en application à fort impact. « Il faut garder en tête que ces mécanismes sont beaucoup utilisés en génie civil car ils permettent d'alléger une structure. L'idée, avec cette découverte, c'est de reprendre ces mécanismes en robotique pour alléger les masses en mouvement, moins consommer d'énergie, utiliser moins de matière pour les construire et diminuer le danger en cas de collision avec un opérateur », signale Philippe Wenger, directeur de recherche au LS2N. Ainsi, les ingénieurs imaginent déjà des robots bipèdes dotés de systèmes de tenségrité leur permettant de maintenir des postures debout, en équilibre sur des supports peu stables, pendant de longues périodes, sans dépenser la moindre énergie. ||

“Chez les oiseaux, il y a un tendon qui passe à l'arrière du genou à travers une boucle ligamentaire de sorte à le maintenir dans son axe. Une particularité anatomique unique.”

1. <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rsif.2023.0433> 2. Unité CNRS/MNHN. 3. Unité CNRS/École centrale de Nantes/Nantes Université.



© VOISIN / PHANIE

# Faut-il naître pour être ?

VIVANT



SOCIÉTÉS



© D. VILLA, SCIENCE IMAGES CBI / CNRS



**ENTRETIEN** Face au progrès des techniques de procréation et à certaines controverses récentes sur le statut juridique du fœtus, l'anthropologue Anne-Sophie Giraud s'interroge sur l'évolution du statut de l'enfant à naître dans nos sociétés.

PROPOS RECUEILLIS PAR ANNE-SOPHIE BOUTAUD

**Dans *L'être anténatal. Dynamiques parentales, médicales et juridiques* (MSH, 2024), vous revenez sur le contexte, au premier abord incompatible, entre l'autonomie féminine et l'attention portée aujourd'hui à l'embryon et au fœtus. Comment en êtes-vous venue à étudier ce sujet sensible ?**

**Anne-Sophie Giraud**<sup>1</sup>. J'ai commencé mes recherches lors de mon master à l'université d'Aix-Marseille sur le vécu parental du deuil périnatal et l'impact des pratiques l'entourant au tournant des années 1990. Ma directrice de thèse, la sociologue Irène Théry<sup>2</sup>, m'a suggéré de poursuivre l'enquête à l'autre extrémité, sur l'embryon en

aide médicale à la procréation (AMP), afin de saisir l'ensemble du processus. À peu près au même moment, une série de transformations juridiques sont intervenues en France : en 2009, une circulaire abaisse à 14 semaines d'aménorrhée (SA) le seuil légal pour la déclaration à l'état civil des enfants sans vie ; en 2011, la révision des lois de bioéthique (re)lance les controverses autour du statut des embryons *in vitro*, sur le diagnostic prénatal, la gestation pour autrui et le don de gamètes. À l'été 2013 enfin, est autorisée sous conditions la possibilité d'effectuer des recherches sur l'embryon. Ce contexte de profondes métamorphoses a rendu opportune l'étude du statut de cet « être anténatal » et du « devenir parent ».

## Pourquoi avoir retenu le terme « anténatal » ?

**A.-S. G.** Dès lors qu'on aborde le produit de la conception humaine, les terminologies adoptées sont forcément politiquement, culturellement, théoriquement et émotionnellement chargées. Il est donc nécessaire de s'en justifier. En anglais, il existe un terme, « *unborn* », qui peut se traduire par « non encore né » mais qui n'a pas vraiment d'équivalent en français. J'ai donc choisi celui d'être anténatal, entendu comme tout organisme produit par l'union de gamètes humains, que ce soit *in vivo* – dans le corps de la femme – ou *ex vivo* – créé en laboratoire. Qu'il soit destiné à devenir un enfant ou non.

Le substantif « être » reste discutable car il pourrait laisser supposer une essence ou une existence. Il se justifie dans la mesure où cette masse de cellules fécondées peut aussi être considérée comme un acteur social qui va agir, et sur lequel on va agir dans le temps. Je me suis aussi appuyée sur l'usage de termes médicaux en retenant le terme d'embryon jusqu'à 10 semaines d'aménorrhée, puis de fœtus jusqu'à la naissance.

## En quoi cette notion se distingue-t-elle de celle des militants anti-avortement, pour qui « tout commence à la première cellule qui résulte de la fusion des gamètes lors de la fécondation » ?

**A.-S. G.** Les militants anti-avortement ont une vision essentialiste qui considère l'être anténatal comme une personne à part entière dès sa conception, nécessitant de ce fait d'être protégé contre toute atteinte. Ils restent ainsi dans l'opposition chose/personne et rejettent la conception processuelle et relationnelle de l'être anténatal. Or, j'ai pu l'observer lors de mes entretiens avec des couples engagés dans un parcours d'aide médicale à la procréation, l'embryon oscille sans cesse entre le statut de cellules et celui d'enfant potentiel. Dans le cas d'un mort-né, entre le statut de « simple produit de fausse couche » et celui

« d'enfant à part entière ». Mon enquête a permis de mettre en lumière la pluralité de ces statuts tout au long de l'engendrement, et de le comprendre comme un processus graduel et non linéaire.

## Sur quelles sources repose votre enquête ?

**A.-S. G.** C'est un travail qui s'est étalé sur plusieurs années. Je me suis appuyée d'une part sur des observations de terrain, en maternité notamment ; et d'autre part sur plus de 180 entretiens menés entre 2003 et 2015 auprès de professionnels de la procréation médicalement assistée (PMA) et de couples engagés dans un projet parental (qu'il aboutisse ou non). J'ai ainsi rencontré celles et ceux qui, en laboratoire, sélectionnent les embryons avant leur transfert dans l'utérus. J'ai aussi suivi des sages-femmes dans leur accompagnement des deuils périnataux. J'ai également assisté à des fêtes des anges, ces cérémonies du souvenir rassemblant des familles ayant vécu un tel deuil. Par ailleurs, la quasi-totalité de mes entretiens avec des personnes ayant perdu un enfant avant ou peu de temps après la naissance se sont déroulés



À lire :

**L'être anténatal. Dynamiques parentales, médicales et juridiques,**

Anne-Sophie Giraud, préface d'Irène Théry, Ed. de la Maison des sciences de l'homme, coll. « Ethnologie de la France et des mondes contemporains », avril 2024, 209 p.

▲ Des manifestants anti-avortement tiennent des banderoles lors d'une Marche pour la vie, à Paris, en janvier 2019.

avec des femmes. Parce que le sujet est lourd et douloureux, parce qu'ils avaient moins l'occasion de l'aborder, parce qu'ils ne se sentaient pas toujours légitimes aussi, j'ai recueilli moins de témoignages d'hommes.

## De la conception *in vitro* à la mort périnatale, votre ouvrage traite ainsi moins le « devenir parent » que les cas difficiles où ce processus est « contrarié ». Pourquoi vous être arrêtée sur ces deux statuts ?

**A.-S. G.** Ces deux moments, conception *in vitro* et mort périnatale, sont des révélateurs : ils rendent les vécus et les dilemmes concrets. En France, les embryons *in vitro* congelés peuvent être pensés à la fois comme des enfants potentiels inscrits dans un projet parental et en même temps comme un bioproduit utilisable à des fins de recherche. Comme lorsqu'un couple, arrivé au bout de son parcours de PMA, doit décider de ce qu'il va advenir de ses derniers embryons congelés : les détruire ? les conserver ? les donner à la science ? Le fœtus mort est, lui, considéré comme un presque bébé lorsque, par exemple, les parents inscrivent un prénom et un nom sur le livret de famille. S'il n'est

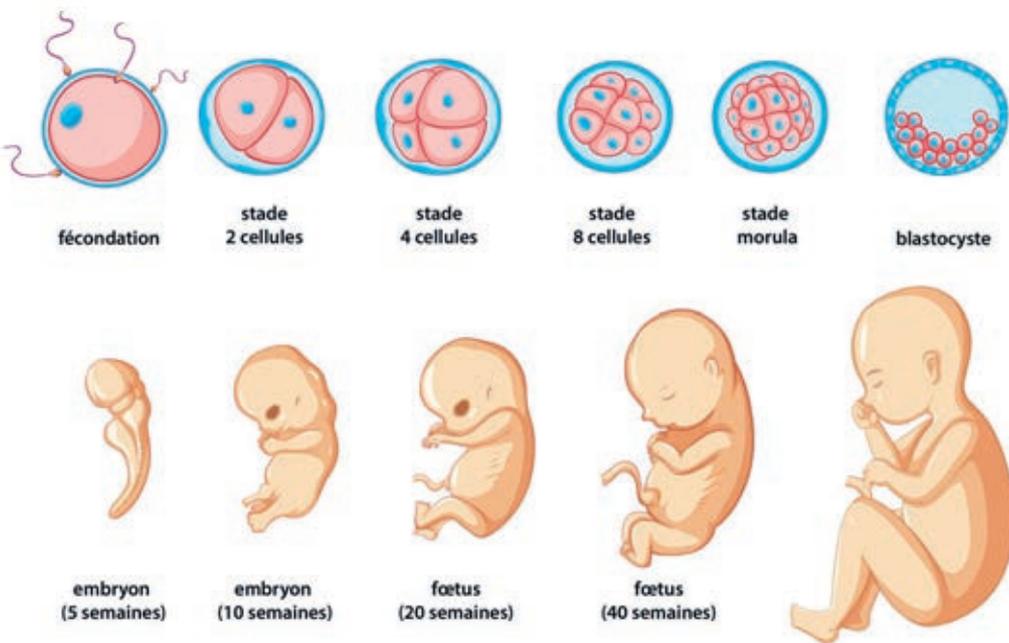


© GEOFFROY VAN DER HASSELT / AFP

pas pris en charge par les couples et les professionnels, il est d'un point de vue juridique une pièce anatomique. En définitive, les individus décident seulement de ce qui arrive à leurs embryons et à leur fœtus mort selon le sens qu'ils donnent à leurs relations avec ces êtres. Le droit prévoit, lui, que ces êtres ne se retrouvent jamais sans statut, dans des « limbes laïques ». La conception *in vitro* et la mort périnatale m'ont ainsi permis de mieux saisir ce processus, dépendant des pratiques de l'ensemble des acteurs, de leurs actions, de leurs manières de se comporter avec l'être anténatal, et d'agir avec lui.

### Dans quelles mesures les nouvelles techniques et technologies médicales qui entourent la PMA notamment ont-elles fait évoluer le statut de l'être anténatal ?

**A.-S. G.** La nouveauté de la technique de la fécondation *in vitro* (FIV) et des possibilités entrevues (eugénisme, clonage, expérimentations scientifiques) ont entraîné relativement rapidement un encadrement juridique des pratiques et un statut spécifique de l'embryon. En France, aucun embryon *in vitro* ne dépasse le stade de l'implantation dans l'endomètre, soit sept jours. Dans ce laps de temps, c'est aux professionnels de les sélectionner, et parfois de les détruire. Ces derniers ont mis en place un certain nombre de tactiques pour gérer le poids de la responsabilité dans le devenir des embryons *in vitro* frais. Pour exemple, en laissant les embryons écartés se détériorer



▼ Étapes du développement, de l'ovule fécondé au fœtus.

tout seuls ou en inscrivant leur action comme une aide à la nature.

Par ailleurs, l'introduction de nouvelles techniques de sélection des embryons, comme le *time-lapse*<sup>3</sup> ou le diagnostic préimplantatoire<sup>4</sup>, a aussi fait évoluer le statut d'embryons jugés normaux auparavant (c'est-à-dire ceux qui ont le plus de chance de se développer et produire une grossesse) et ceux désormais qualifiés d'anormaux (autrement dit, de mauvais pronostic pour la qualité embryonnaire). Ce qui n'était pas perçu auparavant comme un critère de désélection, le devient. Les plus viables sont alors congelés pour être transférés et leur sort revient ensuite entre les mains du couple, selon leur volonté parentale.

Ces choix sont entièrement délimités par le droit, pour les professionnels comme pour les couples. Après le transfert dans l'utérus, on revient à une situation ordinaire de grossesse. Dès lors, l'embryon implanté s'individualise, progressivement, dans le ventre de la femme.

### Qu'avez-vous pu observer concernant le statut du fœtus mort ?

**A.-S. G.** À partir de 14 semaines d'aménorrhée, le fœtus mort est considéré, par défaut, comme une pièce anatomique. Depuis les années 1990, en cas de mort fœtale *in utero* ou dans le cadre d'interruption médicale de grossesse (IMG), des pratiques de personnification du mort-né ont émergé. Il est désormais presque systématiquement proposé aux couples de le voir, jusqu'au dernier moment, de l'habiller, d'organiser un rituel funéraire, de le nommer. Depuis 2021, il est possible d'inscrire le nom en plus du prénom sur le livret de famille. Les parents peuvent, sur demande, obtenir un acte d'enfant sans vie jusqu'à plusieurs années après son décès. Dans les témoignages que j'ai recueillis, cette dimension réversible et temporelle est très importante.

*“L'être anténatal est reconnu comme un être de nature humaine, mais il n'a pas la qualité de personne juridique. Celle-ci n'est attribuée qu'au moment de la naissance, vivante et viable.”*

3. Dans le cadre d'une FIV, le *time-lapse* permet de suivre le développement embryonnaire à l'aide d'un microscope caméra afin d'en évaluer la qualité. 4. Toujours dans le cadre d'une FIV, le diagnostic pré-implantatoire (DIP) vise à rechercher, à partir de cellules de l'embryon, des maladies génétiques rares.

## En bref

Les couples ont donc des degrés de choix possibles, sans qu'ils soient forcément institutionnalisés, autour du rapport au corps, du devenir de ce corps et de son inscription à l'état civil. Ils peuvent refuser toute personnification du fœtus mort, ou, au contraire, entièrement le personnifier. C'est cette possibilité de choix, ici offerte aux individus, ou permise et encadrée par le droit, qui forme le statut, ou plutôt les statuts intermédiaires de l'être anténatal.

**Après l'accident provoqué le 10 février 2023 par Pierre Palmade, qui avait fait trois blessés graves dont une femme enceinte qui a perdu son bébé, le parquet de Melun avait requis le renvoi en procès du comédien pour « blessures et homicide involontaire ». La qualification pénale d'homicide involontaire, concernant un enfant non né, aurait-elle vraiment pu être retenue ?**

**A.-S. G.** C'est un exemple pris et appris en première année de droit. Il n'y a pas d'homicide reconnu sur un enfant non né, et une évolution en ce sens serait extrêmement dangereuse. L'être anténatal est reconnu comme un être de nature humaine, mais il n'a pas la qualité de personne juridique. Celle-ci n'est attribuée qu'au moment de la naissance, vivante et viable. Ainsi, ses droits ne s'opposent pas à ceux de la femme. Mais ici comme ailleurs, les militants anti-avortement s'érigent en entrepreneurs de morale et voudraient limiter les droits et les libertés pour toutes et tous.

Comme aux États-Unis, où ce sont désormais plus d'une vingtaine d'États qui ont largement restreint, voire interdit le droit à l'avortement avec le renversement en 2022 de l'arrêt *Roe vs Wade*, qui instituait le droit à l'avortement dans tout le pays depuis 1973. Désormais, chaque État peut légiférer sur la question. Depuis février dernier, la Cour suprême de l'Alabama considère les embryons conservés par congélation comme des enfants. Au-delà des conséquences sur les droits et libertés des femmes, cela pourrait rendre impossible des pratiques comme la fécondation *in vitro*. **II**

### DIX ANS D'ACCOMPAGNEMENT EN PRÉMATURATION

Depuis 2014, le programme de prématuration du CNRS favorise l'émergence de projets innovants. Il a financé et accompagné près de 400 projets dans les premières étapes de leur développement pour faciliter leur transfert vers l'industrie ou la création d'entreprise. Le 17 octobre 2024, le CNRS rassemblera son écosystème pour revenir sur dix années d'accompagnement en prématuration et découvrir ce que sont devenus ces projets d'innovation.

### ONE OCEAN SCIENCE CONGRESS

En 2025, la Ville de Nice accueillera la troisième Conférence des Nations unies sur l'Océan (UNOC3). En amont de cet événement, le CNRS et l'Ifremer y organisent, du 4 au 6 juin 2025, le One Ocean Science Congress, qui vise à fournir des recommandations scientifiques fortes aux décideurs.

### AVIS DU COMETS

Le Comité d'éthique du CNRS a rendu en juillet dernier un avis sur les robots dits « sociaux » et les effets liés à leur utilisation croissante dans la vie quotidienne, plus particulièrement sur le phénomène d'attachement des utilisateurs à ces machines.

>> Lire sur cnrs.fr : <https://urls.fr/uC4FmE>

### MOUV'EN SANTÉ

Durant les Jeux olympiques et paralympiques de Paris 2024, le CNRS a lancé, le 29 juillet, au Club France, un projet de science participative inédit, Mouv'en Santé, autour de l'activité physique et la santé. À travers des questionnaires et des tests physiques ouverts à tous, ce programme de recherche vise à comprendre les habitudes de vie, les niveaux d'activité physique et la condition physique des Français ainsi que leurs répercussions sur leur santé.

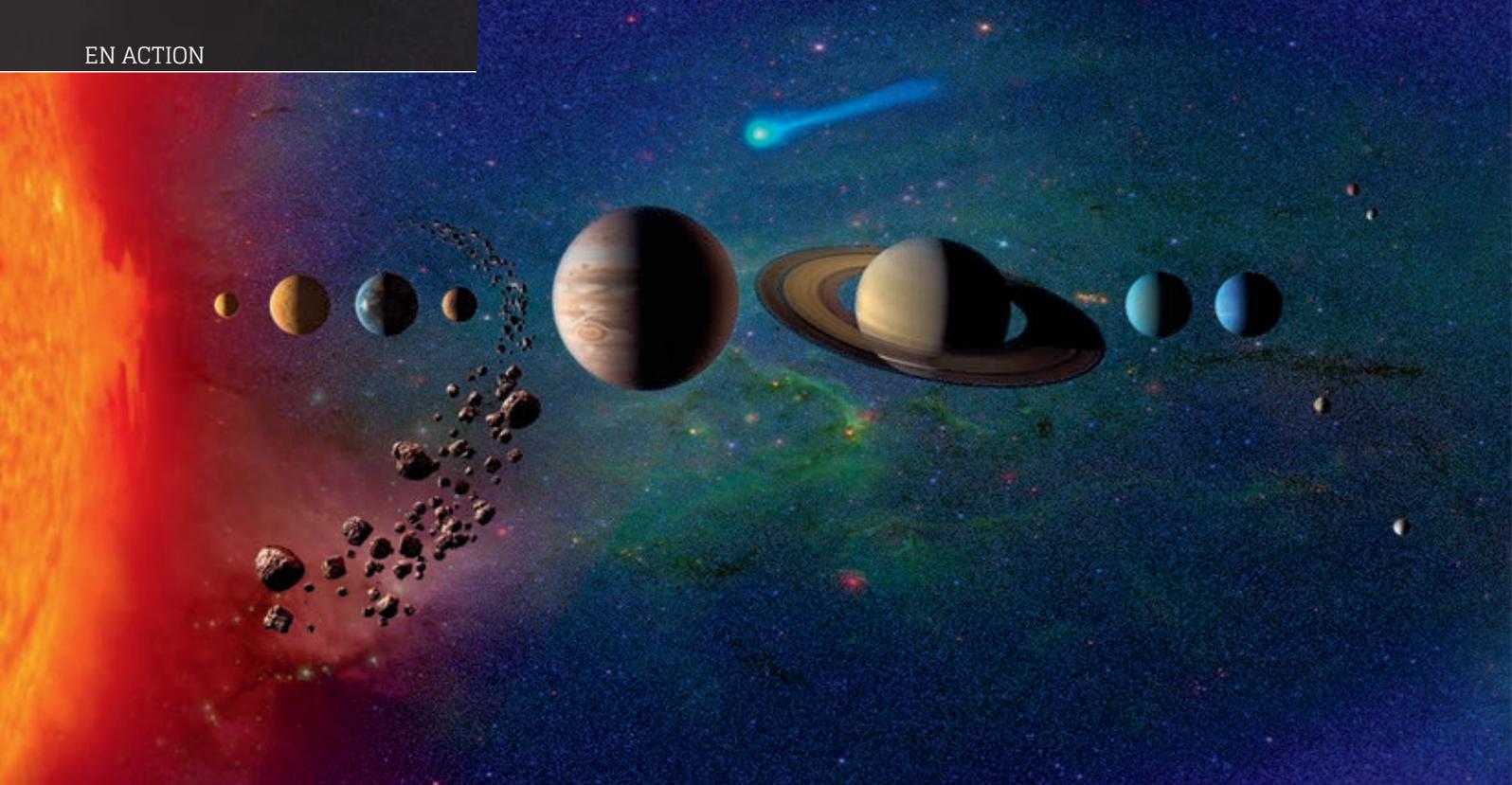
>> Pour en savoir plus : <https://sport.cnrs.fr/mouv-en-sante/>

### PREMIÈRE ÉDITION DES RENCONTRES INNOV'SHS

Événement phare de CNRS Sciences humaines & sociales, succédant aux cinq éditions du Salon Innovatives SHS avec un format remanié, la première édition des Rencontres Innov'SHS aura lieu cette année le 9 octobre à la Maison de l'Amérique latine, à Paris. L'occasion d'y découvrir la pluralité des innovations en sciences humaines et sociales.

### ERC STARTING GRANT 2024

Le 5 septembre 2024, le Conseil européen de la recherche a annoncé les résultats de l'appel ERC Starting Grant 2024 qui concerne des scientifiques en début de carrière. Le CNRS est l'institution hôte pour 25 bourses.



© IMAGE NASA / JET PROPULSION LABORATORY-CALTECH

# Planète 9, y es-tu ?

UNIVERS 

**ASTRONOMIE** Depuis près de dix ans, des astronomes tentent de prouver l'existence d'un objet massif qui évoluerait aux confins du Système solaire. Alors que la théorie est largement débattue, une récente étude affirme que l'absence d'un tel astre serait statistiquement impossible...

PAR ÉVRARD-OUICEM ELJAOUHARI

Depuis l'éviction de Pluton de la famille des planètes du Système solaire, ce dernier n'en compte plus que huit. Vraiment ? Et si une neuvième planète échappait à notre regard, cachée bien au-delà de la ceinture de Kuiper ? C'est ce que croient de nombreux astronomes, parmi lesquels Konstantin Batygin, du California Institute of Technology (Caltech, États-Unis) qui, en 2016, avec son collègue Michael Brown, annonce avoir découvert le signe de l'influence gravitationnelle de cette « Planète 9 » sur les orbites d'objets transneptuniens (*objets dont l'orbite croise ou se trouve au-delà de celle de Neptune, Ndlr*).

Mais ces résultats sont fortement débattus : ces objets sont trop peu nombreux et les effets de sélection qui

accompagnent les découvertes des relevés astronomiques n'auraient pas été correctement pris en compte. Dans une étude<sup>1</sup> parue en avril dernier, les chercheurs et leurs collaborateurs ont donc tourné leur attention vers une classe d'objets a priori moins sujets aux biais observationnels. Et leur conclusion ne change pas : leurs orbites ne peuvent s'expliquer que si une planète encore inconnue les influence.

## Une distribution non aléatoire

Les objets transneptuniens extrêmes sont des corps du Système solaire dont le périhélie, c'est-à-dire le point de leur orbite le plus proche du Soleil, est situé à au moins 50 fois la distance Terre-Soleil, et qui ont une trajectoire très elliptique. Leur périhélie est donc si éloigné qu'ils se rapprochent très peu de Neptune et sont donc très peu soumis à l'influence gravitationnelle des planètes géantes. De façon surprenante, des relevés astronomiques effectués sur plusieurs décennies, au cours du XX<sup>e</sup> et au début du XXI<sup>e</sup> siècle, révèlent que pour une dizaine de ces objets, leurs orbites semblent alignées. « Elles ont toutes la même orientation dans le ciel, leur distribution n'est pas aléatoire », précise Sean Raymond, au Laboratoire d'astrophysique de Bordeaux<sup>2</sup>.

1. <https://arxiv.org/abs/2404.11594> 2. Unité CNRS/Université de Bordeaux. 3. Unité CNRS/Observatoire de la Côte d'Azur/Université Côte d'Azur. 4. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/0004-6256/151/2/22> 5. Unité CNRS/Université de Franche-Comté.

## ► Vue d'artiste de notre Système solaire.

Pourtant, les lois de la mécanique céleste portent à croire que ce ne devrait pas être le cas. En effet, non seulement un objet tourne autour du Soleil, mais l'axe de son orbite oscille également autour de notre étoile. C'est ce que l'on appelle la précession. « *Donc même s'il y a plus de 4 milliards d'années, un certain nombre d'objets avaient été expulsés dans la même direction à cause de perturbations dans le Système solaire primitif, en raison de ces précessions leurs orbites auraient dû se disperser depuis lors* », pose Alessandro Morbidelli, astronome et planétologue au Laboratoire Lagrange<sup>3</sup> et professeur au Collège de France. Que l'alignement des orbites ait été conservé au cours de toutes ces années est le signe que « *quelque chose* » force ces orbites à ne pas se comporter comme on pourrait s'y attendre. « *Puisque les objets sont loin de Neptune, ce n'est pas l'influence gravitationnelle de cette dernière qui force les orbites à rester groupées. Pour expliquer cette anomalie, il doit exister une autre planète* », appuie l'astronome.

### Se départir des biais

L'hypothèse d'une planète cachée dans le Système solaire était née, et une publication<sup>4</sup> de 2016 en dessine les contours : elle devrait avoir une masse comprise entre 5 et 7 fois celle de la Terre, et se déplacer sur une orbite elliptique, éloignée et inclinée. Mais cette conclusion a rapidement amené son lot de scepticisme. En effet, est-on sûr qu'il y a réellement un alignement orbital ? Une dizaine d'objets n'est peut-être pas suffisante pour établir une statistique fiable ? Comment s'assurer que tous les biais observationnels sous-jacents à ces détections ont été correctement modélisés ?

« *Il est très difficile de détecter des objets lointains dans certaines régions du ciel, comme dans le plan galactique par exemple, où il y a beaucoup d'étoiles. Si on n'observe pas d'objets transneptuniens qui passent dans ce plan, et qu'on ne tire des conclusions que par rapport aux objets qu'on a observés, alors cela introduit des biais*, développe Sean Raymond. *L'équipe de Batygin est convaincue que l'alignement qu'elle observe est intrinsèque à la population des objets qu'elle a pris en compte, mais ce n'est pas universellement accepté dans la communauté.* »

Jean-Marc Petit, astronome à l'Institut Univers, théorie, interfaces, nanostructures, atmosphère et environnement, molécules<sup>5</sup> (Utinam) a d'ailleurs pris le temps d'étudier les biais observationnels associés aux objets pris en compte dans la publication de 2016. S'il pense également qu'il n'est pas impossible qu'il y ait réellement un groupement d'orbites, il trouve aussi que la probabilité que ce soit le cas est bien inférieure à ce qu'avancent Batygin et ses collaborateurs. « *On ne dit pas qu'il n'y a pas de Planète 9, clarifie Jean-Marc Petit, mais que l'argument qu'ils mettent en avant n'est pas assez fort.* » « *Et c'est une position tout à fait légitime* », convient Alessandro Morbidelli.

Dans leur article de 2024, Konstantin Batygin, Alessandro Morbidelli, Michael Brown et David Nesvorný (planétologue au Southwest Research Institute) tentent donc une nouvelle approche. Au lieu de se concentrer sur des objets distants qui ont des orbites très elliptiques, ils jettent cette fois leur dévolu sur des objets toujours transneptuniens, mais qui croisent l'orbite de Neptune. « *Ces objets viennent relativement près de nous et sont brillants, ils sont donc plus faciles à observer* », décrit Alessandro Morbidelli.

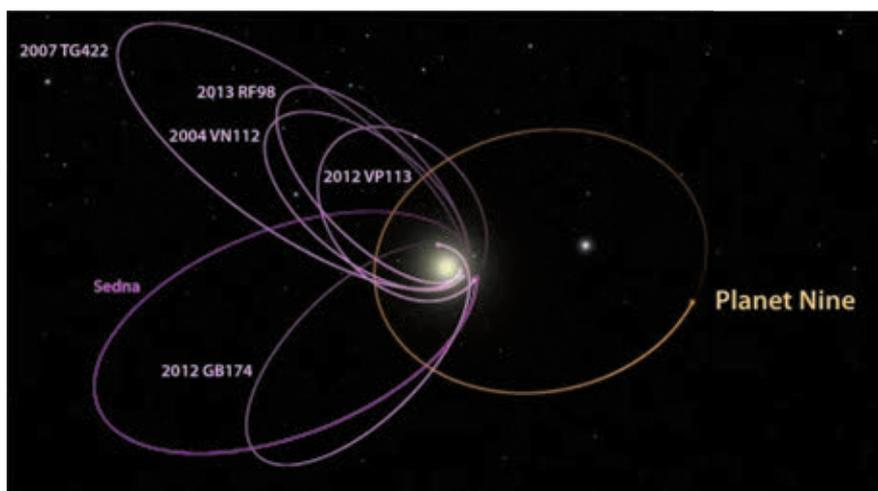
### Une absence impossible ?

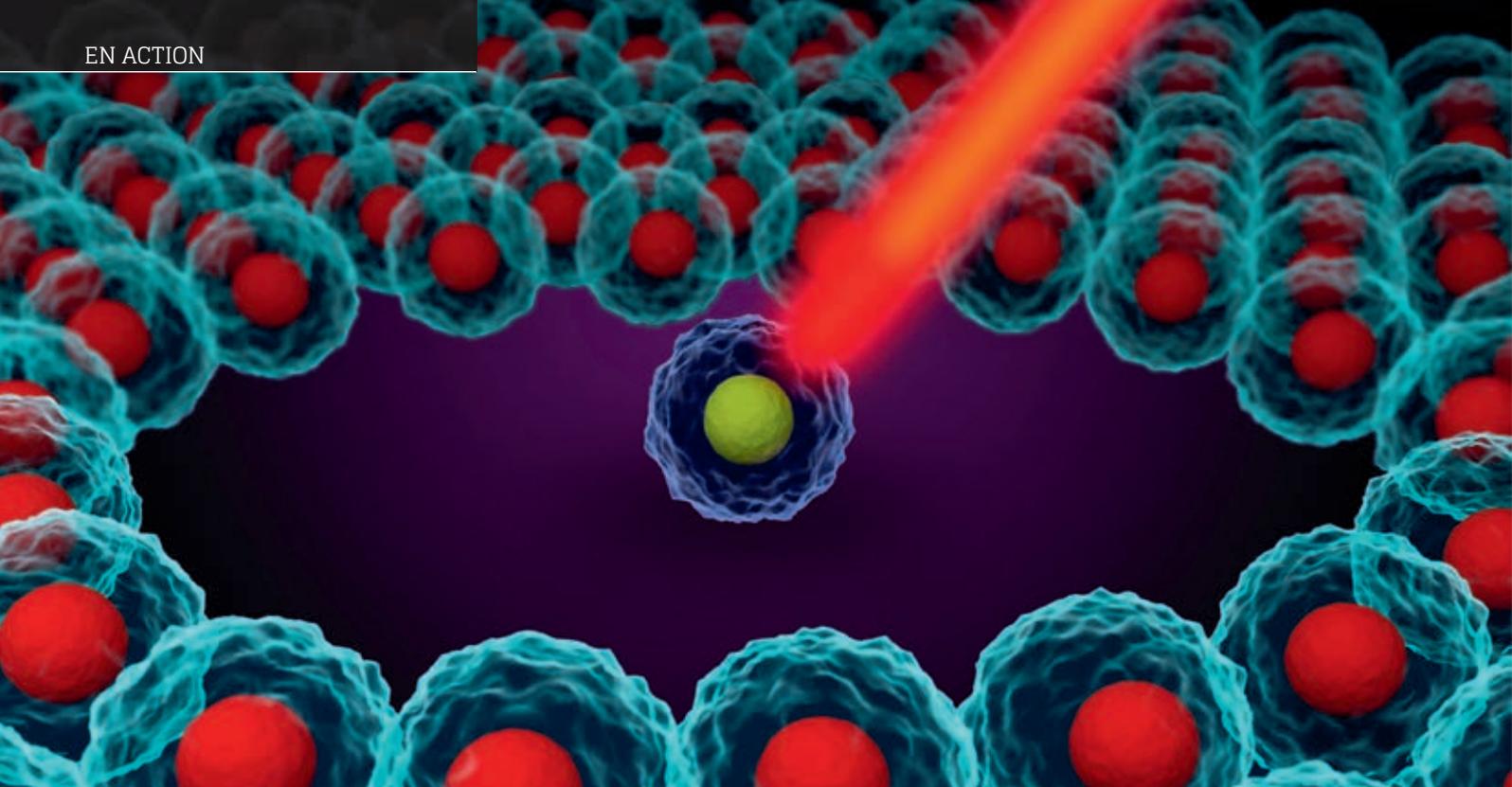
De plus, ces objets sont très instables. En traversant l'orbite des planètes géantes, celles-ci les dispersent et changent leurs orbites. Leur espérance de vie n'est ainsi que de quelques dizaines de millions d'années. Ils sont donc continuellement réalimentés par la population véritablement transneptunienne. « *On a comparé un système avec une Planète 9 et un système sans, pour voir à quel taux on peut renouveler cette population d'objets qui croisent l'orbite de Neptune. Et on a trouvé que sans Planète 9, ce taux est trop faible. Avec la Planète 9, en revanche, nos modèles reproduisent beaucoup mieux les observations* », explique le planétologue.

Alors la présence d'une neuvième planète est-elle actée ? « *Ce n'est pas si simple*, tempère Sean Raymond. *En principe, dans cette étude, il y a moins de biais observationnels, mais c'est vraiment difficile de dégager tous les biais.* » Des biais cachés, Jean-Marc Petit en liste plusieurs : « *Par exemple, les relevés qu'ils utilisent ne sont pas dédiés aux objets transneptuniens. De plus, la taille des objets, dont ils ne tiennent pas compte, peut avoir son importance.* » Toute observation s'accompagne d'erreurs et d'approximations qu'il peut être difficile de prendre en considération. « *C'est pourquoi, même si on a de bonnes raisons de penser que la Planète 9 est là, on ne devrait jamais croire que quelque chose existe avant de l'avoir trouvé*, rapporte Sean Raymond. *On doit la chercher avec l'esprit ouvert.* » II

► Représentation de l'orbite de six objets transneptuniens (en violet). En orange, l'orbite supposée de la mystérieuse Planète 9. Le point brillant au centre de l'image est notre Soleil.

✚ Lire l'intégralité de l'article sur [lejournal.cnrs.fr](https://www.lejournal.cnrs.fr)





© MELETIOS VERRAS / SHUTTERSTOCK

# Les technologies single cell révolutionnent la recherche en biologie

Depuis 2017, à l'Institut Curie, Céline Vallot<sup>1</sup> et son équipe développent des techniques de single cell (« cellule unique ») pour comprendre pourquoi une tumeur émerge et résiste au traitement. « *Les méthodes de single cell ont accéléré la biologie 2.0. Nos travaux reposent sur un ballet pluridisciplinaire, qui va du médecin au biologiste, à l'analyste de données et au statisticien. C'est parce que toutes ces personnes s'y mettent main dans la main que tout fonctionne* », décrit la directrice de recherche au CNRS, spécialiste des mécanismes d'épigénétique du cancer du sein.

Le single cell est une innovation qui utilise un procédé appelé « microfluidique » : les cellules passent une à une dans des micro-canaux pour être encapsulées dans une micro-gouttelette d'huile contenant des réactifs. Au moment de l'encapsulage, le matériel génétique de la cellule est marqué par un code-barres génétique qui permet d'identifier la cellule. Grâce à cette technologie, la chercheuse se place à l'échelle de la cellule « unique », et essaie de comprendre l'hétérogénéité cellulaire au sein d'une même tumeur. « *Avant, on faisait des expériences sur un groupe de millions de cellules, on étudiait l'expression moyenne des gènes*, explique Céline Vallot. *Ce qui est novateur avec le single cell, c'est le côté systématique, on peut étudier beaucoup de cellules et avoir une information relati-*

VIVANT  NUMÉRIQUE

**BIOLOGIE** Ces techniques d'analyse de l'information génomique permettent de se placer à l'échelle de la « cellule unique » pour mieux en étudier les mécanismes et l'hétérogénéité des tissus. Elles génèrent aussi une massification des données qui font entrer la biologie cellulaire dans une nouvelle ère.

PAR RAHMAADJADJ

*vement exhaustive.* » Cette nouvelle technique porte de nombreux espoirs, avec comme ligne de mire la promesse d'une médecine de précision où chaque patient bénéficierait d'un traitement spécifique.

## Des approches multiples

La première publication scientifique<sup>2</sup> où des ARN sont étudiés avec la méthode du single cell date de 2009. En 2015, la technologie s'accélère et à partir de 2017, la plupart des laboratoires de biologie étudiant le cancer en France

se dotent de cette technique. Au Centre de recherche en cancérologie et immunologie intégrée Nantes-Angers<sup>3</sup>, la machine est arrivée en 2018. Pas plus grande qu'un mini lave-vaisselle, elle a ouvert un monde des possibles pour Stéphane Minvielle, directeur de recherche CNRS et co-responsable de l'équipe Integrative Cancer Genomics. Depuis vingt ans, l'équipe installée au cœur du CHU de Nantes y étudie le myélome multiple, un cancer de la moelle osseuse. Leurs travaux se concentrent sur l'activité des cellules, par le biais de leurs ARN messagers : c'est l'approche transcriptomique, ou l'étude et l'analyse de la transcription de l'ADN en ARN messagers. La combinaison du single cell et de la transcriptomique est baptisée « single cell RNA-seq ». « Grâce à cette technique, on peut différencier les sous-types de cellules du système immunitaire alors qu'avant, on ne voyait qu'un bloc. On accède à des réponses complexes sur comment la cellule tumorale modifie son environnement », explique Stéphane Minvielle.

La technique du single cell peut être combinée à d'autres protocoles expérimentaux. C'est le cas pour Céline Vallot, qui étudie l'épigénétique, c'est-à-dire l'activité de la cellule à travers les mécanismes de régulation de l'expression des gènes. L'association de ces deux techniques est quant à elle baptisée « single cell ChIP seq ». De son côté, Yad Ghavi-Helm, à l'Institut de génomique fonctionnelle de Lyon<sup>4</sup>, travaille sur l'embryon de la mouche du vinaigre, *Drosophila melanogaster*. L'objectif est d'utiliser la drosophile comme modèle pour comprendre les interactions entre les régions régulatrices du génome, aussi appelées « enhancers », et les gènes, « car des mutations dans la séquence des enhancers peuvent affecter l'expression des gènes qu'ils régulent et causer des maladies telles que des cancers », détaille la chercheuse.

### Un forte interdisciplinarité

Comme à Nantes, Yad Ghavi-Helm associe le single cell RNA-seq à la transcriptomique spatiale, une technologie qui combine le profilage à haut débit de l'expression des gènes avec l'information de la localisation spatiale des cellules dans leurs tissus ou organes d'origine. « Jusqu'à présent, seules les méthodes d'imagerie permettaient d'étudier l'expression des gènes de cette façon, mais cette technique restait limitée à une poignée de gènes par expérience. Avec la transcriptomique spatiale, on peut analyser des centaines, voire des milliers de gènes en parallèle », développe-t-elle.

Le single cell avance si vite que ses limites techniques sont en passe d'être franchies, mais son coût d'utilisation demeure un frein majeur pour les laboratoires. « Avec l'arrivée du single cell, on est passé d'un tableau Excel de 20 000 lignes à des serveurs de calculs, affirme Stéphane Minvielle. Ceux qui produisent les données ne peuvent plus les interpréter seuls, les biologistes ont besoin de s'appuyer sur des ingénieurs et aussi sur une recherche méthodologique en statistique et en intelligence artificielle », éclaire Franck Picard, directeur de recherche CNRS au Laboratoire de

biologie et modélisation de la cellule<sup>5</sup>, spécialiste de statistique et de *machine learning* (apprentissage automatique). Le single cell implique une forte interdisciplinarité, il crée des ponts entre les biologistes et ceux qui font de la recherche en méthodes d'analyse de données ; par conséquent, attirer des mathématiciens vers la biologie devient une nécessité.

### Mettre le vivant en équation

« Le défi pour la recherche méthodologique est de mettre en équation le vivant », résume Stéphane Minvielle. « En France, notre avantage est que la formation en maths et en machine learning est excellente », ajoute Franck Picard. Mais en intelligence artificielle (IA), la compétitivité est grande et ces profils ont tendance à être recrutés dans le privé où les salaires sont plus importants que ceux de la recherche publique. Pour y remédier, Franck Picard et Céline Vallot misent sur la formation doctorale, avec pour idéal de faire aussi émerger plus d'instituts interdisciplinaires.

Dans cette dynamique, depuis 2023, le single cell est mis en avant dans le Programme et équipement prioritaire de recherche Santé numérique<sup>6</sup>, copiloté par l'Inserm et Inria. « Le but, explique Franck Picard qui coordonne un des projets du programme pour le CNRS, est de développer de nouvelles méthodologies en IA pour l'exploitation des données du single cell. L'objectif à terme est de faire un lien avec la médecine de précision et surtout, de faire émerger une communauté française spécialiste de ce domaine. » La révolution n'en est qu'à ses prémices. ||

▲ L'institut Curie a mis en place la première plateforme française d'analyse sur cellules uniques dédiée au cancer.



Lire l'intégralité de l'article sur [lejournale.cnrs.fr](https://lejournale.cnrs.fr)



© MANDON MATIAS / INSTITUT CURIE

1. Unité Dynamique de l'information génétique : bases fondamentales et cancer (DIG-CANCER, CNRS/Institut Curie/Sorbonne Université). 2. Tang, F., Barbacioru, C., Wang, Y. et al., "mRNA-Seq whole-transcriptome analysis of a single cell", *Nat Methods* 6, 377-382 (2009). 3. Unité CNRS/Inserm/Nantes Université/Université d'Angers. 4. Unité CNRS/ENS Lyon. 5. Unité CNRS/ENS Lyon. 6. <https://pepr-santenum.fr>

# Un vent de tempête solaire souffle sur la Terre

TERRE ● UNIVERS

**ASTROPHYSIQUE** Depuis plusieurs mois, notre planète est confrontée à une intense activité éruptive en provenance du Soleil. Ce phénomène, à l'origine des aurores polaires qui ont récemment illuminé le ciel européen, peut aussi perturber certains secteurs industriels.

PAR GRÉGORY FLÉCHET

Dans la nuit du 10 au 11 mai 2024, en plein week-end de l'Ascension, le ciel de France se drapait d'un voile rougeoyant accompagné, par endroits, d'un liseré vert près de la ligne d'horizon. Aussi surprenant que cela puisse paraître, il s'agissait d'aurores boréales survenues à des latitudes anormalement basses. La raison de cet événement exceptionnel, habituellement réservé aux régions proches des pôles ? Le Soleil connaît depuis plusieurs mois une forte période d'activité, qui se manifeste par la multiplication des éruptions solaires à sa surface, avec une conséquence directe sur notre planète : des orages magnétiques particulièrement intenses, dont les aurores boréales sont le symptôme le plus visible et le plus merveilleux.

Notre étoile alterne constamment entre des phases de relative accalmie et des périodes d'activité plus marquées. Ces variations suivent elles-mêmes un cycle dont la durée varie de 10 à 13 ans. La mise en évidence de cette périodicité repose entre autres sur un suivi des taches solaires entamé au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle. À l'appui de ces observations rigoureuses, nous savons que notre étoile a déjà connu 24 cycles solaires depuis 1755 et qu'un 25<sup>e</sup> cycle, débuté en 2019, serait sur le point d'atteindre son pic d'activité. Une situation corroborée par la présence de plus d'une centaine de taches solaires à sa surface, alors qu'une poignée seulement sont visibles en période de faible activité.

► Le Soleil connaît depuis plusieurs mois une forte période d'activité, qui se manifeste par la multiplication des éruptions solaires à sa surface (image du 15 mai 2024 à 08:45 UT).

« Ces zones qui apparaissent plus sombres, car plus froides de plusieurs milliers de degrés Celsius que la surface environnante, sont associées à de soudaines remontées du champ magnétique circulant à l'intérieur du Soleil et qui vient en quelque sorte perforer sa surface, explique Alexis Rouillard, chercheur CNRS à l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie<sup>1</sup> de Toulouse. La complexification et l'intensification du champ magnétique à l'aplomb des regroupements de taches solaires sont à l'origine des tempêtes solaires : l'éjection, à des vitesses pouvant aller de plusieurs centaines à plusieurs milliers de kilomètres par seconde, de panaches de particules chargées, à savoir des électrons et des protons. » Des tempêtes qui peuvent mettre de un à quatre jours pour parcourir les quelque 150 millions de kilomètres qui séparent la surface du Soleil de la Terre.

### Tempêtes géomagnétiques

Au bout de leur course, les particules ionisées éjectées par le Soleil viennent « buter » contre la magnétosphère de notre planète, provoquant sa reconfiguration. En cheminant le long de ce champ magnétique réagencé, une partie des particules solaires sont ramenées vers l'ionosphère, la couche supérieure de l'atmosphère, où elles entrent en contact avec les molécules d'oxygène et d'azote. En interagissant avec le champ magnétique terrestre, la tempête solaire se mue alors en tempête géomagnétique. Les aurores polaires sont en quelque sorte le fruit de cette rencontre, comme le détaille Alexis Rouillard : « En percutant les molécules, atomes et ions du gaz atmosphérique à grande vitesse, les électrons charriés par la tempête géomagnétique les placent dans un état d'excitation transitoire. Afin de revenir à leur niveau d'énergie initial, les éléments excités libèrent de la lumière dont la couleur dépend à la fois de leur nature et de la composition de la haute atmosphère. »

Problème : dans nos sociétés où la technologie occupe une place de plus en plus importante, les tempêtes solaires peuvent fortement perturber les activités humaines. La société Space X l'a appris à ses dépens : en février 2022, elle a perdu quarante satellites de télécommunication Starlink pendant la phase de mise en orbite. Si l'entreprise n'a pas précisé les raisons de cet échec, l'implication d'une tempête géomagnétique est très probable. « Faute d'avoir anticipé l'arrivée de cette tempête, la vitesse octroyée aux satellites pour leur permettre d'atteindre leur orbite définitive s'est révélée insuffisante pour pouvoir traverser cette région de l'atmosphère devenue plus dense, provoquant leur chute prématurée vers la Terre », explique Jean Liliensten, directeur de recherche CNRS et astronome à l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble<sup>2</sup>.

L'orage magnétique a également pour effet de modifier la répartition des électrons dans l'atmosphère, perturbant

*Notre étoile alterne constamment entre des phases de relative accalmie et des périodes d'activité plus marquées. Ces variations suivent elles-mêmes un cycle dont la durée varie de 10 à 13 ans.*

la propagation des ondes diffusées par les satellites dédiés au positionnement par GPS de nos véhicules. C'est la mésaventure qu'ont vécue des centaines d'exploitations agricoles du Midwest (États-Unis) durant la tempête solaire survenue en mai 2024 : le système de navigation GPS qui permet aux tracteurs d'optimiser la répartition des semis sur ces immenses parcelles agricoles est soudainement devenu inopérant sous l'effet des interférences électromagnétiques.

### Un épisode majeur tous les 150 ans

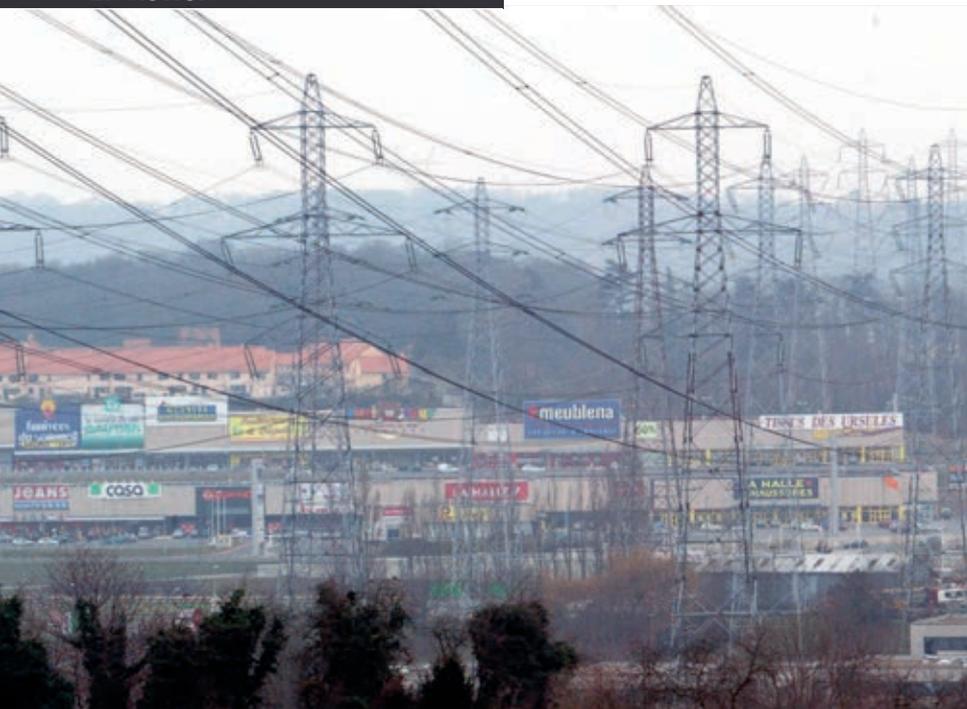
Certains secteurs industriels stratégiques peuvent aussi être perturbés par des courants géomagnétiques induits découlant de l'orage magnétique – des courants électriques qui se forment à la surface de la Terre à la suite de changements rapides du champ magnétique. Cela va des pipelines destinés à l'acheminement d'hydrocarbures aux câbles de télécommunication sous-marins, en passant par

► Inhabituelle, cette aurore boréale visible au-dessus du Mont-Saint-Michel, en mai 2024, témoigne de la multiplication des éruptions à la surface du Soleil.



© GLAZ / MATHIEU RVRIN / HEMIS.FR

1. Unité CNRS/Cnes/Université Toulouse Paul Sabatier. 2. Unité CNRS/Université Grenoble Alpes.



© ALAIN AUBOIROUX / LE PARISIEN / PHOTOPOR / MAXPPP

► Les réseaux électriques, comme ici à Champlan en région parisienne, sont à risque lors des pics d'activité solaire.

*procher de l'apogée du cycle, la formation de nouveaux amas de taches solaires va se produire de plus en plus près de l'équateur du Soleil, prévient Jean Lilensten. Cette concentration de taches dans la région équatoriale s'accompagnant d'une accumulation d'énergie, les éruptions susceptibles de s'y produire ont plus de chances d'avoir un impact sur notre planète.* » Pour suivre au plus près l'activité du Soleil, la communauté scientifique a développé depuis une vingtaine d'années un réseau d'observatoires aussi bien terrestres que spatiaux, parmi lesquels le satellite américain Solar Dynamics Observatory (SDO). Doté de capteurs à très haute résolution, cet appareil situé en orbite géosynchrone, à 36 000 km de la Terre, surveille en continu l'évolution de la surface magnétisée et de la couronne solaire très dynamique située à plus haute altitude.

les forages pétroliers ou les systèmes de production et de transport d'électricité : au Québec, en mars 1989, six millions de personnes ont ainsi été plongées dans l'obscurité pendant près de dix heures suite à une défaillance massive du réseau électrique de la province canadienne.

Mais la tempête solaire la plus puissante jamais observée et documentée à ce jour reste celle de l'été 1859, aussi appelée « événement de Carrington<sup>3</sup> ». Cet épisode d'une intensité trois fois supérieure à celui du printemps dernier avait fortement perturbé les communications par télégraphe, allant jusqu'à provoquer la combustion de certains appareils. Sachant qu'une tempête solaire de cette puissance se produit en moyenne tous les 150 ans, l'imminence d'un phénomène de cette ampleur ne peut être totalement écartée – sans que l'on sache dire quand il se produira. Car, aussi étonnant que cela puisse paraître, les scientifiques restent incapables de prédire avec précision la survenue des pics d'activité de notre étoile. « *Pour l'heure, nous ne sommes ni en mesure de prévoir avec certitude si une zone active à la surface du soleil générera une tempête magnétique, ni avec quelle intensité cet événement hypothétique se produira* », avoue Alexis Rouillard. Sachant que l'éruption solaire qui provoqua la tempête magnétique de 1859 mit seulement 17 heures pour atteindre la Terre – contre deux jours pour celle du 10 mai 2024 –, parvenir à prévoir un tel épisode éruptif laisserait tout juste le temps de protéger nos infrastructures les plus sensibles, en les mettant hors tension.

### Un pic d'activité début 2025

Quant au cycle dans lequel nous nous trouvons, il devrait atteindre son maximum début 2025... ou un peu plus tôt, personne ne peut le dire à ce stade. Une seule certitude : les tempêtes solaires vont devenir plus puissantes dans les mois qui viennent. « *À mesure que nous allons nous rap-*



À lire :  
**Météorologie de l'espace. Vivre demain avec notre Soleil,**  
Lilensten, M. Gruet,  
F. Pitout, J. P. Cadhile  
Marques, Éditions  
De Boeck supérieur,  
mars 2021, 240 p.

### Vers une météo de l'espace

Mais cela ne suffit pas : mieux prévoir les tempêtes solaires, et donc mieux anticiper les risques qu'elles font peser sur nos activités, demande de décupler les capacités de surveillance de notre étoile. Dans cette perspective, des spécialistes de l'Organisation française de recherche applicative en météorologie de l'espace (Oframe) envisagent de renforcer le réseau de sondes et de capteurs mesurant depuis la Terre ou son proche environnement spatial les champs électromagnétiques et les particules. Le déploiement de microsattellites dédiés à la surveillance de la haute atmosphère et de la magnétosphère pourrait venir compléter ce dispositif d'investigation. « *Il s'agit de transposer à l'environnement Terre-Soleil les méthodes de modélisation de la météorologie terrestre reposant avant tout sur la multiplicité des points de mesure* », explique Alexis Rouillard, qui codirige l'Oframe.

À l'horizon 2031, l'Agence spatiale européenne (ESA) envisage pour sa part de placer un observatoire de la météorologie spatiale au point Lagrange n° 5, un point d'observation situé à l'écart de l'axe Soleil-Terre. Alors qu'un télescope placé en orbite autour de la Terre, comme c'est le cas pour le satellite américain SDO, n'autorise qu'une vue « frontale » des tempêtes solaires, l'installation d'un instrument à ce point d'observation stratégique donnerait une vision déportée de la tempête solaire. Avantage : depuis cette position inédite, le futur satellite de l'ESA, baptisé Vigil, sera en mesure de repérer le moindre soubresaut éruptif de notre étoile et de suivre la propagation des tempêtes solaires en direction de la Terre jusqu'au moment de leur impact avec notre champ magnétique. **II**

3. L'expression fait référence à l'astronome britannique Richard Carrington (1826-1975) qui décrit cette tempête solaire.



Lire l'intégralité de l'article  
sur [lejournal.cnrs.fr](http://lejournal.cnrs.fr)

# LES IDÉES



*On se penche sur l'histoire  
du droit international et on se  
confronte aux frontières du réel.*

# Les États dans le viseur du droit international

## Quand le droit international est-il né ?

**Raphaëlle Nollez-Goldbach**<sup>1</sup>. Le droit international contemporain est né suite au choc des deux guerres mondiales et du génocide perpétré par les nazis. Dès 1945, l'Organisation des Nations unies (ONU) est créée avec pour but le maintien de la paix. Un des outils qu'elle se donne, c'est la Cour internationale de justice (CIJ), qui a le pouvoir de juger les différends entre États. À la même période, naît également l'idée d'établir une Cour pénale internationale (CPI), pour pouvoir juger les individus et notamment les chefs d'État responsables des crimes les plus graves. Mais à cause de la guerre froide, la CPI ne sera installée qu'en 2002.

## Pour quels motifs ces deux Cours peuvent-elles poursuivre un État ou un individu ?

**R. N.-G.** La CIJ règle les différends entre États uniquement, mais ne juge pas les individus. Si un État considère qu'une règle a été violée, qu'un de ses droits n'est pas respecté, il peut saisir la CIJ. La CPI, elle, juge des individus suspectés d'être responsables de crimes. Il s'agit d'une cour pénale, compétente pour juger de quatre



SOCIÉTÉS

**DROIT** Alors que la Cour pénale internationale examine une demande de mandat d'arrêt du Premier ministre israélien et de trois responsables du Hamas pour crimes contre l'humanité, Raphaëlle Nollez-Goldbach, spécialiste du sujet, revient sur l'histoire très récente du droit international.

PROPOS RECUEILLIS PAR MARINA JULIENNE

crimes. Le « génocide », qui désigne un acte visant à détruire un groupe national, ethnique, racial ou religieux. Ensuite, le « crime contre l'humanité », qui concerne les actes commis contre une population civile dans le cadre d'une attaque généralisée ou systématique (meurtres, torture, viols, transfert forcé, disparitions...).

Puis le « crime de guerre », qui vise les crimes commis contre des civils ou des combattants qui ne sont plus en état de se battre. C'est ainsi que la CPI, en mars 2023 a lancé un mandat d'arrêt contre Vladimir Poutine et Maria Lvova-Beleva, sa commissaire aux droits de l'enfant, pour le crime de guerre de « déportation illégale » d'enfants ukrainiens. Enfin un quatrième crime, le « crime d'agression » est constitué par l'usage illégal de la

force d'un État contre la souveraineté, l'intégrité territoriale ou l'indépendance politique d'un autre État.

## Quelles sont les limites de cette justice internationale ?

**R. N.-G.** Elle ne s'applique pas à tous les États. La CIJ n'est compétente que lorsque les parties se soumettent à sa juridiction, soit par une déclaration d'acceptation générale de sa compétence (or seulement 74 pays l'ont faite), soit au cas par cas lorsqu'un différend les oppose. Cette dernière possibilité lui permet de régler certains différends (limites frontalières, partages de ressources naturelles, etc.). En ce qui concerne la CPI, dont la compétence n'est pas non plus obligatoire pour les États, 123 États (sur les 193 membres de l'ONU) l'ont cependant acceptée.

1. Directrice de recherche au CNRS, au Centre de théorie et d'analyse du droit (CNRS/Université Paris Nanterre), Raphaëlle Nollez-Goldbach enseigne le droit international public, le droit pénal international et les négociations internationales à l'ENS-PSL. Elle est lauréate de la médaille de bronze du CNRS 2019.



© ALEXANDER KAZAKOV / POOL / AFP

► Le président russe Vladimir Poutine et Maria Lvova-Belova, sa commissaire aux droits de l'enfant, font l'objet d'un mandat d'arrêt lancé par la CPI en mars 2023, pour le crime de guerre de « déportation illégale » d'enfants ukrainiens. Ils sont ici à Moscou, le 31 mai 2024.

Même si des pays aussi puissants que les États-Unis, la Russie, la Chine, l'Inde et Israël ont choisi de rester en dehors. Or, la Cour ne peut intervenir que si le crime a été commis sur le territoire d'un État membre de la CPI, ou si l'auteur présumé est le ressortissant de l'un de ces États.

Malgré cela, des conflits majeurs peuvent se retrouver sous enquête de la CPI. Par exemple, la Palestine ayant choisi de rejoindre la CPI, les Palestiniens ayant commis des crimes en Israël peuvent être poursuivis, ainsi que les Israéliens ayant commis des crimes en territoire palestinien. Il en va de même pour les soldats russes commettant des crimes en Ukraine car si la Russie refuse toute idée d'une juridiction internationale, l'Ukraine a elle accepté la compétence de la CPI.

### La CPI a mis plusieurs années à asseoir sa légitimité ?

**R. N.-G.** Pendant ses vingt premières années d'existence, la Cour pénale internationale n'a instruit que des affaires concernant des conflits africains, et a été soupçonnée de partialité. De plus, si elle a condamné des chefs de guerre, ministres et chefs d'États lui ont tous échappé,

que les dossiers aient abouti à des acquittements faute de preuves, ou que les accusés soient en fuite. Mais depuis quelques années, les choses changent. L'ancienne procureure Fatou Bensouda<sup>2</sup> avait entamé des investigations sur les crimes contre l'humanité et les crimes de guerre commis en Afghanistan par les talibans, les organes sécuritaires du régime et les forces américaines, visant directement la CIA. L'enquête a finalement été autorisée en 2020. Avec l'arrivée du nouveau procureur Karim Khan en 2021, on sent une véritable inflexion dans la politique pénale menée par son Bureau. Quelle que soit la puissance des États, leurs dirigeants peuvent désormais être visés par des mandats d'arrêt.

C'est ainsi que la CPI a lancé un mandat d'arrêt contre Vladimir Poutine en 2023. Et que le procureur a demandé en mai 2024 aux juges d'émettre des mandats d'arrêt contre le Premier ministre d'Israël, Benyamin Netanyahu, et son ministre de la Défense Yoav Gallant, ainsi que contre trois des principaux dirigeants du Hamas. Des procédures engagées concomitamment, pour « crimes de guerre », et « crimes contre

l'humanité » dans les deux cas, afin de démontrer « que toutes les vies se valent », selon les termes du procureur Khan. Il reviendra aux trois juges de la chambre préliminaire de la CPI de déterminer, « dans un délai raisonnable » (quelques mois), si des mandats d'arrêt sont justifiés, en fonction des preuves fournies par l'accusation.

### Les « petits » pays n'hésitent plus à saisir la justice internationale ?

**R. N.-G.** Effectivement, des pays qui ne comptent pas parmi les plus puissants sur le plan international sont en train de s'emparer de ce nouveau droit. Par exemple, en mars 2024, le Nicaragua a saisi la CIJ contre l'Allemagne, qu'il estimait apporter une aide à la possible commission d'un génocide en Palestine à travers ses livraisons de matériel militaire à Israël. Sur un tout autre thème, celui des conséquences du réchauffement climatique pour les petits États insulaires dont le territoire est menacé par la montée des eaux, plusieurs États du Pacifique et des Caraïbes se sont coalisés, à l'initiative du Vanuatu, pour porter une demande d'avis devant la CIJ sur ce sujet. ...

2. Le procureur et les procureurs-adjoints sont nommés par l'« Assemblée des États parties » de la Cour, pour un mandat de neuf ans non renouvelable, au même titre que les juges de la Cour. La Gambienne Fatou Bensouda avait été nommée par consensus en 2011. Suite à des mois de discussions, le Britannique Karim Khan a été élu en 2021 après un vote à bulletin secret.

# À lire

## Mais la CPI ne dispose pas d'un pouvoir de police ?

**R. N.-G.** La plus grande difficulté pour la Cour, c'est effectivement d'accéder aux suspects. Seuls les États ayant ratifié le Statut de la CPI ont l'obligation d'arrêter toute personne poursuivie par la Cour et qui se trouverait sur leur territoire. Beaucoup de mandats d'arrêts ne sont donc pas exécutés. La Cour ne juge que les personnes présentes à l'audience.

## Comment vos recherches évaluent-elles l'impact de ces décisions de justice sur les conflits internationaux ?

**R. N.-G.** J'observe ce qui dans la diplomatie internationale, les discours, les actes des responsables étatiques, est affecté par ce nouveau droit international. Je me demande quels effets il produit sur les crimes commis et les potentielles négociations de paix. Ce qui est certain, c'est que si les chefs d'États au pouvoir se trouvent sous le coup d'un mandat d'arrêt, il leur est désormais impossible de se réfugier en exil ou d'obtenir des mesures d'amnistie. Surtout, ces procédures ont un impact sociétal et politique. Elles permettent de dire le droit et de légitimer une vérité judiciaire. Toutes les affaires traitées par la CIJ et la CPI sont par ailleurs publiques, les audiences faisant l'objet de procès-verbaux mis en ligne sur leurs sites internet.

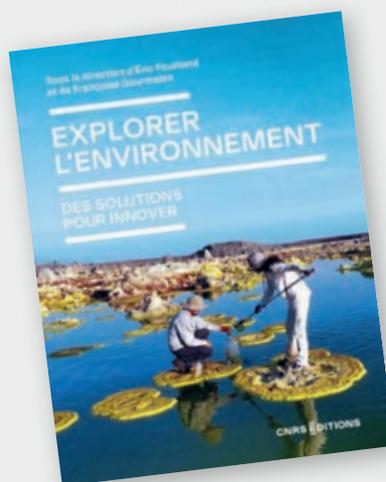
Donc des propos comme ceux du ministre israélien de la Défense Yoav Galant, qui avait dit à propos des Palestiniens : « *Nous imposons un siège total contre la ville de Gaza [...]. Nous combattons les animaux humains et nous agissons en conséquence* », ne peuvent plus être tenus. Et si demain une des deux Cours venait à dire que les dirigeants d'un État commettaient un génocide ou des crimes de guerre, l'impact politique et moral serait considérable, même si l'effet juridique resterait peut-être faible, en l'absence d'arrestation. ■

## Écologie

Et si écologie rimait avec innovation ? Dans cet ouvrage collectif, 58 innovations variées telles que l'entomoculture durable, le développement de crèmes solaires à base d'algues, la bioremédiation des pesticides ou encore l'adaptation des territoires côtiers au changement climatique, sont expliquées et décrites par plus de 180 scientifiques.

Incontournable pour celles et ceux qui pensent que les canons de la « start-up nation » ne peuvent pas s'appliquer à tous les domaines de la recherche.

**Explorer l'environnement. Des solutions pour innover**, Éric Fouilland et Françoise Gourmelon (dir.), CNRS Éditions, sept. 2024, 336 p., 26 €.

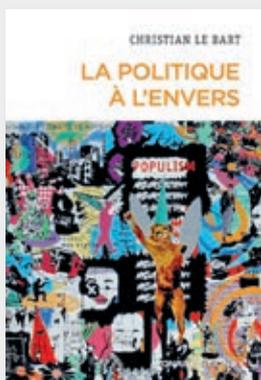


## Écosystèmes

Médaillée d'or du CNRS en 2023, la spécialiste de l'écologie fonctionnelle Sandra Lavorel raconte son parcours et les raisons qui l'ont poussée à s'orienter vers l'étude des écosystèmes dans leur entier. Une approche qui, selon elle, est nécessaire si l'on veut réellement saisir l'ensemble des services que les écosystèmes nous rendent. « *Il ne s'agit pas uniquement de décrire les espèces en présence [...] mais plutôt de comprendre par quels mécanismes [...] l'écosystème en question va fonctionner du fait des espèces qui s'y trouvent* », écrit-elle dans son introduction.

**Les Écosystèmes, un bien commun**, Sandra Lavorel, CNRS Éditions, coll. « Les grandes voix de la recherche », sept. 2024, 64 p., 9 €.





## Politique

« Des cumulants qui dénoncent le cumul des mandats, des énarques qui dénoncent l'ENA. » Pour Christian Le Bart comme pour d'autres spécialistes des sciences politiques, le système politique français subit des mutations importantes induisant de lourds

changements dans un système qui « jusqu'alors faisait preuve d'une redoutable stabilité ». Dans cet « essai sur le déclin de l'autonomie du champ politique », l'auteur analyse notamment la professionnalisation et la partisanisation de la politique française, deux phénomènes promouvant une politique à l'envers.

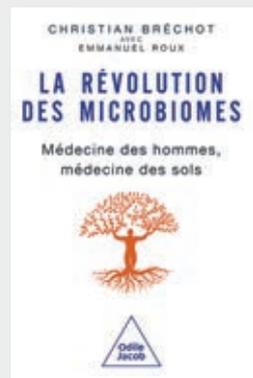
*La Politique à l'envers*, Christian Le Bart, CNRS Éditions, sept 2024, 280 p., 23 €.

## Microbes

On le sait de mieux en mieux, nous ne sommes pas seuls dans nos corps. En effet, des milliards de micro-organismes – bactéries, virus, champignons et autres parasites – nous peuplent et ce pour notre plus grand bien. Il en va de même pour les plantes, les sols et les océans. Adaptés à tous les milieux, ces petits êtres pourraient tout

simplement être la source de solutions plutôt que de problèmes, comme ils sont le plus souvent dépeints. Médecine, agriculture ou encore entretien de la biodiversité, les communautés microbiennes ont un rôle déterminant à jouer, il ne tient qu'à nous de nous y intéresser.

*La Révolution des microbiomes. Médecine des hommes, médecine des sols*, Christian Bréchet avec Emmanuel Roux, Ed. Odile Jacob, sept. 2024, 240 p., 18,99€.



## Jeunesse

L'astrophysicien Jean-Philippe Uzan nous raconte l'histoire de l'Univers à travers les pérégrinations de deux photons, Hor et Nour. Poétique et remplie de dessins, cette histoire de plus de 13 milliards d'années nous mènera de l'apparition des deux acolytes à leur première rencontre avec la matière, leur traversée de l'Univers, jusqu'à leur arrivée sur Terre. Un ouvrage clair, facile à lire pour les plus grands comme les plus petits.

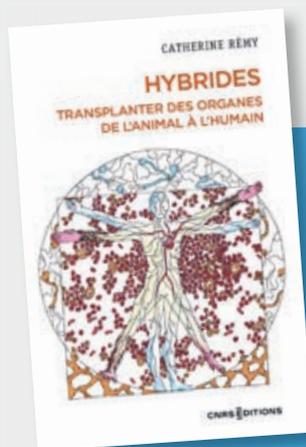
*L'Appel de l'Univers. L'aventure cosmique de Hor et Nour*, Jean-Philippe Uzan, Éditions H&K, juin 2024, 104 p., 9,99 €.



## Réflexions

Au fil d'une myriade de chapitres courts, le physicien François Vannucci nous fait part de ses réflexions sur le hasard. Ponctué de citations, l'ouvrage propose une balade philosophique tout en s'appuyant sur l'histoire des sciences. Finalement, qui de la physique classique, de la physique quantique ou de la métaphysique décrit le mieux le réel ? De prime à bord, la première semble la plus indiquée. Mais est-elle à même de tout expliquer et de tout prédire ? Peut-être pas, et c'est sans doute à ce moment que le hasard s'imisce et prend corps.

*La Promesse du hasard*, François Vannucci, Ed. Odile Jacob, juin 2024, 256 p. 23,90 €.



**Médecine** À travers une double enquête, historique et ethnographique, Catherine Rémy retrace plus d'un siècle d'expérimentations de transplantations d'organes d'animaux aux humains. Riche de multiples exemples, comme la première transplantation de testicules de grands singes sur des hommes en 1910, ou la greffe d'organes humanisés dans le courant des années 2000, la sociologue tente également de comprendre les motivations des chirurgiens de l'époque comme ceux d'aujourd'hui. Ces protocoles ont-ils été mis en

place pour soigner ou bien pour améliorer les receveurs ? Les animaux doivent-ils alors être considérés comme de simples « réservoirs d'organes » ?

*Hybrides. Transplanter des organes de l'animal à l'humain*, Catherine Rémy, CNRS Éditions, sept. 2024, 293 p. 25 €.

# Une anthropologie de l'invisible

SOCIÉTÉS



© VINCENT MICLOUD

**ENTRETIEN** Maisons hantées, fantômes, esprits... De la Mongolie à la Grande-Bretagne, l'anthropologue Grégory Delaplace enquête sur les différentes façons dont les morts se manifestent auprès des vivants. Il prend les « apparitions » au sérieux, refusant de juger *a priori* ce qui relève d'une vérité scientifique ou d'une illusion de la croyance.

PROPOS RECUEILLIS PAR NIDAL TAIBI ET MARINA JULIENNE

**Vos recherches portent sur « l'anthropologie de l'invisible ». Comment pouvez-vous étudier quelque chose qui ne se voit pas ?**

**Grégory Delaplace<sup>1</sup>.** À vrai dire, l'anthropologie n'étudie que des objets « invisibles ». L'étude de la croyance en des êtres spirituels y figure en bonne place et un grand nombre de concepts centraux en anthropologie, comme la « culture », la « nature », la « société », désignent des choses invisibles. Et c'est d'ailleurs le sens de notre discipline que de rendre ces concepts visibles en tant que composantes des mondes que les humains façonnent et habitent, avec lesquels ils interagissent.

**Peut-on dire que vos travaux traitent le « visible » et l'« invisible » à dignité égale ?**

**G. D.** Oui, à condition de ne pas définir l'invisible comme le contraire du visible. On pourrait dire que mes recherches visent à donner une dignité scientifique aux fantômes, en tant qu'archétypes des êtres qui existent en apparaissant. Dans le cadre de ce que l'anthropologue Philippe Descola a appelé « naturalisme », les sciences expérimentales ont fait avancer notre connaissance en repoussant les frontières du visible. Des êtres comme les micro-organismes, ou des phénomènes comme le magnétisme, ont pris place dans notre monde à mesure qu'ils étaient découverts. Mais d'autres phénomènes, comme les fantômes, exigent un type d'enquêtes différent.



À lire :

*L'invention des morts. Sépultures, fantômes et photographie en Mongolie contemporaine*, Grégory Delaplace, EPHE (Nord-Asie 1), 2008.

*Les Intelligences particulières. Enquête dans les maisons hantées*, Grégory Delaplace, Éditions Vues de l'esprit, Bruxelles, 2021.

Le pari d'une anthropologie de l'invisible, c'est de comparer la diversité des choses qui apparaissent dans les mondes humains, sans décider *a priori* de ce qui relève d'une vérité scientifique ou d'une illusion de la croyance.

**Vous avez d'abord étudié pendant plusieurs années les relations que les Mongols entretiennent avec leurs morts. Qu'en avez-vous retiré ?**

**G. D.** J'ai enquêté dès 1999 auprès des pasteurs nomades de l'extrême nord-ouest du pays et dans la capitale Ulaanbaatar (Oulan-Bator), pour étudier leurs rituels funéraires. J'ai également documenté la façon dont les morts se rendaient présents en dehors des circonstances où ils étaient expressément convoqués par les vivants, en essayant de comprendre le langage mis en œuvre pour rendre compte de l'apparition de ce qui n'est pas visible par tout le monde. J'ai pu montrer ainsi que les morts sont au centre de pratiques discrètes, par lesquelles éleveurs et citadins embrassent ou rejettent des

idéologies modernistes et socialisent un environnement peuplé de « maîtres » invisibles. Ces recherches ont donné lieu à une thèse et à un livre, *L'invention des morts* (EPHE, 2008).

**Vous avez poursuivi ce travail dans la Grande-Bretagne du XIX<sup>e</sup> siècle...**

**G. D.** J'ai trouvé les archives d'une société savante britannique, la Société pour la recherche psychique, *Society for Psychical Research* en anglais, fondée à Londres en 1882 par un groupe de chercheurs, physiciens et philosophes, avec pour but de comprendre les phénomènes paranormaux : la transmission de pensée, le « médiumnisme », etc. Ses enquêteurs interrogeaient les témoins de ces phénomènes dans toute l'Angleterre. L'un d'eux, Donald West, se montre sceptique : il renonce à établir des « faits » qui soient indépendants de la subjectivité des personnes, estimant qu'il est impossible de distinguer dans les maisons hantées ce qui pourrait concerner des phénomènes « authentiquement paranormaux » et ce qui relève simplement des croyances des

1. Médaille de bronze du CNRS en 2015, Grégory Delaplace est directeur d'études à l'École pratique des hautes études (EPHE), où il occupe la chaire d'anthropologie du religieux. Membre du Groupe Sociétés, Religions, Laïcités (CNRS/EPHE-PSL) et de l'Institut universitaire de France (2017-2022), il est également rédacteur en chef de *L'Homme, Revue française d'anthropologie*.



© TALLANDIER / BRIDGEMAN IMAGES

témoins, voire d'un déséquilibre psychique ou de canulars. Dans mon livre *Les intelligences particulières* (Vues de l'esprit, 2021), je reprends les enquêtes de Donald West en me demandant ce qu'il n'a pas semblé prendre au sérieux dans ce que les témoins ont vu. J'ai étudié plus particulièrement trois cas de maisons hantées, par exemple le récit d'une vieille dame qui voit apparaître une silhouette au pied de son lit le soir, ou des familles perturbées par toutes sortes de bruits incongrus dans leur maison la nuit. Ces cas ont fait l'objet de récits et d'enquêtes détaillées qui donnent leur matière au livre.

**Vous concluez qu'il existe des « intelligences particulières », susceptibles de percevoir ces esprits ?**

**G. D.** En fait je ne me suis pas posé la question de savoir si les fantômes existent ou pas, mais « comment » ils existent. En Mongolie, ils se manifestent par exemple par des tintements de cloches, des odeurs de cuisine, des lumières dans le ciel ; en Angleterre, ils prennent plutôt la forme de figures féminines, ou bien ils frappent des coups sur les murs. Dans tous les cas, les apparitions se

dérober à la caractérisation objective, provoquant une véritable inquiétude chez ceux et celles qui les perçoivent.

D'ailleurs, les fantômes se manifestent même auprès de personnes qui n'y croient pas, et ils ne vont pas nécessairement apparaître à ceux qui cherchent leur présence ! Ils émergent d'une relation « particulière » entre des personnes et des lieux. Cette relation – cette intelligence des lieux – est difficilement extensible au-delà des limites de ce petit groupe. En outre, elle se déploie souvent autour d'individus dont le caractère singulier ou l'histoire de vie les rend capables de percevoir ce que les autres ne voient pas. Ils sont dotés d'une « intelligence particulière » du monde. Comme si leur marginalité les avait accoutumés à percevoir des choses que les autres ne remarquent pas.

**Ces différentes recherches vous ont-elles permis de définir l'invisible ?**

**G. D.** S'il s'agit de définir l'invisible comme un concept anthropologique, il est important que cela permette de délimiter un ensemble de phénomènes comparables. Concrètement, si l'on définit l'invisible comme « ce

► Le physicien Camille Flammarion (à droite) assiste à une séance de spiritisme en 1897. Bien qu'il ait maintenu les jambes et les pieds de la médium (au centre) pour s'assurer de l'absence de supercherie, la table lévita cinq fois...

qui se dérobe à la vue », alors la comparaison s'effrite car cela désigne des choses trop disparates : quoi de commun entre une personne temporairement absente, une bactérie microscopique, le boson de Higgs, un objet caché, etc. ? De plus cela mélange deux types d'objets : certains qui peuvent être découverts et d'autres qui restent invisibles même après avoir été découverts. Comme les fantômes, justement qui restent toujours soumis au régime de l'apparition.

La question que pose l'anthropologie de l'invisible, à partir de cette définition – à savoir, l'invisible, c'est ce qui « apparaît », ce qui ne peut être définitivement « découvert » –, appelle donc de nouvelles enquêtes : qu'est-ce qui, dans notre monde, se comporte de la même manière qu'un fantôme ? De quelles choses invisibles nos mondes humains se composent-ils ? ||



À lire :

*La Voix des Fantômes. Quand débordent les morts,*  
Grégory Delaplace,  
Seuil, septembre 2024.



Lire l'intégralité de l'entretien sur [lejournal.cnrs.fr](http://lejournal.cnrs.fr)



de Denis Guthleben,  
historien au CNRS

# 40 ans de fonction publique

Comme un mal cruel mais nécessaire, deux extraits du *Journal officiel* introduisent cette chronique. Le premier provient d'un décret du 30 décembre 1983, paru le 7 janvier suivant : « Les métiers de la recherche sont exercés, au sein des établissements publics scientifiques et technologiques, par des fonctionnaires... » Le second, d'un autre décret du 27 décembre 1984 publié le lendemain : « Les fonctionnaires du Centre national de la recherche scientifique [...] sont répartis entre les corps suivants : attachés de recherche ; chargés de recherche ; directeurs de recherche ; ingénieurs de recherche », etc. Il y a 40 ans, nous avons été fonctionnarisés !

## « Chercheurs à vie »

Cette réforme n'est pas tombée du ciel. La question des statuts des personnels du CNRS est aussi vieille que l'organisme lui-même. Jean Perrin l'avait abordée avec lyrisme mais prudence : « Les recherches désintéressées de science pure ont été la source de presque tous les grands progrès [...] La Nation a le plus haut intérêt à découvrir les hommes qui sont le mieux doués pour ces recherches, à libérer leur activité, et à faciliter leur effort ». Or, le 19 octobre 1939, la Nation n'a offert à ces hommes – et à ces femmes ! – que des positions fragiles, avec des allocations renouvelables certes sans limites, mais aussi sans garanties.

*“La question des statuts des personnels du CNRS est aussi vieille que l'organisme lui-même.”*

Le directeur du CNRS désigné par Vichy s'est ensuite montré plus tranché : pour Charles Jacob, il ne fallait « pas créer un nouveau corps de fonctionnaires comportant des chercheurs à vie », afin d'« habituer les chercheurs à l'idée que leurs allocations sont temporaires » et « maintenues que suivant le rendement de leurs travaux ».

Le jugement de ce professeur – à vie – de géologie a survécu au naufrage du régime collaborationniste. Après

lui, la situation des salariés du CNRS n'a évolué qu'à la marge. Leur accroissement – 3 000 en 1950, 6 000 en 1958, 17 000 en 1969... – et leur mobilisation – nos premiers syndicats ont vu le jour dès la Libération – n'ont débouché que sur de rares aménagements.

Les personnels techniques sont devenus contractuels de l'État en 1952, et une « prime de participation à la production scientifique » leur a été accordée trois ans plus tard pour tenter de compenser un déficit d'attractivité face au secteur privé – l'Histoire ne serait-elle qu'un éternel recommencement ? Bien plus tard, en 1980, un statut des chercheurs contractuels a prévu des recrutements « pour une durée indéterminée ».

## « Brûler le CNRS ? »

En 1981, François Mitterrand s'engage à prendre le sujet à bras le corps, promesse que le candidat à la présidentielle tient après sa victoire – c'est donc possible ! Les statuts sont examinés pendant les Assises de la recherche organisées dans la foulée, débattus lors du colloque national qui les a conclues en janvier 1982, et ont fini par être inscrits dans la loi de programmation du 15 juillet 1982, prolongée par les décrets de 1983 et 1984. Puisque « les métiers de la recherche concourent à une mission d'intérêt national », leurs statuts « doivent garantir l'autonomie de leur démarche scientifique, leur participation à l'évaluation des travaux qui leur incombent », de même que « la libre circulation des idées ». De louables ambitions, mais qui sont venues à rebours d'une idéologie alors dominante selon laquelle « l'État, c'est le problème », et ont subi en prime l'effet de préjugés bien ancrés sur la fonction publique dans notre pays, où Clemenceau voyait planter des fonctionnaires et pousser des impôts.

Il n'est qu'à parcourir les colonnes de la presse pour s'en rendre compte : au milieu des années 1980, certains commentateurs ont accueilli cette « fonctionnarisation » comme le préambule d'une tragédie qui allait conduire les chars de l'armée rouge jusqu'au siège du CNRS ! La télévision n'a pas fait mieux : dès 1985, Michel Polac a animé sur TF1 une émission, *Faut-il brûler le CNRS ?*, où les nouveaux statuts ont subi un feu nourri. Les braises, depuis, ne se sont jamais éteintes : alors, peut-on être « chercheur à vie » ? Rien n'interdit de poser la question. Mais pourquoi la restreindre à ce métier seulement ? Peut-on être boulanger, pharmacien, banquier, greffier, mytiliculteur ou universitaire à vie ? ||



La banque coopérative  
de la Fonction publique

CASDEN Banque Populaire - Société Anonyme Coopérative de Banque Populaire à capital variable - Siège social : 1 bis rue Jean Wiener 77420 Champs-sur-Marne - Siren n° 784 275 778 - RCS Meaux - Immatriculation ORIAS n° 07 027 138 - BPCE - Société anonyme à directeur et conseil de surveillance au capital de 188 932 730 euros - Siège social : 7, promenade Germaine Sablon, 75 013 Paris - RCS Paris n° 493 455 042 - Immatriculation ORIAS n° 08 045 100 - Crédit photo : © Roman Jehanno - Conception : Insign 2021 - Merci à Jenny, enseignante chercheuse d'avoir prêté son visage à notre campagne de communication.

# COMME MOI, REJOIGNEZ LA CASDEN, LA BANQUE DE LA FONCTION PUBLIQUE !

*Jenny, Enseignante chercheuse*



[casden.fr](https://www.casden.fr)



Retrouvez-nous chez



# CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS

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



Entrez dans  
les coulisses  
de la recherche



CNRS ÉDITIONS

[www.carnetsdescience-larevue.fr](http://www.carnetsdescience-larevue.fr)