

Trimestriel n° 323  
AVRIL 2026

# CNRS

## LE JOURNAL



**DOSSIER**  
La géo-ingénierie  
sauvera-t-elle le climat?

**PORTFOLIO**  
Ces géants qui  
scrutent l'Univers

**MICROBIOTE  
VÉGÉTAL**  
Ses étonnants pouvoirs

**CANCER**  
Un nouveau mécanisme  
de résistance identifié



# AGENTS DE LA FONCTION PUBLIQUE, CHEZ NOUS, VOUS ÊTES CHEZ VOUS.

Près de 2 millions de Sociétaires ont choisi de nous faire confiance. Parce que nous connaissons bien les besoins des agents de la Fonction publique : première affectation, déménagement suite à une mutation, achat immobilier<sup>(1)</sup> et pour tous les autres moments de la vie qui comptent, la CASDEN se tient toujours à vos côtés.



La banque coopérative  
de la Fonction publique

Rendez-vous sur [casden.fr](https://www.casden.fr)\* ou retrouvez-nous chez



\*Coût de connexion selon votre opérateur.

<sup>(1)</sup>Offre soumise à conditions et dans les limites fixées par l'offre de crédit, sous réserve d'acceptation de votre dossier par l'organisme prêteur, la CASDEN Banque Populaire. Pour le financement d'une opération relevant des articles L 313-1 et suivants du code de la consommation (crédit immobilier), l'emprunteur dispose d'un délai de réflexion de 10 jours avant d'accepter l'offre de crédit. La réalisation de la vente est subordonnée à l'obtention du prêt. Si celui-ci n'est pas obtenu, le vendeur doit rembourser les sommes versées.

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 directoire et conseil de surveillance au capital de 207 603 030 euros. • Siège social : 7, promenade Germaine Sablon 75013 PARIS – Siren n° 493 455 042 – RCS Paris – Immatriculation ORIAS n° 08 045 100 • Conception : •becoming • Crédits photos : SolAir • Illustrations : ©Frédéric Rébèna • Document à caractère publicitaire et sans valeur contractuelle. Ne pas jeter sur la voie publique.

**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 communication :**

Jérôme Guilbert

**Directeur de la rédaction :**

Saman Musacchio

**Rédactrice en chef :**

Laure Cailloce

**Rédacteur en chef adjoint :**

Yaroslav Pigenet

**Chefs de rubrique :**

Mehdi Harmi, Marina Julienne

**Rédacteurs :**

Lou Andrey, Marine Christille, Sonia Collavizza

Sophie Félix, Apolline Flori, Cyril Frésillon,

Maxime Lerolle, Laurence Stenvot

**Ont participé à ce numéro :**

Thomas Allard, Kheira Bettayeb,

Anne-Sophie Boutaud, Mathieu Grousseau,

Émilie Martin, Charlotte Mauger

**Secrétaire de rédaction :**

Fabien Maréchal

**Directeur artistique :**

David Faure

**Iconographes :**

Anne-Emmanuelle Héry, Sophie Léonard

et Valérie Delchambre

**Gestionnaire :**

Mathieu Chatellier

**Assistant de direction :**

Frédéric Roman

**Impression :**

Roto France Impression

25 rue de la Maison Rouge, 77185 Lognes

ISSN 2261-6446

Dépôt légal : à parution



Photos CNRS disponibles à :  
contact-mediathèque@cnrs.fr  
<https://images.cnrs.fr>

La reproduction intégrale ou partielle des textes  
et des illustrations doit faire obligatoirement l'objet  
d'une demande auprès de la rédaction.

**En couverture :**

Grand télescope à La Palma (Espagne).

© Cyril Frésillon/LAPP/CNRS Images

**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



**A** lors que les effets du changement climatique s'imposent dans le quotidien et que le coût de l'inaction pèse déjà sur les populations et les économies, les appels scientifiques à réduire massivement les émissions de gaz à effet de serre restent peu audibles face aux polémiques et aux fausses informations. À l'inverse, l'idée d'« intervenir » directement sur le climat s'installe dans certaines stratégies médiatiques, étatiques ou privées. Injecter des aérosols dans la stratosphère pour réfléchir le rayonnement solaire, modifier l'océan pour absorber plus de CO<sub>2</sub>, ou agir sur les nuages pour refroidir la planète : ces projets, qualifiés de « géo-ingénierie » ou d'« intervention climatique », visent à modifier à grande échelle le système Terre pour limiter le réchauffement climatique. S'ils séduisent par leur apparente simplicité et semblent répondre à l'urgence, ils constituent surtout un tournant historique exigeant une vigilance extrême face aux incertitudes et questions majeures qu'ils soulèvent.

Le consensus scientifique est clair : stabiliser le climat exige avant tout une réduction rapide et massive des émissions de gaz à effet de serre. L'élimination du CO<sub>2</sub> atmosphérique n'est à envisager que pour compenser les émissions résiduelles. Étudier les techniques de retrait du carbone, leurs limites et leurs impacts constitue donc un programme de recherche légitime.

*« Stabiliser  
le climat impose  
avant tout  
de transformer  
nos activités,  
non la planète  
elle-même »*

Le cas est différent pour des approches plus intrusives, comme la modification du rayonnement solaire, qui n'agit pas sur la cause du réchauffement ni n'empêche l'acidification des océans. Elles produisent des risques encore méconnus et impliquent un engagement de très longue durée, dont l'interruption pourrait provoquer un réchauffement brutal, créant une dépendance technique et politique inédite. Elles portent le risque de l'illusion d'un « correctif » climatique affaiblissant la volonté de réduire les émissions. Pourtant, la recherche ne peut en être totalement écartée face au risque de déploiements non contrôlés.

La recherche publique doit produire, de manière interdisciplinaire, les connaissances nécessaires pour évaluer ces approches. Sa responsabilité est multiple : accompagner la réduction des émissions, approfondir l'évaluation des solutions de retrait du carbone, développer des systèmes de surveillance et analyser les risques des interventions les plus radicales, sans en préparer le déploiement.

Ces travaux doivent être d'abord fondés sur la modélisation, en excluant tout déploiement sans évaluation préalable de la robustesse scientifique, des impacts écologiques et sociétaux, ainsi que des rétroactions à toutes les échelles. À l'image de la recherche biomédicale, des comités d'éthique opérationnels doivent garantir ces évaluations.

L'intervention climatique ne doit pas devenir l'horizon implicite de la politique climatique. Elle doit rester un objet d'examen critique éclairé par la science et débattu collectivement. Stabiliser le climat impose avant tout de transformer nos activités, non la planète elle-même.

Jean-François  
Doussin,  
directeur adjoint de  
CNRS Terre & Univers



© CNRS TERRE &amp; UNIVERS



# GRAND FORMAT

# 11

La géo-ingénierie sauvera-t-elle la planète ? .....	12
En mer ou dans le ciel, des solutions jamais vues .....	14
Quelles règles pour réduire le CO <sub>2</sub> océanique ? .....	19
Ces géants qui scrutent le ciel .....	22
Femmes du Néolithique : une société au microscope .....	28



Étonnants pouvoirs  
du microbiote végétal

# 42



Votre cuisine  
est pleine de maths !

# 44



Les jeux vidéo violents  
rendent-ils violents ?

# 62

## EN PERSONNE

## 5

Les « Ingénieuses » défient les stéréotypes de genre .....	6
« CNRS Innovation occupe une position unique » .....	9
Brèves .....	10

## EN ACTION

## 35

Le dinosaure qui pique la vedette .....	36
Amsterdam, l'île confetti aux avant-postes de la recherche .....	38
Étonnants pouvoirs du microbiote végétal .....	42
Votre cuisine est pleine de maths ! .....	44
Les nouvelles routes de la cocaïne .....	47
Un mécanisme clé de résistance des cancers identifié .....	50
Avec les femmes du « Made in China » .....	52
Le CNRS, explorateur de l'Univers .....	56

## LES IDÉES

## 59

Dans la forge des mots nouveaux .....	60
Les jeux vidéo violents rendent-ils violents ? .....	62
À lire, à voir .....	65

## LA CHRONIQUE

Il y a 60 ans, les laboratoires associés .....	66
--	----



## EN PERSONNE

*« Quand j'ai découvert  
la mécanique des matériaux,  
j'ai eu un coup de cœur.  
J'ai senti que ce que je voulais  
faire, c'était comprendre leurs  
comportements. »*

# Les « Ingénieuses » défient les stéréotypes de genre



L'ingénierie, chasse gardée des hommes ? Pour démentir les stéréotypes de genre associés aux métiers de l'ingénierie, CNRS Ingénierie a tiré le portrait de 12 femmes ingénieures dans le cadre de son Année de l'ingénierie. Quatre d'entre elles retracent leur parcours.

PAR ÉMILIE MARTIN • PHOTOS THIERRY HAGE / GORILLA PHOTOGRAPHIE

Pour combattre les préjugés et encourager les vocations féminines, une exposition photographique organisée par CNRS Ingénierie dans le cadre de son Année de l'ingénierie met à l'honneur 12 portraits d'« Ingénieuses ». Quatre d'entre elles, ingénieure chacune à leur façon, évoquent leur métier avec passion, comme un vaste terrain de jeu dans lequel tout le monde, filles comme garçons, peut s'épanouir.

## **Louise Le Barbenchon et les matériaux poreux**

« Quand j'ai découvert la mécanique des matériaux, j'ai eu un coup de cœur. J'ai senti que ce que je voulais faire, c'était comprendre leurs comportements » : l'épiphanie de Louise Le Barbenchon survient dès son entrée à l'École nationale supérieure des ingénieurs en arts chimiques et technologiques, à Toulouse, en spécialité Matériaux. Son diplôme en poche, elle enchaîne avec une thèse aux Arts et Métiers de Bordeaux sur « le comportement

*mécanique de composites à base de liège sous sollicitation sévère* ». Dès son doctorat, Louise Le Barbenchon plonge donc dans l'intimité des matériaux poreux et travaille en particulier sur le comportement des matériaux dits « architecturés » – ceux dont les propriétés émergent davantage de la façon dont leur structure est organisée (par exemple, la répétition de motifs à l'échelle microscopique) que de la matière elle-même.

De la santé à l'aéronautique, *via* l'architecture, leurs applications sont très nombreuses – par exemple, dans les mousses qui tapissent l'intérieur des casques de moto et de vélo. Ceux-ci devant protéger la tête, il est essentiel d'étudier leur comportement « en dynamique », notamment lors des chocs à très grande vitesse, et de développer de nouvelles structures toujours plus efficaces. C'est ce à quoi la chercheuse s'emploie depuis qu'elle a été recrutée au CNRS, en 2021, *via* la filière handicap, au sein de l'Institut de mécanique et d'ingénierie<sup>1</sup>.

Elle plaide en parallèle pour une plus forte féminisation des sciences. Responsable égalité de son laboratoire et membre de l'association Femmes & Sciences, elle se rend régulièrement dans les écoles primaires, collèges et lycées pour encourager les jeunes filles à se tourner vers la science.

1. Unité CNRS/Ensam/Bordeaux INP/Univ. de Bordeaux.



### Helen Reverón, la pro des céramiques

La carrière d'Helen Reverón commence au Venezuela, son pays d'origine. En 1996, après un diplôme en sciences des matériaux à l'université de Caracas, elle obtient une bourse pour mener une thèse au sein de la très prestigieuse École nationale supérieure de céramique industrielle de Limoges. « *Les céramiques, c'est un champ immense*, explique la chercheuse. *Cela regroupe tout ce qui n'est ni métal ni polymère.* »

Après un bref retour au Venezuela, elle s'installe définitivement en France en 2003, du fait de la forte instabilité politique dans son pays. Elle intègre le CNRS en 2007, au sein du laboratoire Matériaux, ingénierie et science de l'Institut national des sciences appliquées de Lyon<sup>2</sup>.

Aujourd'hui directrice de recherche et coautrice de plusieurs brevets, elle dédie son expertise à des céramiques aux besoins de la médecine : « *Depuis maintenant une vingtaine d'années, nous développons des matériaux céramiques spécifiques pour des prothèses de hanches, de genoux, du rachis ou encore dentaires capables de durer plus de 60 ans, contrairement aux prothèses actuelles, métalliques, qui doivent être remplacées tous les 15 ou 20 ans.* »

Pour ce faire, elle explore avec ses équipes la fabrication additive. Ce procédé consiste à imprimer des implants céramiques en 3D, couche par couche, à partir des

► De gauche à droite: Louise Le Barbençon, Helen Reverón et Myriam Saadé.

scanners des patients, afin de produire des prothèses adaptées à chacun d'entre eux – et sans générer de déchets. C'est que l'impact environnemental de la recherche est au cœur des préoccupations d'Helen Reverón : « *Avec la fabrication additive, on utilise moins de matière que si l'on sculptait un bloc de céramique, mais cela nécessite un chauffage à haute température. Il est crucial de déterminer le ratio avantages/coût environnemental de ces recherches, afin que chaque décision sur leurs applications se prenne de façon éclairée.* »

### Myriam Saadé, au service de l'environnement

Ce n'est pas Myriam Saadé, directrice d'Utopii<sup>3</sup>, qui la contredirait. Cette unité d'appui et de recherche lancée en avril 2025 a pour vocation d'évaluer les impacts environnementaux de la recherche en ingénierie et dans les nouvelles technologies. Et ce, en prenant en compte le changement climatique, la santé humaine, la biodiversité et la gestion des ressources naturelles : « *Nous analysons le cycle de vie des pratiques de recherche (des équipements ou des essais en laboratoire),* précise la chercheuse, *mais*

2. Unité CNRS/Insa Lyon/Univ. Lyon 1 Claude Bernard. 3. Unité transdisciplinaire d'orientation et de prospective des impacts environnementaux de la recherche en ingénierie (unité CNRS/Aix-Marseille Univ./Ensa/ENPC/Insa/Sorbonne Univ.).

nous évaluons également de manière prospective des technologies émergentes dans différents domaines de l'ingénierie, comme les nanomatériaux médicaux. »

« J'ai découvert le métier d'ingénieure vers 14-15 ans, raconte-t-elle. La fille d'amis de mes parents, qui était ingénieure agronome, m'avait raconté qu'elle faisait du terrain en Afrique, ça m'avait fascinée ! » En France, aucune formation ne correspond alors vraiment à ce qu'elle veut entreprendre, des études d'ingénierie autour de la protection de l'environnement. Elle entame donc un cursus en Suisse, à l'École polytechnique fédérale de Lausanne.

« Mon diplôme en poche, je me suis rendue en Syrie, d'où vient mon grand-père paternel, dans une démarche de "retour aux sources" ». Elle y mène une thèse sur l'exploitation des eaux souterraines en région semi-aride et en contexte autoritaire. Thèse qu'elle soutient en 2011, année où la guerre éclate en Syrie. Elle poursuit ses recherches à l'Institut des hautes études internationales et du développement, à Genève, sur la gestion des eaux transfrontalières entre le Liban, la Syrie et la Turquie.

Devenue mère en 2016, elle choisit de quitter les terrains compliqués et s'installe en France. À partir de 2018, elle mène des recherches au laboratoire Navier<sup>4</sup> sur l'évaluation des impacts environnementaux du secteur de la construction et du génie civil, avant d'être recrutée au CNRS en 2024 et de prendre la direction d'Utopii.

### Aurore Loisy, la science a du flair

Aurore Loisy a su très tôt qu'elle voulait embrasser une carrière en science ou en ingénierie : « J'ai d'abord suivi un parcours classique : une école d'ingénieur, puis une thèse en mécanique des fluides. Mais il s'agit d'une discipline déjà mature, avec des siècles d'histoire, et je craignais de ne rien pouvoir y apporter de très nouveau. Je voulais certes travailler en mécanique des fluides, mais sur des problèmes encore peu explorés, si possible à l'interface avec la biologie et la robotique, deux disciplines qui me passionnaient. »

Elle trouve sa voie dès son arrivée à l'Institut de recherche sur les phénomènes hors équilibre (Irphé)<sup>5</sup>, à Marseille, où elle cherche à expliquer le mouvement des bactéries, des insectes, ou encore du plancton dans des fluides. « Les problèmes que je tente de résoudre sont beaucoup liés à l'éthologie (l'étude du comportement animal), résume-t-elle. Comment naviguent les insectes dans l'air, les poissons ou les bactéries dans l'eau, pour migrer, s'accoupler,



▼ Aurore Loisy

trouver de quoi manger ? Quel rôle jouent les fluides dans ces dynamiques ? Je propose des modèles qui, grâce à des collaborations avec mes collègues biologistes, vont pouvoir être confrontés à des expériences de terrain. C'est passionnant ! »

À l'Irphé depuis six ans, Aurore Loisy développe Otto, un réseau de neurones entraîné à localiser la source d'une odeur dans la turbulence, avec une efficacité inédite : « Imaginez que vous deviez retrouver la source d'une odeur de parfum en extérieur, uniquement avec votre odorat. C'est extrêmement complexe, car les mouvements de l'air dispersent ces molécules odorantes de façon chaotique. À cet exercice, les insectes sont bien plus performants que nous. Les moustiques, par exemple, retrouvent facilement l'origine des odeurs humaines dans un jardin... ».

Avec Otto, la chercheuse entend affiner notre compréhension du sens de l'olfaction chez les insectes, mais aussi contribuer à la sécurité des personnes : « Otto pourrait être installé sur des robots qui, dans un cadre militaire, sont déployés afin de détecter des explosifs (dont les substances chimiques s'échappent dans l'air) ».

Jonglant avec la mécanique des fluides, la biologie et la robotique, Aurore Loisy fait la démonstration que l'ingénierie est un formidable terrain d'épanouissement. II

« Je voulais certes travailler en mécanique des fluides, mais sur des problèmes encore peu explorés. »

4. Unité CNRS/ENPC/EIVP/Univ. Gustave Eiffel

5. Unité CNRS/Aix-Marseille Univ./Centrale Méditerranée.

# «CNRS Innovation occupe une position unique»

## Quels enjeux orientent la stratégie de CNRS Innovation ?

**Thomas Ribeiro** CNRS Innovation occupe une position unique par son rôle d'interface entre les écosystèmes de la valorisation aux échelles locale, nationale et européenne. Premièrement, nous devons nous assurer que l'ensemble des actions menées par le CNRS se retrouve dans l'offre proposée par les Pôles universitaires d'innovation (PUI) sur les territoires. C'est dans cette optique que nous allons amplifier le déploiement des ingénieurs innovation au sein des délégations régionales.

À l'échelle nationale, il existe un véritable enjeu concernant la valorisation des Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR). Ces projets s'appuyant sur de nombreux laboratoires partout en France, il est indispensable de coordonner efficacement les actions des différentes parties prenantes – que ce soit aux échelons locaux, avec les Sociétés d'accélération du transfert de



© M. BOURGLET / CNRS INNOVATION

Thomas Ribeiro, directeur général de CNRS Innovation depuis juillet 2025, nous en dit plus sur ses orientations en matière de valorisation, de partenariats et d'accompagnement.

PROPOS RECUEILLIS PAR APOLLINE FLORI

technologies et les PUI, ou nationaux, au niveau des organismes nationaux de recherche.

## Qu'en est-il sur le plan européen ?

**T. R.** Les guichets de financement européens à l'innovation sont particulièrement sélectifs et nécessitent de considérer la création de valeur économique des projets soumis. C'est pourquoi il nous paraît important de consolider notre positionnement à ce niveau. C'est notre cœur de métier, et nous apportons ici notre expertise aux chercheuses et chercheurs souhaitant mobiliser ces dispositifs.

► Infalsifiable, ce token produit par l'entreprise Sam est en partie né au CNRS.



© CYRIL RÉZILLON / SAM / JIL / LORIA / CNRS IMAGES

## Quels sont les objectifs de CNRS Innovation pour les prochaines années ?

**T. R.** Depuis mon arrivée, en 2019, j'ai pu apprécier la montée en puissance de CNRS Innovation, qui s'est par exemple manifestée par la mise en œuvre et la professionnalisation de programmes d'accompagnement désormais références dans l'écosystème, tels que Rise [*appui aux start-up, Ndlr*] ou la prématuration. C'est cette dynamique ambitieuse initiée par mes prédécesseurs que je souhaite poursuivre. Pour ce faire, nous avons formalisé, avec une trentaine de collaborateurs, un plan d'actions triennal prenant en compte un contexte de contraintes budgétaires.

Il s'articule autour de plusieurs axes, dont trois principaux. *Primo*, accroître nos interfaces avec le monde économique, pour augmenter nos opportunités de transfert et améliorer nos capacités d'accompagnement. Il s'agit ici de rapprocher les milieux de la recherche innovante et de l'entreprise en faisant converger leurs intérêts. *Secundo*, construire et diffuser de nouvelles pratiques de transfert validées par l'écosystème afin d'accélérer le déploiement des briques technologiques développées dans les laboratoires du CNRS vers le monde économique. *Tertio*, positionner les actions de CNRS Innovation dans l'écosystème européen et en devenir une référence, notamment en investissant un espace de dialogue auprès des instances institutionnelles européennes.

## Quelle forme ces actions vont-elles prendre, concrètement ?

**T. R.** Cela pourra être la création d'une cellule d'intelligence économique et d'un poste de responsable de la stratégie partenariale, la structuration d'une offre d'accompagnement de projets à l'European Innovation Council (EIC), ou encore la mise en place d'un comité stratégique pour CNRS Innovation rassemblant des représentants du monde économique et de l'écosystème de l'innovation européen. Toutes les pistes sont explorées. ||



© LAURENT ARSOLINI

## Prix Irène Joliot-Curie : deux lauréates au CNRS

Deux chercheuses du CNRS figurent parmi les lauréates du prix Irène Joliot-Curie, qui récompense l'excellence scientifique et l'engagement en faveur de la place des femmes dans la recherche. Valentina Emiliani, directrice de recherche à l'Institut de la vision<sup>1</sup>, reçoit le prix de la Femme scientifique de l'année. Spécialiste

d'optique et de lasers, elle a mené des travaux pionniers en opto-génétique et en microscopie haute résolution, notamment autour de l'holographie pour manipuler la lumière à l'échelle cellulaire, ouvrant de nouvelles perspectives thérapeutiques pour la restauration de la vision. Maïmouna Bocoum, chercheuse à l'Institut Langevin<sup>2</sup>, est distinguée dans la catégorie « Jeune femme scientifique ». Après avoir développé des capteurs quantiques appliqués à la détection des ondes gravitationnelles, elle travaille sur de nouvelles approches d'imagerie biomédicale en combinant optique et ultrasons, afin d'explorer en profondeur les tissus biologiques *in vivo*.

1. Unité CNRS/Inserm/Sorbonne Univ. 2. Unité CNRS/ESPCI PARIS-PSL.



© COLLECTION PERSONNELLE

## Anne-Laure Thomas Derepas

directrice de la DDAPI

Anne-Laure Thomas Derepas, ingénieure de recherche, est nommée directrice de la direction des données, analyses et prospective pour l'innovation (DDAPI) du CNRS à compter du 1<sup>er</sup> mars 2026. Docteure en physicochimie, elle a exercé à l'interface entre recherche et innovation, notamment au CNRS, au cabinet de

la ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, à l'Inpi et au sein de la start-up d'État Pix, avant de piloter la valorisation et les partenariats de l'Institut des systèmes complexes de Paris Île-de-France. Nouvellement créée au sein de la direction générale déléguée à l'innovation, la DDAPI a pour mission d'éclairer les stratégies d'innovation du CNRS grâce à l'analyse des données et à la prospective.



© PIX

## Céline Bataillon

directrice de la CNPS

Au 1<sup>er</sup> février 2026, Céline Bataillon a pris la tête de la Coordination nationale de prévention et sécurité (CNPS) du CNRS, qui définit et met en œuvre la politique nationale de prévention de l'établissement. Ingénieure de recherche en prévention des risques professionnels, elle a rejoint le CNRS en 2006, au sein de la délégation régionale Hauts-de-France. Elle rejoint en 2014 la CNPS, dont elle devient la directrice adjointe en 2021, avant d'en prendre la direction.



© COL. PERS

## Nominations dans les délégations régionales

Sont nommés délégué régional : Benoît Forêt, à Paris Centre, au 1<sup>er</sup> janvier 2026 ; Marjolaine Robillard, en Centre Limousin Poitou Charente, au 1<sup>er</sup> avril ; et Younis Hermès, en Île-de-France Gif-sur-Yvette, au 1<sup>er</sup> mai.

## La Société géologique de France couronne Marie-Pierre Doin

Directrice de recherche à CNRS Terre & Univers, Marie-Pierre Doin reçoit le Grand Prix 2025 de la Société géologique de France. Spécialiste de la dynamique des enveloppes solides de la Terre, elle est récompensée pour l'originalité et l'impact durable de ses travaux, qui explorent les phénomènes allant de la convection mantellique aux déformations de surface. Ses recherches ont notamment contribué à l'essor de l'imagerie InSAR pour l'étude de la déformation de la Terre.

# GRAND FORMAT

## GRAND FORMAT

*« Même si la capture de CO<sub>2</sub> pourrait compléter les réductions d'émissions, elle ne peut en aucun cas les remplacer. »*



# *La géo-ingénierie sauvera-t-elle la planète?*

TERRE

SOCIÉTÉS

Retirer du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère en intervenant sur la pompe à carbone océanique, limiter le rayonnement solaire en pulvérisant des aérosols dans la stratosphère... Les solutions de géo-ingénierie climatique se multiplient et, pour certaines, sont déjà à l'essai à petite échelle. Les scientifiques restent prudents et réclament une évaluation de ces dispositifs et de leurs conséquences.

DOSSIER COORDONNÉ PAR LAURE CAILLOCE • ILLUSTRATIONS DE GWEN KERAVAL



# En mer ou dans le ciel, des solutions jamais vues

Le constat est sans appel. D'un côté, une stabilisation du réchauffement climatique à 1,5 °C au-dessus des températures préindustrielles, comme les pays du monde entier l'ont acté en 2015 avec l'accord de Paris, nécessite d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 – la limite de +2 °C permettant de gagner une vingtaine d'années, tout au plus. De l'autre, les émissions mondiales de gaz à effet de serre continuent d'augmenter, nous projetant vers un réchauffement de 3,1 °C à la fin du siècle...

Aussi, de plus en plus d'experts en sont convaincus : pour éviter le chaos climatique, les objectifs de réduction des émissions ne seront pas suffisants. Dans la lutte contre le réchauffement climatique, la **géo-ingénierie** est désormais en vogue.

Plusieurs techniques sont aujourd'hui à l'étude. L'une des pistes consiste à retirer du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère de manière indirecte, en utilisant la capacité de l'océan à dissoudre le CO<sub>2</sub> atmosphérique. Une autre est le renvoi vers l'espace d'une partie du rayonnement solaire, par exemple en injectant des aérosols dans la stratosphère.

Si la communauté scientifique s'est emparée il y a peu de ces sujets, c'est avec une grande prudence. Divisés, les chercheurs estiment qu'il faut appréhender avec sérieux les possibles conséquences environnementales et sociétales de déploiements à grande échelle. Et s'interroger sur l'efficacité réelle de ces techniques.

En 2014, dans son cinquième rapport, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) lui-même envisageait de recourir à des techniques de captation de CO<sub>2</sub> – la seule façon, selon lui, d'atteindre l'objectif de

Considérée il y a encore quelques années comme une lubie d'apprentis sorciers, la géo-ingénierie est peu à peu montée en puissance, jusqu'à s'imposer dans le débat public comme une solution viable au dérèglement climatique. Mais l'est-elle vraiment ?

PAR MATHIEU GROUSSON

## Géo-ingénierie

Ensemble des procédés qui visent à modifier de manière volontaire le climat de la Terre en vue d'atténuer le réchauffement climatique.

« 0 émission nette ». Dans le rapport, les experts mettaient en avant l'idée d'une reforestation importante, la forêt agissant comme une véritable pompe à carbone. Cette reforestation se doublerait d'une production d'énergie par combustion de biomasse (au lieu des énergies fossiles), dont on pourrait stocker les émissions de CO<sub>2</sub> dans des couches géologiques profondes. Le tout devait permettre de retirer jusqu'à 12 gigatonnes (milliards de tonnes) de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère à l'horizon 2100, soit environ un quart des émissions actuelles d'origine

Un pulvérisateur pour l'éclaircissement des nuages, sur le pont d'un porte-avions désarmé, en Californie, en 2024. Cette technique vise à renvoyer le rayonnement solaire vers l'espace.





humaine, annonçait alors le document. Mais, avant d'enfourer le CO<sub>2</sub> issu de la combustion, encore faut-il le capter... Depuis, les chiffres ont été largement revus à la baisse. Plus prudent, le sixième rapport du Giec, paru en 2023, souligne toutes les limites des technologies envisagées.

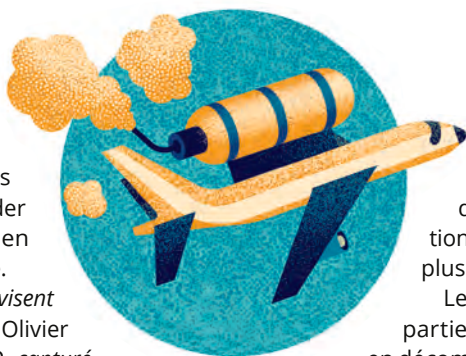
### L'océan, une pompe à carbone à booster ?

Autre pompe à carbone naturelle, l'océan apparaît comme l'endroit idéal pour piéger nos émissions de gaz à effet de serre. En effet, il échange en continu des gaz avec l'atmosphère. L'océan a ainsi absorbé environ 25 % des émissions d'origine humaine depuis le début de l'ère industrielle. D'où l'idée de l'aider à capter davantage de CO<sub>2</sub> atmosphérique en « boostant » cette pompe à carbone naturelle.

En pratique, « les activités de capture du CO<sub>2</sub> visent à retirer du CO<sub>2</sub> dissous de l'eau de mer, explique Olivier Sulpis, biogéochimiste au CNRS<sup>1</sup>. Une fois ce CO<sub>2</sub> capturé, un transfert de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère vers l'océan a lieu, pour combler le déséquilibre ainsi créé. »

Pour y parvenir, diverses techniques de géo-ingénierie marine (en anglais, « marine Carbon dioxide removal », ou mCDR) sont envisagées. La première se fonde sur des processus biologiques. Le principe est simple : jouer sur la prolifération d'espèces photosynthétiques qui utilisent la lumière du soleil et le CO<sub>2</sub> dissous dans l'océan pour fabriquer de la matière organique. C'est peu ou prou l'équivalent marin de la reforestation !

À cette fin, l'océanographe John Martin, au Laboratoire marin de Moss Landing, en Californie, proposait dès la fin des années 1980 de fertiliser les eaux océaniques de surface avec du fer, nécessaire à la croissance du phytoplancton. Une fois mort, le phytoplancton (et le carbone



qu'il contient) se décompose et coule au fond de l'océan, où il sédimente. Problème : le fonctionnement de la pompe biologique à carbone est plus complexe qu'on l'imaginait.

Les chercheurs soupçonnent aujourd'hui qu'une partie du carbone piégé dans les végétaux marins en décomposition est en réalité relarguée dans l'atmosphère... Sans compter les possibles effets secondaires en cas de déploiement à grande échelle de la fertilisation en fer de l'océan, tels l'apparition de zones pauvres en oxygène, le développement d'espèces toxiques pour la faune marine ou la production d'autres gaz à effet de serre (tel le dioxyde d'azote) par certaines plantes et bactéries.

### Eaux alcalines et décès d'huîtres

Une autre possibilité pour renforcer la pompe à carbone biologique de l'océan consisterait à massifier la culture d'algues, utilisées ensuite par l'industrie ou pour la consommation humaine. Certaines études montrent un potentiel de plusieurs gigatonnes d'absorption de CO<sub>2</sub> par an. Mais, là encore, les risques de perturbation des écosystèmes marins sont importants.



© SEBASTIEN ORTOLA / REA

Autres technologies marines envisagées : des procédés pour augmenter l'alcalinité de l'océan, ce qui favorise l'absorption du CO<sub>2</sub> atmosphérique. Le principe : plus une eau est chargée en ions alcalins, plus elle facilite la synthèse d'ions carbonatés à partir du CO<sub>2</sub> dissous, permettant d'accroître la quantité de carbone atmosphérique intégré à l'eau de mer. Ce qui va de pair avec ce que l'on sait de l'histoire du climat, observe Olivier Sulpis : « On constate que les périodes où l'érosion des roches (et, par conséquent, les apports minéraux à l'océan) a été la plus importante sont celles durant lesquelles les océans absorbaient le plus de CO<sub>2</sub> ».

Pour alcaliniser l'eau de mer et réduire son acidité, l'idée est d'y ajouter des roches broyées riches en calcium ou en magnésium telles que le calcaire, le basalte ou l'olivine. Des études scientifiques<sup>2</sup> envisagent, grâce à l'alcalinisation, d'éliminer 4 gigatonnes de CO<sub>2</sub> atmosphérique par an, soit 10 % des émissions fossiles actuelles.

Cependant, le prix à payer serait faramineux. Une telle opération exigerait l'extraction, le broyage et l'épandage de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de gigatonnes de roche par an. Ce sont de véritables montagnes qu'il faudrait mettre à bas pour mener ces opérations à bien.

« Au stade actuel, résume Frédéric Gazeau, directeur du Laboratoire d'océanographie de Villefranche<sup>3</sup>, tout ce qui concerne l'ensemble de ces technologies est essentiellement théorique. Les risques environnementaux associés sont potentiellement considérables. Et la possibilité du passage à l'échelle



À gauche : une entreprise spécialisée dans la capture et la revalorisation du CO<sub>2</sub> travaille sur des microalgues, à Libourne. Ci-dessus : efflorescence algale détectée au large de l'Argentine par le satellite Aqua de la Nasa.

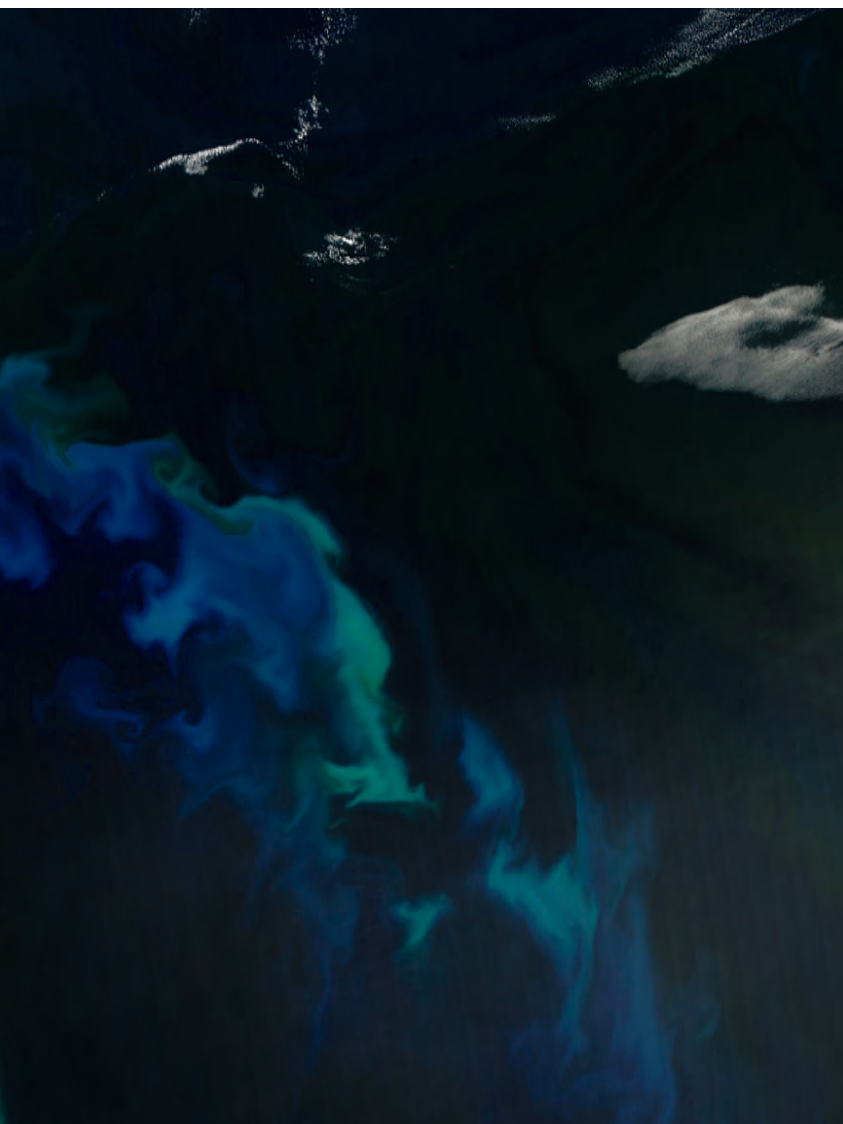
est loin d'être évidente. » Pour preuve, l'océanographe et ses collègues ont par exemple montré récemment que de l'olivine dissoute libère dans l'eau des éléments traces provenant d'impuretés minérales, qui font s'effondrer le développement embryonnaire et larvaire d'huîtres creuses.

#### Des standards à établir

Le Giec lui-même reconnaît la faible efficacité de ces technologies de géo-ingénierie climatique. En 2020, il estimait qu'il « faudrait environ un siècle et demi pour éliminer le CO<sub>2</sub> émis au cours des 50 dernières années, ce qui rend difficile l'atténuation rapide du changement climatique<sup>4</sup> ».

Il n'empêche, les technologies marines ont le vent en poupe. En 2022, les Académies nationales des sciences, d'ingénierie et de médecine des États-Unis ont décrit dans un rapport les stratégies à mettre en œuvre afin d'évaluer leur potentiel. De nombreux projets de test sont déjà en cours. De ce côté-ci de l'Atlantique, 12 experts européens ont rendu en novembre dernier un rapport à l'European Marine Board<sup>5</sup>, dont le CNRS et l'Ifremer sont membres,

*Les technologies de géo-ingénierie marine ont le vent en poupe. Des projets de test sont déjà en cours.*



© NASA IMAGE COURTESY JEFF SCHWALTZ, MODIS LAND RAPID RESPONSE TEAM AT NASA GSFC

afin d'établir des standards dits de « surveillance, déclaration et vérification » afin d'évaluer objectivement ce que les techniques de géo-ingénierie marine peuvent ou non apporter (voir page 19).

Sollicitée par le ministère de la Transition écologique, l'agence de programme Climat, biodiversité et sociétés durables, pilotée par le CNRS, a de son côté rendu en décembre 2025 une fiche sur les interventions climatiques, publiée dans la *Revue nationale stratégique*. L'objectif : dresser une feuille de route nationale pour savoir quelles recherches conduire dans le secteur de la géo-ingénierie, en tenant compte des enjeux politiques, économiques et éthiques, ainsi que des questions de souveraineté et de sécurité nationale.

### Géo-ingénierie solaire : du rejet aux essais

Ces enjeux sont d'autant plus cruciaux que, si la capture de CO<sub>2</sub> interroge, d'autres projets d'ingénierie climatique peuvent susciter une franche hostilité. C'est le cas de la géo-ingénierie solaire. L'une des techniques envisagées consiste à projeter dans la stratosphère des gouttelettes ou des poussières, afin de réfléchir vers l'espace une

partie du rayonnement solaire et, ainsi, refroidir la Terre – comme cela se produit de manière naturelle lors des grandes éruptions volcaniques. Pour ce faire, des centaines d'avions devraient être mobilisés chaque jour.

« *En théorie, la géo-ingénierie solaire pourrait contrer rapidement le changement climatique d'origine anthropique, en refroidissant la Terre jusqu'à atteindre les niveaux pré-industriels en l'espace d'une ou deux décennies*<sup>6</sup> », admet le Giec dans son sixième rapport, en 2023. En 1991, l'éruption du Pinatubo, aux Philippines, en a fourni la preuve. Elle a entraîné une baisse de la température terrestre de 0,5 °C pendant plusieurs mois du fait du panache de gaz et de particules envoyé dans la haute atmosphère.

Envisagée dès les années 1960, la géo-ingénierie solaire (ou SRM, pour « *Solar radiation modification* ») a d'abord été rejetée en bloc par les climatologues. Elle est désormais promue par plusieurs start-up états-uniennes, à quoi s'ajoutent des financements publics, aux États-Unis et au Royaume-Uni notamment.

Ainsi, en 2023, la start-up Make Sunsets s'est livrée en dehors de tout cadre scientifique à une expérience de lâcher d'un ballon stratosphérique rempli de dioxyde de soufre entre le Nevada et la Californie. Quant au Royaume-Uni, il a récemment financé, *via* l'Advanced Research + Invention Agency, une série d'expériences de SRM de terrain, celles-ci étant limitées à moins de 24 heures et à une petite échelle spatiale.

### Le scénario du « choc terminal »

En France, dans son rapport sur la géo-ingénierie climatique, publié le 2 octobre 2025, l'Académie des sciences est pourtant sans appel : « *Le SRM est un leurre climatique et non un investissement d'avenir* ». En effet, comme l'ont montré de très nombreuses simulations, l'injection à grande échelle d'aérosols dans l'atmosphère pourrait conduire à un amincissement de la couche d'ozone et à des modifications incontrôlées de la météorologie, notamment à un déplacement des moussons dont dépendent aujourd'hui 1,5 milliard de personnes.

Ce n'est pas tout, explique Sandrine Bony, climatologue au CNRS au sein du Laboratoire de météorologie dynamique<sup>7</sup> et corédactrice du rapport de l'Académie des sciences : « *Si l'humanité se lançait sur la piste de l'ingénierie solaire, il faudrait injecter des aérosols dans la stratosphère sans doute pendant des générations, au risque, en cas d'arrêt, de voir la température de la Terre s'élever brutalement, bien plus rapidement qu'en l'absence de géo-ingénierie solaire* ».

C'est le scénario dit du « choc terminal », dont le nom résume l'effroi qu'il inspire à la quasi-totalité des spécialistes du climat. Au point que 600 scientifiques de plus

1. Centre de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement (Cerege, unité CNRS/Aix-Marseille Univ./Inrae/IRD). 2. Voir : [tinyurl.com/geo-ingenierie-climat](https://tinyurl.com/geo-ingenierie-climat)  
3. Lov, unité CNRS/Sorbonne Univ. 4. et 6 Voir : [tinyurl.com/climatipcc](https://tinyurl.com/climatipcc) 5. Organisation indépendante créée en 1995, l'European Marine Board représente 38 organisations de 19 pays européens. 7. LMD, unité CNRS/École polytechnique/ENS-PSL/Sorbonne Univ.  
8. Iode, unité CNRS/Univ. de Rennes.

## *Il n'existe aucun texte de droit qui réglemente spécifiquement le recours à la géo-ingénierie.*

de 60 pays ont signé en 2022 un appel pour réclamer un moratoire sur tout déploiement de ces technologies SRM, expériences en plein air comprises.

### Les enjeux stratégiques de la recherche

Convient-il alors de proscrire toute recherche sur la géo-ingénierie solaire ? « Une recherche dédiée est nécessaire pour que la France dispose d'une expertise sur un sujet potentiellement source de conflit tel que la gouvernance du SRM, estime François Ravetta, professeur à Sorbonne Université et chef de projet Interventions climatiques de l'agence de programme Climat, biodiversité et sociétés durables. En effet, l'absence de recherche induit une expertise lacunaire, qui nous fragilise lors des négociations internationales. »

En clair, si la prudence s'impose, il est risqué de laisser le sujet à d'autres. Christine Noiville, présidente du Comité d'éthique du CNRS (Comets), à l'origine d'un avis sur le SRM en juin 2025, préconise « une veille des projets en cours dans le monde, afin de se doter des moyens de détecter les essais et les déploiements, et d'en documenter les risques et

La start-up californienne Make Sunsets a déjà lâché des ballons remplis de dioxyde de soufre sans autorisation.



les bénéfiques ». Selon la scientifique, il est également nécessaire de s'intéresser aux questions sociopolitiques qui en découlent, aux premiers rangs desquelles l'acceptabilité par les populations et la gouvernance internationale.

De fait, sur le terrain juridique en particulier, tout, ou presque, reste à faire. Ainsi, à date, il n'existe aucun texte de droit qui réglemente spécifiquement le recours à la géo-ingénierie. Est-ce à dire que tout est permis ? Pas exactement. Comme le résume Marion Lemoine-Schonne, spécialiste au CNRS du droit de l'environnement à l'Institut de l'Ouest : Droit et Europe<sup>8</sup>, « le droit en vigueur balise le recours à ces techniques, en particulier le droit international de l'environnement ».

Ainsi, la protection de l'océan fait l'objet de plusieurs textes, notamment le protocole de Londres, relatif à l'immersion des déchets en mer. Cet accord interdit depuis 2008 les expériences de fertilisation des océans, hors études scientifiques à petite échelle. Par ailleurs, depuis 2010, les États parties à la Convention sur la diversité biologique ont transformé un moratoire non contraignant sur la fertilisation des océans en un moratoire plus large sur toutes les activités de géo-ingénierie susceptibles d'affecter la biodiversité.

### Quel droit pour modifier le climat ?

Paradoxalement, de par leur caractère très hypothétique, les techniques de modification du rayonnement solaire

font l'objet d'une attention juridique moindre. Même si, selon les termes de la Déclaration de Rio, adoptée par les Nations unies lors du Sommet de la Terre, en 1992, aucun État ne doit causer de dommages transfrontaliers significatifs. Or nul ne sait où les panaches d'aérosols largués par avion au-dessus de tel ou tel territoire seront entraînés. Cela étant, selon Marion Lemoine-Schonne, « dans un monde de plus en plus conflictuel et un contexte de backlash écologique, le risque de contentieux autour de l'ingénierie climatique est bien réel ».

Reste que toute avancée réglementaire – comme, du reste, toute attention portée à la géo-ingénierie – fait porter le risque de voir ces solutions s'imposer au détriment d'autres, à commencer par l'objectif de réduire drastiquement nos émissions de gaz à effet de serre.

« Si elles s'avèrent efficaces et que les risques sont maîtrisés, avance François Ravetta, il y a fort à parier que des techniques d'élimination du carbone atmosphérique seront déployées. »

À mesure que la dérive climatique s'accroîtra, même une fuite en avant technosolutionniste finira peut-être par nous apparaître comme la seule solution (dé)raisonnable. ||



## Quelles règles pour réduire le CO<sub>2</sub> océanique ?

Accroître la capacité de l'océan à absorber le CO<sub>2</sub> atmosphérique est l'une des pistes explorées pour limiter le réchauffement climatique. Mais des règles doivent être mises en place pour encadrer le déploiement des technologies de géo-ingénierie marine, explique le biogéochimiste Olivier Sulpis.

PROPOS RECUEILLIS PAR MARINE CHRISTILLE

**Vous avez copiloté le travail d'un panel d'experts européens sur les techniques de captation du CO<sub>2</sub> dissous dans l'eau de mer (mCDR)<sup>1</sup>. Pourquoi se pencher sur ce sujet ?**  
**Olivier Sulpis<sup>2</sup>** L'océan absorbe déjà près d'un quart de nos émissions annuelles de CO<sub>2</sub>. Plusieurs documents du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) indiquent que la probabilité

de maintenir le réchauffement sous la barre de +1,5 °C d'ici à la fin du siècle est très faible. Pour y parvenir, il faudra activement retirer du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. Dans ce contexte, il est régulièrement proposé de se servir de l'océan comme levier, soit en augmentant l'efficacité de processus naturels (les fameux puits de carbone), soit en mettant en œuvre de nouvelles méthodes privilégiant des approches technologiques.

Il faut bien comprendre que si ces méthodes s'inspirent de processus naturels dont il est bien établi qu'ils

1. Voir : « Surveillance, déclaration et vérification du captage de CO<sub>2</sub> en mer », par O. Sulpis : canal-u.tv/167622 2. Centre de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement (Cerege, unité CNRS/Aix-Marseille Univ./Inrae/IRD).



Étude comparative en mésocosmes (milieux expérimentaux contrôlés) d'alcalinisation artificielle de l'océan avec des silicates et des carbonates, en Norvège, en 2022.

© MICHAEL SWIAT, GEOWAR

ont refroidi la planète par le passé, ceux-ci ont opéré à des échelles de temps bien plus longues. L'ensemble de ces méthodes est encore à l'état de développement, et la recherche doit aussi s'interroger sur leurs effets à moyen et long terme sur l'environnement et les écosystèmes marins. À ce sujet, il faut noter que la plus connue des méthodes de mCDR, la fertilisation des océans, montre une faible efficacité après plus de 20 ans d'évaluation.

#### En quoi ont consisté vos travaux ?

**O. S.** On ne peut pas déployer des techniques d'élimination du CO<sub>2</sub> océanique sans fixer un cadre réglementaire et des méthodes pour évaluer l'efficacité effective de ces techniques, et combien de carbone elles permettent de capturer. Le but de cette expertise, publiée par l'European Marine Board<sup>3</sup>, était d'établir les standards de surveillance, de déclaration et de vérification (MRV, pour « *Monitoring, reporting & verification*<sup>4</sup> ») nécessaires avant tout déploiement. Ces standards permettront de quantifier la capture des gaz à effet de serre effectivement réalisée par rapport à un niveau initial de référence, mais aussi d'évaluer la durée pendant

*« On ne peut pas déployer des techniques d'élimination du CO<sub>2</sub> océanique sans fixer un cadre réglementaire. »*

laquelle le CO<sub>2</sub> est capturé et stocké hors de contact avec l'atmosphère, ainsi que les incertitudes associées.

Il est également indispensable de décrire les effets sur l'environnement et les écosystèmes des activités de géo-ingénierie marine selon des critères prédéfinis, afin de s'assurer que des seuils de dangerosité ne sont pas dépassés. Ce que nous proposons, c'est un peu le bilan comptable de la capture de CO<sub>2</sub>. Sans ce cadre, impossible de déterminer son efficacité ou ses conséquences, et impossible de prendre des décisions responsables.

#### Comment fait-on pour vérifier que le CO<sub>2</sub> a bien été capturé et stocké durablement ?

**O. S.** Mesurer ce stockage est difficile, car l'océan est un milieu interconnecté qui varie tout le temps, au gré des cycles journaliers, des saisons, de la météo, des migrations d'espèces

et des activités humaines... Détecter un changement dans la teneur de CO<sub>2</sub> dissous au milieu de toute cette variabilité nécessite des instruments de grande précision, d'autant plus que les modifications chimiques que l'on cherche à détecter sont minimes.

Par ailleurs, il faut réussir à entériner le fait qu'une diminution du taux de CO<sub>2</sub> résulte bien du déploiement d'une méthode d'ingénierie marine donnée, et pas d'un phénomène naturel. Déterminer la durée de stockage nécessite l'utilisation de modèles prédictifs qui nous permettent de déterminer l'évolution des masses d'eau et des interactions avec les écosystèmes. Ces modèles sont souvent très complexes et gourmands en ressources informatiques.

Enfin, dès qu'on envisage une méthode reposant sur le stockage de CO<sub>2</sub> dans la biomasse (phytoplancton, essentiellement), il est nécessaire de s'assurer que la matière organique ne sera pas rapidement décomposée, ce qui relâcherait à nouveau le CO<sub>2</sub> dans l'eau de mer. Il faut donc s'assurer que cette biomasse se déposera bien au fond des océans, ou alors l'utiliser pour produire des matériaux durables ou de l'énergie.

#### Les annonces d'investissements dans les techniques de recapture de CO<sub>2</sub> se multiplient. Ne craignez-vous pas qu'on vous reproche de « légitimer » ces techniques, alors que l'urgence reste de réduire les émissions ?

**O. S.** Un des messages principaux de notre expertise est que, même si la capture de CO<sub>2</sub> pourrait compléter les réductions d'émissions, elle ne peut en aucun cas les remplacer. L'humanité émet de nos jours 40 gigatonnes de CO<sub>2</sub> par an, soit 1 000 t par seconde ! Le moyen le plus direct de faire baisser le taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique est donc d'abord de réduire ces

3. L'European Marine Board est une organisation indépendante créée en 1995. Elle représente 38 organisations de 19 pays européens.

4. Voir : [tinyurl.com/MRV-climat](https://tinyurl.com/MRV-climat)

émissions. Nous insistons également sur le fait qu'à l'heure actuelle, aucune méthode de mCDR n'est prête à être déployée à large échelle.

Nous ne prenons pas position sur la question de savoir si ces méthodes devraient être déployées ou pas, et le rapport ne promet aucune méthode. Il se contente de fixer des exigences d'évaluation pour éviter le greenwashing et protéger l'océan.

Notre message est un message de précaution : avancer par la science, par des tests encadrés et en toute transparence.

**Pourquoi ne prenez-vous pas position sur l'opportunité même de déployer les techniques de géo-ingénierie marine à grande échelle ?**

**O. S.** Notre rôle de scientifiques n'est pas de décider, mais d'exposer ce que

**+**  
**À lire**

« *Monitoring, Reporting and Verification for Marine Carbon Dioxide Removal* », European Marine Board, *Future Science Brief* n° 13, 17 nov. 2025 : [zenodo.org/records/17435116](https://zenodo.org/records/17435116)

la connaissance permet d'affirmer, puis d'établir selon quelles conditions et avec quel niveau de certitude une action serait justifiable. Décider d'un déploiement ou d'une interdiction relève d'un choix politique et sociétal qui repose, au-delà des arguments scientifiques, sur des valeurs, des priorités démocratiques et des arbitrages économiques.

**Qui devra payer pour ces systèmes de surveillance que l'on devine très coûteux et dont vous dites qu'ils sont indispensables avant tout déploiement ?**

**O. S.** Actuellement, des financements publics et philanthropiques ont permis de mettre en place de petites stations d'observation, comme les mésocosmes (lieux contrôlés ou semi-contrôlés, où un expérimentateur peut faire varier les paramètres du milieu), ainsi que des instruments et des modèles dédiés à l'évaluation des techniques de capture. Des réseaux d'observations de l'océan à l'échelle globale existent déjà, *via* des campagnes en mer, des robots autonomes, des mesures satellitaires...

Reste que la pérennité des financements – et donc de la maintenance de ces réseaux – n'est pas toujours garantie. À terme, un réseau d'observation permettant l'évaluation des techniques de capture du CO<sub>2</sub> océanique à échelle globale nécessitera

un soutien non seulement financier, mais aussi opérationnel de la part des États, seuls capables d'assurer la mise en place d'une législation commune et d'une vérification indépendante.

Il peut aussi être question d'un marché de crédits carbone. Ceux-ci seraient vendus par les entités réalisant de la capture de CO<sub>2</sub> océanique et achetés par des entités voulant compenser leurs émissions. Mais un tel marché ne peut intervenir qu'après la mise en place de protocoles de surveillance et d'évaluation éprouvés. Nous en sommes encore loin.

**Que représente pour le CNRS et pour la recherche française le fait d'avoir porté ce projet ?**

**O. S.** Le rapport propose une position européenne de référence, portée par un groupe d'experts coprésidé par un chercheur CNRS. Le CNRS contribue ainsi à structurer un cadre scientifique et opérationnel utile aux décideurs en Europe et, au-delà, au service d'une action climatique intègre.

Pour la recherche française, il est à mon sens urgent de se pencher davantage sur l'étude des méthodes de capture du CO<sub>2</sub> océanique. Je pense que les scientifiques doivent prendre une part active à ce débat. Il est désormais clair qu'aucune solution unique ne suffira pour retirer une quantité suffisante de CO<sub>2</sub>, mais qu'une multitude d'actions peuvent coexister, dans la mesure où leur impact environnemental et écologique ne dépasse pas des seuils clairement définis.

Étudier ces techniques en tant que scientifique ne signifie pas nécessairement les soutenir. Une recherche scientifique rigoureuse, qui explique et qui éclaire, peut indiquer des solutions. Mais elle peut également conduire à limiter, voire interdire certaines activités potentiellement néfastes. En outre, la recherche fondamentale, en particulier celle qui se concentre sur les grands fonds marins, bénéficiera certainement d'une attention accrue portée au paysage biogéochimique marin. **||**

© MICHAEL SSWAT, GEOMAR



Prélèvement d'eau dans la mer Baltique pour suivre l'effet de l'augmentation de l'alcalinité sur les communautés planctoniques.

UNIVERS

Aux Canaries, quatre télescopes de grande taille, ou LST (Large-Sized Telescopes), sortent de terre. Leur mission : traquer les rayons gamma, la lumière la plus énergétique de l'Univers. Des scientifiques français participent à l'aventure.

TEXTE PAR CYRIL FRÉSILLON ET SONIA COLLAVIZZA  
PHOTOS © CYRIL FRÉSILLON/LAPP/CNRS IMAGES

# Ces géants qui scrutent le ciel



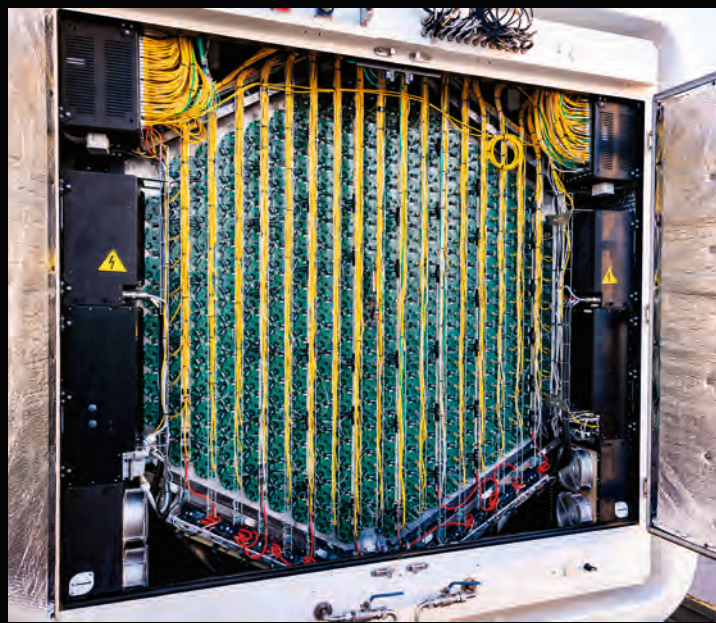
**1.** Sur le site de l'observatoire du Roque de los Muchachos, sur l'île de La Palma (Espagne), les quatre grands télescopes (LST) sont en construction depuis 2017. Ils traquent les rayons gamma, la partie la plus énergétique du spectre lumineux, émise lors de phénomènes d'accélération de particules dans notre galaxie ou dans des galaxies beaucoup plus lointaines : mort d'étoile, pulsar et sa nébuleuse, noyau actif de galaxie...



**2.** Chaque télescope est doté d'un miroir de 400 m<sup>2</sup>, spécialement conçu pour renvoyer les flashes lumineux générés par les rayons gamma vers une caméra fixée au sommet d'une grande arche. Malgré une hauteur de 45 m et un poids de 100 tonnes, le télescope géant est capable d'effectuer une rotation de 180° en moins de 20 secondes. Cette prouesse lui permet de pointer vers n'importe quelle zone du ciel nocturne en un clin d'œil.



**3.** La caméra du télescope, bourrée d'électronique, pèse 2 tonnes à elle seule. Elle est constituée de 1 855 pixels extrêmement sensibles, qui détectent les flashes lumineux générés par les rayons gamma lorsqu'ils interagissent avec l'atmosphère. Ces flashes, de très faible intensité, durent quelques milliardièmes de seconde à peine !





**4.** C'est le grand jour pour l'installation de l'arche du LST-2 (partie supérieure de l'image). Une grue de plusieurs tonnes est en place pour soulever et implanter la pièce haute de 28 m, qui semble bien fragile dans le ciel des Canaries. L'opération va durer plusieurs heures, afin que l'arche soit fixée solidement sur la structure du télescope.



**5.** Des scientifiques du Laboratoire d'Annecy de physique des particules<sup>1</sup> et du Centre de physique des particules de Marseille<sup>2</sup> sont en charge de la construction des télescopes depuis plusieurs années. Ils se sont formés spécialement avec des cordistes pour travailler en hauteur et en toute sécurité. Afin que l'arche soit correctement amarrée, ils doivent accrocher et tendre les haubans en fibre de carbone.

1. Lapp, unité CNRS/Univ. Savoie Mont Blanc.  
2. CPPM, unité CNRS/Aix-Marseille Univ.





6. À la nuit tombée, le LST-1 sort de sa torpeur. C'est le seul, pour l'heure, qui est en mesure de collecter des informations. Il n'a pas chômé pour autant et détient déjà le record d'observation du noyau actif de galaxie le plus lointain détecté par un télescope de ce type : OP 313, situé à 8 milliards d'années-lumière.



**7.** Tous les soirs, des astronomes prennent le contrôle du télescope. Les LST ne produisent pas de belles images comme les télescopes optiques, mais plutôt des données et des courbes de lumière.

**8.** Les quatre LST de La Palma font partie d'un vaste réseau mondial de télescopes dédié à l'observation des rayons gamma. Au total, 60 de ces instruments seront déployés sur deux sites : aux Canaries, donc, et au Chili, dans le désert d'Atacama.



# Femmes du Néolithique

## Une société au microscope

SOCIÉTÉS



**ARCHÉOANTHROPOLOGIE** Un vaste programme de recherche revisite la place des femmes et des hommes il y a 7 000 ans. Ces nouvelles explorations de restes humains fossilisés, qui mêlent manipulations de précision et haute technologie, aident à cerner le rôle de « lady Sapiens », loin des stéréotypes.

PAR MARINA JULIENNE



**N**ous sommes au V<sup>e</sup> millénaire avant notre ère, dans les premières sociétés agropastorales du Néolithique, sur le territoire actuel de la France. C'est le moment où s'opère la transition entre un mode de vie de type chasseurs-cueilleurs et une économie de production agricole et pastorale. Quelle était alors la place des femmes ? Se déplaçaient-elles beaucoup ou étaient-elles plutôt sédentaires ? Avaient-elles une activité physique différente de celle des hommes ? Et comment choisissaient-elles d'allaiter leurs enfants ?

Grâce au programme de recherche « Histoires de vie et place des femmes chez les premiers agropasteurs (WomenSOFar) », une équipe de bioanthropologues – associée à des généticiens, des archéologues, des archéozoologues et archéobotanistes, des géochimistes et des ingénieurs en statistiques et pratiques numériques – peut aujourd'hui répondre en partie à ces questions.

« Nous avons voulu explorer la place des femmes, non pas en tant qu'individus déterminés par un sexe biologique, opposés aux hommes, explique Gwenaëlle Goude, directrice de recherche au Laboratoire méditerranéen de préhistoire Europe-Afrique<sup>1</sup> et coordinatrice du projet, mais en tant que personnes ayant eu une histoire de vie, qui peut être mouvante (bébé, fille, femme et femme âgée) et complexe (union, mobilité, maladies, famines, etc.). »



« Il s'agissait de considérer les individus en dehors des "genres", précise la chercheuse, pour sortir des approches qui reposent sur une vision binaire des structures genrées. »

Le stéréotype de la femme préhistorique supposée frêle et recluse dans une grotte a été opposé pendant longtemps à celui d'un homme préhistorique fort et triomphant à la chasse. Différentes recherches ont ensuite tenté de mettre à mal ces représentations caricaturales, pour redorer le blason d'une « lady Sapiens » plus émancipée.

« Mais, si aucune étude archéologique n'exclut la participation des femmes préhistoriques à toutes les tâches (éducation des enfants, confection d'outils et d'armes, collecte et cueillette, chasse), les différentes théories qui se succèdent sur leur place dans la Préhistoire sont impossibles à généraliser, en raison du grand nombre de contre-exemples », rappelle Gwenaëlle Goude.

C'est pourquoi une approche résolument scientifique et raisonnée a présidé à l'élaboration du projet WomenSOFar. Pour mener l'enquête, les chercheurs ont repris des restes humains anciens (ossements et dents) afin de les faire « parler » grâce à des techniques permettant d'en savoir toujours plus sur nos ancêtres. Selon Gwenaëlle Goude, « l'originalité de cette étude est de baser la réflexion sur les témoignages biologiques qui résultent en partie de comportements sociaux ».

### Dans la bibliothèque des ossements

Point de départ de ces investigations : l'ostéothèque de Pessac, en Gironde. Impossible de soupçonner que cet immense hangar stocke les restes humains de collections issues de plus de 350 sites de fouilles archéologiques françaises et de l'étranger.

Sur une grande table, les archéanthropologues Stéphane Rottier<sup>2</sup> et Samuel Bédécarrats<sup>3</sup> ont posé un céphalomètre (instrument de mesure des crânes), un pied à coulisse, un mandibulomètre, des dents, quelques humérus et des fémurs. Grâce aux analyses ostéologiques (examen des os), d'ADN et au carbone 14, ces éléments ont déjà été étudiés et datés. Les chercheurs savent notamment s'ils proviennent d'adultes ou d'enfants, d'hommes ou de femmes. Mais il faut sélectionner les restes les plus pertinents pour le projet – et assez bien conservés pour être soumis à de nouvelles analyses. Au total, environ 130 individus, dont une cinquantaine d'enfants, seront examinés.

« Nous travaillons sur un transect [ligne entre deux points d'un paysage, au long de laquelle sont effectuées des études, Ndlr] nord-sud qui rend compte de la variété

Les portraits dessinés présentés dans ce dossier se fondent sur les analyses d'ADN des ossements pour la couleur des yeux, des cheveux et de la peau. Les attitudes et ornements sont l'interprétation de l'illustratrice. Ces dessins s'inscrivent dans le cadre du projet « Interactions entre groupes humains en Europe de l'Ouest durant la transition Mésolithique-Néolithique : la double perspective des échanges biologiques et culturels » (Interact) : [anr.fr/Projet-ANR-17-FRAL-0010](http://anr.fr/Projet-ANR-17-FRAL-0010)

TOUS LES DESSINS : © ELENA PLAIN/PACEA (CNRS/MINISTÈRE DE LA CULTURE/UNIVERSITÉ DE BORDEAUX).

1. Lampea, unité CNRS/Aix-Marseille Univ./Min. de la Culture.

2. Laboratoire De la Préhistoire à l'actuel : culture, environnement et anthropologie (Pacea, unité CNRS/Min. de la Culture/Univ. de Bordeaux).

3. Chercheur contractuel aux laboratoires Pacea et Lampea.

des paysages et des climats, car ces différences écologiques peuvent influencer le type de productions économiques et alimentaires (par exemple, agriculture versus pastoralisme, ressources sauvages versus ressources domestiques), explique Stéphane Rottier. La disponibilité des ressources alimentaires, leur mode d'acquisition ont potentiellement joué un rôle dans la définition des conditions de vie, dans les organisations sociales et dans l'implication des femmes dans les activités de subsistance. »

À partir de là, les scientifiques s'intéressent surtout à l'aspect et à la taille de ces os. « Les os sont comme les poutres de la charpente d'une église. Selon les forces exercées, ils s'adaptent pour supporter ces contraintes, décrit Samuel Bédécarrats. Tout au long de votre vie, en fonction de votre activité physique, vous remodelez votre squelette, sur lequel on pourra ensuite retrouver des signes d'usure (ou micro-porosités). Sur les os que nous examinons, il est fréquent de repérer des traces d'arthrose, de scoliose ou de tuberculose, maladie dont la présence chez les populations préhistoriques a été confirmée par des analyses génétiques. »

### Des os en 3D

Une fois les spécimens les plus prometteurs isolés, les chercheurs déplacent ces ossements à la Plateforme aquitaine de caractérisation des matériaux<sup>4</sup>, surtout utilisée pour la recherche industrielle. Mais les archéologues y trouvent aussi leur bonheur. Grâce à un scanner 3D, ils vont pouvoir visualiser des structures internes inaccessibles aux moyens classiques d'observation, et révéler l'évolution de processus pathologiques.

L'environnement est ultra high-tech, mais la « manip », comme souvent, a un côté artisanal. Samuel Bédécarrats découpe des morceaux de mousse afin de caler l'os dans le tube placé dans le scanner. Là, le tube est bombardé de rayons X pendant environ une heure. On récupère ainsi 1 000 à 2 000 clichés, retravaillés numériquement pour



▼ Les archéo-anthropologues Stéphane Rottier et Samuel Bédécarrats examinent un fémur humain.

obtenir une représentation en 3D. « Ces différentes étapes prennent beaucoup de temps, explique Stéphane Rottier. Avant chaque analyse, il faut régler le scanner en fonction de la nature et de la forme de l'échantillon (les dents sont plus denses que les os, par exemple), puis compter plusieurs heures pour extraire des données les images 3D. »

Dans sa base de données, Samuel Bédécarrats dispose désormais de centaines de représentations de restes humains en 3D. Il va pouvoir les mesurer (déterminer l'épaisseur des os et en examiner l'état intérieur) et établir un référentiel. Ce qui permettra de préciser, par exemple,

## À quoi servent les analyses isotopiques ?

Un isotope constitue une version un peu différente d'un élément chimique. Il possède le même nombre de protons que cet élément, mais pas le même nombre de neutrons. Par exemple, on connaît trois isotopes de l'atome de carbone naturel : le carbone 12 (6 neutrons), le carbone 13 (7 neutrons) et le carbone 14 (8 neutrons).

C'est ce fameux carbone 14 que l'on utilise pour dater les vestiges archéologiques\*, car il perd la moitié de sa masse tous les 5 700 ans. Voilà pourquoi cet isotope, radioactif, est dit « instable ». Moins il y a de carbone 14

dans un échantillon, et plus celui-ci est ancien. Problème, au-delà de 50 000 ans, toute trace de carbone 14 disparaît.

Mais, depuis un peu plus d'une quarantaine d'années, les scientifiques savent extraire et étudier également les isotopes dits « stables ». Comme leur nom l'indique, ceux-ci ne se désintègrent pas après la mort de l'organisme. Or les isotopes 12 et 13 du carbone sont stables. Ainsi, les teneurs mesurées aujourd'hui sur des tissus fossiles sont identiques à celles accumulées du vivant de l'individu et restées emprisonnées dans son collagène, qui est la protéine

la plus abondante dans le corps humain (et que l'on trouve notamment dans les os et dans les dents).

Il en va de même pour toute une série d'isotopes étudiés, comme le soufre, l'oxygène ou le strontium. Présents partout dans l'environnement, ils se retrouvent dans les plantes *via* des sédiments et de l'eau, puis dans les tissus animaux et humains à travers l'alimentation, la boisson et la respiration – fournissant des informations toujours plus nombreuses sur la végétation, le climat, les modes de vie des êtres vivants, dans une période actuelle ou passée.

\* Voir : [tinyurl.com/datations](https://tinyurl.com/datations)



© CYRIL FRÉLILLON / WOMENSOFFAR / CNRS IMAGES

## Les images en 3D des os permettent de préciser si un individu a beaucoup marché, s'il a été mal nourri...

Au centre, la pulpe dentaire est composée de tissus nerveux et de vaisseaux sanguins. Elle bénéficie d'une importante protection. Cela confère à l'ADN pulpaire une grande fiabilité pour établir des profils génétiques.

Enfin, lorsque des reliquats de tartre fossilisés sont présents, on peut y trouver traces de virus et de bactéries, mais aussi de pollens, de parasites, voire de petits insectes, ou encore des microrestes alimentaires.

### Dans les secrets des dents

On comprend que ces vestiges fassent l'objet d'une attention croissante. En étudiant une deuxième molaire permanente (M2), qui se forme chez l'enfant entre 24 et 36 mois, Gwenaëlle Goude obtient des informations sur l'individu entre ses 2 ans et ses 16 ans environ. Si elle étudie la troisième molaire permanente (M3) du même individu, elle recueille des données sur sa vie entre 8 et 18-20 ans.

« Nous connaissons le calendrier de croissance des différentes parties dentaires, détaille la chercheuse. Donc, en prélevant à l'horizontal de fines lamelles (1 mm) d'émail, par exemple en bas puis en haut de la couronne dentaire, j'aurai des informations sur l'alimentation du tout-petit (en haut), devenu adulte (en bas). En revanche, si je réalise un prélèvement vertical, j'obtiendrai un signal chimique moyenné sur plusieurs années de la vie de l'individu. »

C'est un peu comme lire l'âge d'un arbre grâce aux cernes (anneaux de croissance) du tronc. Les chercheurs peuvent ainsi connaître le temps de l'allaitement exclusif, puis estimer l'âge à partir duquel un enfant a été sevré et ce qu'il a mangé au cours de sa croissance.

### Comment percer un coffre-fort biologique

Plusieurs étapes sont toutefois nécessaires avant d'arriver aux informations que renferme ce véritable coffre-fort biologique. Gwenaëlle Goude commence par insérer la dent dans une résine pour la découper. « C'est un métier, commente la chercheuse. Il faut avoir du doigté, mais pas trop de force ! » Elle place ensuite la dent

si un individu a beaucoup sollicité ses membres supérieurs, ou est anormalement petit, ou a peut-être été mal nourri, ou a souffert de maladies...

### Une analyse par couche

Direction maintenant le Laboratoire méditerranéen de Préhistoire Europe-Afrique (Lampea), à Aix-en-Provence. Là, Gwenaëlle Goude et son équipe récupèrent des échantillons des ossements et réalisent des prélèvements sur des dizaines de dents. L'intérêt de ce matériel est inestimable. Une dent comporte en effet différentes parties, minérales et organiques. Et ces parties fournissent chacune des informations complémentaires : sur l'individu, sur l'environnement dans lequel il a évolué, sur son mode de vie, sur son état de santé...

Situé en surface, l'émail contient 95 % de substances minérales. C'est le tissu le plus dur de l'organisme. Grâce à des analyses de composition isotopique (voir ci-contre), on y retrouve des informations sur les zones géographiques traversées par l'individu, depuis son enfance jusqu'à l'âge adulte.

Sous l'émail, la dentine est un tissu organique plus poreux. Il se prête à une analyse des composants chimiques qui se sont figés dans le collagène (protéine la plus abondante dans le corps humain) quand la dent a terminé son développement. C'est là que l'on déniche des informations sur le régime alimentaire et sur certaines pathologies que l'individu a développées.



# Des femmes plus mobiles que les hommes

**E**n 2004, le site de Gurgy (Yonne) a livré l'une des plus importantes nécropoles du néolithique français, datée entre 4 900 et 4 700 avant notre ère. L'archéanthropologue Stéphane Rottier et les équipes de paléogénétiques de Pacea<sup>1</sup> ainsi que de l'Institut Max Planck de Leipzig ont pu reconstituer les arbres paléogénétiques de deux familles enterrées là. Le premier relie 64 individus sur 7 générations<sup>2</sup> – c'est le plus grand arbre reconstitué à partir d'ADN ancien à ce jour. Le second regroupe 12 individus sur 5 générations, chacune de ces générations étant reliée à la précédente par le père, car les hommes inhumés là partagent des gènes en commun hérités de leurs ancêtres masculins.

« Ce n'est généralement pas le cas des femmes présentes dans ces sépultures, qui ne sont ni sœurs ni cousines sur

plusieurs générations, précise Stéphane Rottier. Les pratiques funéraires semblent donc indiquer que les fils restaient vivre dans leur communauté, où ils avaient des enfants avec des femmes venues d'autres groupes et d'autres territoires que celui de Gurgy. »

Ce mode de fonctionnement est appelé « patrilocalité ». Il s'oppose à la « matrilocalité » (cas où l'homme rejoint le groupe de la femme) et à la « néolocalité » (hommes et femmes s'installent dans un endroit différent de celui d'origine). Or les différentes analyses menées dans le cadre du programme WomenSOFar semblent confirmer ce mode de fonctionnement.

## Des réseaux sociaux plus complexes

« Nous constatons que les femmes connaissent des mobilités plus importantes, notamment à l'enfance et à l'adolescence, autant dans le centre de la France qu'en vallée du Rhône ou en région méditerranéenne, souligne Gwenaëlle Goude, du Laboratoire méditerranéen de préhistoire Europe-Afrique. En fait, tout le monde se déplace, mais les hommes reviennent là d'où ils sont partis, puis ils y restent, alors que les femmes continuent de se déplacer. Il semble qu'elles créent ainsi des réseaux sociaux plus complexes et plus larges que ceux des hommes. Même en Auvergne, où les paysages de montagne restreignent en partie la mobilité, les femmes se déplacent plus que les hommes. »

En outre, les femmes présentent une plus grande diversité dans la consommation des ressources protéiques. Et leurs adaptations biomécaniques suggèrent des activités plus variées, moins spécialisées que celles des hommes.

« Ces différentes données et la comparaison avec les sociétés patrilocales actuelles<sup>3</sup> nous ont amené à proposer

l'existence d'une "matrisocialité", explique Samuel Bédécarrats. Par leurs mobilités, leurs échanges biologiques et culturels, leurs adaptations à de nouveaux environnements sociaux, leurs rôles essentiels dans la vie des communautés et le soin aux enfants, les femmes ont eu des impacts majeurs dans le maintien des communautés et des relations entre des groupes distants. » En bref, les points d'ancrage dans les territoires seraient le fait des hommes (patrilocalité), puis le maillage et l'extension des territoires, celui des femmes (matrisocialité).

## Des questions à creuser

Quant aux différences d'activité entre les hommes et les femmes, il est encore trop tôt pour déterminer si le fait d'être garçon ou fille était déjà important dans la construction de l'identité de la personne et dans l'organisation de ces sociétés. « Pour l'instant, constate Gwenaëlle Goude, on peut juste noter que les modifications importantes alimentaires ou de déplacement semblent plus reliées à l'âge des individus qu'à leur sexe biologique. »

L'exploitation des données recueillies se poursuit. C'est le cas sur les questions de sevrage des enfants. On ignore si les durées plus longues d'allaitement étaient dues à une mauvaise santé des petits, obligeant les parents à les garder plus longtemps auprès d'eux, ou si, au contraire, un temps d'allaitement plus long favorisait une meilleure survie des individus sur le long terme.

Autre question : la grande mobilité des femmes découle-t-elle du fait qu'il leur revenait de prospecter de nouvelles ressources végétales et animales ?

Les scientifiques ne sont pas prêts d'abandonner des analyses qui peuvent encore ouvrir quelques fenêtres sur la vie des sociétés néolithiques ! ■

► Des sépultures du site de Burgy, l'une des plus importantes nécropoles du Néolithique en France, datée entre 4900 et 4700 avant notre ère.

1. Laboratoire De la Préhistoire à l'actuel : culture, environnement et anthropologie.

2. Voir : doi.org/10.1038/s41586-023-06350-8

3. Chez les Tamils (Sri Lanka), les Shodagors (Bangladesh), des populations rurales d'Éthiopie, les Kipsigis (Kenya), les Tamangs (Népal) et les Himbas (Namibie).

© STÉPHANE ROTTIER, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX





© CYRIL FRÉLILLON / WOMENSO FAR / CNRS IMAGES

dans une solution chimique pour la déminéraliser, afin d'en extraire un fragment de collagène. Lequel, inséré dans une petite capsule d'étain, sera prêt pour des analyses isotopiques. En analysant des éléments chimiques comme le soufre, le strontium, l'azote, le carbone ou l'oxygène, conservés dans les restes de fossiles humains, on peut obtenir des informations sur les environnements dans lesquels ont vécu ces individus...

#### À chaque environnement son isotope

C'est au Centre de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement<sup>5</sup>, près d'Aix-en-Provence, que les analyses sont réalisées. « J'ai l'habitude de manipuler des carottes contenant des sédiments et, si j'en perds quelques grammes au cours d'une "manip", je peux toujours aller en récupérer, raconte Guillaume Leduc, spécialiste de l'étude des climats du passé. Mais, dans le cadre du programme WomenSOFar, je manipule des échantillons de restes humains,

► Gwenaëlle Goude, coordinatrice du projet WomenSOFar, observe une molaire d'une femme du Néolithique au microscope numérique. L'émail, la dentine et la pulpe livrent des informations différentes.

*ce qui est autrement impressionnant et émouvant... On n'a pas le droit à l'erreur, car ce matériel est extrêmement rare !* Les échantillons sont placés dans un spectromètre de masse à ratio isotopique, pour y être brûlés par un flash instantané à 1000 °C. Le gaz produit par la combustion passe dans une colonne chromatographique, où les divers isotopes sont séparés. Reste à lire sur l'ordinateur les pics formés par leurs différences de composition.

Pour interpréter ces données, encore faut-il connaître les variations isotopiques de la région d'où sont issus les restes des individus. Plaine ? Montagne ? Prairie ? Forêt ? À chaque environnement sa signature isotopique ! Celle-ci se retrouve dans l'eau et l'alimentation ingérées par les différents organismes – ici, par les humains. Cette signature permet donc de reconstituer leur mobilité géographique, de savoir si tel individu est allé dans des terrains géologiques contrastés, s'il est passé d'un paysage forestier à un environnement de prairie, ou l'inverse.

Oui, mais... « Ce n'est pas si simple !, tempère Guillaume Leduc. Car les minéraux ne s'altèrent pas tous à la même vitesse. Donc, ce n'est pas parce qu'on mesure aujourd'hui

« On n'a pas le droit à l'erreur, car ce matériel est extrêmement rare ! »

5. Cerege, Unité CNRS/Aix-Marseille Univ./Inrae/IRD.

la composition isotopique globale d'une roche que l'on va la retrouver à l'échelle locale d'un site où se trouvent les restes d'un individu y ayant vécu il y a 15 000 ans. Pour quantifier la composition isotopique du strontium (qui se trouve vraiment dans l'environnement et peut être ingéré par les organismes), nous avons donc étudié... les coquilles d'escargots archéologiques, dont on est certain qu'ils n'ont pas migré bien loin ! »

### Les révélations des ratios isotopiques

D'autres isotopes (ceux de l'azote et du carbone notamment) fournissent des informations sur l'alimentation au sein d'un écosystème. Et les ratios isotopiques des plantes tropicales diffèrent de ceux des plantes des climats tempérés, quand les légumineuses ont une signature carbone très basse, au contraire de certaines céréales.

Par ailleurs, les valeurs des ratios isotopiques de l'azote des organismes carnivores sont systématiquement plus hautes que celles relevées chez les omnivores, elles-mêmes plus hautes que celles des herbivores. On peut donc savoir si un individu était carnivore ou végétarien !

Et, pour les mères et leurs enfants, il est possible d'estimer la durée de l'allaitement exclusif, ou de se forger une idée préliminaire de la nourriture qui était privilégiée pour le sevrage. « *Les premiers résultats de nos analyses*



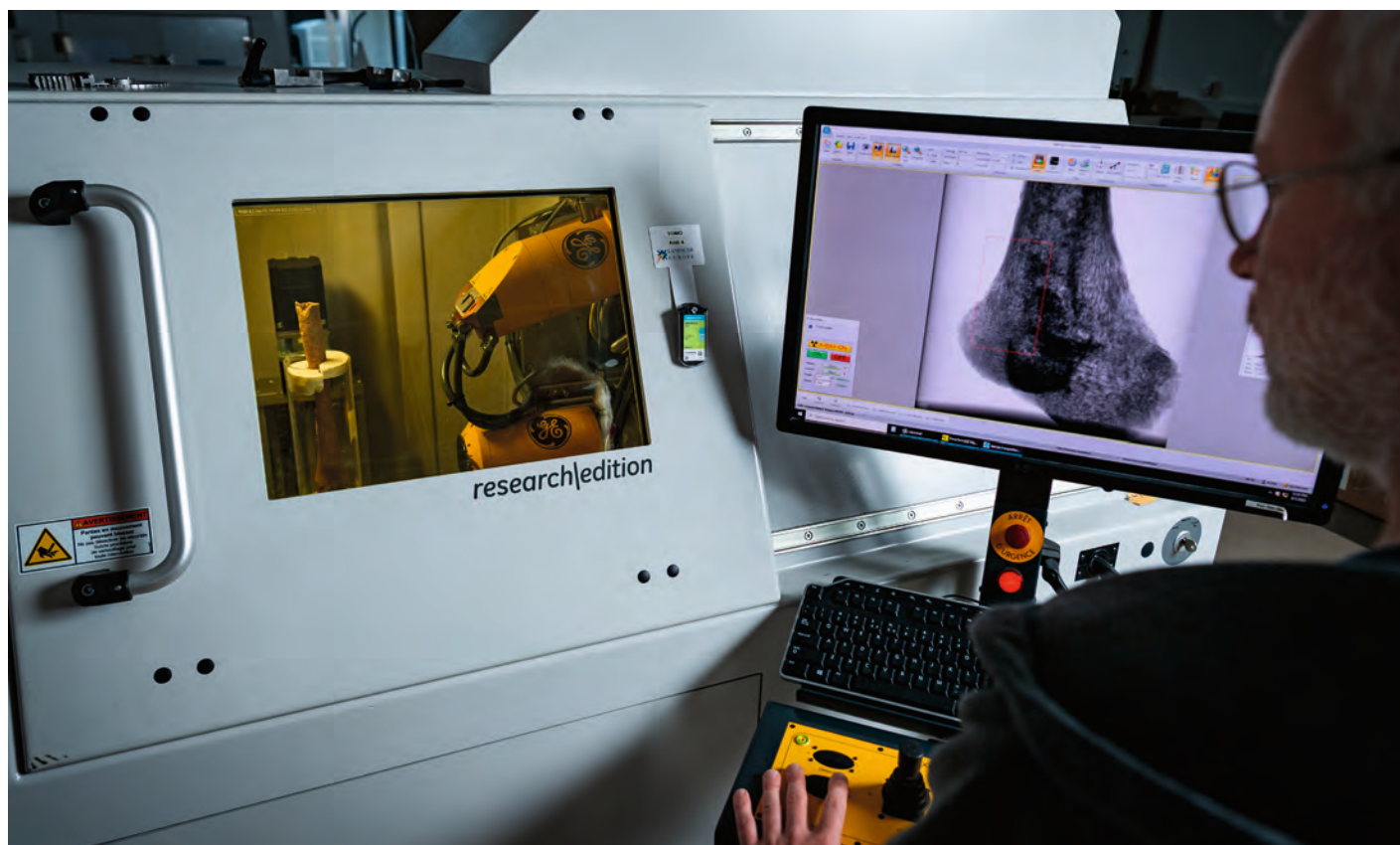
sur l'Afrique du Nord montrent une variabilité dans les durées d'allaitement et de sevrage qui est indépendante du sexe de l'enfant, relate Gwenaëlle Goude. Ils indiquent un allaitement exclusif pour deux sujets jusqu'à 12-14 mois et jusqu'à environ 2 ans pour deux autres enfants, tous étant décédés avant la fin du sevrage. »

### Le tableau de la vie préhistorique se précise

Là aussi, il y a un « mais »... Reconstituer les régimes alimentaires des individus reste compliqué. On sait qu'un stress physiologique, par exemple, peut modifier les valeurs de certains isotopes. C'est donc en croisant des types d'analyses très différents que se dessinent petit à petit des scènes de vie de nos ancêtres préhistoriques.

Les dents racontent une partie de l'histoire d'un individu, de sa tendre enfance jusqu'à ses 20 ans environ – ensuite, elles cessent de croître. Les os, eux, reflètent les 10 ou 15 dernières années de la vie. Et l'ADN permet parfois de reconstituer un véritable livret de famille, en mettant en évidence les liens de parenté entre les individus. Muni de ces diverses informations biologiques, on peut commencer à décrypter des structures sociales dont elles témoignent. II

► Un fémur humain est scanné dans un microtomographe pour le modéliser en 3D.



© CYRIL FRESILLON / MOHENSOPAR / CNRS IMAGES

## EN ACTION

*« L'exploration in situ des planètes devra se poursuivre, en allant au-delà de Mars.*

*À l'horizon 2040-2050, nous projetons d'effectuer des analyses sur les satellites de Jupiter et de Saturne. »*

## L'IMAGE

# Le dinosaure qui pique la vedette

Les iguanodontidés, découverts il y a deux siècles, n'ont pas dévoilé tous leurs secrets. Un spécimen exhumé dans le nord-est de la Chine par une équipe internationale (dont des membres du CNRS<sup>1</sup>) et daté de 125 millions d'années a récemment livré des indices sur leur apparence. La nouvelle espèce, nommée *Haolong dongi* (littéralement, « dragon épineux de Dong », un hommage au paléontologue chinois Dong Zhiming), présente une particularité inédite...


Des gisements fossiles chinois ont déjà révélé des dinosaures à plumes. Et les oiseaux actuels sont, *stricto sensu*, des descendants de dinosaures théropodes (comme *T. rex*) ayant réchappé de l'extinction de masse survenue voilà 66 millions d'années. Mais, chez *H. dongi*, les scientifiques ont mis en évidence la présence de

petits piquants rigides. Le spécimen, long de 2,5 m, en présente sur le cou, le poitrail et le dos, donnant à l'herbivore un air de porc-épic.

Grâce à l'état de conservation exceptionnel de ces excroissances, jusqu'à un niveau cellulaire, les paléontologues ont pu les étudier en profondeur<sup>2</sup>. Ces piquants constituaient sans doute une arme de dissuasion. Ils ont aussi pu jouer un rôle dans la thermorégulation ou dans la perception sensorielle. Les scientifiques restent toutefois mesurés dans leurs conclusions. Car le spécimen est un juvénile, ce qui ne permet pas d'appréhender avec finesse la morphologie des adultes. II

1. Géosciences Rennes (CNRS/Univ. de Rennes); des membres de l'Institut pour l'avancée des biosciences (CNRS/Inserm/Univ. Grenoble Alpes) ont aussi pris part à ces travaux. 2. Voir : [doi.org/10.1038/s41559-025-02960-9](https://doi.org/10.1038/s41559-025-02960-9)





# Amsterdam, l'île confetti aux avant-postes de la recherche

VIVANT  TERRE 

**ENVIRONNEMENT** Début 2025, un incendie gigantesque a ravagé plus de la moitié de l'île Amsterdam. Plusieurs mois après, des scientifiques tentent d'en estimer les conséquences sur ce havre de biodiversité aux confins des océans Indien et Austral.

PAR MAXIME LEROLLE

**N**ovembre 2025, à la fin du printemps austral : après une quinzaine de jours de navigation depuis La Réunion, une équipe de scientifiques français débarque du *Marion Dufresne* sur l'île Amsterdam. Son objectif est de mesurer les dommages causés par le plus important incendie jamais observé sur l'île française. Entre janvier et mars 2025 – au cœur de l'été, sous ces latitudes –, plus de 55 % de ses 58 km<sup>2</sup> ont brûlé.

Un incendie d'une telle ampleur menace directement la faune et la flore locales, dont nombre d'espèces endémiques (spécifiques à un territoire). Au sein des Terres australes et antarctiques françaises (Taaf, qui s'étendent

des îles Éparses, entre Madagascar et le Mozambique, à la Terre Adélie, sur le continent blanc), Amsterdam dispose d'une situation géographique particulière. Entre les Kerguelen, à 1 300 km au sud, et Maurice, à 2 700 km au nord, cette petite île volcanique se trouve à la jonction des climats polaires et subtropicaux. Amsterdam et sa plus proche voisine, Saint-Paul, à 91 km plus au sud, constituent les îles les plus éloignées au monde de toute habitation humaine permanente.

Un tel isolement géographique a longtemps empêché toute installation pérenne sur l'île. Si le navigateur Juan Sebastián Elcano l'aperçoit en 1522, au cours de son tour du monde, il faut attendre le XIX<sup>e</sup> siècle et la prise de possession française, en 1843, pour que de rares colons s'y établissent. Contestant les prétentions britanniques sur l'île, la France encourage la venue de pêcheurs, et même d'un exploitant agricole réunionnais. En vain. De cette présence coloniale, seules demeureront... des vaches, introduites en 1871 et qui prospéreront là – aux dépens de la biodiversité locale – jusqu'à leur éradication, au début des années 2010.

1. Unité CNRS/Univ de Rennes. 2. Unité CNRS/La Rochelle Univ.

▲ Vue aérienne de l'île Amsterdam (2022), avec la station de recherche Martin-de-Viviès, où se relaient biologistes, météorologues, géophysiciens...

Si les tentatives d'exploitation économique d'Amsterdam ont toutes échoué, la présence humaine y a trouvé un second souffle au xx<sup>e</sup> siècle, avec l'installation de la base scientifique Martin-de-Viviès, en 1950, dans le nord de l'île. La science trouve en effet dans l'isolement géographique d'Amsterdam ce qui repoussait agriculteurs et pêcheurs : du temps et une sortie de la civilisation industrielle.

À 2 km au sud de la base scientifique, au sommet de la pointe Bénédicte, les chimistes bénéficient d'un site d'observation exceptionnel à l'échelle mondiale pour la chimie de l'atmosphère. En raison des faibles pollutions d'origine humaine sur Amsterdam, ils y mesurent depuis 1980 les quantités de CO<sub>2</sub>, d'aérosols et de poussières présentes dans l'atmosphère.

La pureté des observations sur la « pointe B » est telle, s'amuse l'écologue David Renault, directeur de l'Institut polaire français Paul-Émile Victor (Ipev) et professeur à l'université de Rennes au sein du laboratoire Écosystèmes, biodiversité, évolution<sup>1</sup>, que « mes collègues chimistes

me disent que lorsqu'un incendie de brousse se déclare en Afrique, ils parviennent à l'identifier depuis Amsterdam ».

### Un havre de paix pour les oiseaux

David Renault se rend sur place pour admirer d'autres merveilles que la pureté de l'air. Chaque été depuis une cinquantaine d'années, nombre de scientifiques débarquent sur Amsterdam afin d'en observer les prodiges de biodiversité. L'île-confetti est notamment réputée pour ses oiseaux marins.

Elle figure même « dans le top 5 des îles les plus importantes » pour ceux-ci, assure Christophe Barbraud, directeur de recherche au CNRS au sein du Centre d'études biologiques de Chizé<sup>2</sup> : « Située à mi-chemin entre l'Inde, l'Australie et la zone subantarctique, elle abrite en effet une avifaune unique au monde, fruit d'influences indiennes, australasiennes et subantarctiques ».

Quantité d'albatros y ont élu domicile : les albatros de Carter (ou albatros à bec jaune de l'océan Indien – *Thalassarche carteri* –, avec 20 000 couples reproducteurs environ, soit 83 % de la population mondiale) et fuligineux (*Phoebastria palpebrata*,

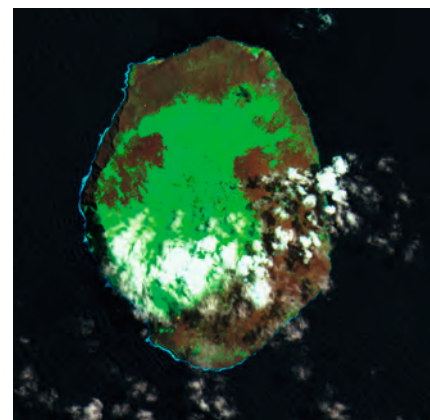
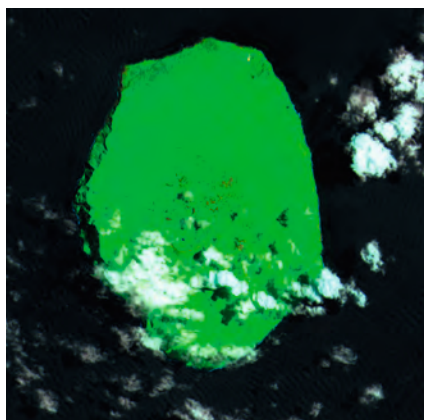
## Amsterdam figure dans le top 5 des îles les plus importantes pour les oiseaux marins.

autour de 400 couples), ainsi que l'emblème de l'île, l'endémique albatros d'Amsterdam (*Diomedea amsterdamensis*, avec aujourd'hui 80 couples reproducteurs, contre seulement 5 ou 6 dans les années 1980). En plus des géants des mers, Amsterdam abrite environ 8 000 couples de gorfous de Moseley (ou gorfous sauteurs du Nord – *Eudyptes moseleyi*), quelques pétrels et 70 couples reproducteurs de skuas d'Amsterdam (ou labbes antarctiques – *Stercorarius antarcticus*).

Du haut des falaises d'Entrecasteaux et du plateau où ils nichent, ces oiseaux toisent une considérable colonie d'otaries à fourrure (30 000 à 35 000 individus), venues mettre bas sur ces plages, loin des activités humaines. Chassés pour leur fourrure de la fin du xviii<sup>e</sup> siècle à leur quasi-extinction, à la fin du xix<sup>e</sup> siècle (au point qu'ils manquent de disparaître à Saint-Paul et à Amsterdam au début du xx<sup>e</sup> siècle), les pinnipèdes ont retrouvé leur état de santé antérieur avec la fin de la chasse et la mise en place de mesures conservatoires dans la seconde moitié du xx<sup>e</sup> siècle. Désormais, se réjouit Christophe Barbraud, « toutes les plages de l'île sont saturées d'otaries ».

Au-delà de leur intérêt propre, ces animaux jouent le rôle de « sentinelles des écosystèmes de l'océan Austral ». Stars de l'île, les oiseaux et les otaries masquent des espèces de plus petite taille ô combien rares. En plus de ces migrants, Amsterdam héberge ainsi quelques résidents permanents, à l'instar de la belle-dame (*Vanessa cardui*), un magnifique papillon.

▲ Images satellitaires en fausses couleurs de l'île Amsterdam : à gauche, le 21 janvier 2024 ; à droite, le 9 février 2025. On constate l'étendue des zones brûlées lors de l'incendie de janvier 2025.





► Deux scientifiques examinent une jeune otarie pour mesurer sa croissance, en 2022.

Cette entomofaune (ensemble des espèces d'insectes et d'arthropodes locales) unique au monde, qu'étudient entre autres David Renault et ses collègues, prospère à l'ombre du seul arbre natif des Taaf, *Phyllica arborea*. Celui-ci joue pour les insectes le rôle d'espèce parapluie (espèce dont le domaine vital est assez large pour que sa protection assure celle des autres espèces végétales et animales peuplant le même territoire).

Ravagés par le pâturage des bovins, perdant jusqu'à 80 à 90 % de sa population antérieure à l'introduction des ruminants, les *Phyllica* ont retrouvé des couleurs depuis l'éradication des vaches. « Une campagne de restauration menée par les Taaf à partir d'une pépinière, après l'abattage des bovins, a permis de retrouver un couvert forestier proche de celui antérieur aux bovins », confirme David Renault.

### Des incendies fréquents

Vu la richesse de la biodiversité et la longévité des observations scientifiques sur place, Amsterdam bénéficie depuis deux ans du label See-Life décerné par CNRS Écologie & Environnement, l'un des 10 instituts de l'organisme. Cette labellisation, note Dominique Joly, directrice adjointe scientifique de l'institut, garantit aux suivis des oiseaux marins et de la flore d'Amsterdam « un soutien dans la continuité, renouvelable tous les cinq ans ».

À ce label récent, précise-t-elle, s'ajoute la plus ancienne Zone atelier Antarctique et Terres australes, créée en 2001, qui « assure non seulement une vision systémique du socio-écosystème, mais aussi la mise en place d'actions rapides en cas de crise, à l'instar de l'incendie début 2025 ». Cet incendie a fait craindre à l'ensemble des communautés

scientifiques présentes sur l'île la perte d'une biodiversité inestimable. Les premières estimations réalisées par les personnels techniques des Taaf et de l'Institut polaire français (Ipev), revenus sur l'île dès le mois d'avril 2025, ont cependant permis de les rassurer pour partie.

Malgré l'ampleur de l'incendie, son impact pourrait être « a priori faible, sinon nul pour les oiseaux marins et les otaries, tempère Christophe Barbraud. Les falaises d'Entrecasteaux, où nichent les albatros, ont été épargnées par l'incendie, et celui-ci s'est arrêté à la lisière des tourbières sur le plateau où vivent les albatros d'Amsterdam. »

David Renault se montre tout aussi optimiste pour la population de *Phyllica*. Sur cette île aride exposée aux vents, les incendies d'origine naturelle sont fréquents (11 grands incendies ont notamment été recensés en trois siècles de présence humaine). La flore s'est adaptée en conséquence. Le directeur de l'Ipev en veut pour preuve que « les traces du dernier incendie sur les falaises d'Entrecasteaux, en 2021, ont déjà disparu dans de nombreuses zones, signe que la reprise de la végétation peut y être extrêmement rapide ».

### Une opportunité scientifique

Néanmoins, tous s'inquiètent des conséquences à plus long terme d'un tel événement, aussi bien pour les petites bêtes que pour les plus grosses. Avec la baisse du nombre de fleurs, la belle-dame disposera de moins de nectar pour se nourrir. Du côté des oiseaux marins, même si

► Une colonie d'albatros, dont des albatros de Carter (ou albatros à bec jaune de l'océan Indien), niche sur les flancs des falaises d'Entrecasteaux, épargnées par l'incendie de 2025.



« Les falaises d'Entrecasteaux, où nichent les albatros, ont été épargnées par l'incendie, et celui-ci s'est arrêté à la lisière des tourbières. »

▲ Les otaries à fourrure d'Amsterdam (ou subantarctiques - *Arctocephalus tropicalis*) et de Kerguelen (ou antarctiques - *Arctocephalus gazella*) se reproduisent et prospèrent dans les îles australes.



son impact est faible, l'incendie s'ajoute aux maux à répétition dont souffrent les volatiles : noyades accidentelles dans les palangriers industriels, prédation des rats sur les œufs et les poussins, et surtout épidémies chroniques chez les jeunes de choléra aviaire – une maladie dont les rats sont le vecteur potentiel.

Affligées d'une telle cohorte de malheurs, tous imputables directement ou indirectement à l'espèce humaine, « ces populations arriveraient difficilement à se remettre de tels incendies si ceux-ci les impactaient, assure Christophe Barbraud. Quand une population d'albatros se porte bien, on estime son succès moyen de reproduction à 60 % des pontes. Aujourd'hui, le succès moyen est de 10 à 20 %. On observe même des colonies où ne survit aucun poussin. Des chiffres trop faibles pour maintenir la pérennité de ces espèces. »

Pour autant, une véritable opportunité scientifique se niche dans le drame du mégafeu. En effet, quelques mois à peine avant les flammes, l'équipe de David Renault bouclait le premier recensement intégral de la diversité

des habitats d'Amsterdam en s'appuyant sur la définition des formations végétales. « C'est un point zéro unique par rapport à ce genre de situations, souligne Dominique Joly. De ce point de vue, l'incendie représente à la fois une catastrophe pour l'île et une réelle opportunité pour la recherche. »

### La dynamique de recolonisation

Forts de cet état de conservation antérieur au mégafeu, les scientifiques de retour sur l'île pourront y suivre au cours des prochaines années la dynamique de recolonisation des espaces ravagés par les flammes et, ainsi, en comprendre les mouvements et les interactions entre populations, animales comme végétales.

Pour garantir et diversifier ces observations, le CNRS a débloqué un soutien financier exceptionnel pour les deux prochaines années, afin de « fédérer les personnes qui n'étaient pas encore impliquées dans les programmes de recherche de l'Ipev », signale François Criscuolo, directeur adjoint scientifique de CNRS Écologie & Environnement, chargé de la coordination des suivis See-Life.

« Notre objectif est d'apporter de nouvelles méthodes, de nouveaux savoir-faire et de nouvelles équipes pour caractériser la biodiversité d'Amsterdam, poursuit-il. De nouveaux projets de recherche ambitionnent dès à présent d'étudier les sols, d'expérimenter de nouveaux suivis des vertébrés, des invertébrés et des plantes, de caractériser les interactions au niveau du sol, ou encore de lister les polluants, notamment ceux émis par le feu, et leurs impacts sur les vertébrés. »

Pour expliquer l'importance scientifique de cet événement, aussi dramatique soit-il, sa collègue Dominique Joly dresse un parallèle avec une autre catastrophe bien connue des Français : « L'incendie d'Amsterdam a déclenché une prise de conscience, de la même façon – toutes proportions gardées – que l'incendie de Notre-Dame de Paris ». Gageons qu'il pourra fédérer et mobiliser tout autant les communautés scientifiques pour mieux comprendre, restaurer et préserver ce havre de la biodiversité polaire. **II**



# Étonnants pouvoirs du microbiote végétal

En 2025, vous avez reçu la médaille d'argent du CNRS pour votre contribution à la découverte et à l'étude d'un élément crucial pour les plantes : le microbiote végétal. Qu'est-ce au juste ?

**Philippe Vandenkoornhuysen**

Le microbiote végétal est une partie des plantes dont l'existence est longtemps restée insoupçonnée. C'est l'équivalent du microbiote intestinal (ou flore intestinale), cet ensemble de bactéries et d'autres micro-organismes qui vivent naturellement dans notre intestin et dont le déséquilibre pourrait être lié à plusieurs maladies (obésité, allergies, troubles autistiques...).

Le microbiote végétal est formé de micro-organismes assez diversifiés (bactéries, champignons...) et spécifiques des plantes. Présents chez tous les végétaux, ceux-ci sont principalement issus du sol. Certains sont recrutés dans les racines depuis la rhizosphère, la zone du sol proche des racines. Et certains sont ensuite transférés vers les parties aériennes : tiges, feuilles, fleurs.

Une autre fraction provient de la plante mère, qui transmet directement à ses descendants une partie de son microbiote, via ses graines ou par reproduction clonale (boutures, pousses, tubercules...). De plus, la composition du microbiote varie selon l'espèce de plante et les propriétés du milieu (type de sol, climat...).

**En quoi ce microbiote est-il important pour les plantes ?**

**P. V.** Il est impliqué dans plusieurs fonctions majeures. Tout d'abord, il est crucial pour la nutrition des végétaux. Le microbiote forme avec la plante hôte des interactions mutuellement bénéfiques. Celle-ci lui fournit



© J.-C. MOSCHETTI / CNRS IMAGES

VIVANT

**ÉCOLOGIE** Le microbiote des plantes ? L'holobionte végétal ? Des concepts méconnus, mais cruciaux pour la santé des plantes comme pour l'agriculture durable. Explications avec l'écologue Philippe Vandenkoornhuysen.

PROPOS RECUEILLIS PAR KHEIRA BETTAYEB

des glucides produits via le processus biochimique de photosynthèse ; et les micro-organismes, eux, permettent à la plante de mieux capter divers nutriments dans son environnement.

Par exemple, à partir des racines, les champignons mycorhiziens produisent dans le sol un réseau de filaments (les hyphes) ayant la propriété de capter de l'eau, des nutriments, des minéraux, et de les ramener à la plante. Chez les légumineuses, certaines bactéries associées aux racines fixent le diazote atmosphérique, améliorant ainsi la croissance végétale.

D'autres micro-organismes les protègent de microbes pathogènes – soit en occupant l'habitat racinaire, ce qui empêche les pathogènes de s'y installer (phénomène de compétition), soit en stimulant des mécanismes de défense des végétaux. Enfin, le microbiote racinaire est impliqué dans la résistance des plantes à différents stress environnementaux, tel que le stress hydrique (manque d'eau).

**La médaille du CNRS distingue aussi votre contribution à la notion d'holobionte. À quoi renvoie ce terme ?**

**P. V.** Il définit un nouveau niveau d'organisation biologique. Dans ce concept, l'individu n'est pas l'hôte, en tant qu'entité autonome, mais

▲ Des bactéries forment des nodules (en rose) sur les racines (en blanc) d'une légumineuse. Les bactéries fournissent de l'azote à la plante, et la plante donne des glucides aux bactéries.



© THIERRY BERROD, MONA LISA PRODUCTION / SCIENCE PHOTO LIBRARY

l'ensemble formé par cet hôte et le microbiote qu'il héberge. En 2023, nous avons démontré expérimentalement que cette notion correspond bien à une réalité biologique<sup>2</sup>. Même dans une plante greffée, constituée de racines venant d'un végétal et d'une partie aérienne issue d'un autre, la composition du microbiote n'est pas aléatoire, mais très fortement similaire à celle de la plante dont provient le système racinaire. Ceci est la signature d'une coévolution très forte entre la plante hôte et son microbiote.

### Ce concept d'holobionte constitue un changement de paradigme majeur. Pourquoi ?

**P. V.** Parce qu'il suggère que considérer les plantes comme des entités autonomes est une erreur ! Celles-ci ne peuvent pas être isolées de leur microbiote, et vice versa, car leurs traits et leurs fonctions individuelles sont réciproquement augmentées par leurs interactions. Par exemple, la captation de nutriments et d'eau

## Une méta-analyse révèle «une forte dégradation de la diversité en micro-organismes dans les sols agricoles à l'échelle planétaire».

réalisée par la plante seule est accrue par certains des micro-organismes composant le microbiote, qui, réciproquement, tirent profit de la plante.

Considérer la plante et son microbiote comme un seul et même tout est essentiel pour affiner notre compréhension de la biologie des plantes. Cela devrait aussi aider à améliorer la production des végétaux agricoles.

### Justement, certaines de vos recherches montrent que l'agriculture conventionnelle malmène le microbiote végétal.

**P. V.** Oui... Depuis 2020, avec des collègues de différents organismes chinois, nous avons commencé à établir le diagnostic des impacts de l'agriculture sur le microbiote végétal. Une importante analyse, qui a compilé les données de 150 études, a mis en évidence une forte dégradation de la diversité en micro-organismes dans les sols agricoles à l'échelle planétaire<sup>3</sup>. Or cette altération affecte directement la composition du microbiote des plantes cultivées, en limitant le nombre de souches de micro-organismes qu'elles peuvent recruter – le tout, avec le risque d'accroître la vulnérabilité des plantes aux changements environnementaux.

Ces altérations sont notamment liées à l'apport d'engrais chimiques plutôt qu'organiques. Cela a pour effet de diminuer dans le sol la quantité de carbone décomposable, dont dépend la nutrition de nombreux micro-organismes qui y vivent. L'emploi de fongicides occasionne aussi des dégâts collatéraux, en particulier sur les champignons bénéfiques.

### Comment pourrait-on restaurer la diversité du microbiote végétal dans les sols agricoles ?

**P. V.** Nous avons identifié trois pistes. L'une consiste à cocultiver, avec les plantes agricoles, des plantes sauvages « auxiliaires ». La capacité de ces dernières à interagir avec de bons micro-organismes n'a pas été altérée. Elles pourraient donc, par effet de voisinage, véhiculer ou échanger certains des bons organismes de leur microbiote avec les plantes de cultures.

Une autre piste vise à transformer la sélection variétale, qui ne concernerait plus uniquement les plantes agricoles, mais aussi le microbiote comme point important de cette sélection. Pour sélectionner les holobiontes les plus efficaces, une idée serait de placer les plantes dans des situations où elles ont absolument besoin de micro-organismes pour se développer, comme un sol pauvre en nutriments ou en eau. Cela permettrait d'obtenir des plantes très efficaces pour interagir avec de bons micro-organismes.

Une troisième solution consisterait simplement à changer les pratiques agricoles elles-mêmes, pour mieux respecter le microbiote végétal. Par exemple, on pourrait augmenter la diversité des plantes dans les champs. Ainsi, elles n'auraient pas les mêmes besoins au même moment et, de ce fait, seraient moins dépendantes des engrais. ||



1. Chercheur au laboratoire Écosystèmes, biodiversité, évolution (Ecobio, unité CNRS/Univ. de Rennes). 2. Voir : [doi.org/10.1016/j.jisci.2023.106031](https://doi.org/10.1016/j.jisci.2023.106031) 3. Voir : [doi.org/10.1128/msystems.00337-20](https://doi.org/10.1128/msystems.00337-20)



## NUMÉRIQUE

**MATHÉMATIQUES** Préparer une pâte à gâteau, découper une pizza ou optimiser son temps en cuisine... Ces situations du quotidien dissimulent des concepts informatiques et mathématiques, à découvrir dans l'exposition « Dans ma cuisine ».

PAR CHARLOTTE MAUGER

# Votre cuisine est pleine de maths!

« **Q** uasiment n'importe quelle activité de la cuisine peut faire penser à des mathématiques ou à de l'informatique, énonce Olivier Druet, commissaire scientifique de l'exposition « Dans ma cuisine »<sup>1</sup> et mathématicien au CNRS<sup>2</sup>. Réciproquement, presque n'importe quelle notion de ces disciplines peut être explicitée grâce à des parallèles avec la cuisine. »

« Une recette ressemble beaucoup à un algorithme », estime Nina Gasking, commissaire de l'exposition. Les deux constituent des listes d'instructions simples qui, réalisées dans l'ordre, conduisent à un résultat plus élaboré.

« On ne sait peut-être pas faire un sauté d'agneau, mais, si on nous donne plusieurs étapes à suivre, on réussira à le cuisiner, illustre Laurent Feuilloley, chercheur CNRS au Laboratoire d'informatique en image et systèmes d'information (Liris)<sup>3</sup>, à Villeurbanne. Cette analogie fonctionne bien pour l'ordinateur : il faut décomposer sa tâche en plusieurs instructions très simples et bien définies pour qu'il la réalise. »

« Les recettes ont aussi un côté probabiliste », souligne Céline Bonnet. Chercheuse de l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria) dans l'équipe lyonnaise Dynamiques du cancer, adaptation et modélisation<sup>4</sup>, elle a participé à la création de l'exposition. « On n'arrive pas toujours au même résultat bien qu'on suive une même recette, note-t-elle. Plein de petits éléments peuvent agir et faire varier le résultat. » Elle décrit la recette comme un modèle, soit la représentation simple

1. Conçue par la Maison des mathématiques et de l'informatique (MMI) de Lyon.  
2. Directeur de recherche à l'Institut Camille Jordan (unité CNRS/École centrale de Lyon/Insa Lyon/Univ. Lyon 1 C. Bernard/Univ. Lyon 3 J. Monnet) et directeur de la MMI.  
3. Unité CNRS/Insa Lyon/Univ. Lyon 1 C. Bernard. 4. Centre Léon Bérard/CNRS/ENS de Lyon/Inria/Inserm/Univ. Lyon 1 C. Bernard.

► Une fois mélangés, les ingrédients d'une pâte à gâteau ne peuvent plus être séparés. Question de probabilités et de thermodynamique!

d'un phénomène de transformation. Ingrédients, matériel utilisé, précision... Tous ces paramètres influent sur la réussite de la préparation.

En termes de matériel, on peut ainsi se demander, en lisant une recette, s'il faut utiliser un robot, certes efficace, mais encombrant et compliqué. Un raisonnement qui rejoint celui des scientifiques, qui s'interrogent de façon similaire. Car des modèles très détaillés (par exemple, un qui décrirait la dynamique de tout le corps humain) sont intéressants, mais trop compliqués pour être manipulables. « *Dans les deux cas, il y a une question de prix, pointe Céline Bonnet. Une grosse machine vaut-elle le coup par rapport à ce qu'on veut faire ?* »

### L'entropie de la pâte à gâteau

Revenons aux ingrédients et préparons une pâte à gâteau. Est-il possible d'inverser le mélange pour retrouver la situation initiale, la farine séparée du sucre ? « *Tout le monde sait que c'est impossible, mais pourquoi ? Lorsqu'on pose la question, les visiteurs [de l'exposition] commencent à en douter* », relate Nina Gasking.

Or l'entropie (mesure du désordre) d'un système ne peut qu'augmenter, prescrit le deuxième principe de la thermodynamique, discipline qui décrit les échanges d'énergie. Pour l'illustrer, l'exposition dispose de 2 urnes, avec 10 boules blanches dans l'une et 10 noires dans l'autre. « *On prend au hasard une boule dans chaque urne et on la verse dans l'autre, décrit Olivier Druet. On mélange les boules noires et blanches, en quelque sorte. On se rend compte assez vite qu'il est quasi impossible de retomber sur la situation de départ en continuant de mélanger.* »

S'il ne reste que 1 boule blanche parmi 9 noires dans une urne, vous n'aurez que 1 chance sur 10 d'y piocher la boule blanche, et 1 chance sur 10 de piocher la dernière noire dans l'autre. Une probabilité très faible. « *Si on passe à des millions de grains de sucre et de farine, poursuit Olivier Druet, la probabilité devient nulle.* »

Et comment ne pas perdre de temps quand on prépare plusieurs plats à la fois ? Faut-il commencer par le plus rapide à exécuter ou par celui dont le temps de cuisson est le plus court ? « *Un algorithme optimal mêle ces deux idées, explique Aline Parreau, chercheuse CNRS au Liris. Mais plus on ajoute de complexité, et plus trouver la meilleure organisation devient ardu.* »

► L'exposition invite à partager une bûche de Noël ornée de plusieurs fruits entre deux personnes. Comment faire pour que chacune ait autant de chaque fruit... tout en coupant le moins de parts possible ?

## Pour maximiser le nombre de cookies sur une plaque de cuisson, on décale une colonne de biscuits sur deux un peu vers le bas.

L'optimisation en cuisine permet aussi un gain de place. Ainsi, pour maximiser le nombre de cookies sur une plaque de cuisson, on décale une colonne de biscuits sur deux un peu vers le bas. Les cookies forment alors un réseau hexagonal. Une solution intuitive, mais pas si simple. Elle est même au cœur des travaux de recherche actuels, dont ceux de la mathématicienne ukrainienne Maryna Viazovska, médaille Fields en 2022 pour des équivalents aux cercles dans des espaces de plus grandes dimensions.

Vient ensuite le partage. La trigonométrie offre des outils pour diviser un plat en forme de disque, telle une pizza, en parts parfaitement égales. Mais, pour une bûche



## + À voir

Exposition « Dans ma cuisine »,  
au musée Fermat de Beaumont-  
de-Lomagne (Tarn-et-Garonne),  
jusqu'au 1<sup>er</sup> novembre 2027.

de Noël ornée de plusieurs fruits, on procédera autrement. « Dans l'exposition, décrit Nina Gasking, on demande aux participants de répartir la bûche entre deux personnes, de sorte que chacune ait autant de chaque fruit, tout en faisant le moins de parts possibles. » Aline Parreau donne la solution : « Si l'on a deux types de fruits sur le gâteau, deux coups de couteau suffisent, trois coups de couteau s'il y en a trois, et ainsi de suite... »

Autre théorème mathématique, celui appelé « du sandwich au jambon ». Lequel, précise Nina Gasking, « nous dit que peu importe comment j'ai fait mon sandwich, il y aura toujours une manière de le partager en deux morceaux avec la même quantité d'ingrédients, même si ce n'est pas la manière naturelle de couper un sandwich. »

Les solutions de partage peuvent se démontrer à l'aide d'un même théorème, celui de Borsuk-Ulam. Ce résultat de topologie algébrique des années 1930 indique que pour toute grandeur qui varie de manière continue sur une sphère, il existe toujours deux points de même valeur situés aux antipodes.

### Les limites de l'« algorithme glouton »

Même lorsque l'objectif est moins l'équité que le plaisir gustatif, l'informatique vient à la rescousse. « Si vous voulez avoir le plus de parts de pizza avec des olives et que vous n'avez le choix qu'entre les deux voisines de la part précédemment choisie, le mieux est de choisir la part ayant le plus d'olives, affirme Céline Bonnet. On appelle cette manière de choisir l'« algorithme glouton ». » Mais celui-ci « ne maximise pas toujours le nombre d'olives à la fin », tempère-t-elle. Il faut alors recourir à un autre algorithme.

D'ailleurs, la théorie des jeux démontre que, dans ce jeu à deux joueurs, il existe toujours une stratégie gagnante pour l'un d'eux. « Quand le nombre de parts

de pizza est pair, la stratégie favorise toujours celui qui joue en premier, indique Aline Parreau. Mais, récemment, une étude a démontré que pour un nombre impair de parts, il y a des cas où c'est le second joueur qui est avantagé. »

Venons-en au service. Dresser votre plan de table est un casse-tête ? Un autre outil mathématique s'avère ici efficace : les graphes. « Ces objets permettent de modéliser tellement de choses qu'il est facile de les raccrocher à des applications variées », constate Aline Parreau. En représentant chaque invité par un point et en reliant d'un trait les personnes qui ne s'entendent pas, il devient possible, grâce à la coloration de graphe, de répartir les invités en un minimum de tables... sans créer de conflit.

### La cuisine de l'article scientifique

Chercheurs et chercheuses dressent aussi des parallèles entre leur façon de travailler et l'action de cuisiner. « Certains partagent dans l'exposition qu'écrire un article de recherche, c'est un peu comme dresser un plat, témoigne Nina Gasking. Il faut donner envie à la personne qui va lire ou à la personne qui va déguster. Même si, dans l'un et l'autre des cas, "bien présenter" ne veut pas dire la même chose. »

Et la créativité est tout aussi importante. « Parfois, poursuit l'ingénieure, il faut oser des mélanges étonnants – des aliments qu'on ne mettrait pas spontanément ensemble ou des outils qui proviennent de deux domaines très distincts – pour un résultat très intéressant. »

« L'exposition n'a pas vraiment pour but d'expliquer que les mathématiques et l'informatique sont utiles pour faire de la cuisine, concède la commissaire d'exposition. Il s'agit plutôt d'un habillage pour explorer les liens que ces disciplines entretiennent avec une activité aussi commune que la cuisine. »

« Des actions en cuisine comme couper, ranger, organiser sont des opérations centrales en mathématiques et en informatique », résume Aline Parreau. Et Laurent Feuilloley va encore plus loin : « D'une part, la cuisine est une sorte de monde miniaturisé, car c'est une modélisation de plein d'aspects de la société : le partage des ressources, la collaboration, la transformation des ressources... Or, d'autre part, les mathématiques travaillent à modéliser le monde ». II

► Des algorithmes et des recherches en théorie des jeux peuvent vous aider à mieux distribuer les parts de pizza équitablement... ou à votre seul bénéfice !

© NINA GASKING



# Les nouvelles routes de la cocaïne

SOCIÉTÉS

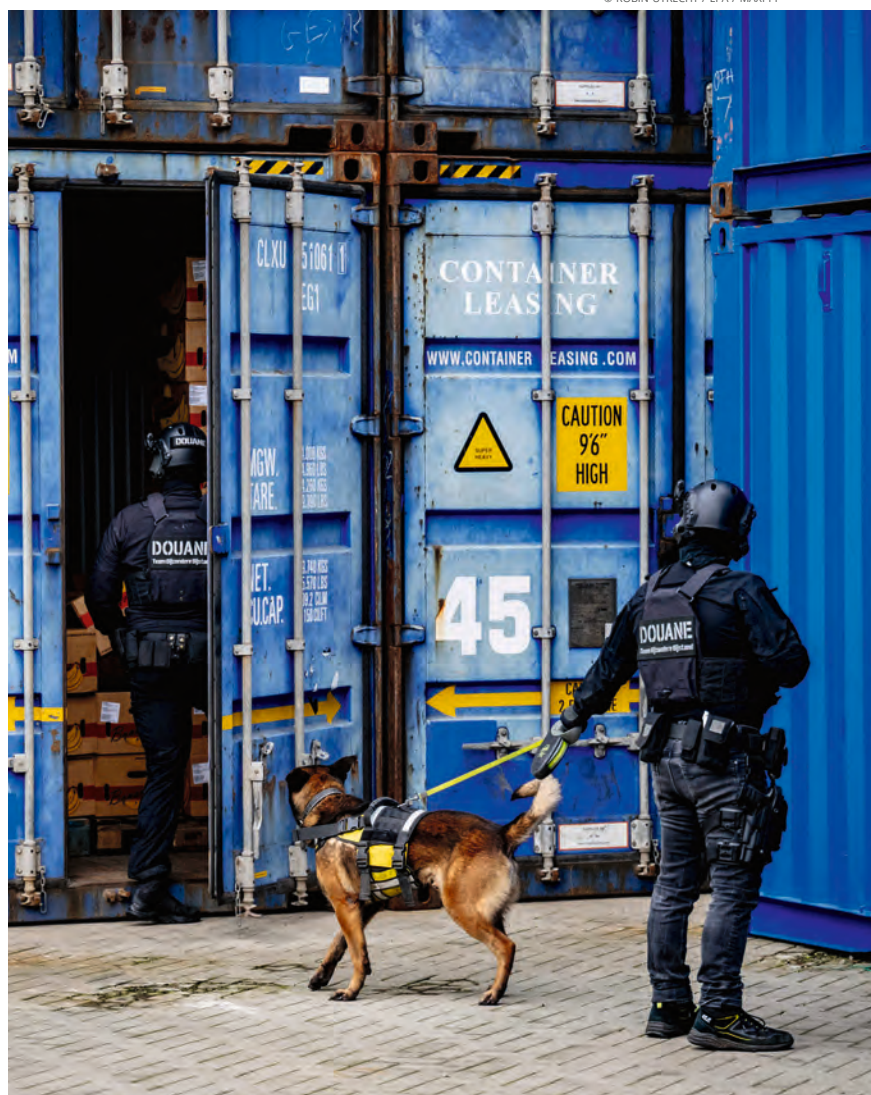
**SOCIO-ÉCONOMIE** Le trafic de cocaïne explose en Europe. Des ports comme Le Havre et Rotterdam deviennent les maillons clés d'une logistique mondialisée qui prend ses sources en Amérique latine. Le sociologue Gabriel Feltran révèle ce que le narcotrafic a appris du capitalisme de plateforme.

PAR ANNE-SOPHIE BOUTAUD

En novembre 2023, un pêcheur découvre des dizaines de ballots de cocaïne flottant au large de Fécamp, non loin du Havre. Le « drop-off » est l'une des techniques utilisées par les narcotrafiquants : largués en pleine mer, les ballots sont récupérés par des bateaux complices. Ainsi, face à la surveillance croissante des ports, où la drogue est souvent cachée dans des cargos, les modes d'acheminement de la drogue se diversifient.

Après le cannabis, la cocaïne représente la substance illicite la plus consommée en Europe. En France, le transport maritime en est le principal vecteur d'entrée. Arrivant aussi par les airs et par la route, le volume de cocaïne sur le marché européen n'a cessé d'augmenter lors de la dernière décennie, avec des saisies à l'avenant – notamment dans l'Hexagone, selon l'Office anti-stupéfiants (Ofast) : 23,2 tonnes (t) en 2023, 53,5 t en 2024, 81 t en 2025 !

Sociologue du crime et directeur de recherche au CNRS, Gabriel Feltran<sup>1</sup> étudie les effets de ce trafic en Europe, en partant de ceux qui le contrôlent entre l'Amérique latine et le Vieux Continent. Une partie des résultats de son projet



Des douaniers spécialisés dans la lutte antidrogue présentent leurs méthodes, dans le port de Rotterdam, en janvier 2024.

de recherche « Le trafic de cocaïne vers la France : enquête sur la chaîne de valeur à partir des ports du Havre et de Rotterdam »<sup>2</sup> a été publiée. Il y décrit le mode opératoire des groupes criminels qui font transiter la cocaïne par ces ports, et soutient que la transformation du commerce de la cocaïne est portée par une « *plateformisation criminelle* » encore peu étudiée de la logistique globale.

Gabriel Feltran a déjà enquêté durant deux décennies sur les principales factions criminelles brésiliennes, et notamment sur le Primeiro Comando da Capital (PCC), devenu un partenaire important de plusieurs mafias européennes, actrices incontournables de ce trafic transatlantique. Né en 1993, le PCC s'est d'abord formé à travers de petites factions dans les prisons de São Paulo. S'imposant ensuite jusque dans les quartiers populaires, il a permis d'y instaurer un certain ordre social.

Cette organisation criminelle a sa justice interne, ses règles de conduite, sa gouvernance flexible et décentralisée, mais aussi une direction stratégique univoque et radicale. Le PCC ne fonctionne pas tout à fait comme

un cartel mexicain ou une mafia italienne. Il ressemble davantage à une société secrète, telle la franc-maçonnerie, où le leadership n'est pas personnalisé.

« Cela permet au PCC d'occuper silencieusement des positions stratégiques dans des chaînes d'approvisionnement de marchés illégaux : cocaïne, armes à feu, voitures volées ou blanchiment d'argent », explique le chercheur. En Europe, cette chaîne de valeur illicite ne relève pas « d'une économie marginale. On parle de centaines de milliards d'euros par an, blanchis et circulant sur les marchés les plus divers. »

### Structure flexible et logistique mondiale

L'année 2016 marque un tournant dans les dynamiques du marché de la cocaïne. En Colombie, les accords de paix ont permis de démobiliser une partie des acteurs armés traditionnels des zones de production de coca, ouvrant la voie à de nouveaux intermédiaires logistiques. Cette année marque également l'emprise du PCC sur le port de Santos (principal port brésilien et plus grand complexe portuaire d'Amérique latine), ainsi que sur la frontière entre le Brésil et le Paraguay, un pays gangrené par le trafic de drogue.

Le PCC repose sur une structure flexible, s'appuie sur des opérateurs « professionnels » et dispose de capacités logistiques considérables. C'est ainsi qu'il s'impose aussi bien dans les « cuisines » où l'on transforme la coca en cocaïne que dans la logistique de sa distribution mondiale, en partenariat avec des mafias voisines, mais aussi européennes, asiatiques et africaines.

« Le Brésil devient un hub fondamental d'exportation, à côté de l'Équateur et de la Colombie, et des ports européens comme Le Havre et Rotterdam s'intègrent dans cette chaîne globale, observe Gabriel Feltran. L'explosion du trafic vers l'Europe, la hausse de la consommation et du transit en France sont les effets directs d'une transformation logistique de

▴ Des ballots de cocaïne flottent au large de la Sicile, en 2023. Ils ont sans doute été jetés d'un cargo pour être récupérés par des trafiquants.

## Quelques organisations criminelles centralisent le pouvoir en agissant comme des plateformes d'intermédiation.

la chaîne de valeur de la cocaïne, qui s'appuie toujours sur des territoires précis : ports, villes, frontières, quartiers populaires, districts financiers. »

Depuis 2024, Gabriel Feltran et son équipe enquêtent dans différents quartiers du Havre. « Nous avons réalisé plus d'une centaine d'entretiens anonymisés avec des acteurs issus de sphères très variées, détaille-t-il : des fonctionnaires de police, des douaniers, des magistrats, des gendarmes, des acteurs associatifs, des personnes impliquées dans le trafic, ou encore des familles de détenus. » L'équipe étudie aussi des dossiers judiciaires, des procès en cours ou passés, ainsi que des données institutionnelles (police, justice, Mission interministérielle de lutte contre les drogues et les conduites addictives).

Point d'entrée discret mais stratégique, Le Havre possède des liaisons maritimes avec des pays sud-américains parmi les plus gros producteurs mondiaux de cocaïne. Il est ainsi le principal port de transit (vers les Pays-Bas et l'Espagne) en Europe et « fait partie de cette ligne de ports, avec Anvers, Rotterdam, Amsterdam et Hambourg, qui sont l'entrée nord de l'Europe pour la cocaïne ».

### L'intégration des petits acteurs

Gabriel Feltran reprend le travail de Peter Reuter, l'un des grands spécialistes américains des trafics de drogue, pour qui le marché international de la cocaïne s'apparente à un sablier : en haut, une multitude de petits producteurs fragmentés ; en bas, des millions de consommateurs ; au centre, une poignée d'acteurs puissants qui maîtrisent la logistique globale (transport, distribution, blanchiment...).

« Tous les pouvoirs sont concentrés dans le centre du sablier, décrit le chercheur. Ce sont les organisations – sans doute trois ou quatre, dont le PCC – qui font la logistique grossiste et donc la gouvernance de ce commerce international. »

Ce système permet une coordination mondiale. Les trafiquants peuvent aisément choisir entre voies maritime, aérienne, terrestre – soit « deux dizaines de méthodes d'entrée maritime identifiées et huit à neuf par voie aérienne ».

Gabriel Feltran décrit un « effet de plateforme », dans lequel le marché des grossistes fonctionne à la façon d'une plateforme géante, à l'instar d'entreprises telles qu'Uber ou Airbnb. Les organisations comme le PCC et les mafias européennes intègrent progressivement tous les petits acteurs dans leur système. Elles jouent le rôle d'intermédiaire logistique, mettant en relation producteurs, transporteurs et distributeurs.

© HANDOUT / GUARDIA DI FINANZA PRESS OFFICE / AFP





▾ Le quartier surnommé Cracolândia (littéralement, le « pays du crack »), à São Paulo (Brésil), après une opération de police visant à désorganiser le réseau du trafic de drogue. Sur le mur, le graffiti « PCC » fait référence à la principale organisation qui dirige ce trafic.

« Si, dans n'importe quelle ville du monde, on peut aujourd'hui se procurer de la cocaïne, c'est dû au processus de "plateformisation" du marché », assure le chercheur. Car les organisations offrent infrastructures, contacts, protection, et même services juridiques à des trafiquants indépendants. « C'est comme pour Uber : le chauffeur ne connaît ni le P-DG ni l'algorithme, mais il l'utilise. Et, s'il est arrêté, il est facilement remplaçable. »

Les politiques répressives classiques, qui ciblent les petits opérateurs, n'affectent pas la structure du marché, estime Gabriel Feltran. En revanche, elles génèrent des effets pervers comme le renouvellement perpétuel des « petites mains » de la criminalité. Chaque arrestation d'un « guetteur, d'un chauffeur de camion, d'un pêcheur ou docker corrompu » libère un poste que d'autres remplissent aussitôt. Mais l'organisation criminelle reste intacte.

Le transport maritime a représenté les trois quarts des saisies de cocaïne en 2022, selon l'Observatoire français des drogues et des tendances addictives (OFDT). Ce chiffre a largement diminué en 2023 et en 2024 grâce aux contrôles accrus dans les ports français. Les organisations criminelles ont-elles réorienté leurs routes pour contourner les ports les plus surveillés ? Quels sont, à court et moyen termes, les effets sur les port(s) d'entrée en Europe, comme Le Havre et Rotterdam ?

Les travaux du chercheur devraient bientôt éclairer ces questions. En parallèle, il a coorganisé en 2025 avec la Mission interministérielle de lutte contre les drogues et

conduites addictives et l'École urbaine de Sciences Po un cycle de conférences afin de renforcer la coopération entre la recherche scientifique et les acteurs publics sur ce thème. « J'ai découvert la qualité des cadres de la bureaucratie française, se réjouit Gabriel Feltran. Les fonctionnaires ont une expertise rare qui peut vraiment aider la recherche universitaire, tout comme la bonne recherche peut aider à prendre des décisions qui ne répètent pas les erreurs du passé. »

Gabriel Feltran lève ainsi le voile sur un système globalisé, structuré autour de chaînes de valeur complexes et flexibles, dans lequel quelques organisations centralisent le pouvoir en agissant comme des plateformes d'intermédiation. La logistique, plus que la production ou la consommation, est au cœur du marché.

Pour lutter contre le narcotrafic, un Parquet national anticriminalité organisée (Pnaco) a été installé en janvier dernier. Sont aussi entrés en vigueur un régime carcéral plus strict pour les plus gros trafiquants, ou encore la refonte du régime des repentis. Mais seule une connaissance sociologique fine, nourrie par la recherche de terrain et le dialogue avec les institutions, permettra de repenser la régulation de ces économies criminelles transnationales, estime Gabriel Feltran : « Le chercheur n'est ni juge ni policier, mais il peut contribuer à éclairer les choix collectifs ». ▮

1. Centre d'études européennes et de politique comparée (unité CNRS/Sciences Po Paris) ; coauteur d'un rapport sur les factions criminelles brésiliennes en Guyane : [tinyurl.com/drogue-guyane](https://tinyurl.com/drogue-guyane) 2. Voir : [tinyurl.com/cocaine-ports](https://tinyurl.com/cocaine-ports)

# Un mécanisme clé de résistance des cancers identifié

VIVANT 

En l'an 2000, Douglas Hanahan et Robert Weinberg, deux biologistes américains, publient l'article scientifique « *The Hallmarks of Cancer* [les caractéristiques fondamentales du cancer] ». Pour la première fois sont posées sur le papier six spécificités de l'ensemble des cancers – avec, en tête, l'inflammation comme condition première permettant leur développement. L'article devient une référence, et plusieurs mises à jour seront publiées.

Fin 2025, de ce côté de l'Atlantique, Céline Vallot, directrice de recherche à l'Institut Curie<sup>1</sup>, et son équipe réussissent à identifier un mécanisme fondamental et encore inconnu des cellules cancéreuses. Ce processus leur permet de ne pas succomber aux thérapies anticancéreuses, mais sans y développer de résistance. Une découverte réalisée en étudiant les cancers du sein triple négatif.

**MÉDECINE** Le cancer du sein triple négatif est l'un des plus agressifs. En l'étudiant, une équipe de l'Institut Curie vient de mettre en évidence un comportement inédit des cellules cancéreuses face aux traitements.

PAR MEHDI HARMI

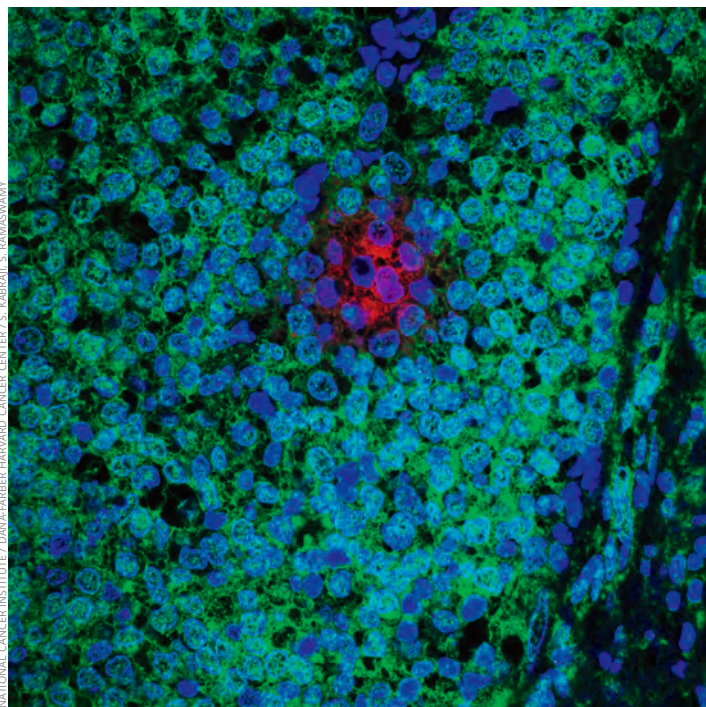
La version triple négatif représente environ 15 % des cancers du sein. Elle est souvent présentée comme le sous-type le plus agressif, notamment du fait d'un taux de rechute élevé et dans des délais plus rapides (19 à 40 mois, contre 35 à 67 en moyenne pour le non-triple négatif). On recense quelque 9 000 nouveaux cas par an en France, souvent chez des femmes de moins de 40 ans.

Comme tout cancer, celui du sein peut développer des résistances face à des traitements, comme la chimiothérapie ou certaines immunothérapies, mais pas seulement. « *La résistance est la capacité d'une cellule cancéreuse à résister à un traitement quel qu'il soit*, détaille Céline Vallot. *Une cellule sensible au traitement va mourir, alors que la cellule résistante va continuer à se diviser, même sous thérapie.* »

## Des cellules tolérantes aux traitements

Il existe toutefois un état intermédiaire entre la mort de la cellule cancéreuse et la résistance. C'est ce qu'on appelle la « persistance face au traitement ». Qui intéresse fortement les scientifiques. Dans ce cas, les cellules ne meurent pas sous l'effet de la thérapie, mais elles cessent de se diviser activement. Bref, elles endurent le traitement de façon transitoire. « *Elles vont simplement tolérer le traitement le temps qu'il dure* », explique la chercheuse.

Voici le plus étonnant, chez ce groupe de cellules : lorsque la thérapie s'arrête, il redevient sensible aux molécules thérapeutiques utilisées. Ainsi, lorsque le traitement reprendra, certaines de ces cellules mourront, tandis que d'autres réactiveront le mécanisme de tolérance.



Cellules de cancer du sein peu proliférantes et tolérantes au traitement (en rouge), entourées de cellules cancéreuses primaires (en bleu et en vert).

1. Laboratoire Dynamique de l'information génétique : bases fondamentales et cancer (DIG-Cancer, unité CNRS/Institut Curie/Sorbonne Univ.).

Mais, attention ! L'état de tolérance ne dure qu'un temps. Le risque est réel que ces cellules persistantes finissent par devenir purement et simplement résistantes si elles sont exposées de façon prolongée au traitement. « *Si jamais ce même groupe de cellules était davantage en contact avec le traitement, précise Céline Vallot, alors les chances qu'elles acquièrent une résistance seraient démultipliées.* » Et la rechute serait prévisible.

### Toujours la même réaction

Pour mettre au jour les mécanismes qui sous-tendent cette tolérance, les scientifiques ont réalisé des « avatars » de cancer chez des souris. « *Accéder aux cellules tolérantes chez les patientes est assez compliqué. À l'Institut Curie, comme dans d'autres laboratoires à travers le monde, on a mis au point des systèmes ex vivo,* décrit Céline Vallot. *C'est-à-dire qu'on prend des souris immunodéficientes sur lesquelles on greffe la tumeur de la patiente. Les souris sont ensuite traitées avec les mêmes traitements que la patiente.* »

Le modèle murin présente un avantage dans ce cas. Le groupe de cellules que les scientifiques recherchent (les fameuses cellules tolérantes à l'origine des rechutes) se reforme au bout de 1 à 2 mois, alors qu'il faut attendre entre 3 et 4 ans chez les humains. « *Nous avons plusieurs souris pour une même tumeur. Cela nous permet de savoir s'il se passe toujours la même chose,* souligne la chercheuse, *mais également de tester plusieurs traitements différents, afin de déterminer si on obtient toujours le même type de cellules tolérantes ou non.* »

Cette approche a permis une découverte d'envergure : « *On a compris que, pour chaque patiente, peu importe le nombre de fois où l'on traitait la tumeur, on obtenait toujours le même phénotype. C'est-à-dire que les cellules présentaient*

« *Avant, on pensait que chaque patient ou patiente développait ses propres groupes de cellules persistantes. Ce qui n'est pas le cas.* »

*toujours le même programme d'expression de gène. On a aussi compris que, peu importe le traitement utilisé, on obtenait toujours la même proportion de cellules persistantes.* »

Autrement dit, quels que soient le traitement et le nombre de fois auquel les cellules y sont soumises, elles y réagissent toujours de la même façon. « *Il faut garder en tête qu'avant, on pensait que chaque patient ou patiente développait ses propres groupes de cellules persistantes. Ce qui n'est pas le cas. Et ce qui est assez fou, c'est qu'en regardant dans les données publiques d'autres cancers, comme celui du poumon, on a pu démontrer que la signature d'expression génique (qui comprend plusieurs centaines de gènes) identifiée dans le cancer du sein triple négatif se retrouvait également dans ces tumeurs* », se réjouit la chercheuse.

Pour Céline Vallot, pas de doute : son équipe a mis le doigt sur une nouvelle caractéristique fondamentale des cancers, une nouvelle *hallmark*. Or dénicher une spécificité des cancers équivaut à découvrir l'un de leurs points faibles.

De plus, ce nouveau talon d'Achille repose sur une adaptation transcriptomique des cellules tolérantes, et non sur une adaptation génétique, comme c'est le cas chez les cellules résistantes. En somme, les cellules tolérantes ne portent pas de mutations génétiques particulières. Elles s'adaptent de façon transitoire à la présence de molécules thérapeutiques en surexprimant certains de leurs gènes. « *Du point de vue des patients, assure Céline Vallot, cela veut dire que cet état est véritablement réversible, et cela donne espoir pour certaines personnes.* »

Aujourd'hui, la tendance est plutôt de traiter les patients et patientes de façon continue. Ce qui a pour effet de générer des résistances. Grâce à cette découverte, les schémas de traitement pourraient à moyen terme être pensés différemment : traiter moins, mais de manière séquentielle, afin que les cellules tolérantes redeviennent sensibles et puissent à nouveau être traitées. ||

► Céline Vallot, lauréate de la médaille de l'Innovation du CNRS 2022 (au centre) et une partie de son équipe, au laboratoire DIG-Cancer, situé à l'Institut Curie, à Paris.

© FRÉDÉRIQUE PLAS / CNRS IMAGES





© RICHARD JONES / SHUTTERSTOCK

# Avec les femmes du « Made in China »

Beatrice Zani<sup>1</sup> ne se contente pas de parler six langues et de posséder une dose d'empathie qui lui permet de nouer des liens avec des personnes de tout milieu et de toute nationalité. Elle maîtrise aussi l'art du récit. Quelles sont les origines d'un soutien-gorge orange fluo embarqué sur un conteneur traversant le détroit de Taïwan, et que devient-il ? À partir d'une interrogation qui peut paraître anecdotique, la chercheuse étudie et met à notre portée les parcours sociaux, économiques, mais aussi émotionnels des jeunes femmes migrantes. Et apporte un regard totalement nouveau sur ces trajectoires de vie.

Le parcours personnel de Beatrice Zani n'est pas banal non plus. Née en Italie, elle quitte Milan pour un cursus en sciences sociales à Sciences Po Lyon, puis part en Chine et s'installe en colocation à Nankin avec de jeunes Chinoises – loin de toute diaspora française ou italienne, pour bien apprendre la langue. Elle rédige alors une thèse sur les jeunes femmes migrantes chinoises<sup>2</sup>, poursuit avec des postdoctorats dans les universités de Tübingen (Allemagne) et McGill (Canada), puis intègre le CNRS en 2023, à 31 ans. Et elle vient de partir en Indonésie pour en apprendre

VIVANT  NUMÉRIQUE

**SOCIO-ÉCONOMIE** En suivant le trajet d'un soutien-gorge glissé dans une valise, la sociologue Beatrice Zani révèle les trajectoires de jeunes femmes migrantes entre la Chine et Taïwan. Et brise l'image d'un capitalisme géré par la seule « haute finance ».

PAR MARINA JULIENNE

la langue, afin de discuter avec les ouvriers embarqués sur les bateaux de pêche. Elle a aussi obtenu un financement de l'Agence nationale de la recherche pour enquêter sur le travail forcé dans les économies maritimes asiatiques.

Et encore ne l'avez-vous pas entendue raconter mille histoires. Par exemple, le partage de sa chambre avec une colocataire qui faisait commerce de fantômes – enfouis dans des tiges de bambou et vendus 8 000 dollars pièce

► Une femme coud un soutien-gorge dans une usine textile, à Yanbu, dans le sud de la Chine.

« Elles ont pu me raconter leur vie, les épreuves et, souvent, la violence qu'elles avaient subie. »

à de riches familles de Malaisie souhaitant protéger leur maison. Ou ses journées passées à boire des bières dans la boutique d'un antiquaire, ancien marin qui lui donna de nombreux contacts pour accéder aux équipages de bateaux circulant entre toutes ces îles et paradis fiscaux stratégiques – Bintan, Batam, Singapour, Kinmen – et qui font transiter meubles, alcool, vêtements entre Malaisie, Indonésie et Singapour.

### Plus que de l'import-export

Revenons au soutien-gorge – un modèle en plastique et silicone, de forme et de couleur assez démodées. Il a été offert à Beatrice Zani à Taïwan par Fujin, une jeune Chinoise qui travaille dans une boutique de lingerie de Taipei, la capitale. Grâce à ce sous-vêtement, Beatrice Zani va retracer bien plus qu'un banal processus d'import-export de biens de consommation ordinaires et bon marché.

Le sous-vêtement a été assemblé et cousu dans une entreprise de Canton, dans le sud de la Chine, par Fujin elle-même. Celle-ci, comme des milliers de ruraux à partir du début des années 1990, a quitté son village pour se vendre comme main-d'œuvre à de grandes multinationales gérées par des hommes d'affaires transnationaux, dont beaucoup sont originaires de Taïwan. Tout le travail de Beatrice Zani va consister à relier les biographies des femmes migrantes aux marchandises qu'elles fabriquent et/ou dont elles font le commerce.

« Ce vêtement avait été construit socialement et émotionnellement par Fujin avant même son processus matériel de fabrication autour d'une chaîne de montage, affirme

la chercheuse. *Symbole d'un statut urbain moderne, ce produit fantaisie préexistait à ses expériences migratoires grâce à son imagination, ses aspirations.* »

### Une communauté de femmes migrantes

C'est par un long travail d'immersion dans le quotidien d'environ 150 jeunes femmes chinoises migrantes comme Fujin que Beatrice Zani a pu décrire le travail de fabrication et documenter les différentes étapes de commercialisation de ce type de produits, mais aussi établir le lien avec la vie émotionnelle des femmes.

En passant du temps dans la boutique de Fujin, elle a rencontré toute une communauté de femmes migrantes. « Fujin m'avait demandé d'être mannequin pour faire la publicité de sa lingerie, raconte Beatrice Zani. Mais, comme le dit le proverbe chinois, "Sous le ciel, il n'y a pas de repas gratuit" ! J'ai donc accepté, tout en lui demandant son aide pour rencontrer d'autres jeunes femmes migrantes. Ces personnes ont pu me raconter leur vie, les épreuves et, souvent, la violence qu'elles avaient subie. En retour, j'ai proposé de leur donner gratuitement des cours d'anglais, le soir, au deuxième étage de la boutique. Je me suis retrouvée avec une classe complète de 30 ou 40 femmes, et j'ai rapidement compris que leur objectif principal n'était pas d'apprendre la langue, mais de tisser un lien social – entre elles, mais aussi avec moi. Petit à petit, elles sont venues avant le cours, pour préparer un dîner que nous partageons toutes ensemble. »

Beatrice Zani se lie avec elles et comprend qu'à travers la production de produits manufacturés comme le soutien-gorge, ces femmes, qui ont quitté la campagne dans un souci d'émancipation, subissent dans les usines et les villes des contraintes telles que leurs conditions de vie deviennent de plus en plus précaires. Elles développent alors de nouvelles aspirations et ambitions pour s'en sortir. À l'occasion de rencontres avec des travailleurs plus qualifiés, nombreuses sont celles qui forment de nouveaux projets migratoires vers la ville mondiale de Taipei, émotionnellement construite comme nouvelle terre d'opportunités.

« J'ai d'abord cru qu'elles accédaient à cette région par le biais du travail, mais mon hypothèse était fautive, explique Beatrice Zani. Le seul moyen pour elles d'obtenir un permis de séjour à Taïwan était (et est toujours) de se marier avec un Taïwanais. » Ce qu'elles font !

ARCHIVES BEATRICE ZANI



► Des migrantes chinoises se retrouvent autour d'un dîner, dans le magasin de lingerie où elles travaillent (2017).

En s'installant à Taïwan, ces femmes vivent donc un déplacement géographique, mais aussi un changement ancré dans une politique rigide d'identité imposée. De migrantes rurales, elles deviennent des « épouses de Taïwan », leurs droits étant fortement liés à ce statut marital. Le mari et la belle-famille assignent le plus souvent la nouvelle venue à des tâches domestiques et reproductives. Pendant deux ans au moins, travailler lui est interdit.

Une fois encore, après avoir cru à une opportunité de progression sociale, elle se retrouve dans une condition de subalternité. C'est là que Beatrice Zani découvre les pratiques et stratégies inventives dont usent ces femmes pour renverser leur condition et retrouver leur autonomie.

### Dans les interstices de la mondialisation

D'objet manufacturé, le soutien-gorge orange est devenu une marchandise qui peut emprunter deux routes. Sur la principale, très encombrée, il attend une autorisation de transit dans un port ou un aéroport, à côté des conteneurs remplis de baskets de marque, d'ordinateurs, de téléphones portables qui seront écoulés dans le monde entier.

Il peut aussi emprunter des routes secondaires discrètes, voire invisibles, ouvertes dans les interstices du capitalisme mondial par ces femmes qui ont investi les applications de communication en ligne, nouveaux espaces où se déroulent les processus de marchandisation et de commercialisation. Elles vont faire traverser au soutien-gorge les frontières physiques et matérielles pour l'inscrire dans le monde dématérialisé du numérique.

Elles peuvent contacter clients et partenaires commerciaux via l'application WeChat (Weixin, en chinois), très populaire et approuvée par les autorités chinoises. Celle-ci a une fonction de géolocalisation, très appréciée, permettant de savoir à quelle distance une femme se trouve d'autres groupes de femmes migrantes chinoises. Et sa fonction « enveloppe rouge » transfère de l'argent en Chine sans que l'administration taïwanaise s'en aperçoive.

Beatrice Zani qualifie de « *petit capitalisme émotionnel translocal* » ce trafic généré à travers les réseaux sociaux, qui deviennent pour elle un autre terrain d'enquête, aussi important que les sites physiques et délimités. « *Ces réseaux ne peuvent être compris uniquement comme des espaces*

*détachés de toute connexion avec la vie réelle, l'expérience et la pratique, explique-t-elle. Les plateformes ont des liens vivants, dynamiques et forts avec les situations et les circonstances dans lesquelles elles sont utilisées.* »

La chercheuse a développé des stratégies pour intégrer ces réseaux et y rester. Elle a pu ainsi participer à des groupes de discussion rassemblant jusqu'à 450 à 500 personnes. Sur certains, les femmes discutaient de leur quotidien, d'autres étant dédiés aux activités économiques et commerciales. Et c'est en partie sur ces réseaux que Beatrice Zani découvre et étudie comment nombre de migrantes créent des activités commerciales de niche en combinant un savoir-faire spécifique à des ressources numériques.

Ces niches entrepreneuriales vont de la cuisine de plats traditionnels de leur région d'origine à l'import-export d'articles à la limite de la légalité (animaux rares, par exemple) entre la Chine et Taïwan.

« *Les plateformes numériques, commente Beatrice Zani, se révèlent être des dispositifs où les fabriques sociales et commerciales se mélangent, où des biographies migratoires et des géographies commerciales se juxtaposent, en créant des liens entre expériences individuelles, réseaux sociaux, stratégies commerciales digitalisées, transactions invisibles et marchandises contestées.* »

### Nouvelles compétences et nouveaux rêves

Grâce à WeChat, ces « sœurs » chinoises (comme elles se nomment sur les réseaux, où se tissent de véritables liens émotionnels) s'entraident, se conseillent, font du business, innovent et, finalement, acquièrent une indépendance économique. Fortes de nouvelles compétences et emplies de nouveaux rêves, elles vont parfois jusqu'à divorcer pour retourner en Chine. Certaines y ouvrent des salons de beauté où elles importent des cosmétiques taïwanais, d'autres s'engagent dans des commerces d'objets divers achetés sur la plateforme en ligne Alibaba, mais aussi de pattes de poulets, de lait en poudre...

Fujin incarne parfaitement ce parcours. Divorcée de son premier mari taïwanais, elle a depuis rencontré, via une application, un homme d'affaires singapourien, avec qui elle vit aujourd'hui. Elle a laissé à ses « sœurs » la gestion du magasin de lingerie, pendant qu'elle-même fait commerce de marchandises chinoises achetées sur des plateformes pratiquant des prix cassés. Sa connaissance des bonnes personnes dans les bons ports, sur les bons bateaux, lui permet d'écouler ces biens et d'en retirer un profit certain.

C'est ainsi, en suivant Fujin, que Beatrice Zani a élargi son sujet de recherche au commerce maritime. « *Les travaux que je conduis aujourd'hui m'amènent à penser qu'on ne peut plus envisager*



### « Le plus important exode rural de l'histoire »

Au début des années 1990, 150 millions de Chinois ont quitté la campagne pour la ville, selon un article publié en 2024 dans le *Journal of Development Economics*<sup>1</sup>. Un flux qui ne s'est pas tari ensuite, soulignent ces travaux : « *En 2020, le Bureau national des statistiques de Chine comptabilisait 286 millions de migrants ruraux, soit 20 % de la population totale du pays* ». Le nombre de migrants internes en Chine est aujourd'hui similaire à celui de l'ensemble des migrants internationaux – tous motifs de migration confondus – dans le monde, selon l'Organisation internationale pour les migrations<sup>2</sup> des Nations unies. Qui relevait déjà en 2016 : « *Ces trente dernières années, la Chine a connu le plus important exode rural de l'histoire* ». Aujourd'hui, près de deux Chinois sur trois vivent en zone urbaine.

1. Voir : [doi.org/10.1016/j.jdeveco.2023.103235](https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2023.103235) 2. Voir : [tinyurl.com/OIM-migration](https://tinyurl.com/OIM-migration)



ARCHIVES BEATRICE ZANI

► Beatrice Zani avec un équipage philippin, sur un bateau de pêche au calamar, dans le port de Kaohsiung, à Taïwan, en 2024.

*La mondialisation comme le symbole d'un capitalisme géré par la haute finance, analyse la chercheuse. Le paradoxe, c'est que ce sont ces mêmes migrants vietnamiens, indonésiens, cambodgiens, exploités sur les navires de pêche et sur les porte-conteneurs qui, s'appuyant sur les infrastructures qu'ils connaissent bien (les ports, les bateaux, les réseaux sociaux) construisent une forme de capitalisme "par le bas". Il n'y a pas de dichotomie entre les deux, ils sont interdépendants, ne peuvent fonctionner l'un sans l'autre. »*

De retour en France pour six mois après un séjour de recherche au Centre de recherche national indonésien, à Jakarta, Beatrice Zani met à profit ce temps pour écrire, mais aussi pour récupérer une dizaine de cartons laissés à Tübingen, donner des nouvelles à toutes ces personnes rencontrées à l'autre bout du monde (« car, sinon, les gens se fâchent »), sans oublier d'acheter des cadeaux pour les uns et les autres : un crucifix pour le capitaine protestant de tel bateau, du saucisson pour un autre, des stylos, des échantillons de parfum...

Se considérant comme citoyenne du monde, apatride, elle prépare son prochain séjour au Centre d'études français sur la Chine contemporaine<sup>3</sup> de Taipei et à l'Institut de recherches sur l'Asie du Sud-Est contemporaine<sup>4</sup>, à Bangkok. Elle travaille également, toujours sur le sujet des mobilités à l'heure du numérique, dans le cadre d'un Partenariat Hubert Curien, avec le géographe Po-yi Hung, à l'université nationale de Taïwan. Et elle réfléchit à son prochain livre. Il pourrait s'intituler *La Vie d'une boîte de thon* et raconter le capitalisme sauvage qui règne dans le commerce maritime... II

1. Chercheuse au Laboratoire interdisciplinaire pour la sociologie économique (Lise, unité CNRS/Cnam). 2. Voir : theses.hal.science/tel-02612789 3. Laboratoire international de recherche CNRS/Min. des Affaires étrangères. 4. Irasec, unité CNRS/Min. des Affaires étrangères.

## En bref

### NOUVEL AVIS DU COMITÉ D'ÉTHIQUE SUR L'EXPÉRIMENTATION ANIMALE

Début février, le Comité d'éthique du CNRS (Comets) a publié un nouvel avis intitulé « Utilisation d'animaux à des fins scientifiques : questions éthiques et recommandations »<sup>1</sup>, concernant l'expérimentation animale en recherche fondamentale.

### LE CNRS PARTICIPE À LA FUTURE LÉGISLATION EUROPÉENNE SUR L'OcéAN

En février, le CNRS a répondu à la consultation de la Commission européenne sur le futur European Ocean Act. Dans la foulée de la troisième Conférence des Nations unies sur l'océan (Unoc-3), en 2025, l'organisme de recherche plaide pour un cadre législatif fondé sur la connaissance scientifique de long terme.

### 72 FEMMES DE SCIENCE SUR LA TOUR EIFFEL

Le 26 janvier, l'association Femmes & Sciences a remis à la maire de Paris un rapport, auquel le CNRS a contribué, proposant l'inscription de 72 femmes scientifiques au premier étage de la tour Eiffel. Six d'entre elles ont directement travaillé au CNRS.

### LE CNRS À L'INDIA AI IMPACT SUMMIT

Le CNRS a participé au sommet indien sur l'intelligence artificielle, les 19 et 20 février, à New Delhi. Antoine Petit, son président-directeur général, y a présenté les outils développés en matière d'IA par l'organisme de recherche français.

### 6 BÉNÉFICIAIRES DE L'ERC PROOF OF CONCEPT AU CNRS

Le 27 janvier, 6 scientifiques du CNRS sur les 12 lauréats français ont décroché l'appel Proof of concept 2025 du Conseil européen de la recherche (ERC). Cet appel s'adresse aux scientifiques qui ont déjà été lauréats d'une bourse ERC (Starting, Consolidator, Advanced ou Synergy) moins d'un an auparavant et qui souhaitent valoriser les résultats de leur recherche, développer leur potentiel d'innovation et se rapprocher d'un marché.

1. Voir : [tinyurl.com/animaux-science](https://tinyurl.com/animaux-science)

# Le CNRS, explorateur de l'Univers

« **À** la croisée des enjeux scientifiques, économiques, militaires et climatiques, l'espace deviendra une infrastructure à la fois invisible et omniprésente » : c'est ce que souligne la nouvelle stratégie spatiale française<sup>1</sup> pour la période 2025-2040. Présentée le 12 novembre dernier, lors de l'inauguration des installations du Commandement de l'espace, à Toulouse, par le Président Emmanuel Macron, cette stratégie fait la part belle à la recherche scientifique et à l'exploration spatiale, à laquelle elle consacre un pilier entier.

« C'est un signal fort qui est envoyé en affirmant que la science doit absolument conserver toute sa place dans l'espace, à un moment où celui-ci devient de plus en plus commercial », affirme Alain Schuhl, directeur général délégué à la science du CNRS. L'organisme a tout son rôle à jouer au sein de cette stratégie, lui qui, de par son expertise fondamentale, « explore les frontières de l'Univers pour comprendre », « défend et développe le patrimoine commun », tout en « anticipant les ruptures technologiques ».

L'un des objectifs stratégiques mentionnés dans le pilier dédié à la recherche scientifique est de poursuivre une politique ambitieuse en sciences de l'Univers, en consolidant les partenariats internationaux, en soutenant les filières instrumentales d'excellence et en mobilisant la recherche nationale pour préparer les grandes missions de demain.

« Les axes de recherche détaillés dans cette stratégie sont parfaitement alignés avec les thématiques que nous avons identifiées comme étant prioritaires dans le cadre des travaux de prospective menés par le comité des programmes scientifiques du Centre national d'études spatiales (Cnes) », observe Nabila Aghanim, directrice de recherche CNRS à l'Institut d'astrophysique spatiale (IAS)<sup>2</sup>, à Orsay.

« Il s'agit notamment de mieux comprendre l'origine de l'Univers et les lois fondamentales qui le régissent, mais aussi la formation, l'évolution et l'habitabilité des systèmes exoplanétaires et solaire, précise la chercheuse, par ailleurs

**ESPACE** La stratégie spatiale française pour 2025-2040 réaffirme le choix de faire de la recherche un pilier à part entière de la souveraineté spatiale. Le CNRS s'y inscrit avec trois objectifs : comprendre la Terre et l'Univers, anticiper les ruptures technologiques et préserver l'espace comme patrimoine commun.

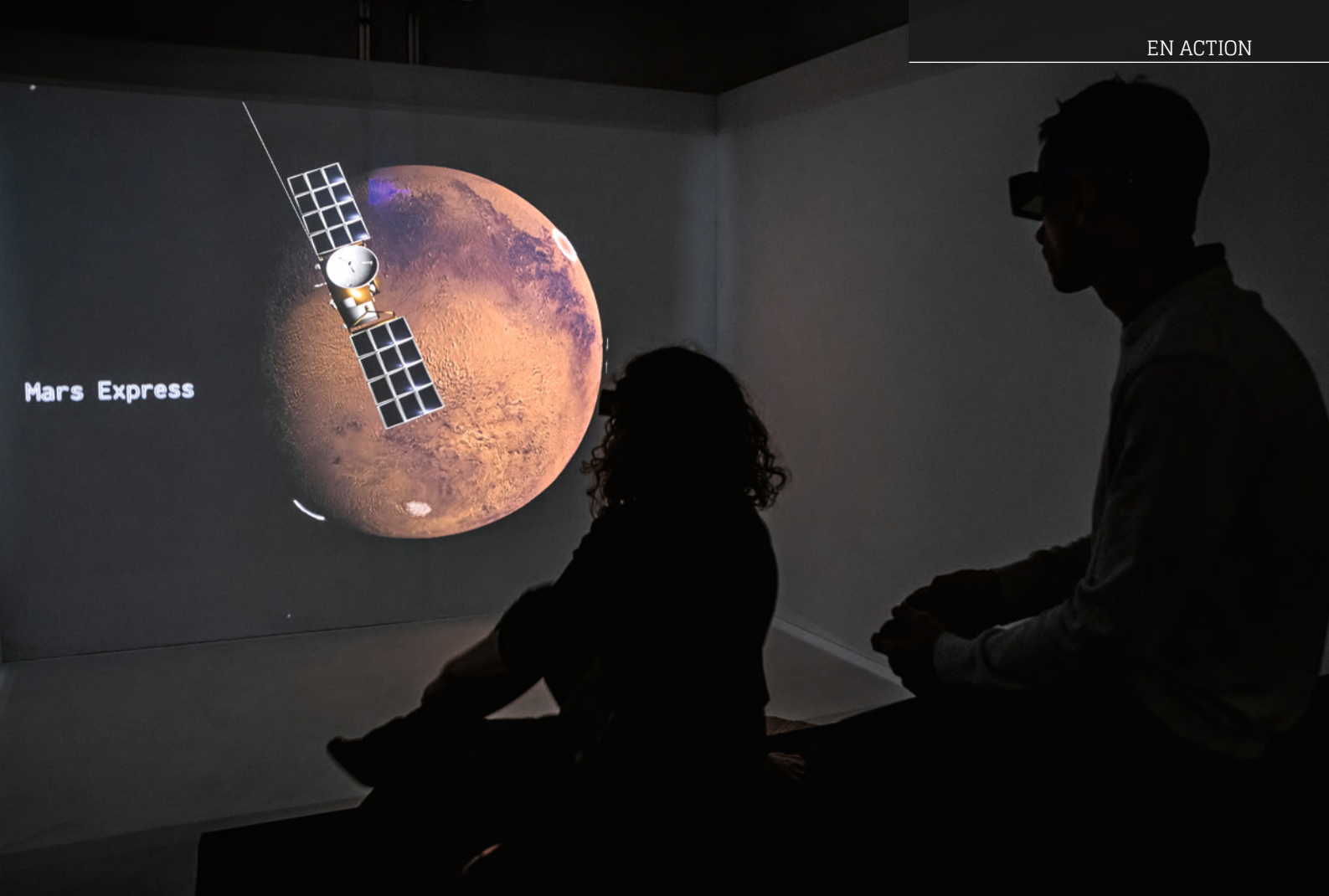
PAR THOMAS ALLARD

présidente du comité d'évaluation sur la recherche et l'exploration spatiale du Cnes. *L'étude des processus qui régissent le vivant et la matière dans l'espace est également une priorité. Nous chercherons notamment à identifier quelles sont les origines des perturbations de la matière qui donnent naissance aux galaxies et, à l'intérieur de ces galaxies, comment le cycle de vie de la matière chaude (qui est chauffée par les trous noirs supermassifs) interagit avec le cycle de vie de la matière froide qui, elle, se condense, et forme les planètes et les étoiles.* »

## Des mystères persistants

Du côté du CNRS, « la vie dans l'Univers est également l'un des six nouveaux défis transverses définis en avril dernier par l'organisme dans son Contrat d'objectif, de moyens et de performance<sup>3</sup> », note Marc Ollivier, directeur de l'IAS et chargé de mission Spatial au CNRS.

L'objectif est de structurer les communautés de recherche autour de cet enjeu stratégique. En effet, notre Univers recèle encore bien des mystères, confie Nabila Aghanim. Un exemple ? « Il existe une différenciation entre les planètes telluriques et les planètes géantes [gazeuses, Ndlr] que l'on ne comprend pas encore. C'est pourtant un élément déterminant pour découvrir comment notre Système solaire s'est formé, mais aussi comment les autres systèmes planétaires se sont constitués. »



► Visualisation 3D immersive de données d'imagerie de Mars. Lancée en 2003, la sonde Mars Express, de l'Agence spatiale européenne (Esa), embarquait notamment un spectromètre conçu au CNRS.

« L'exploration in situ des planètes devra aussi se poursuivre, en allant au-delà de Mars, complète Marc Ollivier. À l'horizon 2040-2050, nous projetons d'effectuer des analyses sur les satellites de Jupiter et de Saturne. »

#### Une instrumentation de pointe

Pour mener à bien ces explorations, il est nécessaire de pouvoir s'appuyer sur des instruments de pointe, qui soient en outre capables d'opérer dans les situations les plus extrêmes. Nabila Aghanim l'affirme : « L'innovation technologique est la colonne vertébrale de l'exploration spatiale. Par exemple, certains détecteurs doivent pouvoir être refroidis à des températures proches du zéro absolu afin d'être opérationnels. »

*Plusieurs outils développés par des équipes de recherche françaises équipent les rovers martiens Curiosity et Perseverance.*

Ces outils technologiques sont principalement conçus au sein des laboratoires de recherche, selon une philosophie « *techno push* » qui permet de bénéficier d'instruments à la pointe en termes de performances, note Marc Ollivier : « Il est nécessaire de développer des instruments adaptés, qui peuvent être embarqués à bord de rovers ou de sondes, et qui vont parfois prélever des échantillons afin de les ramener sur la Terre pour analyse au sein de nos laboratoires ».

Le savoir-faire tricolore en matière de conception d'instruments irrigue le tissu socio-économique du spatial en France... et s'exporte jusque sur Mars. Dans le cadre des missions d'exploration menées par la Nasa, plusieurs outils développés par des équipes de recherche françaises équipent ainsi les rovers martiens *Curiosity* et *Perseverance*.

Ce dernier s'est posé sur la Planète rouge en février 2021. Il est doté d'un ensemble instrumental nommé SuperCam, capable d'analyser la composition chimique des roches martiennes. Cet outil de pointe est né d'une étroite collaboration entre le Laboratoire national de Los Alamos (États-Unis) et l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie<sup>4</sup> de Toulouse, avec la contribution de l'université de Valladolid (Espagne).



► Répétition générale de la mise en orbite du satellite SWOT, au Centre spatial de Toulouse, en octobre 2022.

L'espace est également un lieu d'observation unique pour mieux connaître notre planète. L'un des points clés de la nouvelle stratégie spatiale nationale sera donc de renforcer la contribution de notre pays dans l'étude des sciences de la Terre depuis l'espace. « *Le CNRS y participe activement, relève Marc Ollivier, avec la production et l'exploitation de données issues notamment des mesures obtenues par satellite.* »

« *Ces observations réalisées depuis l'espace permettent d'avoir une vision vraiment globale de l'évolution des systèmes terrestres, et sur de longues échelles de temps, se réjouit Jean-François Cretaux, chercheur au Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales<sup>5</sup>, à Toulouse. Grâce aux mesures effectuées par les satellites, nous pouvons par exemple répertorier les variations de masse des grands glaciers sur la Terre, mesurer les niveaux d'eau sur les lacs et les rivières, ou encore mieux identifier et caractériser les différents courants océaniques.* »

L'une des missions les plus importantes dans ce domaine a démarré en décembre 2022, avec le lancement du satellite SWOT (pour Surface Water and Ocean Topography). Cette mission, issue d'un partenariat entre le Cnes

et la Nasa, apporte de nombreuses informations inédites sur les eaux de surface et sur leur dynamique.

« *Ce satellite est doté d'une nouvelle technologie basée sur l'interférométrie qui permet d'avoir une vision très fine et globale de la topographie des océans et des eaux de surface continentales* », confirme Jean-François Cretaux, qui était également jusqu'à la fin de 2024 directeur du volet hydrologique de la mission SWOT.

« *Les modèles développés au sein de nos laboratoires ne servent pas uniquement à améliorer les connaissances scientifiques, détaille Marc Ollivier. Ils doivent aussi guider les décisions politiques dans le cadre de la lutte contre le changement climatique, en préparant et en anticipant notamment d'éventuels changements brutaux. Il y a donc un immense enjeu sociétal derrière ces observations.* »

### Une réglementation à adapter

En parallèle, cette nouvelle stratégie spatiale française insiste sur la nécessité de renforcer nos collaborations avec les autres pays européens<sup>6</sup>. Les ministres en charge de l'espace des 23 pays membres de l'Agence spatiale européenne (Esa) se sont réunis en Allemagne les 26 et 27 novembre 2025, afin d'acter une augmentation significative des budgets consacrés aux programmes de recherche spatiale européens.

Mais, pour permettre à la recherche scientifique de garder toute sa place dans l'espace, il est nécessaire d'adapter la réglementation, signale Marc Ollivier : « *Afin que ce milieu ne se retrouve pas saturé, notamment par les constellations de satellites, il faut définir un certain nombre de règles quant à la manière d'utiliser les orbites et de les libérer lorsque les missions sont terminées. Le CNRS intervient aussi dans la réflexion pour la mise en place des premiers textes européens sur le sujet dans le cadre du Space Act, le nouveau règlement chargé d'encadrer les activités spatiales dans l'UE.* » Au moment où l'espace suscite plus que jamais l'appétit des milieux économiques, les scientifiques doivent s'assurer de pouvoir y garder une place de choix. II

« *Le satellite SWOT permet d'avoir une vision très fine et globale de la topographie des océans et des eaux de surface continentales.* »

1. Voir : [tinyurl.com/strat-spatiale](https://tinyurl.com/strat-spatiale) 2. Unité CNRS/Univ. Paris-Saclay. 3. Voir : [tinyurl.com/cnrs-comp](https://tinyurl.com/cnrs-comp) 4. Irap, unité CNRS/Cnes/Univ. de Toulouse. 5. Legos, unité CNRS/Cnes/IRD/Univ. de Toulouse. 6. Voir : [tinyurl.com/UE-CNRS](https://tinyurl.com/UE-CNRS)



## LES IDÉES

*« Même s'ils peuvent parfois constituer un facteur de risque qui s'ajoute à d'autres, les jeux vidéo ne sont pas une cause majeure de la criminalité et de la violence. »*

# Dans la forge des mots nouveaux

**Quand un nouveau mot est-il publié au Journal officiel ?**

**François Ravetta**<sup>1</sup> Il y a constamment de nouveaux mots qui sont créés et qui apparaissent sur Internet ou dans des langues étrangères. C'est en particulier vrai dans les domaines de la technologie et des sciences. D'ailleurs, certains nouveaux mots sont repris dans le vocabulaire scientifique avant même de paraître au Journal officiel<sup>2</sup>.

Les listes de nouveaux mots sont d'abord soumises par des collègues d'experts à la Commission d'enrichissement de la langue française, dont je fais partie. C'est elle qui choisit les mots qui seront publiés au Journal officiel. Elle intervient au moment de retenir tel ou tel mot inscrit sur ces listes. Même si beaucoup de membres de la Commission sont compétents dans des domaines comme les langues, les sciences, ou encore les technologies, notre rôle n'est pas d'apporter un regard expert sur les mots soumis à notre appréciation. Je nous vois plutôt comme des « candides », car nous sommes là pour représenter la société civile, débattre avec les experts, nous interroger sur la pertinence de la traduction d'un mot et sur son usage.

Une fois un nouveau mot publié au Journal officiel, son usage devient obligatoire dans les administrations et les établissements de l'État. Cette traduction est parfois indispensable afin que les professionnels puissent communiquer dans leur langue natale de façon précise. Elle est aussi utile pour les traducteurs afin qu'ils

traduisent correctement en français les textes techniques, et pour que les citoyens s'approprient ces réalités dans leur langue.

**À quels défis vous heurtez-vous dans ce travail de traduction ?**

**F. R.** Aujourd'hui, la majorité des nouveaux mots soumis à notre commission proviennent de l'anglais. Un des enjeux, avec les termes en anglais, est de concilier la concision de la langue et la justesse de la traduction.

La question s'est récemment posée pour « *fake news* ». La traduction littérale pencherait pour le mot « fausse nouvelle ». Problème, ce terme implique seulement qu'une information est fautive, mais pas qu'elle a été détournée à une autre fin. Or une *fake news* est une publication conçue pour tromper le lecteur. Elle imite la structure d'un article de presse, et comporte à la fois des renseignements erronés et des renseignements véridiques dans le but de biaiser le débat public.

En fin de compte, nous avons retenu le terme « *infox* » pour la traduction française de « *fake news* », et « information fallacieuse » comme



© CIRIL FRESILLON / CNRS IMAGES

SOCIÉTÉS

**TERMINOLOGIE** Planète vagabonde, gaz à effet de serre, base de données, infox, IA générative...

Le Journal officiel publie des listes de nouveaux termes, notamment scientifiques, avec leur définition. François Ravetta dévoile les secrets de leur sélection.

PROPOS RECUEILLIS PAR SOPHIE FÉLIX • ILLUSTRATION DE FRÉDÉRIC DELIGNE

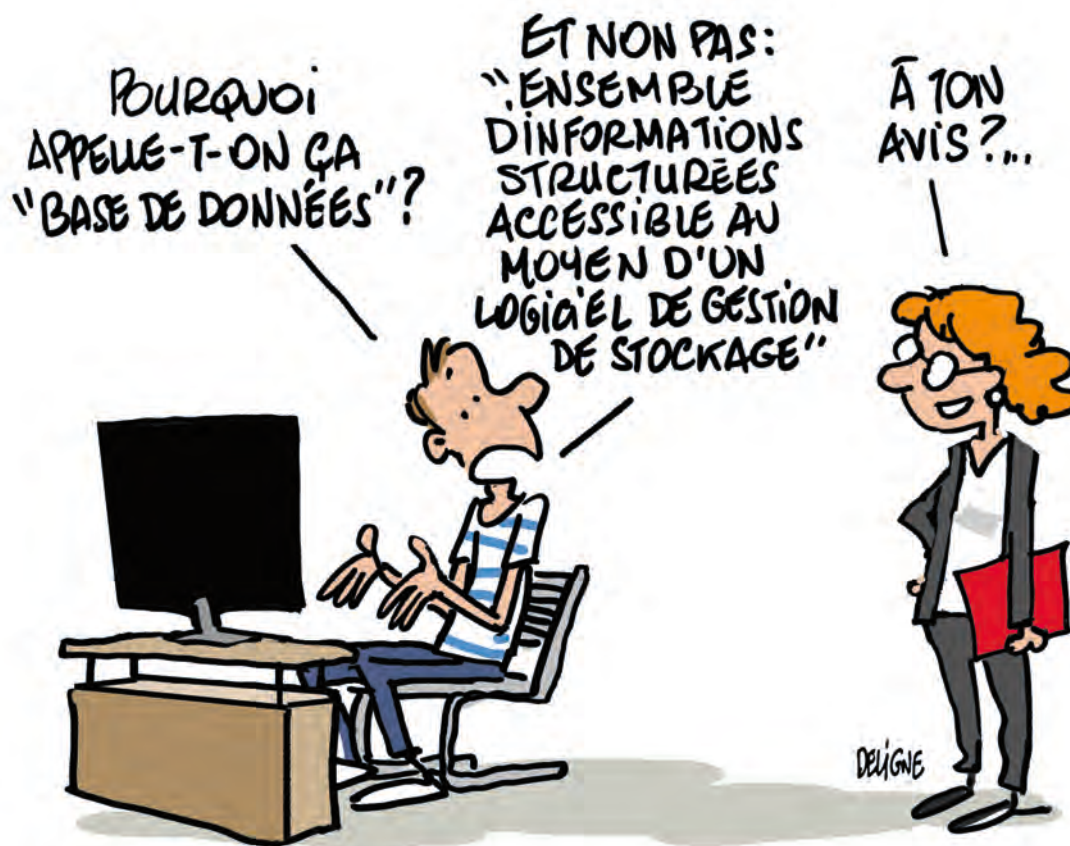
synonyme. « Fallacieux » est d'un usage soutenu, il risquait de n'être utilisé que par une partie de la société civile. Le terme « *infox* » est plus court et plus percutant. Il entre aussi en résonance avec « *intox* », qui existe déjà en français.

Autre exemple avec le terme anglais « *token* ». Les informaticiens aiment bien utiliser ce terme qui désigne une suite de lettres et de chiffres créée par un ordinateur, et qui permet d'authentifier un utilisateur ou une machine sans transmettre de mot de passe. Ce terme peut paraître a priori compliqué pour un novice. Alors qu'il suffit de donner son équivalent en français, à savoir « *jeton* », pour le démythifier pour un non-anglophone. Un jeton, dans un jeu, agit en effet comme un objet symbolique qui donne un droit d'accès ou une valeur d'usage. Nous ne nous rendons pas compte que nous compliquons certains concepts par manque de traduction.

**Selon quels critères choisissez-vous une traduction ou une autre ?**

**F. R.** En amont, tout un travail est réalisé. Les mots sont d'abord sélectionnés par un groupe d'experts spécialistes dans leur discipline, qui les soumettent à la Commission.

1. Membre de la Commission d'enrichissement de la langue française et chercheur au Laboratoire atmosphères et observations spatiales (Latmos, unité CNRS/Sorbonne Univ./Univ. Versailles Saint-Quentin). 2. Voir : [tinyurl.com/fr-terme](http://tinyurl.com/fr-terme)



Trouver la bonne traduction pour un mot, c'est souvent tenter de trouver le juste équilibre entre l'exactitude scientifique, l'usage commun et les règles grammaticales. Un terme sur lequel nous avons beaucoup débattu est « Mpox », qui désigne la variole du singe. L'Organisation mondiale de la santé préconise l'usage de « Mpox » (pour « *Monkey pox* »), mais nous souhaitons éviter le caractère stigmatisant du terme « variole du singe », par ailleurs scientifiquement mal étayé. Nous avons finalement proposé la traduction « variole de type 2 », qui nous semblait moins discriminante.

« Il faut que le concept utilisé par le chercheur existe dans sa langue natale, même s'il est issu d'une langue étrangère. »

**Quels sont les principaux enjeux actuels auxquels est confronté le vocabulaire scientifique ?**

**F. R.** Il y a tout un enjeu de corpus scientifique à constituer dans toutes les langues. La constitution de ce corpus se pose de plus en plus à l'heure de l'intelligence artificielle, car cette technologie a tendance à reprendre les mots issus de l'anglais.

Si nous ne faisons pas cet effort de traduction, nous tirons vers un monolinguisme en sciences. Or le plurilinguisme est indispensable à la richesse de la connaissance. Il faut comprendre qu'une langue véhicule avec elle une façon de concevoir le monde, ce qui rend d'autant plus essentiel cet effort de traduction.

En général, un chercheur fera preuve d'une plus grande finesse d'analyse en maniant des concepts dans sa langue natale. Il faut donc que le concept qu'il utilise et qu'il introduit dans sa pensée existe dans sa langue natale, quand bien même ce concept serait issu d'une langue étrangère.

À TON AVIS?...



DELIGNE

C'est particulièrement vrai pour les disciplines des sciences humaines et sociales, pour lesquelles il est souvent indispensable de travailler dans la langue du pays – lors d'entretiens avec la population, par exemple. Dans les sciences de la nature, les chercheurs peuvent aussi perdre en précision, voire utiliser un jargon pour des raisons de facilité, avec le risque de se couper du grand public.

D'une manière générale et pour le bénéfice du plus grand nombre, les résultats de ces travaux de recherche doivent être accessibles et compréhensibles en français afin de favoriser la dissémination des connaissances scientifiques. ||

**+**  
**À savoir**

Tout citoyen peut soumettre un nouveau mot à traduire à la Commission d'enrichissement de la langue française *via* la boîte à idées du site France Terme : [www.culture.fr/franceterme](http://www.culture.fr/franceterme)



# Les jeux vidéo violents rendent-ils violents ?

En préparation depuis des années, *Grand Theft Auto (GTA) VI* apparaît comme l'un des jeux vidéo les plus attendus de l'histoire. Comment expliquer cet attrait pour une saga outrageusement violente et amoral ?

**Laurent Bègue-Shankland**<sup>1</sup> La violence représente une composante clé du loisir populaire. Au cinéma, sur 800 superproductions sorties ces 50 dernières années, 89 % contiennent de la violence, en constante augmentation. La majorité des jeux vidéo à succès en comportent tout autant.

Au demeurant, la plupart des jeux vidéo à contenu agressif contiennent bien d'autres choses que des actes violents. Selon des comptages



NUMÉRIQUE

**PSYCHOLOGIE** Alors que la sortie de *Grand Theft Auto VI* est attendue comme un événement planétaire, Laurent Bègue-Shankland interroge les effets des jeux vidéo à contenu agressif sur le comportement des joueurs.

PROPOS RECUEILLIS PAR MAXIME LEROLLE

systematiques chez des joueurs expérimentés qui pratiquent un jeu de tir en vue subjective pendant 50 minutes, les actions violentes (par exemple, abattre quelqu'un avec une arme à feu) ne constituent que 15 % des événements et n'occupent que 7 % du temps total de jeu.

Les jeux vidéo violents activent certaines émotions fortes et procurent un sentiment de maîtrise, souvent dans le cadre d'un collectif. Une étude menée aux États-Unis montrait que

lorsque l'option « sang » (qui permet de voir couler l'hémoglobine quand des ennemis sont abattus) était enclenchée dans le jeu *Mortal Kombat*, la pression sanguine du joueur augmentait – ce qui indique une intensification de l'éveil physiologique.

D'autres travaux ont montré que l'amygdale (structure cérébrale impliquée dans le décodage des stimuli menaçants) est mobilisée lors de séquences virtuelles violentes. Dans notre laboratoire, nous avons montré

1. Professeur à l'Université Grenoble Alpes et directeur de la Maison des sciences humaines-Alpes (unité CNRS/Univ. Grenoble Alpes). 2. Voir : doi.org/10.1126/science.1250830

## « Selon les études, la pratique de jeux vidéo violents entraîne une augmentation des pensées, des émotions et des conduites hostiles. »

► Une jeune femme joue à *Mortal Kombat II*, jeu réputé pour sa violence.

également une élévation du stress des joueurs, évaluée au moyen de mesures cardiaques.

En bref, nous aimons être stimulés, au moins jusqu'à un certain point, tandis que l'atonie nous repousse. Ce besoin de stimulation a donné lieu à une recherche étonnante publiée par Timothy Wilson<sup>2</sup> en 2014. Ce chercheur a réalisé plusieurs études qui démontraient que la majorité des hommes et un quart des femmes préféreraient s'auto-administrer des chocs électriques plutôt qu'attendre dans une salle sans rien faire !

### Chaque sortie d'un jeu vidéo violent s'accompagne de critiques l'accusant de favoriser les comportements agressifs. Qu'en disent les études scientifiques ?

**L. B.-S.** Il existe une littérature scientifique depuis une vingtaine d'années qui révèle toute une gamme d'effets des jeux vidéo violents sur le comportement agressif, les réactions hostiles, ou encore la réduction de l'empathie.

À l'université de Grenoble, nous avons mené une série de recherches sur ce sujet. La première phase de l'étude durait trois jours consécutifs : 70 adultes des deux sexes étaient affectés aléatoirement à des jeux violents ou d'action aux niveaux de difficulté et d'excitation comparables pendant 20 minutes par jour. Après chaque session de jeu, les participants réalisaient une tâche ayant pour but de mesurer leurs imputations hostiles. Ils lisaient une histoire dont la fin était indéterminée. Par exemple : « Un conducteur emboutit l'arrière d'un autre conducteur, endommageant les deux véhicules. Après avoir constaté l'ampleur des dégâts, le personnage principal s'approche de l'autre conducteur... ». Ils devaient indiquer ce qui se passait ensuite, ce que disait, pensait et

ressentait le protagoniste. Puis on codait le gradient de violence contenu dans les réponses écrites.

Dans une autre étape, les sujets prenaient part à une compétition, avec pour consigne de répondre plus vite qu'un adversaire lorsqu'un signal visuel apparaissait à l'écran. Quand ils gagnaient, un choc sonore dont ils déterminaient l'intensité (de 60 à 105 décibels) et la durée (de 0 à 5 secondes) était censé être administré à une autre personne assise devant un écran dans la pièce adjacente, selon un protocole classique de mesure d'agression.

Les résultats ont montré une augmentation du gradient d'attributions hostiles en première phase, et une élévation du niveau et de la durée des chocs sonores administrés ensuite à leurs adversaires, alors que ces paramètres restaient stables dans le groupe témoin. En outre, plus les

attentes hostiles augmentaient, et plus les conduites agressives étaient importantes.

Plus généralement, une vaste méta-analyse incluant 130 000 participants a montré que la pratique de jeux vidéo violents entraînait une augmentation des pensées, des émotions et des conduites hostiles, une diminution des conduites coopératives et une élévation de l'éveil physiologique.

### Des défenseurs des jeux vidéo à contenu agressif arguent que leur violence aurait une fonction cathartique, prévenant des comportements interdits et réprimés au quotidien en les exauçant à travers les écrans.

**L. B.-S.** Si c'était le cas, les jeux vidéo devraient diminuer les conduites agressives. Or c'est exactement l'inverse qui se produit.

► Nouveauté de *Grand Theft Auto VI* : il sera possible de jouer un personnage féminin, Lucia.



© ROCKSTAR GAMES

Prenez cette étude : des enfants de 8 ans jouaient pendant 20 minutes à un jeu vidéo de combat, tandis que d'autres s'amusaient à un jeu non violent, une course de motos. On les conduisait ensuite dans une salle de jeu où ils étaient filmés à leur insu pendant un quart d'heure en train d'interagir avec d'autres enfants. Des observateurs extérieurs estimaient divers aspects de leurs comportements, comptabilisant les gestes tels que taper, secouer, donner un coup de pied, pincer, etc. Les résultats ont révélé que les enfants ayant joué au jeu de combat commettaient deux fois plus d'actes agressifs que ceux qui avaient joué à la course de motos.

Une autre étude a consisté à interroger 430 enfants âgés de 9 à 11 ans ainsi que leurs camarades et leurs professeurs, deux fois à un an d'intervalle. Elle a confirmé que ceux qui jouaient davantage à des jeux vidéo violents lors du premier test attribuaient, un an plus tard, plus d'hostilité aux autres personnes qu'ils rencontraient, se montraient plus agressifs verbalement et physiquement, et étaient moins enclins à l'altruisme. Au total, plus de 8,5 % des actes violents mesurés après un an étaient expliqués par la pratique de jeux vidéo violents au cours de l'année.

**Dans quelle mesure cette augmentation de l'agressivité individuelle se manifeste-t-elle dans la société ?**

**L. B.-S.** On ne sait pas qui sera influencé de manière indésirable par un jeu vidéo violent, mais, si l'on fait une moyenne, on constate qu'un groupe de personnes ayant joué à un jeu violent augmente ses risques



© ROCHAIN GAILLARD / REA

► Un enfant de 8 ans joue à *Fortnite*, célèbre jeu de tir en ligne.

par rapport à un groupe ayant joué à un jeu qui ne comporte pas de contenus violents.

Pour autant, les effets observés restent modestes. L'influence indésirable la plus courante s'observera par un comportement perturbateur en classe, une réaction épidermique face à un autre élève qui vous titille entre deux cours, ou un coup de klaxon hostile en voiture. On ne peut donc pas attribuer des cas de violences graves, voire d'homicides, au seul fait d'avoir joué à un jeu vidéo violent ! Même s'ils peuvent parfois constituer un facteur de risque qui s'ajoute à d'autres, les jeux vidéo ne sont pas une cause majeure de la criminalité et de la violence.

**Pourquoi cette focalisation sur la violence dans les jeux vidéo et pas sur celle des films ou des séries télévisées ?**

**L. B.-S.** Avant les jeux vidéo, la recherche s'est aussi beaucoup intéressée à la télévision. Une synthèse de plus de 280 études impliquant plus de 51 000 participants va dans le sens d'un effet sur la violence. Il y a clairement une accoutumance à la violence dans nos sociétés.

Mais, selon les spécialistes du comportement agressif, l'effet des jeux vidéo violents serait encore plus important. L'identification à l'agresseur y sera plus forte, dans la mesure où le joueur contrôle ses actions et s'y implique intensément. Si l'on se fonde sur les principes de l'apprentissage (l'implication active de l'individu produit plus d'impact qu'une simple

observation), simuler la violence aura plus d'impact que regarder un film violent ou lire un texte violent.

Lorsqu'on a comparé le niveau d'agressivité des personnes qui jouaient à un jeu vidéo violent avec celui de personnes qui se contentaient de regarder l'écran d'une personne en train de jouer, on s'est aperçu que le niveau de conduite agressive des joueurs était supérieur à celui des témoins.

**Pour la première fois de l'histoire de la franchise, on pourra jouer un personnage féminin dans *GTA VI*. Cela changera-t-il quoi que ce soit aux représentations de la violence ?**

**L. B.-S.** Les femmes constituent de nos jours la moitié des adeptes des jeux vidéo. Il est logique que l'éditeur cherche à les inclure dans ce titre phare. Selon une enquête menée au Royaume-Uni en 2023, 44 % des joueuses avaient déjà pratiqué *GTA*, contre 72 % des joueurs. L'identification au personnage étant un élément clé du potentiel immersif d'un jeu vidéo, il serait surprenant que l'éditeur ne fasse pas évoluer son offre.

Il est toutefois improbable que l'introduction de femmes dans *GTA* reflète une volonté de lutter contre le sexisme. L'arrivée du personnage de Lucia dans le nouvel opus ne change rien aux codes habituels de la série : personnages hypersexualisés et misogynie latente seront bien au rendez-vous. ||

« On ne peut pas attribuer des cas de violences graves au seul fait d'avoir joué à un jeu vidéo violent. »

# À lire à voir



## Correspondances assyriennes

Un lot de tablettes cunéiformes découvert sur le site de Kültepe (Turquie) a livré la plus ancienne correspondance privée connue à ce jour – entre les épouses de marchands assyriens venus de l'actuel Irak et leurs maris. À travers ces textes, l'assyriologue et directrice de recherche au CNRS Cécile Michel trace le portrait sensible de 20 femmes, dont le rôle dépassait de loin la gestion de la maisonnée, puisqu'elles étaient aussi productrices d'étoffe et redoutables femmes d'affaires. Une plongée dans l'intimité d'il y a 4 000 ans.

**Quand les femmes écrivaient l'histoire**, Cécile Michel, éd. Seuil, 400 p., 25 €, mars 2026.



## Painlevé, le biologiste cinéaste

Entre science, art et poésie, l'exposition « Jean Painlevé, les pieds dans l'eau » met en lumière une partie de l'œuvre photographique de ce biologiste de la faune sous-marine et cinéaste mondialement connu. Méduses aux pieds et caméra à l'épaule sur le littoral breton, gros plan sur un hippocampe ou sur une queue de crevette... Les clichés de Jean Painlevé s'inscrivent pleinement dans le surréalisme du début du xx<sup>e</sup> siècle, mais, surtout, révèlent la beauté des formes naturelles, qu'elles soient simples ou complexes.

« Jean Painlevé, les pieds dans l'eau », au musée de Pont-Aven (Finistère), jusqu'au 31 mai 2026.



## Fascinants astéroïdes

Les nombreux cratères encore visibles à la surface de la Terre en témoignent : le Système solaire abrite aussi une kyrielle de corps célestes, parfois destructeurs, tel l'astéroïde ayant mis fin à l'ère des dinosaures, mais aussi fascinants, telle la comète de Halley. Ce livre nous plonge dans l'intimité de ces « habitants » de notre système planétaire. Que ce soit leur chimie, leurs origines, ou encore leur morphologie, tout y est. L'ouvrage montre surtout à quel point leur étude « nous éclaire sur la formation du Système solaire et sur les ingrédients qui ont pu favoriser l'apparition de la vie », rappelle l'astrophysicienne Morgane Fortin dans sa préface.

**Comètes, astéroïdes, météorites – Ces poussières cosmiques qui ont façonné la Terre**, éd. Glénat, 226 p., 36 €, mars 2026.



## Une odyssée biologique

Quatre graines de pissenlit, fuyant une Terre réduite en cendres, s'envolent à travers l'espace interstellaire pour gagner un nouveau foyer où s'enraciner et fleurir. Là, sur une planète hostile, elles devront braver blob envahisseur, mante prédatrice et rainette géante... *Planètes* est un film hybride, mêlant documentaire et science-fiction, images animées et prises de vue réelles, fable écologique et... CNRS ! Sa réalisatrice, Momoko Seto, y est ingénieure de recherche, et l'organisme a coproduit le long-métrage.

*Planètes*, de Momoko Seto, en salles depuis le 11 mars 2026.



## Des animaux et des hommes

Dans cet essai, l'éthologue Cédric Sueur remonte aux racines de notre rapport de domination des animaux et nous propose une révolution du regard – pour décoloniser notre manière de penser le vivant. Et si celui-ci ne se laissait pas réduire à l'utilité qu'on lui attribue ? Décoloniser les animaux, c'est apprendre à les voir autrement – non plus comme des objets d'usage, mais en tant que partenaires de monde. C'est aussi reconnaître la conscience, la mémoire, la joie et la souffrance de celles et ceux avec qui nous partageons la Terre.

**Décoloniser notre rapport aux animaux – Comment penser notre relation aux êtres vivants**, Cédric Sueur, éd. Odile Jacob, 288 p., 23,90 €, février 2026.



de Denis Guthleben,  
directeur du Musée Curie

# Il y a 60 ans, les laboratoires associés

“ Dans le riche parcours du CNRS, 1966 est une date qui compte. Il a inauguré cette année-là ses « laboratoires associés », gérés en partenariat avec d'autres établissements. Ce dispositif, qui a ensuite évolué jusqu'à donner naissance, au tournant des années 1990 et 2000, à nos unités mixtes de recherche (UMR), répondait à un contexte et à des ambitions qui valent qu'on s'y arrête aujourd'hui encore...

## Le CNRS et l'Université

Les laboratoires associés n'ont pas vu le jour sur une terre en friche. Dès sa création, en 1939, le CNRS a affecté spontanément des chercheuses, des chercheurs, du personnel technique et administratif, ainsi que des ressources budgétaires et instrumentales aux laboratoires d'autres établissements. Il a aussi ouvert grand les portes de ses laboratoires propres, notamment aux universitaires, qui composaient dans certains cas la majorité de leurs membres.

La création des laboratoires associés a répondu à un souci de formalisation, ainsi qu'à un contexte. D'une part, le CNRS connaissait alors une période faste. Son budget, après avoir doublé entre 1958 et 1960, a enregistré une croissance annuelle moyenne de 20 % jusqu'en 1969, et ses effectifs sont passés dans le même temps de moins de 5 000 à plus de 17 000 personnes.

D'autre part, les universités étaient face au défi crucial de l'assimilation d'une vague inédite d'étudiantes et d'étudiants (215 000 en 1960, contre plus de 500 000 en 1968) qui aurait pu engloutir toutes leurs aspirations

à nourrir des activités de recherche ambitieuses. Elles avaient, en somme, plus que jamais besoin du CNRS, qui a conçu en retour ses laboratoires associés.

## LA-1, LA-2, etc.

Le dispositif n'est pas tombé du ciel. Pendant plusieurs années, il a été réfléchi autour du directeur général du CNRS, Pierre Jacquinot, en lien avec les responsables de plusieurs laboratoires. Il a également soulevé des débats. Lors de son examen initial par le directoire du CNRS, en avril 1964, il a suscité des craintes croisées. Le CNRS n'allait-il pas dicter leurs programmes scientifiques aux universités ? Ces dernières ne risquaient-elles pas d'abuser des largesses du CNRS en baissant leurs propres dotations aux laboratoires associés ? Un cadre a toutefois fini par être posé : le CNRS devait se rapprocher des structures à la pointe de la recherche, afin de leur offrir des moyens supplémentaires et d'encourager leur essor et leur rayonnement.

Dans un témoignage *a posteriori*, Pierre Jacquinot a expliqué cette décision : « *Là où se fait de la bonne recherche, le Centre intervient pour aider* » – cette « *bonne recherche* » étant à ses yeux celle « *qui produit des publications, qui suscite des invitations dans des congrès, qui bénéficie d'une reconnaissance internationale* »...

Ces critères ont mené à ne retenir, sur plus de 200 candidatures à l'association dès 1966, que 60 laboratoires, en commençant par l'Institut de recherche mathématique avancée de Strasbourg (LA-1) et le Laboratoire de physique des solides d'Orsay (LA-2). Mais, très vite, face à l'afflux des demandes, le dispositif s'est dilaté. Il y avait déjà 127 laboratoires associés en 1968, plus de 200 deux ans plus tard, et près d'un millier à la fin des années 1970.

C'est qu'au-delà de tout critère apparemment rationnel, la recherche emprunte souvent des chemins singuliers. Ils ont été évoqués avec une louable simplicité dans une note de juillet 1962, qui a amorcé la réflexion sur les laboratoires associés : « *Il est difficile à une date donnée d'affirmer que tel ou tel secteur ne conduira à rien* », car il existe dans des « *petits laboratoires* » des travaux dont seule « *l'expérience prouve parfois la fécondité* », et il reste donc « *sage d'arroser tout le jardin* ». On se gardera de trancher ici la question que soulève cette métaphore horticole. L'Histoire n'a de toute manière pas vocation à fournir des solutions toutes faites aux réflexions qui nous animent. Au moins nous rappelle-t-elle que nous sommes rarement les premiers et les premiers à les initier. ||

« *Le CNRS n'allait-il pas dicter leurs programmes scientifiques aux universités ? Ces dernières ne risquaient-elles pas d'abuser des largesses du CNRS ?* »

FONDATION

cnrs

**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)

# CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS

#19 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)