





La banque coopérative  
de la Fonction publique

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

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

*Jenny, Enseignante chercheuse*



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



Retrouvez-nous chez



**Rédaction :**

3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16

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

Antoine Petit

**Directeur de la rédaction :**

Jérôme Guilbert

**Rédacteur en chef :**

Saman Musacchio

**Rédacteurs en chef adjoints :**

Laure Caillou, Yaroslav Pigenet

**Rédacteurs :**

Sophie Félix, Mehdi Harmi,

Maxime Lerolle, Laurence Stenvot

**Ont participé à ce numéro :**

Samuel Belaud, Kheira Bettayeb, Bastien Contreras,

Sebastián Escalón, Grégory Fléchet, Denis

Guthleben, Romain Loury, Margot Michel, Warda

Mohamed, Emmanuelle Picaud, Marie Privé

**Secrétaire de rédaction :**

Émilie Silvoz

**Direction artistique :**

David Faure

**Iconographes :**

Anne-Emmanuelle Héry, Sophie Léonard

et Valérie Delchambre

**Gestionnaire :**

Mathieu Chatellier

**Assistant de direction :**

Frédéric Roman

**Illustrations :**

Charlotte Molas / Illustrissimo

**Impression :**

Groupe Morault, Imprimerie de Compiègne

2, avenue Berthelot – Zac de Mercières

BP 60524 – 60205 Compiègne Cedex

ISSN 2261-6446

Dépôt légal : à parution



Photos CNRS disponibles à :

contact-media@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 :**

MASTER1305 - STOCKADOB.E.COM

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

Abonnez-vous gratuitement sur :

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

Suivez l'actualité de la recherche avec le CNRS



*“Recyclabilité, recyclage  
et circularité des matières  
premières sont au  
cœur d'un programme  
national de recherche,  
pilote par le CNRS.”*

La population mondiale augmente et avec elle, nos besoins en matières premières. Traiter nos déchets pour limiter le prélèvement de ressources primaires est désormais une nécessité et pourtant, nous n'en sommes qu'au début tant les défis scientifiques, technologiques, économiques et sociaux sont nombreux et diversifiés. Pourquoi recycler lorsque les ressources primaires sont moins coûteuses que les ressources secondaires ? Comment recycler lorsque les déchets sont hétérogènes, les matériaux composites, voire très peu concentrés en éléments d'intérêt ? Comment se projeter sur des temps longs alors que les normes et les technologies évoluent rapidement, fragilisant les circuits de récupération et le réemploi de composants ? Comment concilier écologie, économie et technologie ? Pour faire face à ces défis, des initiatives et des solutions émergent, portées par le CNRS.

Les enjeux de recyclabilité, recyclage et circularité des matières premières sont au cœur d'un programme national de recherche (PEPR) d'accélération dédié, piloté par le CNRS dans le cadre de France 2030, qui offre une occasion unique d'accélérer la recherche et le transfert technologique sur ces sujets. Comme pour les autres PEPR d'accélération, le CNRS est mobilisé sur l'ensemble de la chaîne de valeur de la connais-

sance. Réunir les meilleurs scientifiques et laboratoires dans ce domaine, collaborer avec des acteurs industriels clés, des centres techniques, des pôles de compétitivité, des collectivités, etc., vise à identifier les verrous, les besoins de recherche et les projets à mettre en place.

Il s'agira aussi d'amener au plus proche de la société civile et du monde économique les solutions proposées. Le CNRS et les Sociétés d'accélération du transfert de technologies (Satt), via leurs programmes de prématuration et de maturation, accompagnent ainsi la majorité de ces grands programmes pour finan-

cer le transfert des résultats de recherche vers les entreprises existantes ou vers la création de start-up. Par ses multiples actions et engagements, dont témoigne le dossier thématique dans les pages de ce journal, le CNRS place la recherche au cœur de l'économie circulaire.

Le PEPR Recyclage n'est qu'un exemple parmi les 35 programmes pour lesquels le CNRS est pilote ou copilote. L'organisme est ainsi un acteur stratégique pour les trois quarts des PEPR lancés ou en cours de lancement par France 2030. Cette présence très large s'explique par son caractère interdisciplinaire, qui assure ainsi une approche holistique des verrous et des questions scientifiques identifiés par les stratégies nationales d'accélération et par les grandes problématiques scientifiques actuelles.

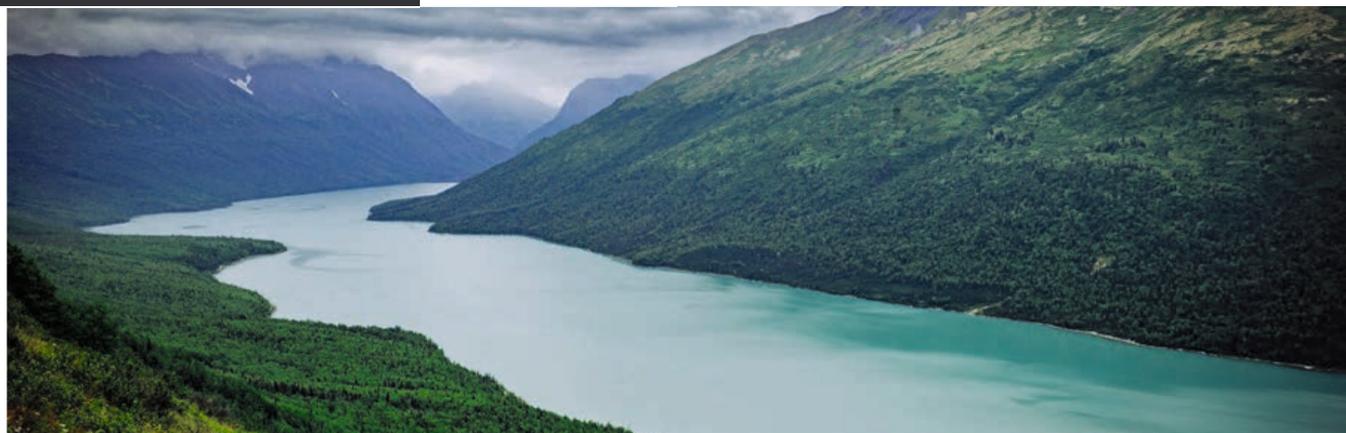
Le CNRS œuvre donc sur de nombreux fronts et illustre à travers ces grands programmes son positionnement d'une recherche fondamentale au service de la société pour répondre aux défis qui affectent et affecteront durablement nos vies de tous les jours.



© CYRIL FRÉLILLON/CNRS IMAGES

Frédéric Villieras,

directeur de la Mission programmes nationaux du CNRS



# GRAND FORMAT

# 11

En Alaska, le pergélisol fait tomber les montagnes .....	12
Curieuses images de science .....	24
La recherche, moteur de l'économie circulaire .....	30

© CYRIL FRÉLILLON / FFG / CNRS IMAGES



## 08

Hannelore Derluyn  
révèle la vie cachée  
des matériaux

© PETER MOONEN

## EN PERSONNE 5

« Les défis du COP ont créé une réelle dynamique », entretien avec Alain Schuhl .....	6
Hannelore Derluyn révèle la vie cachée des matériaux .....	8
Brèves .....	10



## 46

Le Roquefort et le camembert  
en voie d'extinction ?

© DR. MICROBE / STOCKADOBÉ.COM

## EN ACTION 37

Un zoo fossile d'un demi-milliard d'années .....	38
La physique à la conquête de l'infiniment bref .....	40
La cryptographie face à la menace quantique .....	44
Le Roquefort et le camembert en voie d'extinction ? .....	46
Entre mère et père, des apports génétiques différents .....	48
La recherche fait parler les astéroïdes .....	50
Un nouvel anticorps dédié à la lutte contre le cancer .....	52
Aux origines du modèle standard .....	54
Ces plantes qui envahissent le monde .....	56



La mafia, le silence  
et l'anthropologue

## 60

© PIERO GLEBERING/MAMA-BAPHO

## LES IDÉES 59

La mafia, le silence et l'anthropologue .....	60
Brèves à lire .....	63
Quand la recherche rêve de bulles .....	64

## LA CHRONIQUE

Jean Zay ? C'est la République ! .....	66
----------------------------------------	----

# EN PERSONNE



*Rencontre avec une chercheuse  
qui lit à travers les matériaux  
et des scientifiques distingués  
pour leurs travaux.*

# « Les défis du COP ont créé une réelle dynamique »

**ENTRETIEN** Mis en place au cours de l'année 2020, les six défis du Contrat d'objectifs et de performance (COP) du CNRS ont favorisé les synergies entre disciplines et créé de nouvelles approches de recherche. Bilan avec Alain Schuhl, directeur général délégué à la science.

PROPOS RECUEILLIS PAR LAURENCE STENVOT

**En 2019, le CNRS a décidé d'inscrire six défis scientifiques sur des sujets d'actualité – changement climatique, inégalités éducatives, intelligence artificielle (IA), santé et environnement, territoires du futur, transition énergétique – dans son Contrat d'objectifs et de performance<sup>1</sup>. Qu'est-ce qui a motivé cette décision ?**

**Alain Schuhl.** Inscrire explicitement des défis sociétaux dans son COP 2019-2023 a été une nouveauté pour le CNRS. Un changement de bon sens puisque la force de l'organisme consiste à créer des synergies entre les disciplines, afin de contribuer à apporter des éléments de réponse aux questions, rarement disciplinaires, que se pose la société. Les six défis ont donc été délimités sur proposition des dix instituts du CNRS et nous avons choisi les plus pluridisciplinaires.

**Peut-on dire que cet objectif de créer plus de synergies entre les disciplines a été atteint ?**

**A. S.** Tout à fait. Pour chaque défi, tout a commencé avec un groupe de travail

composé de représentants des dix instituts, avec la présence de la Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires du CNRS (Miti). L'implication de toutes ces disciplines a permis d'aborder des thématiques sous de nouveaux angles. Par exemple, le défi Inégalités éducatives a permis de décloisonner une communauté jusque-là organisée en silo et d'asseoir la pertinence du travail interdisciplinaire sur l'éducation. Pour preuve : la création du Groupement de recherche (GDR) « Recherche autour des questions d'éducation » en janvier 2024, et les projets interdisciplinaires issus de l'appel à manifestations financés dans le cadre du défi qui annoncent la structuration d'un champ de recherche en plein essor.

**En 2021, le gouvernement a lancé le dispositif France 2030, avec un volet important : les Programmes et équipements prioritaires de recherche (PEPR). Certaines de leurs thématiques rejoignent celles des défis, comme sur l'IA par exemple. Comment s'opère le maillage entre ces multiples dispositifs ?**

**A.S.** Les PEPR, investissements stratégiques pour la France, ont fait irruption dans le paysage alors que les défis sociétaux du CNRS étaient déjà lancés. La plupart des sujets des PEPR, de l'eau comme bien commun au climat, de l'intelligence artificielle jusqu'à l'enseignement, se rattachent à ces défis sociétaux, preuve que le CNRS avait vu juste sur ses thématiques et leur intérêt pour le pays. Le CNRS se retrouve d'ailleurs à piloter ou copiloter les deux tiers des PEPR, et notamment tous les PEPR exploratoires. En favorisant la transversalité, le terreau déjà existant des défis du CNRS en a facilité la construction.

**D'une Zone-Atelier à un centre de recherche, en passant par des GDR en devenir, des objets très différents sont nés de ces défis. Quel bilan peut-on en faire ?**

**A.S.** Les défis du COP ont créé une réelle dynamique, qui a souligné que les solutions aux plus grands problèmes auxquels nos sociétés sont et seront confrontées concernent plusieurs disciplines. Et le CNRS est un des seuls à pouvoir les mettre toutes en interaction. Concrètement, seize appels à projets ou à manifestations d'intérêt ont été lancés. Certaines recherches n'auraient pas vu le jour

1. [https://www.cnrs.fr/sites/default/files/download-file/COP\\_CNRS1\\_0.pdf](https://www.cnrs.fr/sites/default/files/download-file/COP_CNRS1_0.pdf) 2. Lors de son discours du 7 décembre 2023, le président Emmanuel Macron a acté la mise en place des agences de programmes qui représentent un nouveau rôle à endosser pour les organismes nationaux de recherche.



“*Les six défis  
sociétaux du CNRS  
ont été un changement  
de bon sens.*”

Grand Challenges (Tucson, États-Unis), qui a été sélectionné parmi les sites d'études par le défi Santé et environnement. Les thématiques des défis sont en adéquation avec celles de nos partenaires internationaux et européens, ce qui permet de profiter aussi de nombreux outils de financement de la recherche au niveau national et international.

**Le COP 2019-2023 se termine. Quelles suites y donner ?**

**A. S.** Les actions lancées vont continuer et perdurer. L'objectif des défis du COP était de favoriser une dynamique sur des sujets clés. A-t-on fait le tour des questions sur le changement climatique, les inégalités éducatives ou sur l'intelligence artificielle ? Certainement pas. Le défi Changement climatique, par exemple, a proposé la création d'une cellule « Changements globaux ». Une cellule en résonance avec l'agence de programmes Climat, biodiversité, sociétés durables, récemment confiée au CNRS par le gouvernement<sup>2</sup>, qui confirme la cohérence scientifique de l'élargissement du défi et justifie que le CNRS s'organise collectivement pour traiter cette thématique.

Toujours dans une idée de continuité, les défis ont permis d'identifier plusieurs axes thématiques qui seront soutenus par la Miti, tels que « Sobriété et résilience » ou encore « Données, IA et scénarios du futur ». Un nouveau Contrat d'objectifs, de moyens et de performance (Comp) est à venir, avec six ou sept sujets transverses toujours en cours de réflexion qui seront annoncés à l'été. **II**

sans ces défis et les différentes rencontres (colloques, ateliers...) ont été de véritable succès. Le colloque « Transition énergétique et société » du défi Transition énergétique, par exemple, a créé une véritable dynamique pour la future structuration de la recherche sur la transition énergétique qui souhaite entrer dans une logique de « Giec de l'énergie ».

**Chaque défi a aussi voulu intégrer de manière significative la société et ses attentes dans l'élaboration de ses objectifs.**

**A. S.** Les réflexions autour de l'articulation entre recherche fondamentale et mise au service de la société ont été très discutées. Comment définir des questions scientifiques en commun ? Comment faciliter l'appropriation des résultats ? On peut prendre en

exemple le projet de laboratoire commun Territoires habitables, sur l'aire urbaine de Marseille, imaginé par le défi Territoires du futur. Il vise à construire des partenariats entre les acteurs du territoire et le CNRS pour produire des connaissances provenant à la fois de la production scientifique et de l'innovation sociale. Une structure facilitant le passage de la recherche à l'action politique concrète.

**Comment ces défis se sont-ils inscrits dans la stratégie européenne et internationale du CNRS ?**

**A. S.** Par leur implication sur des enjeux transverses, les défis sociétaux ont trouvé une place importante dans plusieurs actions de coopération internationales. On peut citer l'*International Research Center* du CNRS, France-Arizona Institute for Global

© FREDÉRIQUE PLUS/CNRS IMAGES



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

# Hannelore Derluyn révèle la vie cachée des matériaux

## MATIÈRE

**PORTRAIT** Chercheuse en génie civil, Hannelore Derluyn veut identifier les mécanismes à l'origine de la dégradation des roches utilisées dans les constructions. À la clé : augmenter la durée de vie des matériaux ou encore préserver le patrimoine architectural.

PAR EMMANUELLE PICAUD

SeS collègues de laboratoire qualifient volontiers Hannelore Derluyn de personne réservée. Paradoxalement, ils admirent aussi son parler « franc et direct », « qui ne s'embarrasse pas de circonvolutions ». Cette chercheuse en géomécanique et milieux poreux, au sein du Laboratoire des fluides complexes et leurs réservoirs<sup>1</sup> (LFCR), aurait pourtant de quoi se faire valoir, car les scientifiques capables de rivaliser dans sa spécialité, soit l'étude des matériaux des bâtiments, ne sont pas nombreux.

Hannelore Derluyn s'intéresse plus particulièrement aux phénomènes extérieurs qui conduisent à l'altération des matériaux poreux de construction, comme la pierre naturelle ou la brique : eau, sel, glace, bactéries... les agents de dégradation sont potentiellement nombreux, les raisons et les scénarios multiples. Pour comprendre en détail ces phénomènes, la chercheuse a recours à la tomographie, une technique d'imagerie qui fournit une image tridimensionnelle d'un objet à partir d'une série de radiographies.

### Témoigner de l'invisible

La scientifique peut ainsi observer, à l'échelle microscopique et en temps réel, des phénomènes invisibles à l'œil humain et voir ce qui se trame au cœur de la matière : « Nous sommes désormais capables de voir la formation de certains cristaux ou la circulation de certains fluides dans la matière en temps réel. Cela est impossible avec des scanners classiques », explique-t-elle. Ces découvertes ont des utilités multiples : préserver les édifices historiques, améliorer les modélisations des ingénieurs du bâtiment ou encore prévenir les dommages du réchauffement climatique sur nos ouvrages.

Originaire de Flandres, et plus précisément de Roeselare, une ville située à une trentaine de kilomètres seulement de Lille, Hannelore Derluyn commence à s'intéresser à l'impact de l'humidité sur les textiles à l'intérieur d'un bâtiment lors de ses études en génie civil, à

l'Université catholique de Louvain. En 2009, elle s'envole pour l'École polytechnique fédérale de Zurich, en Suisse, où elle obtient en 2012 un doctorat sur la thématique du transport salin et de la cristallisation dans les milieux poreux. « J'ai voulu me concentrer sur la pierre naturelle pendant ma thèse, un matériau très présent sur les bâtiments historiques, potentiellement fortement concernés par d'éventuelles dégradations », explique-t-elle.

Son intérêt pour le sujet a peut-être été éveillé bien plus tôt, par l'intermédiaire de son grand-père, un passionné du domaine qui a construit sa propre maison et celles de ses enfants. « Lorsque j'étais petite, pendant des réunions de famille, les adultes étaient tout le temps équipés de leurs stylos à discuter de leurs projets de construction », se remémore-t-elle. Son père a également joué un rôle important dans son choix de carrière. À ses côtés, elle se souvient avoir visité, enfant, les ruines antiques de Vaison-la-Romaine,

---

“ Nous sommes désormais capables de voir la formation de certains cristaux ou la circulation de certains fluides dans la matière en temps réel. ”

---

1. Unité CNRS/Total SE/Université de Pau et des Pays de l'Adour. 2. Pour « Precipitation triggered rock dynamics: the missing mesoscopic link ». Ses travaux ont valu à Hannelore Derluyn d'être lauréate de la médaille de bronze du CNRS 2020 et d'obtenir, la même année, une bourse ERC Starting Grant d'un montant de 1,5 million d'euros.



© PETER MOONEN

non loin du mont Ventoux, un site connu pour la richesse de ses mosaïques romaines. Hannelore Derluyn se rappelle encore de ce sol qui en était orné et dans lequel elle a vu « l'histoire se dérouler à travers les âges ». « Ce sentiment, c'est aussi que ce qui transparait dans mes recherches », reconnaît celle qui se définit comme « un témoin de l'invisible » et pour qui observer ces mécanismes de dégradation à l'échelle microscopique en temps réel, « c'est un peu comme révéler un monde caché ».

### Observer les édifices pour mieux les soigner

La chercheuse confie aimer, lors de ses balades dominicales, regarder les édifices remarquables qui l'entourent. Récemment, elle a pris des photos des panneaux qui parlaient du dessalement des voûtes de Notre-Dame de Paris. Son amie conservatrice, Julie Desarnaud, lui a alors expliqué que ce phénomène était apparu suite à l'incendie de 2019. « Au moment de l'intervention par les pompiers, une très grande quantité d'eau a été apportée sur la toiture.

*Le sulfate présent à l'intérieur des gypses qui recouvraient l'extérieur des voûtes a été impacté par l'humidité et les sels de sulfate présents à l'intérieur se sont cristallisés. Sans mesures de correction rapides, cela aurait pu détériorer les parements de manière définitive », détaille Hannelore Derluyn.*

La scientifique observe régulièrement au scanner à tomographie des phénomènes similaires dans son laboratoire. « Je suis un peu comme un médecin qui observerait le corps humain en imagerie médicale, mais je fais cela pour les édifices pour mieux les soigner. J'observe l'eau qui pénètre dans la roche, où elle se loge, dans quels recoins elle s'engouffre, etc. Lorsque j'étudiais les textiles, c'était pareil. Je voyais les fils, comment ils se mettaient en tension et comment leur agencement se modifiait à chaque fois que l'eau arrivait dessus », décrit-elle.

### Faire dialoguer chercheurs et professionnels du bâtiment

Sa posture de femme dans une discipline majoritairement occupée par des hommes n'est pas le seul trait qui la distingue au sein de son laboratoire. Avant d'arriver en France et d'intégrer le CNRS en 2016, en tant que chargée de recherche au LFCR, Hannelore Derluyn a travaillé en Belgique et en Suisse allemande. Deux pays du nord de l'Europe où les mœurs en matière d'organisation de la recherche académique restent différentes du sud, donc de la France. Là-bas, le laboratoire est la plupart du temps dirigé par un chercheur ou une chercheuse autour de qui l'ensemble des autres scientifiques gravitent. En France, les directeurs ne sont pas attachés à un laboratoire, ils changent tous les cinq ans. Une particularité qui peut se révéler déstabilisante au premier abord, reconnaît la chercheuse, même si ne pas avoir l'ombre d'un ténor académique peut offrir une forme de liberté dans la façon d'aborder les sujets. « D'un autre côté, je viens d'une région où si tu veux faire quelque chose, tu le fais, tu bosses, tu y arrives et tu n'as pas besoin d'un bout de papier pour le prouver », ironise-t-elle.

À l'avenir, les travaux qu'Hannelore Derluyn et son équipe mènent dans le cadre du projet PRD-Trigger<sup>2</sup>, financé par le Conseil européen de la recherche, seront déterminants. Ils doivent permettre d'affiner certains modèles mathématiques reproduisant les phénomènes de dégradation des roches. « La tomographie permet de voir où sont situés les cristaux et les fluides dans la matière. Mais cela ne nous indique pas quelle est la concentration des sels présents dans les cristaux ou la température de la glace. Ces informations, ce sont les modèles mathématiques qui nous les fournissent », souligne la chercheuse. Un autre enjeu de ce domaine de recherche reste de mieux faire collaborer chercheurs et professionnels du bâtiment. « Ce dialogue est essentiel afin que nous sachions ce que nous pouvons faire en tant que chercheurs et ne pas nous perdre dans des solutions qui ne seraient pas opérationnelles », conclut-elle. Une collaboration qui pourrait donc être la clé pour un patrimoine bien préservé. ||



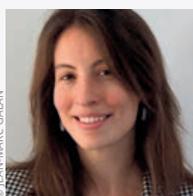
## Christelle Roy, nouvelle directrice de CNRS Nucléaire & Particules

Christelle Roy, précédemment à la tête de la Direction Europe et international, est nommée directrice de CNRS Nucléaire & Particules (IN2P3). Depuis son entrée au CNRS en 1997, ses activités de recherche en physique subatomique auprès des collisionneurs de particules ont été menées au sein de grandes collaborations européennes ou internationales. Directrice de l'Institut pluridisciplinaire Hubert Curien à Strasbourg en 2011, vice-présidente Stratégie à l'université de Strasbourg de 2017 à 2021, Christelle Roy a rejoint la direction du CNRS en tant que chargée de mission Europe auprès de la Direction générale déléguée à la science en 2020.

### Mathilde Cannat, Médaille Arthur Holmes 2023

Mathilde Cannat, directrice de recherche CNRS à l'Institut de physique du globe de Paris (CNRS/IPGP/ Université Paris Cité), reçoit la médaille Arthur Holmes 2023 pour sa contribution à la compréhension des dorsales médio-océaniques en termes de processus tectoniques et de dynamique. Cette récompense, décernée par l'Union européenne des géosciences (EGU), est remise à des scientifiques qui ont atteint un niveau international exceptionnel

dans le domaine Terre-solide des géosciences. Mathilde Cannat est également pilote scientifique pour le Programme et équipement prioritaire de recherche (PEPR) d'accélération Grands fonds marins.



### Francesca Musiani, Prix Cyber Chercheuse 2023

Chercheuse au CNRS depuis 2014,

directrice adjointe du Centre Internet et société du CNRS qu'elle a cofondé en 2019, Francesca Musiani a reçu le prix Cyber Chercheuse qui récompense chaque année des femmes travaillant dans le domaine de la cybersécurité. Il est décerné par le Cercle des femmes de la cybersécurité (Cefcys), une association dont l'objectif est de promouvoir et faire progresser la présence et le leadership des femmes dans les métiers relatifs à la cybersécurité.

### Claire Voisin, Prix Crafoord 2024

Claire Voisin, directrice de recherche CNRS à l'Institut de mathématiques de Jussieu (CNRS/Université Paris Cité/Sorbonne Université), reçoit le prix Crafoord 2024, décerné par l'Académie royale des sciences de Suède et la Fondation Crafoord, pour ses contributions exceptionnelles à la géométrie complexe et algébrique, notamment la

théorie de Hodge, les cycles algébriques et la géométrie hyperkähler. Claire Voisin est la première femme à recevoir ce prix en mathématiques.



## Ludovic Orlando, Prix du meilleur article scientifique 2023

Directeur de recherche en archéologie moléculaire, spécialiste de l'étude des ADN anciens et directeur fondateur du Centre d'anthropobiologie et de génomique de Toulouse (CNRS/Université Paul Sabatier), Médaille d'argent du CNRS 2023, Ludovic Orlando est lauréat du prix du meilleur article scientifique 2023 publié par la revue *Science*, toutes disciplines confondues, décerné par l'Association américaine pour

l'avancée scientifique, pour son article révélant l'origine des chevaux aux Amériques. Ce travail se distingue par son équipe internationale réunissant plus de 80 scientifiques et son approche scientifique inclusive.

## Alain Mermet, nouveau directeur Europe et international

Directeur du Bureau de représentation du CNRS à Bruxelles depuis 2021, Alain Mermet prend la tête de la Direction Europe et international du CNRS. Titulaire d'un doctorat en physique des matériaux, il a commencé sa carrière académique en tant que maître de conférences à l'université d'Orsay, puis en tant que professeur à l'université Lyon 1. Chercheur pendant 4 ans à l'Installation européenne de rayonnement synchrotron à Grenoble, Alain Mermet a également été attaché pour la science et la technologie dans les services de l'ambassade de France aux États-Unis et en Norvège.



© DAVID VILLAV / SCIENCEIMAGE, CBI/CNRS



# GRAND FORMAT



*Où les montagnes tombent  
en Alaska et où la recherche  
s'emballe pour les déchets.*



*En Alaska,  
le pergélisol  
fait tomber  
les montagnes*

Dans la vallée de la Matanuska, à deux heures de route d'Anchorage, les traces d'instabilité sont partout.

**TERRE**

**REPORTAGE** Sous l'effet du réchauffement climatique, le pergélisol, le sol gelé en permanence, fond. Une équipe de géologues du CNRS s'est rendue dans les massifs montagneux de la région d'Anchorage, au sud-ouest de l'Alaska, où la déstabilisation des sols provoque des glissements de terrain de plus en plus spectaculaires.

DOSSIER RÉALISÉ PAR LAURE CAILLOCE, ENVOYÉE SPÉCIALE À ANCHORAGE • PHOTOS CYRIL FRÉSILLON

# Objectif molards

À Glacier View, les scientifiques viennent observer de curieuses formations géologiques : les molards. Témoins de la dégradation du pergélisol, ces amas de terre et de roches pourraient permettre de mieux identifier les zones fragilisées.

PAR LAURE CAILLOCE

Partir en mission en Alaska, même en plein cœur de l'été, c'est un peu comme participer à une émission de téléréalité de type « survie » : les défis se suivent et ne se ressemblent pas. Ce mercredi du mois d'août, après avoir traversé à bord de kayaks les rapides de la Matanuska, une large rivière glaciaire, c'est chargée de dizaines de kilos de matériel que l'équipe de géologues emmenée par Susan Conway, spécialiste de géomorphologie au Laboratoire de planétologie et géosciences<sup>1</sup> à Nantes, attaque sa montée dans la forêt dense, à flanc de montagne. Difficile de croire, dans cette nature sauvage, que nous sommes à deux heures de route seulement d'Anchorage, la principale ville de l'État le plus septentrional des États-Unis, avec ses 400 000 habitants.

## Ascension dans la forêt dense

Ici, pas de sentiers comme dans les Alpes ou les Pyrénées : les scientifiques doivent écarter à mains nues les branches de saules et d'épicéas, enjamber les racines et éviter les larges feuilles urticantes du Devil's club, une plante endémique prisée des populations autochtones. La pente est raide, et plusieurs chutes mettent les nerfs de la petite troupe à vif. Heureusement, nous avons du renfort : nous sommes accompagnés par Bretwood Higman, un géologue indépendant natif de l'Alaska, et par Bill Billmeier, pilote de drone et ancien « bear guard » qui a assuré pendant des années la sécurité d'équipes de télévision venues chercher



le grand frisson en Alaska. Au « pays de l'ours », comme l'État d'Alaska aime à se nommer, on peut à tout moment tomber nez à nez avec un ours noir ou un grizzli. Une rencontre que nous aimerions éviter... Pour se signaler à eux – ils fuient l'humain s'ils en ont la possibilité, sauf dans de rarissimes cas de disette –, nous parlons fort, nous restons groupés. Surtout, chacun garde à portée de la main son « bear spray », une bombe anti-agression à ne dégainer qu'en cas d'attaque de plantigrade.

Après quatre heures d'ascension, l'équipe de scientifiques émerge enfin de la forêt. Le temps de traverser une zone marécageuse, où sont visibles d'anciens barrages de castors, et la raison de notre venue ici s'offre brutalement à nous : vissés au flanc de la montagne, des dizaines, des centaines de cônes noirs de toutes tailles s'échelonnent dans la pente, le long de ce qui semble être un ancien glissement de terrain. Une vision lunaire, qui arrache un cri à Susan Conway : « Incroyable ! Je n'ai jamais vu une chose pareille ! » Ces monticules de débris, amas de roches et de terre à la forme conique caractéristique, ce sont des « molards » : un mot emprunté au parler savoyard, qui désignait à l'origine le sommet arrondi d'une montagne. C'est en effet dans les Alpes, il y a plus d'un siècle, que ces amas ont été pour la première fois identifiés, avant de retomber dans l'oubli.

1. Unité CNRS/Nantes Université/Université d'Angers.



Au pied du pic d'Amulet, plusieurs centaines de molars s'échelonnent tout au long de la pente. La hauteur de ces amas de terre et de roches peut varier de trente centimètres à plus de douze mètres.

Depuis une dizaine d'années, pourtant, des scientifiques commencent à s'intéresser à ces formations géologiques semblables à de petits terrils, dont la hauteur peut varier d'une trentaine de centimètres à plus de douze mètres. C'est le cas de Costanza Morino, géologue à l'université de Padoue et partie prenante de cette expédition en Alaska. En étudiant des glissements de terrain en Islande pour sa thèse de doctorat alors encadrée par Susan Conway, la géologue italienne identifie dans les éboulis plusieurs de ces formations coniques et émet une hypothèse forte. « Ces cônes de débris sont le résultat de glissements de terrain contenant du pergélisol, ce sol gelé en permanence typique des régions polaires, que l'on peut aussi retrouver en haute montagne », explique la scientifique. Mieux, c'est la dégradation du pergélisol qui semble être à l'origine des glissements de terrain donnant naissance à ces molars. « Après avoir été arrachés à la montagne, les blocs de pergélisol se réchauffent et perdent la glace qui "collait" la terre et les cailloux, adoptant ce profil conique caractéristique », poursuit la chercheuse.

### Un glissement de terrain dû au pergélisol ?

Dans un contexte de changement climatique, qui voit les régions proches des pôles se réchauffer plus vite que le reste de la planète, cette découverte est une petite bombe.





litaires de Google Earth, mais aussi en intervenant dans les congrès internationaux de géologie, afin de sensibiliser un maximum de confrères.

### Une concentration unique de cônes

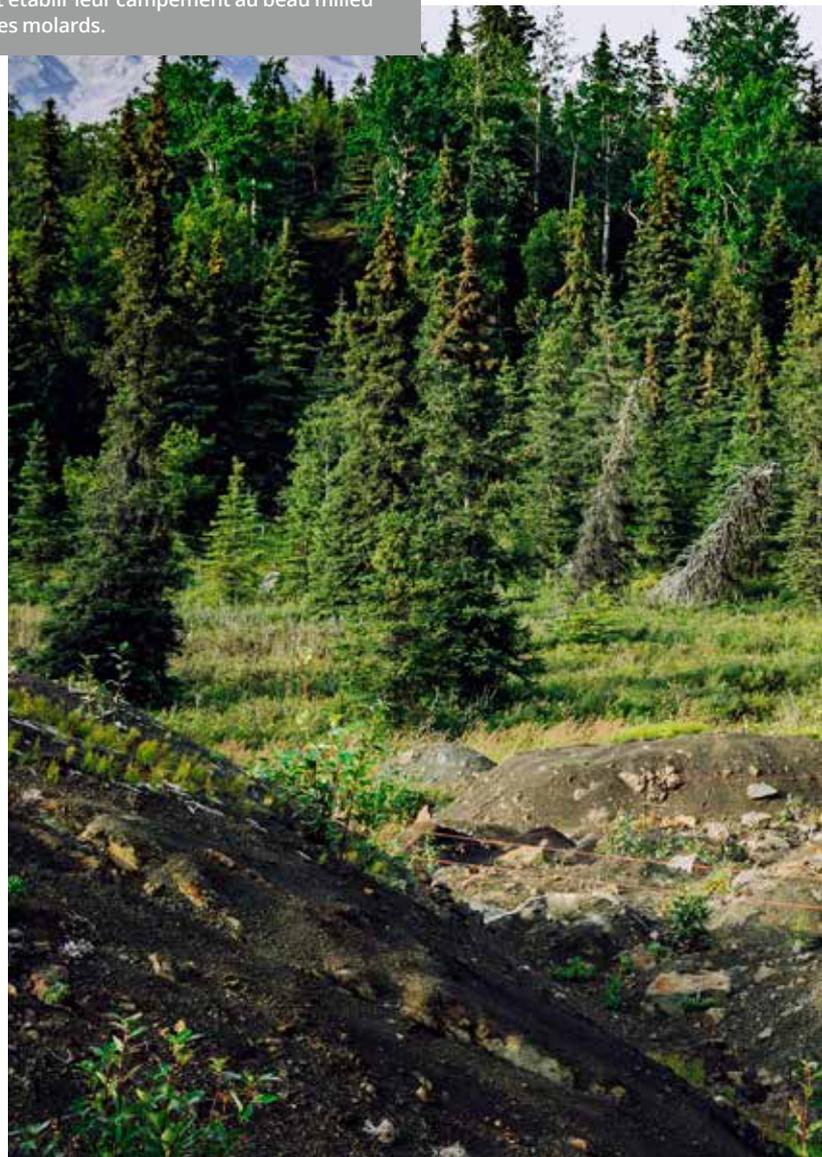
« Grâce à cela, nous avons repéré une dizaine de zones à molards un peu partout sur la planète : au Groenland, en Norvège, au Kamtchatka (une région située au nord-est de la Russie), au Kazakhstan, en Argentine, au Pakistan, ou encore dans les Alpes, ce qui confirme que le phénomène ne concerne pas que les régions arctiques, poursuit Susan Conway. Un soir, alors que j'épluchais la presse d'Alaska sur Internet, je suis tombée sur une photo d'un glissement de terrain dans la vallée de la Matanuska, sur le site d'Amulet où nous sommes aujourd'hui. Quand j'ai vu tous ces cônes, j'ai su qu'on tenait un candidat, et pas n'importe lequel ! En Islande, on dénombrait une poignée de molards à peine... Mais des centaines ? » Bien visibles depuis la route qui longe la rivière Matanuska au niveau de la petite localité de Glacier

Les chercheurs doivent progresser dans la forêt dense pour atteindre leur site d'étude et établir leur campement au beau milieu des molards.

En effet, si l'on connaît bien la répartition du pergélisol dans les zones de plaine à l'échelle planétaire, dans la toundra par exemple, il est plus difficile de savoir avec précision où celui-ci est localisé dans les massifs montagneux, où la nature du sol et l'exposition au soleil varient d'une vallée à l'autre, voire d'un versant à l'autre. « Il faudrait pour cela aller forer et extraire des carottes de sol un peu partout dans les massifs montagneux, poser des capteurs de température... C'est humainement impossible et extrêmement coûteux ! », indique Susan Conway.

Or, avec la hausse des températures moyennes, le pergélisol dégèle, de plus en plus vite. En plaine, son dégel occasionne des affaissements qui fragilisent les fondations des bâtiments jusque-là posés sur un sol dur comme la pierre, créent des trous dans les routes ou les pistes d'aéroports, voire provoquent carrément leur effondrement... Dans les massifs montagneux, les conséquences sont plus spectaculaires encore : quand la glace qui cimente littéralement le sol disparaît, ce sont des pans entiers de montagne qui se décrochent lors de glissements de terrain parfois spectaculaires. « C'est pour cela que les molards nous intéressent autant : ils sont le signe qu'il y a du pergélisol et que celui-ci est en train de se dégrader », explique Susan Conway.

Ainsi est né, en 2019, le projet Permolarads<sup>2</sup>. Son principal objectif : établir clairement les processus de formation de ces cônes de débris, et confirmer qu'ils sont bien liés à la fonte du pergélisol. Pour ce faire, les scientifiques sont partis à la chasse aux molards un peu partout sur la planète. En Islande, où ils ont effectué deux missions de terrain en 2021 et 2022, en passant des nuits blanches sur les images satel-



2. Les actions de communication du projet Permolarads ont été financées par l'Agence nationale de la recherche dans le cadre de l'appel à projets Science avec et pour la société. 3. Unité CNRS/Université Caen Normandie/ Université Rouen Normandie.

*“Ces cônes de débris ont déjà été repérés dans une dizaine de régions du globe, dont les Alpes.”*

View, les cônes noirs se sont vu attribuer le surnom de « *graveland* » (le « champ de tombes ») par les habitants, sans que ceux-ci ne sachent de quoi ils étaient le symptôme.

L'après-midi est déjà bien entamé. Alors que le campement s'installe au beau milieu des molards, les chercheurs préparent leur matériel : installation de panneaux solaires pour recharger les batteries, d'une station GPS fixe... Le programme des trois jours sur place s'annonce chargé : les scientifiques veulent faire un relevé complet de tous les cônes présents sur la zone, afin de déterminer leur taille mais aussi leur répartition et de mieux comprendre la mor-

phologie du glissement de terrain qui les a transportés jusqu'en bas de la pente. Pour cela, ils disposent d'un allié de taille : un drone (le meilleur ami des géologues !) que Calvin Beck, spécialiste de la cryosphère actuellement en thèse au laboratoire Morphodynamique continentale et côtière<sup>3</sup> à Caen, s'occupe de déplier.

Sitôt prêts, les scientifiques s'élancent à l'assaut de la pente. « *L'idée est de capturer les molards par photogrammétrie, explique Calvin Beck. Le drone va prendre des milliers de clichés, sous tous les angles, puis ceux-ci seront fusionnés par un logiciel pour produire un modèle 3D. Lors de notre précédente mission en Islande, il y avait peu de molards et nous avons pu faire de la photogrammétrie cône par cône. Mais ici, ils sont bien trop nombreux et s'échelonnent sur toute la longueur du glissement de terrain, soit 2 200 mètres pour un dénivelé cumulé de 2 500 mètres ! C'est pourquoi nous avons décidé de faire de la photogrammétrie à l'échelle de l'ensemble de la zone.* »

#### **Des mesures au centimètre près**

Avant de faire décoller le drone, les scientifiques disposent des cibles un peu partout dans la pente, dont ils mesurent la position précise avec la technique dite du « GPS





Grâce au drone, les chercheurs prennent des milliers de clichés de la zone. Cette technique, appelée photogrammétrie, leur permettra de produire un modèle en 3D de tous les molards.

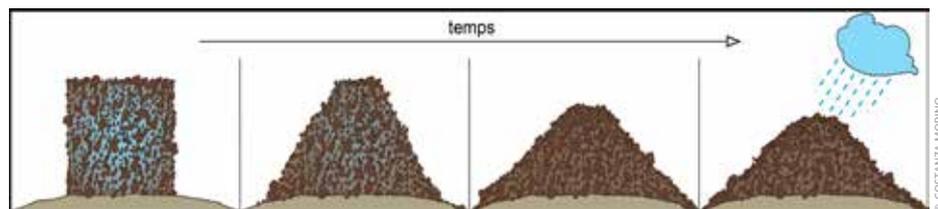
différentiel ». « Les données GPS sont indispensables pour donner une échelle au modèle 3D. C'est ce qui nous permettra de connaître les distances entre les molards et de mesurer précisément leur taille », explique Susan Conway. Mais pour cela, l'utilisation d'un seul appareil GPS est insuffisante : du fait des perturbations engendrées par l'atmosphère terrestre, toutes les positions données comportent en effet une marge d'erreur de 4 mètres – c'est bien trop quand on veut mesurer des molards. « Pour obtenir des mesures au centimètre près, nous devons combiner les données du GPS mobile utilisé au niveau de la cible et celles de la station fixe installée au campement », précise la scientifique.

Une fois les cibles installées, Calvin Beck peut lancer le drone qui se stabilise à une cinquantaine de mètres d'altitude et commence à enchaîner les transects, des trajets en ligne droite de 400 mètres chacun. Les différentes séquences ont été théoriquement programmées dans le drone, mais les aléas du terrain demandent régulièrement au pilote de reprendre le contrôle de l'appareil. Il ne faut pas traîner : l'autonomie de la batterie autorise un vol de 20 minutes seulement. Les allers-retours avec le campement, où les batteries épuisées sont remises en charge, sont incessants. Les dénivelés à avaler, dans un sens puis dans l'autre, ne découragent pas les scientifiques, dont certains se sont imposé un entraînement physique spécial avant le démarrage de la mission – être géologue, c'est aussi tenir une bonne forme physique !

Il faudra un après-midi et près d'une journée complète pour quadriller l'ensemble du glissement de terrain et effectuer la totalité du relevé, moyennant quelques péripéties : perte de

contrôle du drone, heureusement sans le crash redouté de tous les pilotes, ou attaque par un rapace ! Mais la mission des scientifiques ne s'arrête pas là. Au-delà de leur forme et de leur répartition, la composition même des molards est au centre du projet Permolarcs. Les chercheurs n'hésiteront pas à en démanteler quelques-uns, afin de plonger au cœur de ces amas de sédiments.

« L'objectif, c'est de déterminer la part des différents ingrédients (argile, cailloux) dans ces cônes de débris, mais aussi leur granulométrie, c'est-à-dire leur taille », explique Calvin Beck, tout en remplissant des sacs d'échantillons. Trente tamis successifs seront nécessaires pour faire ce tri, du plus grossier au plus fin, et seront complétés par du phototamissage, une technique permettant l'estimation à partir



### COMMENT NAISSENT LES MOLARDS

Après s'être détachés de la montagne, les blocs de pergélisol se réchauffent et perdent la glace qui « collait » la terre et les cailloux. En quelques jours, voire quelques semaines selon la saison et la localisation, ils adoptent ce profil conique caractéristique.

de clichés photographiques de la taille des éléments qui ne pourront pas être transportés. « Déterminer la composition exacte des molards est essentiel, insiste Calvin Beck. Cela permettra de mieux connaître la nature du pergélisol dont ils sont issus et de déduire la quantité de glace qui s'y trouvait. »

### Pourquoi la montagne flanche

Premier constat : ici, les roches sont très friables, bien plus que dans les molards étudiés en Islande. « De nos jours, le glacier qui donne naissance à la rivière Matanuska, situé à quelques kilomètres d'ici à vol d'oiseau, occupe un couloir relativement étroit. Mais lors des dernières glaciations, l'ensemble de la vallée était envahie par la glace qui a vraisemblablement fragilisé la roche-mère », raconte Susan Conway. Bien que spectaculaire, le site d'Amulet n'est pas le seul à avoir livré des molards dans la zone : en scrutant les images aériennes, les chercheurs ont identifié une dizaine de glissements de terrain avec molards dans un rayon de 50 kilomètres alentour. « L'un de nos nombreux objectifs va être de dater avec précision chacun de ces événements, afin de connaître leur fréquence, explique la scientifique. Cela permettra également de mieux cerner l'évolution des molards dans le temps : ces cônes de débris sont en effet exposés à la météo et au temps qui passe. »

Concernant Amulet, le doute n'est pas permis : le fracas du glissement de terrain a en effet été entendu par les riverains tôt le matin du 19 février 2013. Un glissement imputable au réchauffement climatique, qui se produit en plein hiver ? « Même si cela paraît contre intuitif, ce n'est pas le premier dont nous avons connaissance, explique Susan



Installation d'une station GPS fixe au campement. Couplée au GPS mobile, elle permettra de déterminer avec précision la position et la taille des molards.

Conway. Il faut savoir que le pergélisol, qui se trouve en profondeur, ne réagit pas aux températures journalières, ni même saisonnières. C'est vraiment la température annuelle moyenne qui compte. »

Mais les scientifiques sont encore loin de comprendre les subtilités de la mécanique : quand et pourquoi la montagne flanche. Il faut dire que tout se passe dans le sous-sol, loin des regards ! « L'eau liquide qui percole dans le sol est probablement un facteur, avance Susan Conway. Très efficace pour transporter la chaleur, elle s'infiltré dans le pergélisol qui commence à se dégrader, le fragilisant encore davantage. La sismicité aussi peut constituer un facteur déclenchant, même si ici, à Amulet, aucune grosse secousse n'a été enregistrée avant le glissement de terrain... »

Une chose est sûre : avec le réchauffement climatique, ces événements vont se multiplier. « Il y a cinquante ans, un glissement de terrain de l'ampleur de celui d'Amulet – environ 800 000 mètres cubes – se produisait une fois tous les deux ou trois ans en Alaska, relate Bretwood Higman, tandis que le soir et le froid tombent sur Amulet. Aujourd'hui, il y en a trois par an. » Perché au sommet d'un molard, l'Alaskien allume un feu, autant pour se réchauffer que pour tenir à distance les ours dont les traces, poils, déjections rougies par les baies dont ils se régalaient l'été sont visibles tout autour du campement. Au loin, la ligne des montagnes bleutées se confond presque avec le ciel. Dans deux jours, les chercheurs redescendront dans la vallée habitée ; pour l'heure, ils se perdent dans la contemplation de ce paysage immobile, pourtant en plein bouleversement. II

Prélèvement d'échantillons, afin de déterminer la part des différents ingrédients (argile, cailloux) dans ces cônes de débris.





# Quand le tsunami menace

C'est une église de poupée, avec son dôme argenté typique du culte orthodoxe. Autour d'elle, un adorable cimetière et ses tombes figurant de petites maisons en bois (les « maisons aux esprits »). De l'autre côté de la route, quelques baraques éparses. Nous sommes dans le village autochtone d'Eklutna. Ici, comme partout en Alaska, l'orthodoxie apportée au XIX<sup>e</sup> siècle par la colonisation russe reste un marqueur identitaire fort pour les populations de tradition amérindienne, et ce malgré le rachat il y a plus d'un siècle déjà de ce vaste territoire par les États-Unis.

Mais ce n'est pas pour faire du tourisme que nous sommes venus jusqu'ici. La géologue du CNRS Susan Conway<sup>1</sup> a rendez-vous avec Carrie-Ann Brophil, la responsable des affaires environnementales de ce village de 60 habitants situé aux confins de la métropole d'Anchorage. C'est cette dernière qui a pris contact avec la scientifique, après avoir été avertie d'une possibilité effrayante : le village,

Les blocs qui se détachent de la montagne peuvent avoir des conséquences inattendues, comme créer de véritables raz-de-marée. Le village autochtone d'Eklutna, voisin du lac du même nom, a fait appel à l'équipe de géologues pour mieux anticiper le risque.

PAR LAURE CAILLOCE

qui n'a pourtant pas de connexion avec la mer, pourrait être rayé de la carte par un... tsunami. En cause : la fonte du pergélisol.

Eklutna se trouve en effet à une quinzaine de kilomètres en aval du lac du même nom, une vaste étendue d'eau de 10 kilomètres de long enserrée par un massif montagneux et fermée par un barrage. Or des signes d'instabilité ont été repérés sur ses pentes par les experts du US Geological Survey, le service de géologie des États-Unis : des fractures semblant indiquer que le terrain bouge. « Si un morceau de montagne venait à tomber dans le lac, cela créerait une vague

1. Unité CNRS/Nantes Université/Université d'Angers.



« Les cartes de répartition du pergélisol restent muettes sur la présence (ou non) de pergélisol au-dessus du lac, pourtant les gens d'ici ont déjà repéré des signes typiques de son dégel dans le coin, comme des fondations déstabilisées, ou des chaussées effondrées, poursuit-elle. C'est pourquoi nous avons besoin de l'expertise de l'équipe de Susan. Pour pouvoir estimer le risque de glissement de terrain, et donc de submersion, et savoir à quelle échéance il se produira... Est-ce que ce sera dans dix ans, dans cinquante ans, ou est-ce qu'on parle d'un risque imminent ? »

La jeune femme a des raisons d'être inquiète : la présence de pergélisol, si elle se confirmait, se doublerait d'un risque de tremblement de terre à prendre très au sérieux. Le sud-ouest de l'Alaska figure en effet parmi les régions les plus sismiques au monde. Située dans la prolongation de l'arc des Aléoutiennes (l'« anneau de feu », réputé pour son hyperactivité), la zone enregistre près de trois cents secousses telluriques par an, soit presque une par jour ! Un petit tremblement de terre, quasi imperceptible pour l'humain (1,2 sur l'échelle de Richter !) a d'ailleurs lieu lors de notre entretien...

« Les facteurs déclencheurs d'un glissement de terrain dans une zone de pergélisol dégradé restent encore difficiles à démêler. Mais la sismicité en est un, majeur, confirme Susan Conway. L'effet d'un séisme peut être immédiat et provoquer un décrochage brutal de la pente. Mais il existe aussi un effet mémoire bien

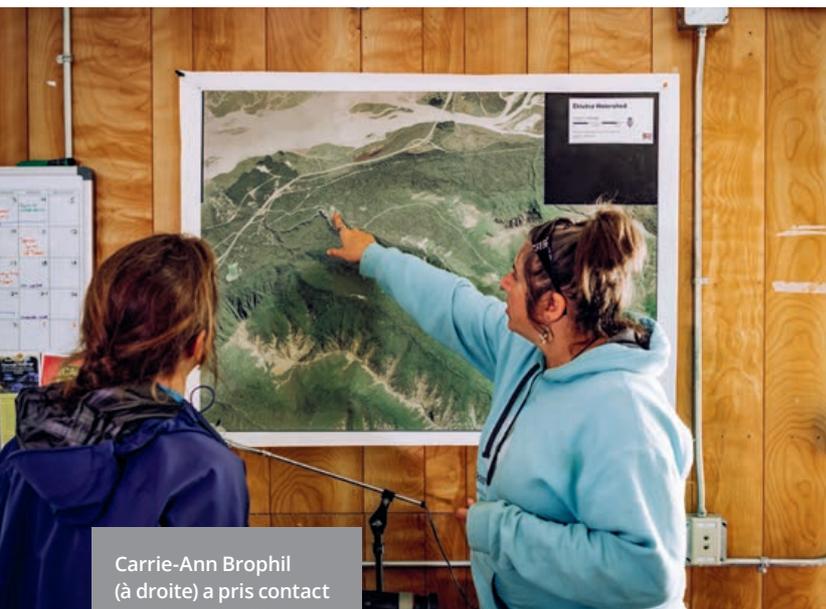
Si l'eau du lac débordait, le village autochtone d'Eklutna et son église orthodoxe seraient submergés par la vague dévastatrice.

énorme, s'inquiète la jeune femme. La masse d'eau passerait par-dessus le barrage et s'engouffrerait dans le canyon et la rivière en contrebas. Le rétrécissement situé un peu plus loin – dix mètres à peine – provoquerait une puissante accélération du flux, avec un débit de 30 millions de mètres cubes par seconde, d'après les premières estimations de Bretwood Higman, le géologue alaskien qui nous a mis en contact avec Susan. »

### Village détruit, autoroute coupée...

Les conséquences d'un tel événement seraient dramatiques : le camping situé au bord du lac, une destination touristique prisée des randonneurs et des amateurs de pêche, serait submergé, de même que le village d'Eklutna. Au-delà : la Glenn Highway, l'autoroute qui relie le port d'Anchorage, par où entrent toutes les marchandises, au reste de l'Alaska serait submergée, les ponts qui l'enjambent détruits, la voie de chemin de fer aussi serait dévastée. Sans compter que le lac représente la réserve d'eau douce de la ville d'Anchorage, et qu'une unité de traitement de l'eau est aussi présente sur la zone. « C'est tout le territoire alaskien qui se retrouverait paralysé », alerte Carrie-Ann Brophil.





Carrie-Ann Brophil (à droite) a pris contact avec les scientifiques pour mieux évaluer le risque pour son village.

connu des géologues, avec des glissements de terrain se produisant plusieurs années après. » Pour savoir s'il y a du pergélisol sur les hauteurs du lac Eklutna, une seule solution : aller voir de plus près, et suivre la température du sol durant toute une année.

### Remonter plusieurs années dans le passé

Rendez-vous est donné le lendemain matin sur les bords du lac. Les canoés sont de sortie – il n'existe aucun autre moyen d'atteindre la zone visée, située de l'autre côté de l'eau. Après deux heures de pagaie, c'est ensuite un dénivelé de plusieurs centaines de mètres, à flanc de montagne, qui attend les chercheurs chargés de tout leur matériel. « L'idée est de poser des capteurs de température qui enregistreront en continu la température du sol en surface, mais aussi la température de l'air », explique Costanza Morino, l'une des scientifiques de l'équipe.

Petite précision : ce n'est pas la température du pergélisol lui-même qui sera mesurée directement (celui-ci peut se trouver à plusieurs dizaines de centimètres, voire plusieurs mètres sous la surface) mais celle de la couche située directement à la surface, aussi appelée « couche active », qui dégèle quand la température de l'air se réchauffe.

*“En Alaska, peu de gens connaissent les dangers liés au dégel du pergélisol.”*

Les capteurs eux-mêmes sont fixés sur des tiges, huit au total, qui seront plantées dans le sol à différentes altitudes. L'un des capteurs sera enfoui, un deuxième sera placé juste à la surface tandis qu'un troisième, situé trente centimètres au-dessus du sol, mesurera la température de l'air. « Ce que nous voulons, c'est confirmer qu'il y a du pergélisol, comme nous le soupçonnons, et savoir à quelle vitesse il se dégrade », explique Susan Conway. Le projet se heurte cependant à une difficulté de taille : la dégradation du pergélisol est un processus lent, qui ne peut s'appréhender qu'à l'échelle de plusieurs années. Pour déterminer s'il est en train de fondre, les chercheurs vont devoir ruser : « Nous allons devoir extrapoler nos données afin de remonter plusieurs années dans le passé », raconte la chercheuse.

Pour ce faire, un modèle 3D de la montagne sera réalisé afin de déterminer quelle quantité de soleil elle reçoit, selon les orientations, Nord ou Sud. « Le capteur de température

Les scientifiques rejoignent le versant fragilisé à bord de canoés.





Des perches équipées de capteurs de température sont plantées dans le sol à différentes altitudes.

terrain soudain sera bien réel et la montagne devra être surveillée de près, avec la pose de divers instruments (capteurs de température, GPS...). « *La glace contenue dans le pergélisol, c'est une colle pour la montagne. Si la glace fond, il n'y a plus de colle et les risques que la montagne s'effondre sont démultipliés* », rappelle Susan Conway.

De retour tard dans la soirée, les scientifiques livrent un premier diagnostic. L'instabilité du versant se confirme : en plus des fractures dans le sol, préalablement repérées sur les images satellite, un survol de drone leur a permis de voir que la végétation était perturbée, avec des buissons qui poussent nettement de travers. « *C'est un signe que le terrain a bougé récemment*, décrypte Costanza Morino. *On sait en effet que lorsque les déformations du sol cessent, la végétation retrouve rapidement sa verticalité.* »

Bien qu'épuisée par l'effort physique, l'équipe est ravie de sa journée. « *Des missions comme celles-ci sont précieuses, commente Bretwood Higman. Elles sont utiles pour faire progresser la connaissance scientifique et servent directement aux populations locales. Ici, en Alaska, les gens sont sensibilisés au risque sismique. Mais peu d'entre eux connaissent les dangers liés au dégel du pergélisol. Notre rôle est de leur donner des éléments qui leur permettront de mieux anticiper le risque : en installant des systèmes de surveillance, en relocalisant certaines activités, et bien sûr, en mettant en place des plans d'évacuation.* » ||

#### ▶ À VOIR

Notre reportage vidéo « Alaska : le sol se dérobe » sur [lejournel.cnrs.fr](http://lejournel.cnrs.fr) et nos reportages photo sur [images.cnrs.fr](http://images.cnrs.fr)

*de surface va nous donner des indications précieuses sur la couverture neigeuse. En effet, la neige fonctionne comme une couverture isolante, qui maintient la température du sol constante, à zéro degré, ajoute Susan Conway. Combinés, ces éléments vont nous permettre de savoir quelle quantité d'énergie la montagne reçoit, ce qui nous permettra de prédire à quelle profondeur le pergélisol se trouve par rapport à la surface.* »

Pour remonter dans le passé, une dernière information sera nécessaire : les données des stations météo. Grâce à elles, les scientifiques établiront le rapport entre les températures relevées sur le terrain pendant une année et la température moyenne de l'air sur la même période. « *L'idée ensuite sera d'utiliser les relevés météo des dix dernières années pour projeter nos données de terrain dans le passé. Nous aurons alors une vision de l'état du pergélisol sur dix ans, si pergélisol il y a, et saurons s'il a perdu en épaisseur ou pas* », explique la chercheuse.

#### Fractures dans le sol et végétation perturbée

Si l'étude révèle qu'il n'y pas de pergélisol sur le versant étudié, alors le risque d'un décrochage brutal de la montagne sera minime. Il faudra néanmoins continuer à surveiller l'évolution des failles repérées, via la télédétection (images satellite). En revanche, si les scientifiques détectent la présence de pergélisol, et que celui-ci montre des signes de dégradation rapide, alors le risque d'un glissement de

Ces arbustes de travers sont le signe que le terrain a bougé récemment.



# Curieuses images de science

Pour la cinquième année consécutive, le CNRS et l'Acfas, son partenaire canadien, proposent l'édition française du concours La preuve par l'image, consacré aux images issues de la recherche. Voici une sélection à découvrir parmi les photos lauréates 2023.

TEXTE GRÉGORY FLÉCHET

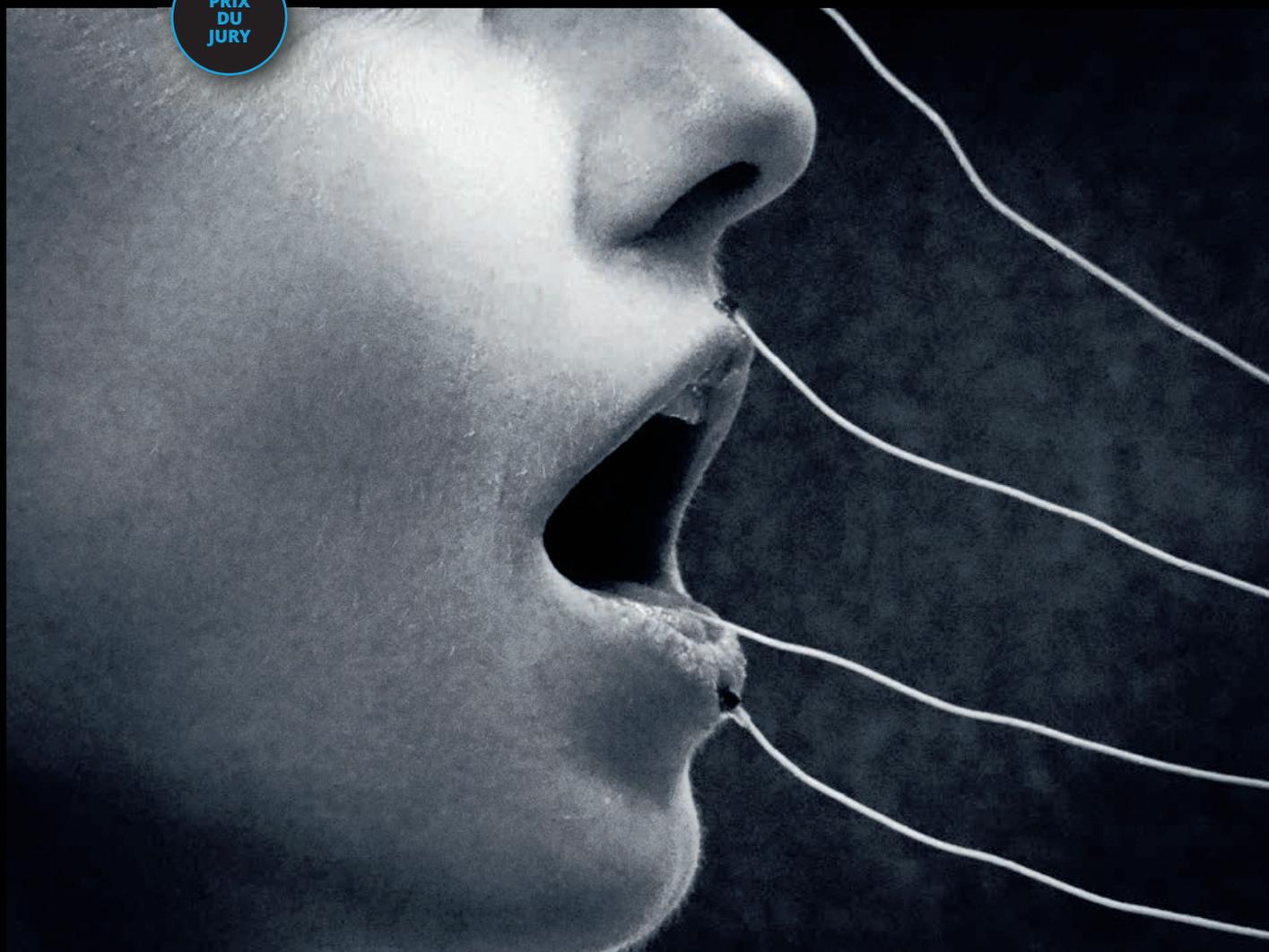
## Sur le bout de la langue

► ANNE HERMES, ANDRÉS FELIPE LARA

© A. Hermes, A.F. Lara/LPP

Ceci n'est pas une séance de torture, mais une expérience totalement indolore visant à décrypter les mécanismes subtils de la production de la parole. Grâce aux capteurs collés sur la langue et les lèvres de cette personne, elle-même placée dans un champ électromagnétique de faible intensité, il est possible d'enregistrer les mouvements de ses organes articulatoires.

PRIX  
DU  
JURY





## Conciliabule forestier

► CLÉMENT CORNEC

© C. Cornec/CRNL

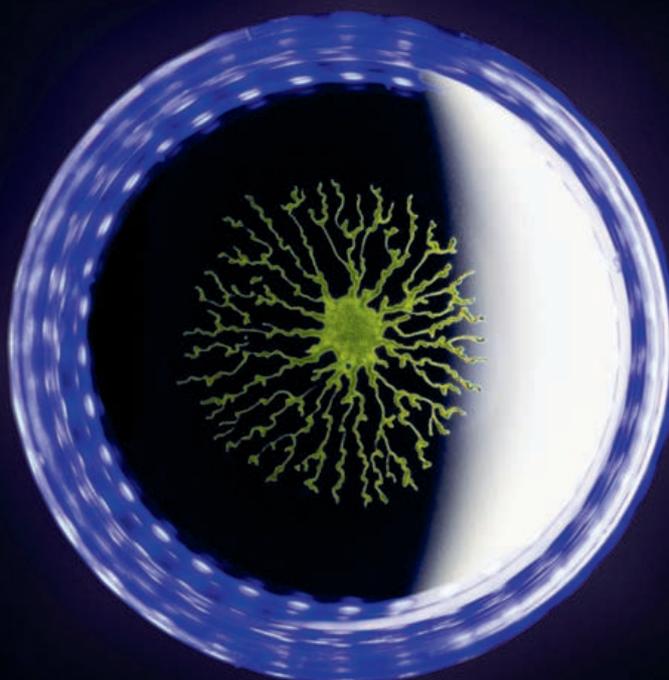
À vingt mètres au-dessus du sol, cette femelle bonobo s'abrite de la pluie sous la canopée de la forêt de Manzano, en République démocratique du Congo. En étudiant les communications vocales des bonobos, les scientifiques ont remarqué que certaines vocalisations se pratiquent uniquement en petits comités et à courte distance. Objectif : maintenir les liens amicaux entre des partenaires sociaux.

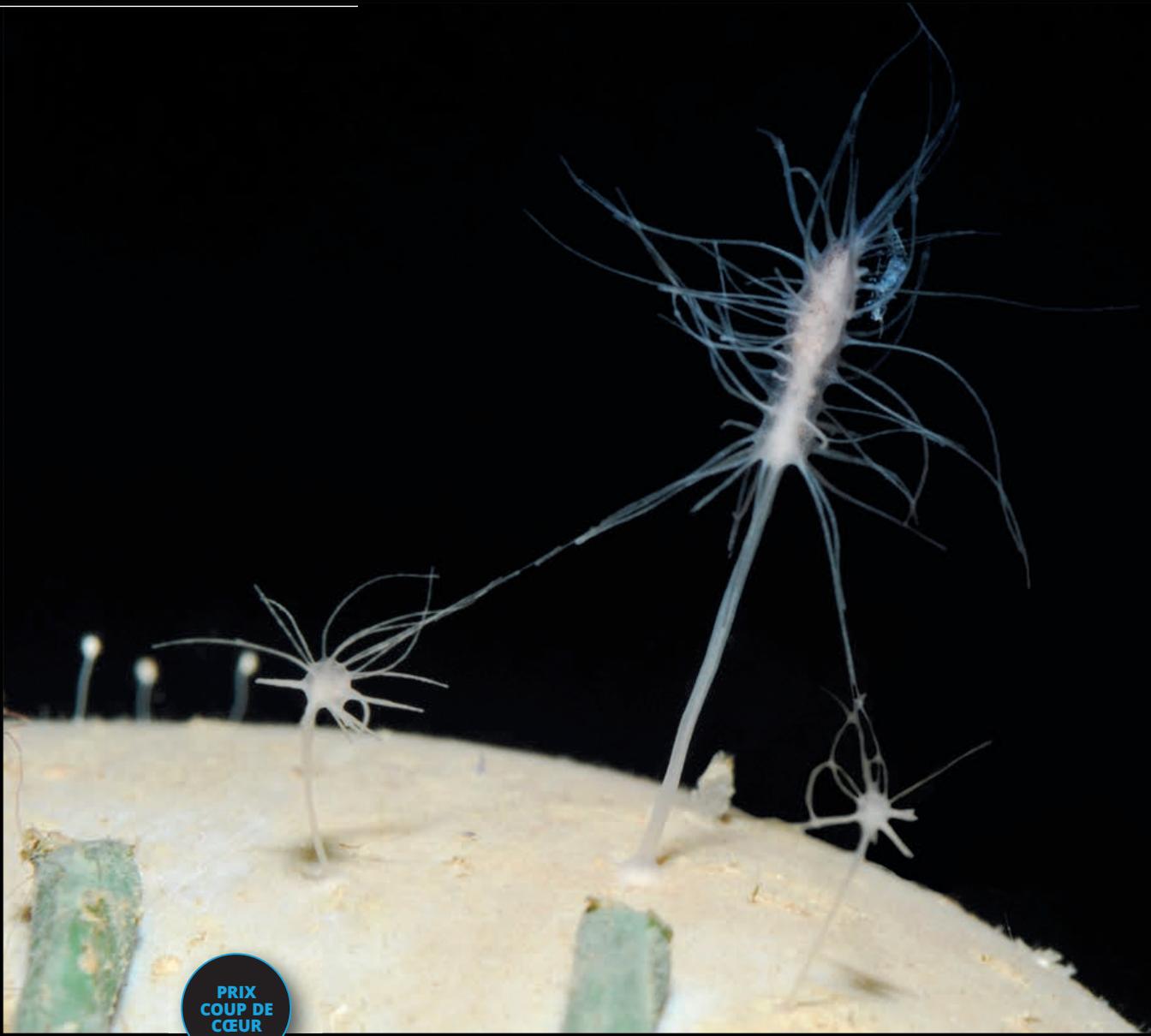
## Tentacules de micro-algues

► RAPHAËL JEANNERET, ÉTIENNE JEANNERET, ISABELLE EISENMANN

© R. Jeanneret, É. Jeanneret, I. Eisenmann/LPENS

Ce réseau de filaments vert électrique est l'œuvre de millions d'algues unicellulaires. Sous l'effet de sources de lumière intenses entourant la boîte de Pétri où ont été déposés les micro-organismes, ces derniers convergent vers le centre en se dissimulant derrière leurs congénères, cherchant ainsi à se prémunir d'une exposition prolongée au flux de photons qui leur serait fatale.





PRIX  
COUP DE  
CŒUR

## L'archéologie au pixel près

► EMMANUEL LAROZE

© E. Laroze/Orient et Méditerranée

Cette vue zénithale sur les vestiges du complexe funéraire de la reine Ânkhnespépy II, à proximité du Caire, a en fait été obtenue... depuis le sol ! Il s'agit de la projection horizontale d'une reconstitution en 3D de cet ensemble architectural, globale et ultra réaliste, qui agrège plus de 2 000 photos et dotée d'une résolution de 2 mm par pixel.





## Mystérieuse éponge

► **DORIAN GUILLEMAIN**  
© D. Guillemain/Institut Pythéas

Semblant mystérieusement reliés par leurs filaments, ces trois organismes échevelés et translucides, dont le plus grand mesure à peine 2 cm, sont des éponges d'un genre particulier.

*Lycopodina hypogaea* colonise des milieux à la fois pauvres en nutriments et plongés dans l'obscurité, où elle utilise ses filaments garnis de crochets pour capturer de petits crustacés qu'elle digère ensuite lentement.

## D'un territoire à l'autre

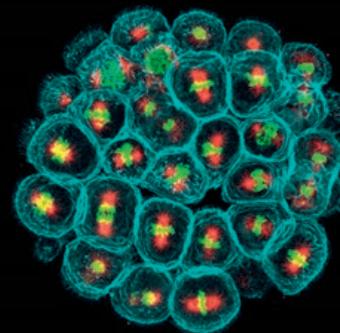
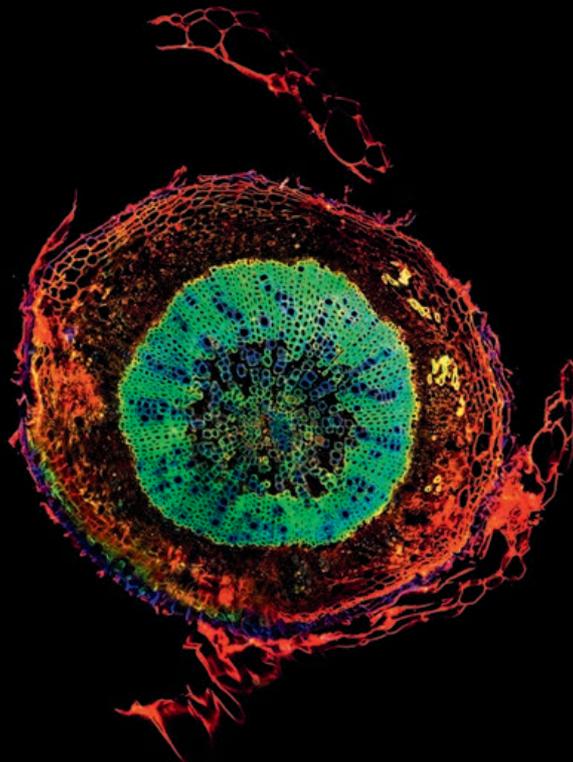
► **GWENDOLINE LEMAITRE**  
© G. Lemaitre/LESC

Culminant à plus de 2 800 mètres d'altitude, le col d'Abano est un point de passage obligé pour les brigades pastorales touches. Dès le mois de mai, celles-ci escortent les troupeaux de moutons le long de cette piste sinueuse de l'est de la Géorgie. Le but de ce dangereux périple : atteindre au plus vite les terres d'estive de la Touchétie, région ancestrale de ce peuple de bergers.

## Galaxie végétale

► **CHRISTOPHE BIOT, THOMAS BANCE, CÉDRIC LION, CLÉMENTINE SIMON, SIMON HAWKINS, CORENTIN SPIRIET**  
© C. Biot, T. Bance, C. Lion, C. Simon, S. Hawkins, C. Spriet / Plateforme TISBio/UGSF

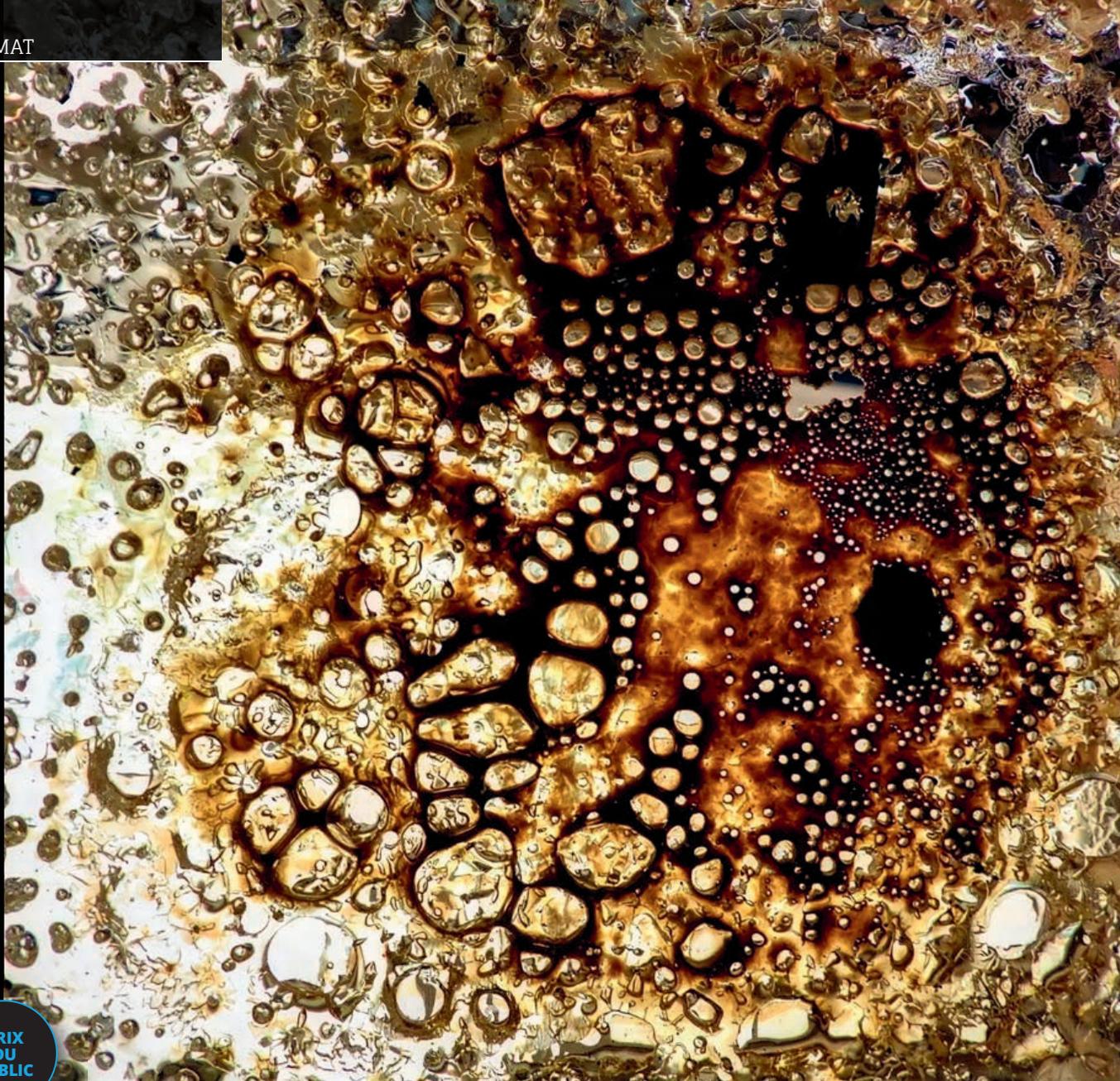
Si cette explosion de couleurs n'est pas sans rappeler la formation d'une nébuleuse planétaire, il s'agit en fait d'une section de racine d'*Arabidopsis thaliana*, modèle végétal emblématique des biologistes. Grâce à un procédé de marquage moléculaire novateur, les scientifiques sont parvenus à distinguer par fluorescence les trois composants de la lignine, substance chargée d'assurer la rigidité des plantes.



## Un modèle qui a du piquant

► **AUDE NOMMICK**  
© A. Nommick/UJM

Cette image microscopique d'un embryon d'oursin après cinq heures de développement révèle le subtil processus de la division cellulaire. Au sein de chaque cellule, dont les contours apparaissent en turquoise, les microtubules du fuseau mitotique, en rouge, tirent les chromosomes, en vert, dans des directions opposées pour former deux nouvelles cellules.



PRIX  
DU  
PUBLIC

## Charmeur de serpent magnétique

► FILIP NOVKOSKI, ÉRIC FALCON

© F. Novkoski, É. Falcon/MSC

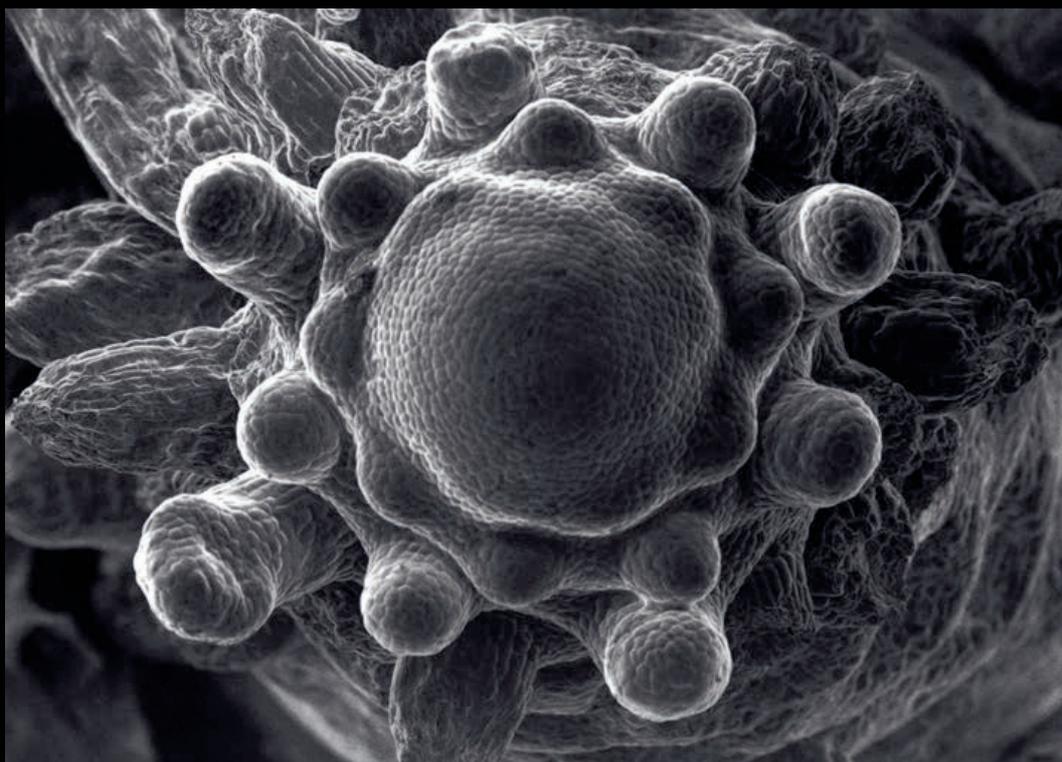
Nul tour de magie derrière les étranges oscillations de cette chaîne de billes métalliques. Le mouvement est ici induit par un champ magnétique engendré à l'aide d'un électro-aimant. En jouant sur l'intensité de la force magnétique, les chercheurs sont parvenus à compenser l'influence de la gravité. Le « serpent » de métal donne alors l'impression de danser au rythme du champ magnétique.



## Matériau en ébullition

► RITA NOHRA  
© R. Nohra/Institut PPrime

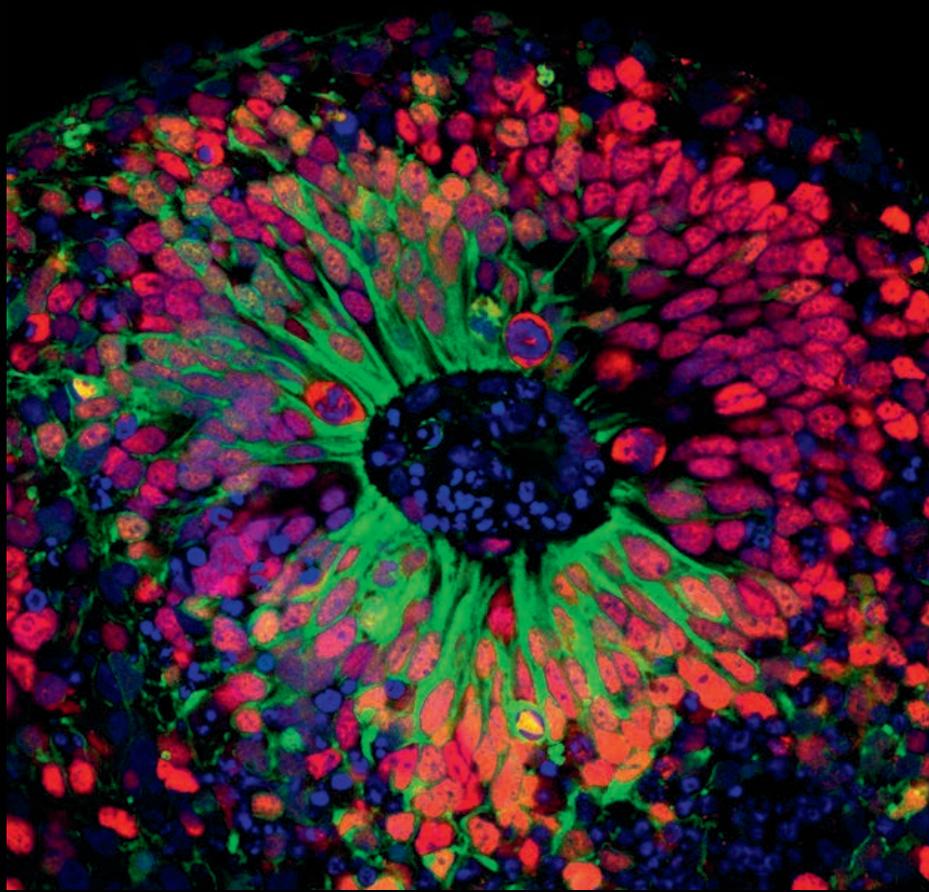
Cette croûte à l'aspect caramélisé n'est pas celle d'une crème brûlée, mais le résultat de la décomposition thermique d'un échantillon de matière plastique. Il s'agit plus précisément du phénomène de nucléation, par lequel les gaz issus de la combustion d'un polymère s'accumulent dans des bulles qui remontent à la surface du matériau où elles finissent par exploser.



## Bourgeonnement tentaculaire

► STÉPHANE HALLET, FABRICE BESNARD  
© S. Hallet, F. Besnard/RDP

Cette structure évoquant les tentacules d'un monstre marin échappé des abysses s'avère inoffensive. Il s'agit en effet de l'extrémité d'une tige d'*Arabidopsis thaliana*, employée comme plante modèle par les généticiens. L'image, grossie 300 fois grâce à un microscope électronique, dévoile le processus de floraison chez un spécimen porteur d'une mutation génétique.



>> Retrouvez l'intégralité  
des photos sur  
[www.concours-preuve-image.fr](http://www.concours-preuve-image.fr)

## Rosace cérébrale

► MARINA MALETIC  
© M. Maletic/ICM

Cette mosaïque de couleurs dévoile l'organisation des cellules souches à l'intérieur d'une rosette neurale. Nous sommes au cœur d'un organoïde cérébral, sorte de cerveau humain en miniature conçu à partir de cellules souches de patients souffrant d'une forme d'épilepsie héréditaire. Ce modèle d'étude vise à mieux comprendre le rôle d'une mutation génétique dans l'apparition de malformations corticales associées à la maladie.

A large pile of sorted waste, including plastic bags, cardboard, and other materials, is shown in the background. In the foreground, a worker wearing a white hard hat and an orange high-visibility vest stands with their back to the camera, looking at the waste. The scene is set in a recycling facility.

# *La recherche, moteur de l'économie circulaire*

Le centre de tri des déchets d'Atrion, à Mornac (Charente), reçoit plus de 800 tonnes de papier, carton, aluminium, acier... chaque semaine.

© GEORGES GOBET / AFP

La résolution de la crise mondiale des déchets ne se limite pas au recyclage. C'est l'ensemble du cycle de vie des matières, de leur extraction jusqu'à leur réutilisation, qu'il faut repenser. Recherche fondamentale, collaboration avec des industriels, start-up, le CNRS se positionne en leader sur ces sujets en pilotant un ambitieux programme de recherche pluridisciplinaire.

PAR SAMUEL BELAUD

Comment généraliser le recyclage et la réutilisation des matières dans une économie mondialisée, consommatrice de toujours plus de matériaux neufs, génératrice de milliards de tonnes de déchets très mal valorisés, et qui repose sur une extraction croissante de ressources naturelles ? Le Programme et équipements prioritaires de recherche (PEPR) d'accélération Recyclage, recyclabilité, réutilisation des matières, piloté depuis 2023 par le CNRS dans le cadre du plan France 2030, ambitionne de résoudre cette problématique d'apparence inextricable.

« Nous voulons éclairer les décisions et proposer des solutions sur le cycle complet de la matière et des déchets », explique Jean-François Gérard, chimiste au laboratoire Ingénierie des matériaux polymères<sup>1</sup> (IMP), qui coordonne le PEPR. En associant plusieurs disciplines (anthropologie, physique, chimie, géographie, etc.) qui, jusque-là, ne collaboraient pas beaucoup sur ce sujet, il s'agit d'interroger « cette circularité de façon holistique », précise-t-il. « Les recherches menées au sein de ce PEPR ont aussi vocation à avoir un impact rapide sur notre quotidien, à travers des collaborations avec des industriels ou par la création d'entreprises capables d'apporter des solutions concrètes », rapporte également le chimiste qui souligne que CNRS Innovation, la filiale de valorisation de l'organisme, est un des coordinateurs de l'action prématuration-maturation du programme.

### Derrière l'arbre du recyclage, une forêt de déchets

Les scientifiques sont unanimes vis-à-vis du recyclage : il demeure peu développé et ne peut être brandi comme une solution ultime aux problèmes des déchets. « Quand bien même nous serions en mesure de collecter et recycler 100 % de toutes les matières extraites et transformées dans le monde, leur part restera insuffisante pour couvrir une demande mondiale qui ne cesse de croître », pointe Yann Tastevin, anthropologue au CNRS, rattaché au laboratoire international de recherche Environnement, santé, sociétés<sup>2</sup> à Dakar et intégré au volet sciences humaines et sociales du PEPR.

Les chiffres sont éloquentes. Le recyclage peine à s'imposer et s'avère peu efficace pour endiguer les deux milliards de tonnes de déchets produites chaque année dans le monde. Ainsi organisé, le recyclage est condamné à « rester minoritaire », affirme Solène Touzé, ingénieure de recherche en génie des procédés au Bureau de recherches géologiques et minières, associée au PEPR. Elle pointe comme principale limite le fait que le recyclage soit organisé en « un marché basé sur la valeur du déchet ». Autrement dit, ce système dépend d'un flux continu d'ordures pour fonctionner et perdurer. « C'est ce qui explique que les décideurs et les organismes de collecte dépensent beaucoup d'argent pour le recyclage ménager, mais très peu pour tarir le déchet à la source », renchérit Jean-Baptiste Bahers, géographe au CNRS au sein du laboratoire Espaces et sociétés<sup>3</sup>, également associé au PEPR.

### Quelle valeur pour les déchets à recycler ?

Dans une économie de l'hyperconsommation et de l'usage unique, les déchets ménagers (0,7 kilogramme/habitant/jour) demeurent ceux sur lesquels le projecteur est braqué. Cette vision étriquée produit de nombreux angles morts et invisibilise une importante partie du stock mondial de déchets, à savoir ceux issus de l'agriculture (3,35 kg/hab/j), ou de l'industrie (12,7 kg/hab/j), parmi lesquels 54 millions de tonnes de déchets d'équipement électrique et électronique (DEEE) en 2019<sup>4</sup>. Or, ces derniers sont très peu recyclés, signale Solène Touzé : « Seuls le cuivre et quelques métaux précieux le sont, car ils ont une valeur marchande. Mais ils représentent moins de 25 % de la masse de métaux contenus dans ce type de produits ». C'est ainsi que l'or présent dans les cartes électroniques de nos ordinateurs ou de nos téléphones n'est recyclé « qu'au-dessus d'une teneur de 100 parties par million » (soit 0,01 % du poids). Preuve supplémentaire que le recyclage est avant tout un marché, puisqu'il n'est opérable qu'à partir d'un certain seuil de rentabilité.

Il existe donc un gisement massif de matières premières, contenu dans ce que les chercheurs dénomment l'« anthropomasse » (ou « masse anthropique »). Elle correspond aux millions de tonnes de tous les artefacts créés par l'humanité qui s'accumulent sur la planète, et pèse désormais plus que la biomasse mondiale, c'est-à-dire le poids de tout ce que la Terre compte de vivant.

1. Unité CNRS/Insa Lyon/Université Claude Bernard /Université Jean Monnet. 2. Unité CNRS/CNRST/Université Cheikh-Anta-Diop/Université Gaston-Berger. 3. Unité CNRS/Institut Agro/Le Mans Université/Nantes Université/Université d'Angers/Université Caen-Normandie/Université Rennes 2. 4. Données Banque mondiale : rapport « What a Waste ».

Avec la nécessaire décarbonation de l'économie pour parvenir à limiter le réchauffement climatique sous le seuil fixé par les accords de Paris (+1,5 °C), un paradoxe nouveau fait surface. Nos besoins en matières premières stratégiques et rares vont considérablement augmenter pour répondre à l'essor des technologies utiles à cette décarbonation. Or, à l'heure actuelle, la majorité de notre approvisionnement provient de l'exploitation minière. Mais, selon l'Agence internationale de l'énergie, cette augmentation de la demande en lithium, nickel, cobalt, manganèse et autre graphite pourrait conduire à la création d'environ quatre cents nouvelles mines d'ici à 2035, si aucune autre solution n'émerge. Alors pourquoi ne pas puiser dans l'anthropomasse ces matières rares dont nous avons tant besoin ?

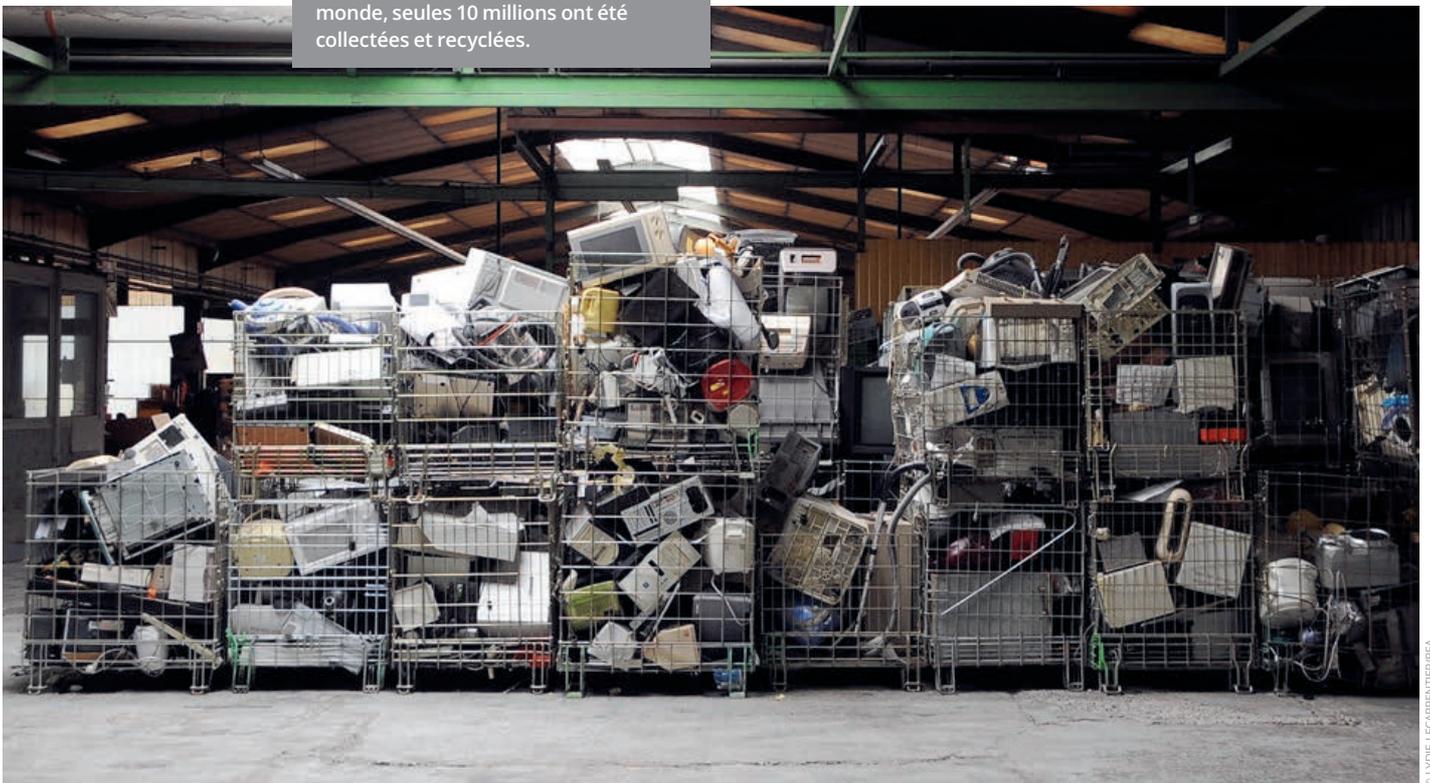
### La mine urbaine, gigantesque gisement anthropique

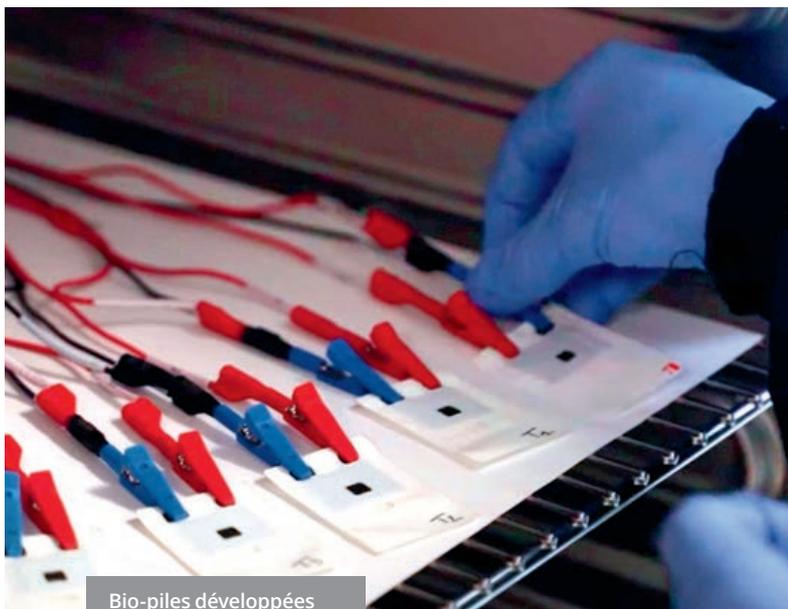
« Au sein du PEPR, nous souhaitons notamment résoudre ce paradoxe en proposant un nouvel équilibre entre l'extraction minière et l'exploitation de la mine urbaine », explique Stéphane Pellet-Rostaing, directeur de recherche CNRS à l'Institut de chimie séparative de Marcoule<sup>5</sup>. Par contraste avec les mines primaires où les ressources naturelles sont exploitées, la mine urbaine regroupe les substances minérales et métalliques contenues dans nos véhicules, nos batteries et nos DEEE. Pour les chercheurs, une approche

*“La mine urbaine recèle pas moins de 182 millions de tonnes de métaux industriels (cuivre aluminium, zinc, titane, etc.), d'après le Conseil de l'Europe.”*

sur deux fronts s'impose. Il faut, d'un côté, proposer des solutions pour réduire l'impact environnemental des procédés d'extraction existants, notamment pour la consommation en eau ou les pollutions induites par l'excavation et la séparation des matières (flottation, lixiviation, etc.). De l'autre, il s'agit de développer des alternatives à cette récolte de matières naturelles en tirant profit des matières précieuses et stratégiques contenues dans la mine urbaine. En 2021, « sur 58 millions de tonnes de DEEE fabriquées et vendues dans le monde, seules 10 millions ont été collectées et recyclées », poursuit le chercheur. Ce gigantesque gisement anthropique recèle pas moins de 182 millions de tonnes de métaux industriels (cuivre aluminium, zinc, titane, etc.), d'après le Conseil de l'Europe, et 1,5 million de tonnes de métaux technologiques et précieux (cobalt, gallium, platinoïdes, or, tantale, etc.) attendent d'être exploités.

En 2021, sur 58 millions de tonnes de DEEE fabriquées et vendues dans le monde, seules 10 millions ont été collectées et recyclées.





Bio-piles développées par la start-up BeFC.

Encore faut-il parvenir à caractériser et isoler les matières précieuses au sein des déchets dans lesquels elles sont intégrées. C'est l'objectif que le laboratoire commun Lilab, une collaboration public-privé entre l'Institut de recherche de Chimie Paris<sup>6</sup> et l'entreprise Eramet, s'efforce d'atteindre en développant des procédés de recyclage de batteries Li-ion pour produire de nouveaux matériaux d'électrode. Créé en 2019 face à l'électrification massive du parc automobile intensifiant la demande en lithium (composé au cœur des batteries des véhicules électriques), Lilab s'est lancé dans le développement de procédés afin de limiter l'impact environnemental de ces ressources depuis la mine à leur traitement en fin de vie. Pour éviter le recours au lithium, d'autres entreprises innovent, comme la start-up BeFC (voir encadré) qui propose une alternative écoresponsable aux micropiles, utilisées dans de nombreux produits.

### Le déchet, carburant d'une économie souveraine

Pour Sébastien Lagoutte, responsable de la coopération de filières à la Direction des relations avec les entreprises du CNRS, le recyclage se ne cantonne pas à un procédé ou un unique composant à forte valeur ajoutée, à l'instar des métaux critiques qu'on trouve dans les DEEE. Au contraire, « *recycler un objet, c'est recycler tout un produit dans son ensemble* », y compris ses composantes les moins rentables. Mais, dès lors, « *comment financer le recyclage intégral d'un produit, alors que toutes ses composantes n'ont pas la même valeur ajoutée ?* ». Sébastien Lagoutte évoque en ce sens l'exemple récent du projet de recherche « Décontamination et valorisation innovante des plastiques bromés issus des DEEE ». Lancé en octobre 2023, dans le cadre de France 2030, ce projet, piloté par l'entreprise Environnement Recycling, associe nombre d'acteurs publics et privés : outre cette

## BeFC: une pile de sucre et de papier

Imaginez une pile électrique, plus petite qu'une carte bancaire, qui fonctionne avec du papier, des enzymes et du sucre. Elle est biodégradable et peut alimenter des dispositifs électroniques jetables ainsi que de petits objets connectés. C'est la prouesse que BeFC, une start-up grenobloise issue notamment du Département de chimie moléculaire<sup>1</sup> a accompli en concevant une bio-pile (*bio-cell*) émettant 100 fois moins de dioxyde de carbone qu'une pile bouton classique. Les micro-piles actuelles carburent majoritairement au lithium. 97 % d'entre elles

finissent en décharge ou incinérées et génèrent une pollution massive. On en trouve dans les capteurs des emballages de colis, des dispositifs de santé, ainsi que dans de nombreux objets à usage unique.

BeFC propose une alternative écoresponsable pertinente, d'autant plus que le nombre d'objets connectés croît inlassablement et devrait atteindre 30 milliards en 2030. Les bio-piles sont constituées d'un assemblage de couches de papiers cellulose et de carbone, entre lesquelles sont immobilisées des enzymes capables d'oxyder du glucose, puis de réduire de l'oxygène pour produire un courant électrique. Cette innovation multirécompensée, fruit de la recherche académique et de plus de 30 brevets, a levé 3 millions d'euros dès son premier mois d'existence, puis 16 millions en 2023. II

1. Unité CNRS/Université Grenoble Alpes.

dernière, on compte notamment le groupe industriel Legrand, parmi les leaders mondiaux des produits électroniques, deux centres techniques industriels, trois laboratoires de recherche sous tutelle CNRS... le tout avec le soutien financier de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe). Un tel projet a pour ambition de passer d'un déchet dangereux voué à l'incinération, à des coûts très élevés, à de la valorisation matière en mobilisant les connaissances approfondies de la recherche, la volonté d'industriels convaincus et le soutien fort des pouvoirs publics.

Les matériaux, notamment ceux contenus dans les DEEE, « *sont plus complexes et hétérogènes qu'on ne le croit* », avertit Solène Touzé. Son travail consiste à déterminer la teneur des substances métalliques et minérales d'intérêt dans les déchets, puis à parvenir à les isoler, les purifier, pour enfin les réinjecter dans les processus de fabrication industrielle. Ce procédé d'échantillonnage est d'autant plus difficile que



Poudre recyclée magnétique.

© MAGREESOURCE

## MagREEsources : des aimants stratégiques

Les aimants sont des matières stratégiques qui font partie intégrante de nombreux objets du quotidien : quelques grammes dans nos ordinateurs, quelques kilogrammes dans nos voitures et plusieurs tonnes dans les éoliennes. Mais leur conception reste extrêmement dépendante du quasi-monopole chinois sur les terres rares, des minéraux indispensables à leur fabrication. Face à ce défi, la start-up MagREEsources propose une solution innovante : recycler les aimants usagés à partir des déchets électroniques de la mine urbaine.

Créée en 2020 par Erick Petit et Sophie Rivoirard, alors chercheuse à l'Institut Néel du CNRS, MagREEsources a mis au point un procédé à base d'hydrogène qui permet de récupérer les aimants des équipements électroniques en fin de vie, de les réduire en poudre et de les recomposer en nouveaux aimants. Ce procédé est co-breveté avec le CNRS. La start-up prévoit de produire 50 tonnes d'aimants par an dans son usine pilote de Noyarey, près de Grenoble, avec l'ambition d'atteindre 1 000 tonnes à terme au sein d'une nouvelle MagFactory. MagREEsources s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire et vise à renforcer la souveraineté européenne sur les matières stratégiques. Pour cela, la start-up compte sur la coopération des recycleurs et le soutien des politiques publiques. II

ces DEEE présentent une composition multiple avec des matériaux hybrides, des alliages, ou des usages dispersifs, difficiles à séparer et échantillonner.

Les DEEE ne sont pas les seuls déchets pour lesquels l'échantillonnage est un enjeu majeur. Le secteur de l'emballage (cosmétiques, santé, alimentation) est aussi confronté à des problématiques d'interactions entre des matériaux complexes et leur environnement. Le laboratoire commun IMPaCT, entre l'Institut de science des matériaux de Mulhouse<sup>7</sup> et AptarGroup, vise ainsi à formuler de nouveaux emballages plus durables, plus recyclables et biodégradables à destination des cosmétiques, de la santé ou encore de l'alimentaire. Il s'agit d'élucider, de comprendre et de maîtriser les mécanismes d'interaction entre les matériaux et leur environnement. Par ailleurs, la PME Granuloplast a développé en partenariat avec l'Institut PPrime du CNRS, spécialisé en sciences physiques et sciences de l'ingénierie, un nouvel équipement capable de séparer le polypropylène du polyéthylène haute densité, des composés souvent associés dans les objets ménagers et industriels en plastique et que les recycleurs peinaient à trier jusqu'alors. Déjà sur le marché, la start-up MagREEsources (voir encadré) propose de recycler les aimants usagés à partir des déchets électroniques de la mine urbaine.

### Vers un retour des mines en Europe ?

Porteuse d'espoir pour l'économie circulaire et la souveraineté, la mine urbaine restera cependant insuffisante pour se substituer totalement aux procédés d'extraction minière existants. « Les pays qui détiennent la matière verront la demande augmenter », analyse Stéphane Pellet-Rostaing, et les gisements naturels de métaux stratégiques dont ils disposent garderont un certain moment leur effet « mine

d'or ». Un approvisionnement souverain et durable en métaux rares appelle donc une solution en trois volets : exploiter massivement la mine urbaine ; décarboner les processus d'extraction existants ; et, concernant l'Europe, ne pas renoncer aux gisements miniers de métaux et de minéraux dont elle dispose. Cette approche permettra « d'arrêter de nous délester de la responsabilité de l'extractivisme sur d'autres pays du Sud », insiste Stéphane Pellet-Rostaing. C'est pourquoi selon lui, « la réindustrialisation passe notamment par une acceptation sociétale de nouveaux procédés industriels sur nos territoires ».

Jean-Baptiste Bahers insiste de son côté sur l'importance de se questionner en amont sur l'intérêt de ces nouvelles mines et de « remettre en cause l'engrenage productiviste et le techno-solutionnisme du cycle des matières ». Et pour Yann Tastevin, les relocalisations et « la souveraineté industrielle croissante sont des occasions sans pareilles pour repenser la circularité de l'économie et de ses déchets ».

Dans les pays du Sud que Yann Tastevin étudie, l'économie circulaire est une réalité déjà prégnante. Il mobilise l'exemple des filières de récupération de la ferraille au Sénégal où il existe des « réseaux très ramifiés de collecteurs (sondeurs de poubelles), connectés à de nombreux petits centres de tri, qui transmettent ensuite les métaux vers des dépôts de retraitement et des fonderies qui vont revaloriser la matière ». Le chercheur décrit « la vieille Renault 21 » comme l'archétype

7. Unité CNRS/Université de Haute-Alsace. 8. Unité CNRS/Université Clermont-Auvergne.

de cette circularité des déchets : importée d'Europe au début des années 2000, elle a été réparée et utilisée comme taxi pendant des centaines de milliers de kilomètres. Puis elle a été démontée et échantillonnée par des collecteurs, qui ont acheminé la ferraille vers des dépôts de retraitement et des fonderies. « Là, elle est soit réinjectée dans le marché mondial du fer, soit elle reste sur place et entre dans la composition des bétons armés que l'industrie du bâtiment et l'urbanisation galopante de ce pays réclament. »

### Circulation et traitement du déchet

Cette « économie circulaire du Sud » présente néanmoins deux angles morts : les processus de retraitement polluent massivement sur place ; et ce système est largement dépendant des déchets que produisent et exportent les pays du Nord. Ce qui pose la question de la territorialité du déchet : « quel intérêt y a-t-il à faire du circulaire dans une économie mondialisée ? », interroge Jean-Baptiste Bahers. Le géographe considère qu'appliquer le principe de proximité à la gestion des déchets pourrait permettre d'éviter certaines des externalités négatives du système actuel, notamment en termes de coûts environnementaux (transports, émanations toxiques des décharges) et de manque à gagner pour l'économie locale.

L'économie circulaire implique donc de la proximité ainsi que de la sobriété dans le mouvement des ressources qui la composent. C'est-à-dire que la production, la transformation, la distribution et la consommation des matières doivent être réduites de concert. « C'est un paradigme qui

implique une forme de décroissance matérielle », propose le géographe, puisqu'il suppose d'extraire moins, de produire moins, de faire circuler plus localement et de générer moins de déchets. La cohérence du modèle d'économie circulaire nécessite ainsi de répartir la responsabilité d'un produit et de ses déchets à l'ensemble des acteurs de son cycle de vie. Cette approche suppose d'accélérer l'écoconception des objets comme le suggère Jean-François Gérard, en « pensant recyclage dès l'amont et en anticipant les opérations de démantèlement qui seront nécessaires à séparer les composants, les trier et les remettre dans le cycle de production de futurs équipements ». Il faudrait alors « impliquer les concepteurs, les associations et les collectivités pour identifier les verrous technologiques et sociétaux auxquels nous, scientifiques, devons répondre par des travaux de recherche », poursuit-il.

Et par-delà le recyclage mécanique d'un produit, le recyclage chimique (avec une meilleure extraction des matériaux) pourrait mener à un recyclage « à l'infini ». Des leviers technologiques sont encore à lever et de nombreuses start-up ont investi le sujet. On retrouve par exemple, au sein du laboratoire commun Popba, entre l'Institut de chimie de Clermont-Ferrand<sup>8</sup> et le groupe Barbier, des chimistes et des ingénieurs industriels qui mesurent l'impact de contaminants sur le comportement photochimique de films polymères formulés à partir de déchets plastiques recyclés. Dans la même veine, le projet SuperPE, mené conjointement entre plusieurs acteurs dont le laboratoire IMP, le groupe

À Dakar, au Sénégal, l'économie circulaire est une réalité : des voitures du monde entier servent de taxis avant d'être démantelées par les ferrailleurs.





Un technicien remplit des flacons avec une solution liquide pour séparer les terres rares des déchets miniers au Bureau de recherches géologiques et minières, à Orléans, le 22 juin 2021.

© CHRISTOPHE ANCHAU/BAULT / AFP

## Recyc'Elit détricote les textiles

Chaque année, des millions de tonnes de textiles sont jetés ou incinérés, faute de pouvoir être recyclés. En cause notamment : le caractère multi-matière de ces fibres (mélanges de coton, élasthane, polyester, etc.), qui rend leur séparation difficile. Recyc'Elit, jeune pousse française, a mis au point un procédé innovant pour isoler chimiquement le polyester de tout autre matériau fibreux, et ainsi réduire l'impact environnemental de l'industrie textile – qui pèse encore pour 11 % des émissions de gaz à effet de serre mondiales –, mais également valoriser des textiles multi-matière et les transformer en nouveaux produits, comme des fibres ou des films.

Recyc'Elit est née de l'expérience de Raouf Medimagh, chercheur passionné par le recyclage chimique, qui a développé un procédé breveté permettant de dissoudre les polyesters à basse température et basse pression, et de les récupérer sous forme de granulés. Une collaboration avec le laboratoire Ingénierie des matériaux polymères<sup>1</sup> et le Laboratoire d'automatique, de génie des procédés et de génie pharmaceutique<sup>2</sup> a permis de l'optimiser et d'aider au changement d'échelle en vue de son industrialisation. En industrialisant son procédé, Recyc'Elit souhaite contribuer à l'essor de l'économie circulaire et à la relocalisation des filières de production textile, aujourd'hui majoritairement asiatiques. II

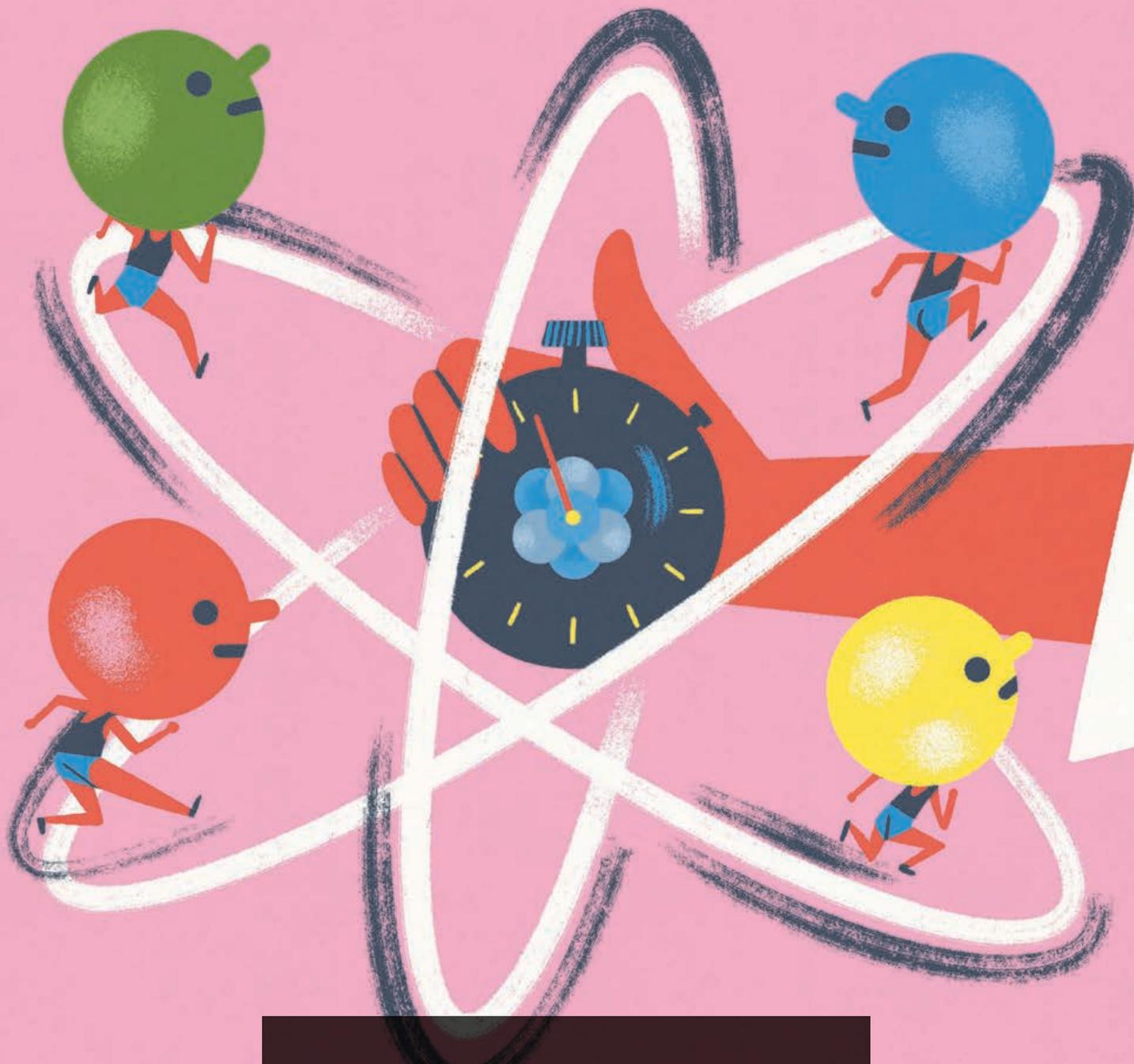
1. Unité CNRS/Insa Lyon/Université Claude Bernard/Université Jean Monnet.
2. Unité CNRS/Université Claude Bernard.

Barbier et le Centre technique industriel de la plasturgie et des composites, avec le soutien de Citeo<sup>9</sup>, ambitionne de préserver la qualité des plastiques alimentaires après le recyclage via un procédé utilisant le CO<sub>2</sub> supercritique. Déjà sur le marché, la start-up Recyc'Elit (voir encadré) a mis au point un procédé innovant pour isoler chimiquement le polyester de tout autre matériau fibreux afin de mieux recycler les textiles. Plus généralement, « *notre objectif est de déterminer comment mettre la bonne matière au bon endroit et à bon escient* », résume le directeur du PEPR. Pour ce faire, les chimistes impliqués proposent des procédés d'extraction de la matière moins polluants, les physiciens développent des méthodes de tri automatique des composés métalliques par rayons X, les géographes réfléchissent à la réduction de la circulation des matières, etc.

La force de tous ces projets réside dans leurs dimensions collaboratives, analyse Solène Touzé : « *Nous ne travaillons plus chacun dans notre coin. Les projets du PEPR sont interdisciplinaires et menés entre des laboratoires de tout le pays* ». Cela permet d'avoir « *une vision globale du cycle de vie des matières* » et donnera du poids aux solutions techniques et aux recommandations que les chercheurs formuleront d'ici la fin du programme, en 2030. CNRS Innovation, qui a déjà accompagné de nombreuses start-up dans le domaine du recyclage, ainsi que les Sociétés d'accélération du transfert de technologies suivent de près les avancées des travaux du PEPR pour accompagner la prématuration et la maturation d'innovations susceptibles de rencontrer des marchés. Une ambition porteuse d'espoir pour l'avènement d'une économie véritablement circulaire et pour une meilleure gestion des déchets, qui commencent à peser lourd sur les épaules de l'humanité. II

9. Le projet regroupe également le groupe Albéa, le Centre technique de la conservation des produits agricoles et le centre d'expertise Innovation Fluides Supercritiques.

# EN ACTION



*De la physique attoseconde  
à la surface des astéroïdes, la science  
explore de nouveaux territoires.*



# Un zoo fossile d'un demi-milliard d'années

VIVANT  TERRE

**PALÉONTOLOGIE** Un nouveau gisement de fossiles découvert au pied de la montagne Noire, au sud du Massif central, apporte un témoignage inédit sur la biodiversité marine d'il y a un demi-milliard d'années.

PAR GRÉGORY FLÉCHET

Dans le sud-est des Rocheuses canadiennes, la faune des schistes de Burgess a acquis une renommée internationale dans le milieu de la paléontologie. Ces dépôts fossiles à flanc de montagne offrent un témoignage unique de l'explosion cambrienne, véritable foisonnement de vie animale survenu il y a plus d'un demi-milliard d'années dans les océans du globe. De l'autre côté de l'Atlantique, Cabrières est en passe de devenir aussi célèbre que le site fossilifère nord-américain. En 2018, ce village de l'Hérault situé sur les contreforts méridionaux de la montagne Noire a été le théâtre d'une découverte exceptionnelle : un vaste ensemble d'espèces fossilisées datant de l'Ordovicien inférieur (- 485 à - 477 millions d'années), soit la période géologique qui succède immédiatement au Cambrien (- 541 à - 485 millions d'années).

Les tout premiers fossiles ont été exhumés par Éric et Sylvie Monceret, un couple de paléontologues amateurs qui explore depuis de nombreuses années les affleurements géologiques de la région du Minervois.

## Un gisement fossilifère exceptionnel

À l'instar du gisement fossilifère très réputé des Fezouata, au Maroc, celui de Cabrières appartient à la catégorie des « *Konservat-Lagerstätten* ». En paléontologie, ce terme d'origine allemande désigne les dépôts fossiles particulièrement bien préservés. « *De tels assemblages contiennent non seulement les parties dures des animaux, comme les squelettes d'arthropodes ou les coquilles de bivalves, mais aussi des parties molles de nature organique qui apparaissent parfois dans la roche sous forme d'empreintes*, détaille Bertrand Lefebvre, chargé de recherche CNRS au Laboratoire de géologie de

1. Unité CNRS/ENS Lyon/Université Claude Bernard. 2. "The Cabrières Biota (France) provides insights into Ordovician polar ecosystems", Farid Saleh et al., *Nature Ecology and Evolution*, 9 février 2024.

► **Reconstitution artistique de la biodiversité marine de la montagne Noire à l'Ordovicien inférieur (- 485 à - 477 millions d'années).**

Lyon : Terre, planètes, environnement<sup>1</sup> (LGL-TPE). Contrairement à un gisement fossilifère classique qui se compose uniquement de restes minéralisés, un "Lagerstätte de conservation" offre donc un très bon aperçu de la structure originelle des communautés d'espèces. »

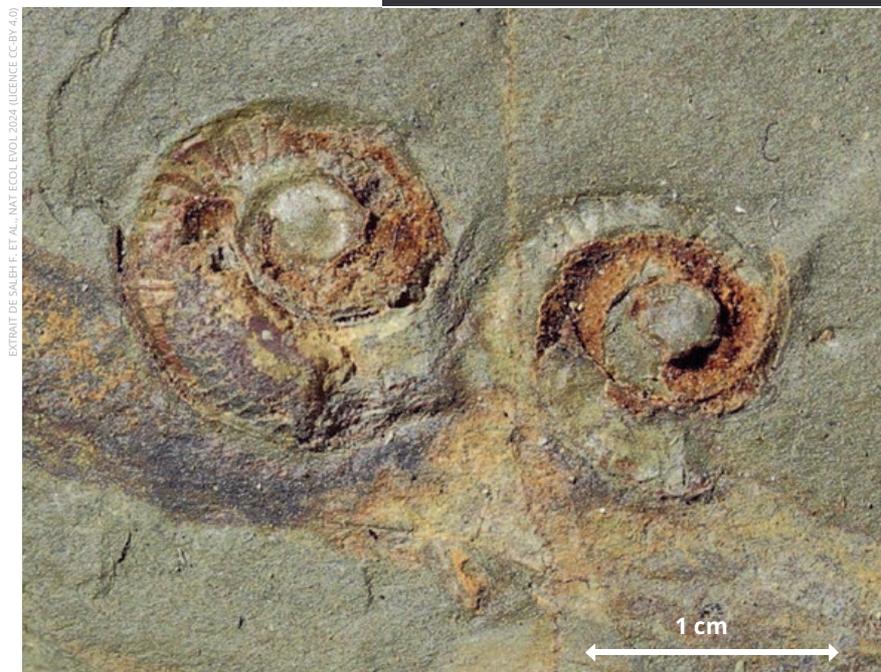
Sur l'ensemble de la planète, les dépôts de ce genre représentent à peine 1 % des sites fossilifères. En ce qui concerne l'Ordovicien inférieur, les gisements en mesure de décrire la faune et la flore des écosystèmes marins de cette époque géologique se comptent même sur les doigts d'une main. À l'aune de cette rareté, on mesure toute la valeur scientifique d'un gisement comme celui de Cabrières. Les campagnes de fouilles organisées depuis 2018 ont déjà abouti à la découverte de plus de 400 fossiles dont la taille s'échelonne entre quelques millimètres et plusieurs centimètres<sup>2</sup>. « Outre la présence d'arthropodes archaïques tels que les trilobites, de brachiopodes, de cnidaires et de mollusques gastéropodes que l'on retrouve tous dans la formation géologique des Fezouata, le biote de Cabrières se singularise par une abondance d'éponges de grande taille et d'algues ramifiées », souligne Christophe Dupichaud, doctorant au LGL-TPE qui a participé à la dernière étude de terrain du site, en octobre 2023.

### Quand l'Hérault voisinait avec le pôle Sud

La présence en nombre d'éponges et de macro-algues dans le gisement de Cabrières trahit son implantation géographique à de hautes latitudes durant l'Ordovicien inférieur. Sous l'action de la dérive des continents, l'actuel département de l'Hérault se situait en effet tout près du pôle Sud à cette époque. Au même moment, la Terre est confrontée à une phase de réchauffement intense ayant débuté vers la fin du Cambrien. La température moyenne des océans est alors supérieure de 15° C à celle d'aujourd'hui.

La biodiversité dont témoigne le dépôt fossile de Cabrières accrédite donc un peu plus l'hypothèse selon laquelle il n'y a pas eu d'extinction à grande échelle des espèces vers la fin de l'époque cambrienne, mais plutôt des disparitions ponctuelles dans les zones océaniques les plus impactées par le réchauffement comme les régions tropicales et tempérées. « Les pôles ayant été moins affectés par la hausse des températures, ils ont pu servir de refuge aux animaux et végétaux qui furent capables de migrer vers ces hautes latitudes », complète Christophe Dupichaud.

Au travers de collaborations avec des chercheurs de l'Institut des sciences de la Terre de Lausanne et de l'université Paris-Saclay, certains des fossiles collectés dans le gisement de la montagne Noire ont pu être examinés avec des technologies de pointe. La surface de cinq spécimens d'arthropodes bivalves a tout d'abord été scrutée à l'aide d'un microscope électronique à balayage de dernière génération. Deux autres échantillons contenant des arthropodes bivalves, des brachiopodes et des éponges ont en outre été auscultés en profondeur grâce au



► Des gastéropodes figurent parmi les espèces observées.

Synchrotron Soleil. En offrant la possibilité de déterminer la géométrie des cristaux de fer présents dans les fossiles, ces analyses nous ont permis de confirmer qu'un processus de fossilisation extrêmement rapide avait abouti à la minéralisation de certains tissus mous de ces organismes », explique le doctorant en paléontologie.

### Contextualiser le processus de fossilisation

Par ailleurs, en dépit des campagnes de fouilles successives, l'équipe scientifique a constaté que certains groupes d'animaux emblématiques de l'Ordovicien étaient quasiment absents du gisement de Cabrières. C'est notamment le cas des échinodermes, dont on dénombre seulement cinq spécimens, alors qu'ils constituent les deux tiers des taxons identifiés sur le site des Fezouata.

Pour Bertrand Lefebvre, cette rareté pourrait aussi refléter la localisation de Cabrières dans le milieu marin lorsque débuta le processus de fossilisation : « Sachant que les éocrinoides, qui constituent l'essentiel des échinodermes des Fezouata, se rencontrent soit près du rivage soit à une centaine de mètres de profondeur, le biote de Cabrières se situait peut-être à une profondeur intermédiaire, dans une sorte de "no man's land" où les éocrinoides sont généralement absents. » La prochaine campagne de fouilles prévue en avril permettra sans doute d'éclaircir ce mystère, et peut-être d'élucider les circonstances dans lesquelles cette communauté d'espèces unique s'est retrouvée piégée dans les sédiments marins de l'Ordovicien inférieur. II

# La physique à la conquête de l'infiniment bref

© THORSTEN NAESER/ LAP/ MAX PLANCK INSTITUTE OF QUANTUM OPTICS

## MATIÈRE

**PHYSIQUE** Mise à l'honneur par le prix Nobel 2023, la physique attoseconde s'attaque à une nouvelle dimension de l'infiniment petit : le temps. À la clé, la possibilité de visualiser et de contrôler la dynamique des électrons et des réactions chimiques entre atomes. **PAR SEBASTIÁN ESCALÓN**

Le 3 octobre dernier, la physicienne Anne L'Huillier donnait son cours de physique à l'université de Lund, en Suède. À la pause, elle ralluma son portable pour voir si elle avait reçu de nouveaux messages. C'est alors qu'elle apprît la nouvelle : elle venait d'obtenir le prix Nobel de physique conjointement avec le Français Pierre Agostini et l'Austro-Hongrois Ferenc Krausz. Elle était la cinquième femme à recevoir cette distinction, la seconde française après Marie Curie. Mais avant de se laisser emporter par l'émotion, Anne L'Huillier avait quelque chose à terminer : son cours. Ce qu'elle fit, en s'excusant auprès de ses étudiants de ce qu'elle terminerait un peu plus tôt que d'habitude.

Avec ce Nobel, l'Académie royale des sciences de Suède récompensait les méthodes expérimentales ayant permis la production d'impulsions de lumière d'une durée de

l'ordre de l'attoseconde, soit un milliardième de milliardième de seconde. Comme aiment le rappeler les chercheurs, il y a autant d'attosecondes dans une seconde que de secondes depuis le Big Bang. Ces impulsions ont ouvert un nouveau champ de recherche : pour la première fois, les scientifiques disposaient d'un outil pour explorer des phénomènes ultrarapides, et en particulier la dynamique des électrons.

« Quand vous regardez la matière, c'est le cortège électronique qui détermine la position des atomes, explique Valérie Blanchet, physicienne au Centre lasers intenses et applications (Celia)<sup>1</sup>. La structuration de la matière, ce sont les électrons qui la déterminent. » D'où l'immense intérêt de se focaliser sur ces minuscules particules chargées négativement. La physique attoseconde apporte la dimension « temps » aux sciences de l'infiniment petit :

► **Génération d'impulsions laser attosecondes à l'Institut Max Planck d'optique quantique (Garching, Allemagne).**

ce n'est pas seulement l'état initial et l'état final d'un système qu'elle permet d'observer, mais aussi la transition de l'un à l'autre. Et ce n'est pas tout : les impulsions attosecondes permettent aussi de contrôler la dynamique des électrons dans la matière. Porté pendant trente ans par un groupe réduit d'opticiens et de physiciens, le domaine « atto » intéresse désormais de nombreux autres champs scientifiques, de la chimie à la médecine en passant par la biologie.

### Mystérieuses harmonies

Tout a commencé en 1988, lorsqu'une jeune physicienne récemment embauchée par le Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), Anne L'Huillier, braque un laser sur des atomes d'argon. L'équipe dont elle fait partie détient une réputation mondiale dans l'étude des interactions lumière-matière. Mais cette fois-ci, au lieu de regarder l'effet de la lumière sur les atomes, elle décide de regarder les photons issus de cette interaction. « *C'était de la pure curiosité d'expérimentatrice. Aucun théoricien ne lui avait suggéré de regarder cela* », explique Philippe Balcou, directeur de recherche au Celia, qui, un an après cette expérience, est devenu le premier étudiant en thèse d'Anne L'Huillier. La physicienne observe alors quelque chose d'inattendu : le laser induit l'émission de faisceaux de photons ultraviolets, dont les fréquences sont des multiples de celle du laser, appelées « harmoniques ». Mais leur présence était alors inexplicable, d'autant plus que l'intensité de ces harmoniques, au lieu de retomber rapidement, atteint un plateau qui se prolonge dans l'extrême ultraviolet et même au-delà. Anne L'Huillier décide dès lors de se consacrer à l'étude de ce phénomène.

« *Au début, personne ne comprenait rien à ces harmoniques* », admet Richard Taïeb, chercheur au Laboratoire de chimie physique - matière et rayonnement<sup>2</sup>, qui fut l'un des premiers théoriciens à travailler avec Anne L'Huillier. Il faudra d'ailleurs attendre cinq ans pour que des chercheurs en expliquent l'origine. Lorsque les électrons sont excités par le laser et « arrachés » de l'atome (qui est ainsi ionisé), ils s'échappent de leur cœur. Mais lorsque la phase de la lumière laser s'inverse, l'électron est brusquement ramené vers le noyau atomique ionisé, et peut alors se recombinaison avec ce dernier. Pour se débarrasser du surplus d'énergie qu'il a accumulé lors de son excitation par le laser, il émet un photon ultraviolet.

Très vite, ces harmoniques suscitent l'intérêt des expérimentateurs et des théoriciens. « *L'une des motivations pour les étudier, c'était d'avoir une source de lumière cohérente dans l'UV extrême* », se souvient Richard Taïeb. En effet, ces faisceaux ne partent pas dans tous les sens : ils sont émis exactement dans la direction du laser. « *On avait*

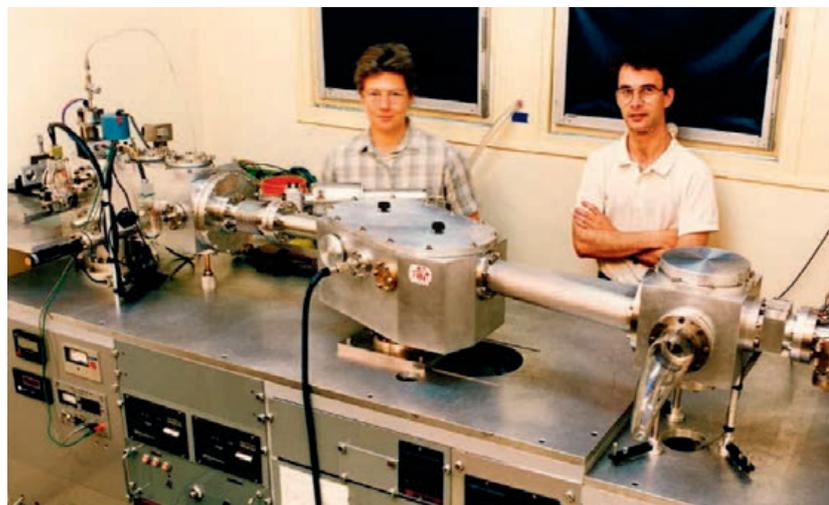
*là une sorte de synchrotron de poche* », s'amuse Philippe Balcou. Au milieu des années 1990, les physiciens comprennent que les harmoniques sont en phase. À intervalles réguliers, toutes les fréquences s'additionnent et forment une impulsion extrêmement brève. Il ne reste plus qu'à trouver le moyen de mesurer sa durée. C'est Pierre Agostini, inspiré par les travaux des théoriciens Richard Taïeb, Valérie Vénier et Alfred Maquet qui détermine pour la première fois la durée d'une impulsion : 250 attosecondes. Nous sommes alors en 2001, la physique « atto » vient de naître.

Les deux décennies suivantes ont vu l'apparition de lasers plus performants. « *Lorsqu'on faisait les premières caractérisations des harmoniques, au début des années 1990, nous disposions d'un laser qui tirait un coup par minute, rappelle Philippe Balcou. Aujourd'hui ils tirent plus de 10 000 fois par seconde.* » D'autant que l'amélioration des lasers s'est conjuguée à une meilleure maîtrise de la génération d'impulsions attosecondes. L'heure était désormais à l'exploitation de ce formidable outil.

### Libérer l'électron

L'un des exploits les plus remarquables de la science attoseconde a été l'observation de l'effet photoélectrique. Décrit par Einstein en 1905, il consiste en l'éjection d'un électron au moment où un atome absorbe un photon d'une énergie particulière. En 2010, Ferenc Krausz montre que cette éjection n'est pas immédiate : l'électron met une poignée d'attosecondes à s'échapper de l'emprise du noyau atomique. Ce temps d'éjection varie aussi en fonction des caractéristiques de l'électron excité. Qu'est-ce qui retarde ces électrons ? Qu'est-ce qui distingue les différents électrons d'un atome ? Comment ceux-ci s'influencent les uns les autres ? Les chercheurs ont enfin les outils expérimentaux et théoriques pour aborder ces questions. « *Grâce aux impulsions attosecondes, on peut*

► **Anne L'Huillier et Philippe Balcou posent derrière le spectromètre qui a permis de mesurer le spectre des harmoniques d'ordre élevé, au CEA-Saclay, en 1992.**



© CEA-LUDYL

1. Unité CNRS/CEA/Université de Bordeaux. 2. Unité CNRS/Sorbonne Université.

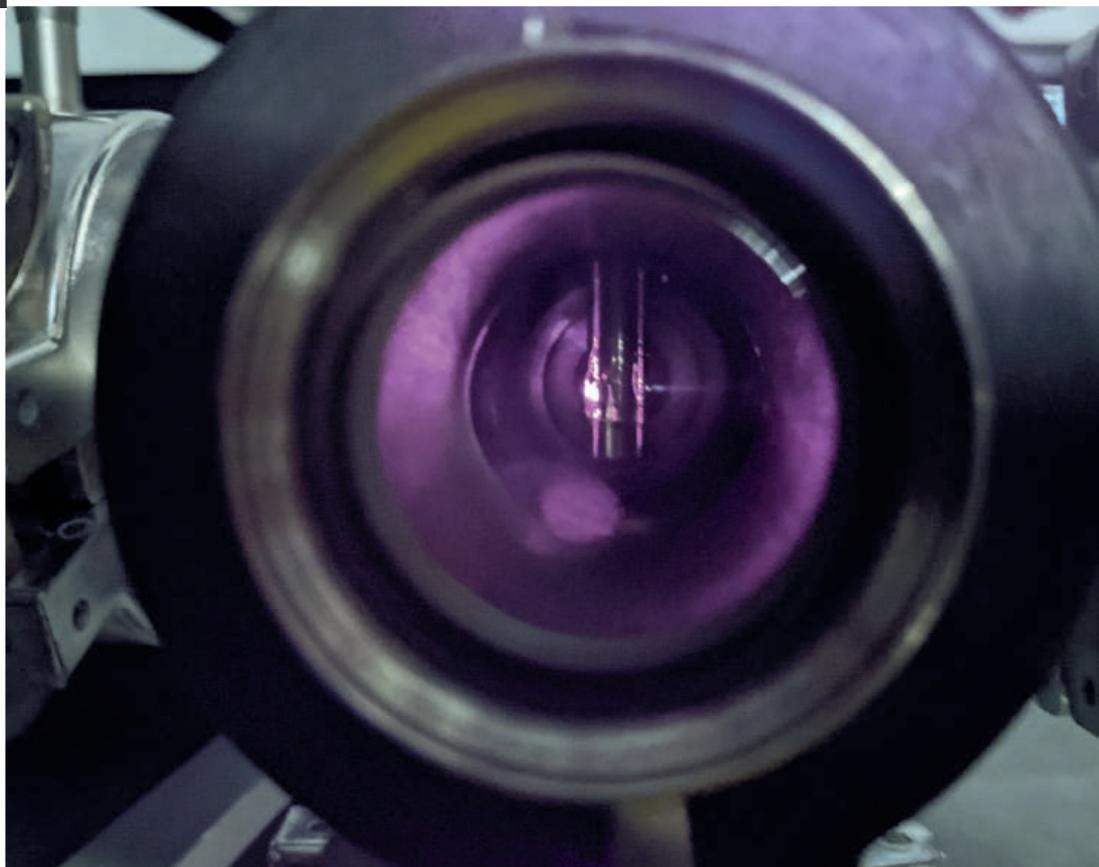
▲ Cellule de gaz argon où sont générées les harmoniques d'ordre élevé sur l'installation laser femto, à l'Institut des sciences moléculaires d'Orsay.

commencer à explorer les interactions entre les électrons, ce que l'on appelle aussi corrélation électronique, de façon résolue dans le temps », explique Valérie Blanchet.

Ces interactions entre électrons conditionnent les interactions des atomes entre eux, notamment lors des réactions chimiques. Celles-ci commencent toujours par un réarrangement électronique : le mouvement des noyaux ne survient que bien plus tard. « *Ce qui me plaît dans la physique attoseconde, c'est qu'on se situe aux premiers instants des phénomènes* », affirme Lou Barreau, chercheuse à l'Institut des sciences moléculaires d'Orsay<sup>3</sup>. Lors de ses expériences, elle utilise des impulsions attosecondes pour ioniser différentes molécules. « *J'essaie de comprendre l'influence du milieu sur l'éjection des électrons. Est-ce que la présence d'un groupe méthyle ou d'un cycle aromatique influence le temps d'ionisation, par exemple.* »

En se plaçant en amont de la chimie, les chercheurs voudraient contrôler, grâce aux impulsions attosecondes, le déroulement des réactions chimiques. Prenons une molécule que l'on voudrait casser à un endroit bien précis afin d'obtenir un certain produit. « *L'idée est d'exciter des électrons dans une molécule pour créer une onde électronique. Cette onde se propagerait le long de la molécule et affaiblirait certaines liaisons atomiques* », explique Lou Barreau. Les impulsions attosecondes serviraient ainsi à « graver » sur la molécule des lignes de découpe avant la réaction chimique afin d'obtenir les produits escomptés. Cependant, beaucoup de travail sera nécessaire avant de mettre à profit ces nouvelles possibilités. « *Il y a déjà des preuves de principe sur des acides aminés, mais il s'agit pour l'instant d'ions. On n'arrive pas encore à le faire sur des molécules neutres* », tempère Lou Barreau.

Un type de molécule bien particulier a beaucoup intéressé les chercheurs des sciences attosecondes. Il s'agit des molécules chirales. Chaque molécule chirale a deux versions, deux énantiomères, qui, comme nos deux mains, sont parfaitement identiques si ce n'est qu'elles sont l'image dans un miroir l'une de l'autre. Depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, on sait que ces molécules énantiomères ont la propriété de modifier dans deux sens opposés la polarisation d'une lumière polarisée. C'est ce qu'on appelle



© LOU BARREAU

l'activité optique. L'équipe HXUV du Celia a ionisé des molécules chirales et montré que le temps que mettent les électrons à s'échapper de la molécule et leur direction d'éjection dépendent du sens de polarisation de la lumière ainsi que de l'énantiomère.

### L'inexorable expansion du domaine attoseconde

L'autre intérêt de la physique attoseconde est son utilité pour d'autres disciplines. « *Avec les progrès de la physique attoseconde, on peut maintenant étudier des objets plus complexes qui nous connectent à d'autres domaines* », explique Franck Lépine, chercheur à l'Institut lumière matière<sup>4</sup>. Parmi ces domaines, l'astrophysique. « *Les molécules de milieu interstellaires réagissent aux rayonnements ionisants présents dans l'espace* », précise le chercheur. Afin de mieux comprendre la relation entre la chimie interstellaire et le rayonnement ionisant, son équipe a utilisé des impulsions attosecondes dans l'extrême ultraviolet pour étudier la stabilité de molécules carbonées, prémisses de l'apparition de la vie dans l'Univers.

Les méthodes attosecondes lui permettent aussi d'étudier l'ADN et les protéines. « *On s'intéresse aux dommages que produisent les rayonnements énergétiques sur la matière vivante. Comprendre les premiers instants de ces processus pourrait permettre d'imaginer de nouvelles façons de nous protéger de ce rayonnement* », précise Franck Lépine, qui développe en collaboration avec Ferenc Krausz une nouvelle méthode de diagnostic médical précoce. « *Grâce à des impulsions attosecondes à large spectre, on peut détecter la présence infime de certaines molécules signatures de cancer dans des fluides biologiques et ainsi prédire très en amont l'apparition de la maladie* », explique le physicien.

3. Unité CNRS/Université Paris-Saclay. 4. Unité CNRS/Université Claude Bernard Lyon 1.

## En bref

### CONSEIL PRÉSIDENTIEL DE LA SCIENCE

Un nouveau Conseil présidentiel de la science, annoncé par le président Emmanuel Macron le 7 décembre 2023, vise à faire le lien entre l'exécutif et le monde de la recherche. Il s'inscrit dans la foulée du rapport Gillet, remis à la ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche en juin 2023. Dix des douze membres nommés relèvent du CNRS ou sont liés à l'organisme.

>> Voir <https://shorturl.at/iGHX9>

### LE CNRS SE DÉSABONNE DE SCOPUS

Le 1<sup>er</sup> janvier 2024, le CNRS s'est désabonné de la base bibliographique Scopus d'Elsevier. Ce geste s'inscrit dans l'engagement en faveur de la science ouverte initié par l'organisme depuis plusieurs années. Dès que des solutions ouvertes seront suffisamment abouties, le CNRS cessera d'avoir recours aux bases bibliographiques commerciales. En attendant, l'abonnement au Web of Science de Clarivate Analytics est maintenu.

>> Voir <https://shorturl.at/efuD7>

### TROISIÈME VAGUE ERC PROOF OF CONCEPT 2023

Le CNRS est l'institution hôte de trois nouvelles bourses du Conseil européen de la recherche (ERC). Les lauréats CNRS des ERC Proof of Concept vont bénéficier d'un budget maximal de 150 000 euros sur 18 mois au plus pour valoriser les résultats de leur recherche, développer leur potentiel d'innovation et se rapprocher d'un marché. Sur l'ensemble de l'année 2023, le CNRS, avec dix projets, héberge 50 % des ERC Proof of Concept français.

>> Voir <https://shorturl.at/euNZ4>

### GROUPEMENTS DE RECHERCHE

Rassemblant les communautés scientifiques autour de thèmes communs et offrant un cadre privilégié d'échanges au profit de la production de connaissances, les Groupements de recherche (GDR) sont des objets uniques adoptés par toute la communauté scientifique. En 2024, le CNRS en soutient 195, toutes disciplines confondues dont 32 renouvelés cette année et 20 nouvellement créés.

>> Voir <https://shorturl.at/aixP6>

### LA MAISON FRANÇAISE D'OXFORD CRÉE SA FONDATION

La Maison française française d'Oxford (MFO), Unité mixte des instituts de français de recherche à l'étranger (Umifre), spécialisée en sciences humaines et sociales, s'est dotée en février d'une fondation, sous égide de la Fondation CNRS. Elle devrait notamment permettre à la MFO de soutenir la mobilité des étudiants français et plus largement des étudiants francophones.

Les chercheurs pensent qu'il faudra encore plusieurs années avant que l'attoseconde entre dans la vie de tous les jours. « Je compare le domaine attoseconde à celui des lasers. Le concept de laser a été posé au début du XX<sup>e</sup> siècle. Il a ensuite fallu cinquante ans pour construire le premier laser, puis trente ans de plus pour qu'il révolutionne notre vie au quotidien avec la lecture de code barre, le CD ou la chirurgie laser », relève Fabrice Catoire, théoricien des cohérences à l'échelle attoseconde au Celia. Mais même si l'attoseconde tarde à entrer dans la vie quotidienne, il est fort probable qu'elle investira rapidement la boîte à outils des scientifiques. « Il suffit de voir l'évolution du domaine femtoseconde ou picoseconde depuis les années 1980 et 1990, observe Franck Lépine. À partir de choses très fondamentales, on est passé à des applications dans l'industrie, la chirurgie, la spectrométrie ultrarapide. On parle de femtochimie ou femtomagnétisme. Pour l'atto, on en est aux preuves de concept, mais peu à peu on va essayer vers d'autres domaines. » Patience donc : les avancées scientifiques ne se font pas en quelques attosecondes. ||

## Laserix et l'exception française

La série de Nobels de physique français de ces dernières années (Gérard Mourou, Alain Aspect, Pierre Agostini, Anne L'Huillier) ne doit rien

au hasard. Leur carrière se caractérise par une utilisation intensive de lasers. Or, depuis les années 1960, la France se distingue par sa grande maîtrise de cet instrument. Il existe une exception française en matière de lasers, faite de techniciens, ingénieurs et chercheurs au top, de plateformes d'excellence et d'entreprises leaders mondiales du secteur telles que Thales et Amplitude.

Laserix, la plateforme laser de l'université Paris-Saclay, fait partie de cette *success story*. Depuis 2003, Laserix offre aux chercheurs de diverses disciplines, sur le modèle de la résidence d'artistes, des sources lasers femtosecondes d'une exceptionnelle qualité. Sa spécialité est la génération d'impulsions dans les très courtes longueurs d'onde, l'UV extrême, et « fournit une source 10 à 100 fois plus énergétique que les sources harmoniques à ces longueurs d'onde », affirme Sophie Kazamias, directrice scientifique de la plateforme depuis 2015.

Parmi les recherches menées grâce à Laserix, il y a l'accélération laser-plasma. Cette technique permet d'accélérer des électrons, avec des champs accélérateurs 1 000 fois supérieurs à ceux des accélérateurs actuels, jusqu'à des vitesses proches de celle de la lumière. À cette vitesse, des phénomènes relativistes se manifestent, comme une augmentation notable de la masse des particules. Ce domaine est sans doute parmi les plus « chauds » de la physique. « Un jour, l'accélération laser-plasma sera l'objet d'un Nobel. Et parmi le groupe de scientifiques récompensés, il y aura sans doute un Français », prédit Sophie Kazamias. ||

# La cryptographie face à la menace quantique



© BENJAMIN FAULLET

NUMÉRIQUE

**ENTRETIEN** Le cryptologue Benjamin Wesolowski nous explique comment la cryptologie

algorithmique renforce les méthodes cryptographiques afin de les rendre résistantes face à l'avènement éventuel de l'ordinateur quantique.

PROPOS RECUEILLIS PAR BASTIEN CONTRERAS

**Comment le mathématicien que vous êtes en est-il venu à la cryptologie ?**

**Benjamin Wesolowski** 1. D'aussi loin que je me souviens, j'ai toujours aimé les mathématiques. J'ai donc suivi cette passion, qui m'a conduit à intégrer l'École polytechnique fédérale de Lausanne où j'ai passé ma licence, mon master, puis mon doctorat. C'est là que j'ai vraiment découvert la cryptologie, une discipline qui a tout de suite séduit l'amoureux des mathématiques que j'étais (et que je suis toujours) ! Mais cette histoire a peut-être commencé bien avant : enfant, j'adorais les jeux d'espion dans les magazines qui consistaient à déchiffrer un texte codé.

Aujourd'hui, je travaille sur un projet<sup>2</sup> qui a pour but d'utiliser des théories mathématiques déjà connues mais jusqu'ici peu employées dans le domaine de la cryptographie. Ces outils peuvent apporter une nouvelle vision à la discipline et contribuer au développement de nouveaux fondements rigoureux, notamment pour estimer la complexité des problèmes.

La cryptographie a connu une avancée majeure dans les années 1970, lorsque les cryptographes ont commencé à puiser dans des théories mathématiques jusqu'alors inexploitées, comme la théorie des nombres. Cette avancée majeure, c'est la cryptographie à clé publique. La discipline est aujourd'hui confrontée à de nouveaux défis, posés notamment par les

ordinateurs quantiques. Les problèmes deviennent de plus en plus complexes, et l'exploration mathématique joue un rôle de plus en plus important.

**Quelle est la différence entre cryptographie à clé publique et cryptographie à clé secrète ?**

**B. W.** La cryptographie à clé secrète est la méthode la plus ancienne. L'idée est simple : deux interlocuteurs veulent communiquer en secret sur un canal non sécurisé (tous leurs messages peuvent être interceptés). Ils se mettent d'accord sur un procédé de chiffrement, permettant de transformer un message en un texte inintelligible, envoyé sur le canal, puis déchiffré par le destinataire. Pour que seul le destinataire puisse déchiffrer le message, les interlocuteurs se sont au préalable mis d'accord sur un ingrédient secret permettant le chiffrement et le déchiffrement : la clé secrète. Sans elle, un espion ne peut pas lire le texte intercepté.

La cryptographie à clé publique répond à la question suivante : comment les interlocuteurs peuvent-ils choisir une telle clé secrète sans avoir à se rencontrer physiquement ? Toutes leurs communications peuvent être interceptées et ils n'ont pas encore choisi de clé secrète commune, donc comment pourraient-ils se mettre d'accord sur un secret (la clé elle-même) ? C'est un problème que l'on a longtemps pensé insoluble, jusqu'à l'invention de la cryptographie à clé publique.

**Comment fonctionne-t-elle ? Pourquoi est-elle aujourd'hui si employée pour la sécurité de nos communications ?**

**B. W.** Le protocole de Diffie-Hellman, qui a été le premier en la matière et qui est encore très utilisé de nos jours, a un fonctionnement assez simple. Les interlocuteurs commencent par se mettre d'accord sur un « nombre »  $n$ , qui n'est pas secret. Le premier choisit en secret un nombre entier  $x$ , et envoie  $n^x$ . Le second choisit également en secret un nombre entier  $y$ , et envoie  $n^y$ . Chacun des interlocuteurs est en mesure de calculer  $n^{xy}$ . En effet, le premier connaît  $x$  (son secret) et  $n^y$  (qui lui a été envoyé) et peut donc calculer  $(n^y)^x$ . De manière similaire, le second peut calculer  $(n^x)^y$ . Un espion aura pu intercepter  $n$ ,  $n^x$  et  $n^y$  mais le « nombre »  $n^{xy}$  n'a jamais transité sur le canal non sécurisé : c'est un secret partagé par les interlocuteurs, qui peut désormais leur servir de clé secrète. En réalité, voyant  $n^x$ , un espion pourrait tenter de retrouver  $x$  :

1. Unité de mathématiques pures et appliquées (CNRS/ENS Lyon). 2. Projet AGATHA CRYPTY financé par une bourse ERC Starting Grant attribuée par le Conseil européen de la recherche.

c'est ce qu'on appelle un logarithme. S'il y parvient, il pourra calculer  $(n^y)^x$ , et tout s'écroule. Calculer des logarithmes pour des nombres usuels est facile. En revanche,  $n$  peut être choisi parmi d'autres types de « nombres » où ce problème est bien plus dur. C'est ce qu'on appelle le problème du logarithme discret.

Plusieurs méthodes ont toutefois été mises au point pour le résoudre, de manière plus efficace que la simple recherche exhaustive. Cependant, elles nécessitent une énorme puissance de calcul lorsque les nombres impliqués sont très élevés. Cela signifie qu'avec des paramètres suffisamment grands, même faire tourner tous les ordinateurs du monde pendant plusieurs milliards d'années ne suffirait pas pour résoudre le problème. C'est pourquoi on considère le problème du logarithme discret comme difficile et le protocole de Diffie-Hellman comme sûr pour protéger nos communications.

#### **Pour des ordinateurs classiques, d'accord. Mais qu'en serait-il avec un ordinateur quantique ?**

**B. W.** La donne serait bien différente ! En supposant qu'un individu ait accès à un ordinateur quantique suffisamment stable, il pourrait alors résoudre le problème du logarithme discret de façon efficace. Et donc casser de nombreux protocoles de cryptographie. Néanmoins, cela ne veut pas

dire qu'un ordinateur quantique consiste juste en une sorte de super ordinateur classique, beaucoup plus puissant. Simplement, il fonctionne différemment : à la place des bits classiques, il s'appuie sur des bits quantiques, qui permettent d'encoder en superposition de nombreux états différents. Cette propriété offre un avantage aux ordinateurs quantiques pour résoudre certains problèmes – un avantage parfois considérable, mais encore une fois, seulement pour certains problèmes. Et le problème du logarithme discret figure justement parmi ceux pour lesquels l'ordinateur quantique serait bien plus efficace !

#### **Mais qu'arrivera-t-il si on parvient à créer un ordinateur quantique suffisamment gros et stable ?**

**B. W.** Il vaudrait mieux ne pas attendre que la menace apparaisse pour se poser la question ! En effet, s'il faut changer tous nos standards de communication, cela prendra plusieurs années. De plus, on peut aisément imaginer que des individus ou agences de renseignement prennent bien soin d'enregistrer les échanges chiffrés actuels. Ils sont peut-être incapables de les lire aujourd'hui, mais cela deviendra une mine d'informations le jour où ils auront accès à un ordinateur quantique. C'est une attaque dite « récolte maintenant, déchiffre plus tard ».

#### **Alors comment faire pour rendre la cryptographie robuste aux ordinateurs quantiques ?**

**B. W.** En remplaçant les problèmes vulnérables, tel celui du logarithme discret, par des problèmes plus difficiles, résistants aux algorithmes quantiques. Pour cela, il faut identifier des problèmes candidats et tester leur difficulté. C'est là que la cryptologie algorithmique joue un rôle fondamental : il s'agit de mettre au point les meilleurs algorithmes permettant de résoudre ces problèmes, pour tester leurs limites. Et en étudiant ces techniques, nous pouvons adapter les méthodes de cryptographie, afin de les rendre plus résistantes aux potentielles attaques.

Cette approche algorithmique s'applique de manière générale, pas seulement dans une perspective post-quantique. Durant des décennies, la cryptologie algorithmique a persécuté les problèmes classiques comme le logarithme discret. Aujourd'hui, l'effort collectif est largement redirigé vers les problèmes post-quantiques.

#### **Quels autres problèmes par exemple ?**

**B. W.** Il y a plusieurs candidats, dont certains autour des réseaux euclidiens. Un réseau euclidien est un arrangement régulier de points dans l'espace, comme les points d'intersection d'une grille. Un des problèmes étudiés est le suivant : dans un mailage donné, quels sont les deux points les plus proches possibles ? Pour une grille carrée, en 2D, la réponse est facile à trouver. Mais si la grille n'est pas si simple, et dans une dimension 100, 200 ou 500, alors la tâche est beaucoup plus difficile. Même pour un ordinateur quantique – c'est du moins ce que l'on espère, et nous continuons de mettre cette hypothèse à l'épreuve. **II**



© ANNIKA /IMAGE CONCEPTUELLE GÉNÉRÉE PAR IA/STOCK.ADOBE.COM

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

# Le roquefort et le camembert en voie d'extinction ?

VIVANT  SOCIÉTÉS 

**BIOLOGIE** Les fromages hébergent une multitude de micro-organismes capables de transformer le lait. Sélectionnés par l'humain, ces ferments ne sont pas épargnés par les standards de l'industrie agro-alimentaire, au point que les fromages bleus ou le camembert pourraient disparaître.

PAR MEHDI HARMI

Connaissez-vous le bleu de Termignon ? Ce fromage confidentiel, confectionné dans les Alpes françaises dans une poignée de fermes seulement, pourrait bien sauver la filière des fromages bleus, menacée de disparition par la standardisation des processus de production. La raison ? Ses moisissures bleu-vert caractéristiques proviennent d'une population jusqu'alors inconnue de *Penicillium roqueforti*, le champignon impliqué dans la fermentation de tous les fromages bleus et persillés. Cette découverte est une petite bombe dans le monde du fromage. « À ce jour, seules quatre populations de l'espèce de champignon *P. roqueforti* étaient connues dans le monde », raconte Jeanne Ropars qui, avec Tatiana Giraud et leur équipe du laboratoire Écologie, systématique et évolution<sup>1</sup> de Gif-sur-Yvette, ont réussi à séquencer le génome du micro-organisme responsable de la fermentation du bleu de Termignon. « Deux populations "sauvages" impliquées dans le pourrissement des fruits et la décomposition de certains aliments et l'ensilage (procédé de fermentation du fourrage destiné à l'élevage, Ndlr), et deux populations

utilisées dans la fabrication des fromages », détaille la chercheuse. Sur les deux populations domestiquées, l'une est utilisée par les seuls producteurs de l'appellation d'origine protégée (AOP) Roquefort, tandis que tous les autres bleus sont ensemencés avec une seule et même souche de *P. roqueforti*.

Pour produire des fromages en grande quantité, les industriels ont sélectionné des souches de champignons correspondant aux cahiers des charges qu'ils se sont imposés. Les fromages doivent être attrayants, avoir bon goût, ne pas arborer de couleurs déroutantes, ne pas produire de mycotoxines, ces toxines sécrétées par les champignons, et surtout pousser rapidement sur le fromage qu'ils se doivent de coloniser. Ce faisant, le secteur de l'agro-alimentaire a exercé une pression de sélection sur les champignons si grande que les fromages, non fermiers et non protégés par une AOP, présentent aujourd'hui une diversité de micro-organismes extrêmement pauvre.

## Des bleus à bout de souffle

« On a réussi à domestiquer ces organismes invisibles comme on l'a fait pour le chien, ou le chou, explique Jeanne Ropars. Mais il s'est produit pour les micro-organismes ce qu'il se produit à chaque fois qu'on sélectionne trop drastiquement des organismes, gros ou petits : cela a entraîné une très forte réduction de leur diversité génétique. En particulier chez les micro-organismes, les producteurs n'ont pas réalisé qu'ils avaient sélectionné un seul individu et que ça n'était pas durable à long terme. » Les micro-organismes sont capables de se reproduire de manière sexuée et asexuée, mais c'est le plus souvent la voie asexuée, via la production de lignées clonales, qui a été privilégiée par les industriels pour les multiplier. Résultat : ils ne peuvent plus se reproduire avec d'autres souches qui pourraient leur apporter du matériel génétique neuf, ce qui au bout d'un certain temps induit la dégénérescence de la souche en question.



1. Unité CNRS/AgroParisTech/Université Paris-Saclay.



© ROMAIN GAILLARD/REA

« La population utilisée par l'AOP Roquefort a un peu moins pâti de cette sélection, et montre un peu plus de diversité », tempore Tatiana Giraud, qui indique y avoir identifié plusieurs souches différentes. Ce n'est pas le cas de la lignée clonale utilisée par le reste des producteurs, appauvrie au point d'être devenue quasi infertile. « Même les plus petits producteurs sont touchés, raconte la chercheuse. Car s'ils ont longtemps fait "pousser" eux-mêmes leur propre souche de *P. roqueforti*, ils ont désormais tendance à acquérir leurs ferments directement auprès des grands producteurs de spores qui fournissent toute l'industrie agro-alimentaire. »

Par conséquent, les champignons qui ont accumulé dans leurs génomes nombre de mauvaises mutations tout au long des multiplications végétatives finissent par devenir quasi infertiles, ce qui pèse lourdement sur la production des fromages. C'est là que le bleu de Termignon et sa population nouvelle de *P. roqueforti* entrent en scène : celle-ci pourrait en effet apporter aux producteurs la diversité génétique qui manque cruellement à leurs ferments, à condition de prendre le risque de la reproduction sexuée, créatrice de diversité certes, mais aussi d'une plus grande variabilité du produit fini.

### Menace sur le camembert

Les fromages bleus sont certes menacés mais leur situation est encore bien loin de celle du camembert, qui lui est au bord de l'extinction. Car cet autre symbole du terroir français n'est inoculé que par une seule et même souche de *Penicillium camemberti* et ce, partout sur Terre. Cette souche est un mutant blanc sélectionné en 1898 pour inoculer les bries puis les camemberts dès 1902. Problème, cette souche est depuis uniquement répliquée par multiplication végétative. Jusque dans les années 1950, les camemberts présentaient encore à leur surface des moisissures grises, vertes, ou parfois orangées. Mais les industriels peu friands de ces couleurs jugées peu

attractives ont tout misé sur l'utilisation de la souche de *P. camemberti* albinos, complètement blanche et de surcroît duveteuse. C'est ainsi que le camembert a acquis sa croûte immaculée caractéristique.

Ce faisant, année après année, génération après génération, la souche albinos de *P. camemberti* a perdu sa capacité à produire des spores asexuées, alors qu'elle était déjà dépourvue de reproduction sexuée. Conséquence : il est aujourd'hui très compliqué pour tous les industriels du secteur d'obtenir des spores de *P. camemberti* en quantité suffisante pour inoculer leur production du fromage normand. Pire encore, l'AOP du camembert impose aux fermiers et autres producteurs de n'utiliser que *P. camemberti*. Pour compenser cette dégénérescence, les producteurs n'hésitent pas à avoir recours à une deuxième espèce de champignons en complément, afin de pallier ses insuffisances : *Geotrichum candidum*, aussi sélectionné pour sa texture blanche et cotonneuse.

Quelles pistes, alors, pour sauver le camembert ? « Il arrive que des industriels nous contactent pour savoir s'il serait possible de modifier un gène et ainsi permettre à une souche de sporuler en plus grande quantité », confie Tatiana Giraud, tout en expliquant que « cela ne saurait constituer une solution : l'édition génomique est une autre forme de sélection, or c'est de la diversité apportée par la reproduction sexuée entre des individus aux génomes différents dont on a aujourd'hui besoin. » L'espèce proche génétiquement de *P. camemberti*, nommée *Penicillium bifforme*, est aussi présente sur nos fromages car on la trouve naturellement dans le lait cru, et montre une diversité génétique et phénotypique incroyable. On pourrait donc imaginer inoculer nos camemberts et bries avec du *P. bifforme*.

Si les amateurs veulent pouvoir continuer à manger du fromage, ils vont devoir apprendre à aimer la diversité des goûts, des couleurs et des textures, parfois au sein d'une même production. Et si notre patrimoine gustatif avait tout à y gagner ? ||

▲ Illustration 3D du champignon *Penicillium roqueforti* utilisé dans la production de fromages bleus.



© DR. MICROBE/ISTOCK/ADOBECOM

# Entre mère et père, des apports génétiques différents

© CHRISTOPHE LEBEDINSKY/CNRS IMAGES

Jusqu'aux dernières décennies du siècle dernier, il était admis qu'un individu ne se déterminait, génétiquement, qu'en fonction de la séquence de ses gènes, codée sous forme d'ADN. Au croisement de la génétique et de la biologie moléculaire, cette idée a depuis connu bien des retouches. En particulier grâce à l'épigénétique : longtemps perçu comme marginal, ce vaste ensemble de processus s'est avéré, au fil des travaux menés depuis une trentaine d'années, jouer un rôle biologique de premier plan.

Par « épigénétique », on entend l'ensemble des processus influant d'une manière stable sur l'expression des gènes, sans que leur séquence soit affectée. Ils font appel à divers mécanismes, dont la méthylation de l'ADN et diverses modifications des histones, protéines qui forment l'habillage de la chromatine. L'un de ces processus épigénétiques intrigue particulièrement les scientifiques depuis sa découverte il y a 40 ans : l'empreinte génomique.

## Des gènes cruciaux pour le développement

Tout individu se caractérise par un nombre défini de paires de chromosomes, l'un d'origine maternelle, l'autre d'origine paternelle. Chez la plupart des groupes d'espèces, il est pourtant possible d'obtenir en laboratoire des individus viables constitués de deux génomes du même sexe. Or, tel n'est pas le cas pour les mammifères, chez qui la présence des deux génomes parentaux est un prérequis absolu pour le développement.

## VIVANT

**GÉNÉTIQUE** Chez les mammifères, le génome des descendants est constitué de gènes provenant, à part égale, de la mère et du père. Or, cette origine détermine l'activité ou non des gènes hérités. Ce phénomène, dénommé « empreinte génomique », repose sur l'intrication complexe de plusieurs mécanismes.

PAR ROMAIN LOURY

À l'origine de cette impossibilité, l'existence de gènes soumis à l'empreinte génomique. Selon de nombreuses études sur l'humain et la souris, leur nombre est estimé à environ 170. Comme tout gène, ils sont présents en deux copies (maternelle et paternelle), mais dans ce cas seule l'une des deux s'exprime tandis que l'autre demeure silencieuse tout au long de la vie de l'individu. Pour certains de ces gènes, seul l'allèle maternel sera actif, pour d'autres ce sera l'allèle paternel, et ceci est contrôlé par l'empreinte génomique.

Observée uniquement chez les mammifères placentaires et les marsupiaux, mais pas chez les monotrèmes (échidnés, ornithorynque, tous ovipares), « l'empreinte génomique est apparue à partir d'il y a 180 millions d'années. Elle pourrait être liée à la dépendance très forte du petit vis-à-vis de sa mère », en particulier lors de la grossesse et de l'allaitement, explique Robert Feil, qui dirige l'équipe Empreinte

1. Unité CNRS/Université Panthéon-Sorbonne/Université Paris-Nanterre. 2. Dans le cadre du projet IMP-Regulome financé par l'Agence nationale de la recherche, notamment en association avec l'équipe de Daan Noordermeer de l'Institut de biologie intégrative de la cellule (CEA/CNRS/Paris-Saclay). 3. doi: 10.1016/j.celrep.2018.03.044 4. doi: 10.1186/s13059-019-1896-8 1896-8

## ▲ Dépôt d'échantillons d'ADN sur gel d'électrophorèse.

génomique et développement de l'Institut de génétique moléculaire de Montpellier<sup>1</sup>. Cette forte implication maternelle aurait engendré « *une lutte d'influence entre les génomes maternel et paternel* », ajoute le chercheur.

### La méthylation de l'ADN, et bien plus

Par exemple, la région *Dlk1-Dio3*, au centre des travaux de l'équipe de Robert Feil<sup>2</sup>. Ce locus génétique héberge divers gènes impliqués dans le développement, dont celui codant pour la protéine DLK1, inhibitrice de la voie de signalisation Notch qui intervient dans la formation des cellules neurales, musculaires et du placenta. L'expression du gène *Dlk1* est exclusivement paternelle.

Comment expliquer ce phénomène ? Lors de la formation des spermatozoïdes et ovules, des séquences régulatrices essentielles dénommées ICR (*Imprinting Control Regions*) sont méthylées chez un sexe, mais pas chez l'autre. Lorsque les deux copies sont mises en présence, après la fécondation, leur différence de méthylation est maintenue et conditionne lequel des deux allèles s'exprimera. Le processus fait aussi intervenir des ARN longs non codants (lncRNA), donc non traduits en protéines – à la différence des ARN messagers (ARNm). Très abondants dans les régions soumises à l'empreinte génomique, ces ARN jouent un rôle important dans la régulation de l'expression des gènes.

Dans la région *Dlk1-Dio3*, l'ICR est située à proximité d'une région riche en gènes qui codent pour des ARN non codants. Or, lors d'une étude publiée en 2018<sup>3</sup>, l'équipe montpelliéraine a montré que la production de ces ARN, en particulier celle de l'ARN Meg3, bloquait l'expression des gènes codants, dont *Dlk1*. Au sein du chromosome maternel, l'ICR y est déméthylée, ce qui permet la production de Meg3, et l'expression de cet ARN non codant va bloquer l'expression du gène *Dlk1*. À l'inverse, sur le chromosome paternel dont l'ICR est méthylée, l'ARN Meg3 n'est pas exprimé, ce chromosome parental est donc le seul à exprimer *Dlk1* durant le développement.

### Une réorganisation structurale de la chromatine

Ce n'est pas tout : l'empreinte génomique implique aussi une réorganisation locale de la structure de la chromatine. Dans une autre étude, publiée en 2019<sup>4</sup>, des différences structurales entre les régions maternelle et paternelle ont été mises en évidence, susceptibles d'activer ou de réprimer l'expression des gènes et des ARN non codants. En cause, l'implication de CTCF, une protéine structurante de la chromatine, qui ne s'ancre à l'ICR que lorsqu'elle est déméthylée. Que ce soit via la méthylation de l'ADN, les ARNs longs non codants ou leur organisation structurale, les régions soumises à l'empreinte obéissent à « *des couches de régulation qui dépendent les unes des autres* », explique Robert Feil. Outre l'étude des mécanismes sous-jacents à l'empreinte génomique, ces travaux ouvrent des perspectives dans le traitement de maladies rares et méconnues. ||



Lire l'intégralité du billet sur le blog Focus Science, sur [lejournel.cnrs.fr](http://lejournel.cnrs.fr)

## En bref

### LE CNRS EN AFRIQUE

Dans le cadre du Plan pluriannuel de coopérations du CNRS avec l'Afrique, l'organisme ouvrira son onzième Bureau de représentation dans le monde à Nairobi, au Kenya. Les objectifs sont de mieux comprendre les besoins de coopération des diverses communautés de recherche, d'initier des liens institutionnels et de coconstruire des projets scientifiques avec les partenaires français, africains et européens.

### ÉGALITÉ PROFESSIONNELLE

En 2024-2025, le CNRS intensifie ses actions en la matière avec un nouveau plan pour l'égalité professionnelle. Ce plan soutiendra, pour les carrières des chercheuses, l'égalité des chances sur les postes à responsabilité. Concernant les violences sexuelles et sexistes, il va se concentrer sur la sensibilisation et la formation et continuer à développer les réseaux existants. Par ailleurs, les actions pour réduire l'impact de la maternité et de la parentalité sur les carrières seront poursuivies.

>> Voir <https://shorturl.at/efuD7>

### MISSION EUROPE POUR LA RECHERCHE

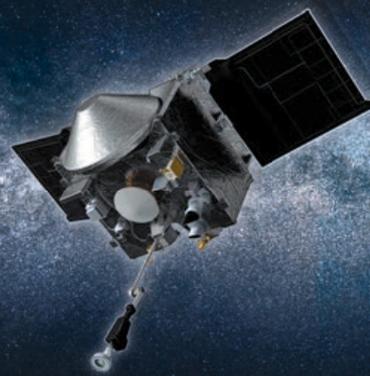
Le 16 février 2024, la Mission Europe pour la recherche a été inaugurée à Marseille. Fruit d'une initiative conjointe d'Aix-Marseille Université, du CNRS, de l'Inserm et de l'IRD, cette nouvelle structure a pour but de mutualiser les outils et les personnels de ces quatre établissements afin de simplifier et d'encourager la participation des scientifiques du territoire aux projets européens.

### INNOVATION

17 nouveaux projets de start-up, fondés sur des technologies développées au sein de laboratoires dont le CNRS assure une tutelle, ont été sélectionnés dans le cadre du programme RISE de CNRS Innovation. Cette dixième promotion s'est réunie le 14 décembre dernier lors d'un événement d'accueil sous le parrainage de Jean-Marie Tarascon, médaille d'or du CNRS en 2022, cofondateur et conseiller scientifique de la start-up Tiamat.

### PARTENARIAT

Jeudi 21 décembre, le ministère des Armées, représenté par l'Agence de l'innovation de défense et le Secrétariat général pour l'administration, a signé une convention de partenariat pour trois ans avec CNRS Innovation. Cette convention permettra de multiplier les synergies autour de la détection d'acteurs innovants, l'accompagnement de start-up et de projets innovants, et le partage d'informations relatives à l'innovation.



# La recherche fait parler les astéroïdes

© NASA/GODDARD/UNIVERSITY OF ARIZONA

## UNIVERS

**ASTRONOMIE** Fin septembre 2023, la mission Osiris-Rex larguait sur Terre de précieux échantillons prélevés trois ans plus tôt à la surface de l'astéroïde Bennu. Des laboratoires du monde entier procèdent désormais à leur analyse, dont plusieurs équipes du CNRS.

PAR GRÉGORY FLÉCHET ET SOPHIE FÉLIX

Le défi s'annonçait pour le moins complexe : envoyer une sonde spatiale à la rencontre d'un astéroïde de 500 mètres de diamètre, évoluant à 300 millions de kilomètres de notre planète pour l'étudier deux années durant, puis en prélever un échantillon et le ramener sur Terre afin d'analyser en détail la composition de ce corps céleste. Sept ans après le lancement d'Osiris-Rex par la Nasa, la mission est couronnée de succès : « *Alors que nous espérions récolter 60 g de matériaux, ce sont finalement près de 170 g d'un mélange de fines particules et de roches pouvant atteindre trois à quatre centimètres de diamètre que la sonde est parvenue à renvoyer vers la Terre* », se réjouit Patrick

Michel, directeur de recherche CNRS au laboratoire Joseph-Louis Lagrange<sup>1</sup> à Nice et membre de l'équipe scientifique d'Osiris-Rex.

Une première partie de l'échantillon a pu être récupérée à la périphérie de la capsule protectrice dans les jours qui ont suivi son retour sur Terre. Une fois les particules d'astéroïde extraites dans une salle blanche du centre spatial Johnson de la Nasa, à Houston (Texas), huit fractions d'une centaine de milligrammes ont été envoyées, début novembre, à autant de laboratoires basés aux États-Unis, au Japon, en Australie et en Europe, qui les ont répartis auprès de nombreuses autres équipes pour des analyses spécifiques. Pour prévenir toute contamination, les fragments ont été placés dans un cylindre métallique sous atmosphère d'azote avant d'être expédiés à leurs destinataires respectifs.

## Révéler les conditions de formation de Bennu

Parmi les heureux élus, l'équipe de Guy Libourel qui réunit des scientifiques du Centre de recherche pour l'hétéro-épitaxie et ses applications<sup>2</sup> et du laboratoire Lagrange, dispose d'un savoir-faire unique en matière d'analyse par cathodoluminescence. « *Au sein du consortium international,*

1. Unité CNRS/Observatoire de la Côte d'Azur/Université Côte d'Azur 2. Unité CNRS/Université Côte d'Azur. 3. Unité CNRS/Université de Lorraine. 4. Voir "NASA's Bennu Asteroid Sample Contains Carbon, Water", sur [nasa.gov](https://www.nasa.gov).

► Vue d'artiste de la mission Osiris-Rex de la Nasa collectant des échantillons de l'astéroïde Bennu.

*nous sommes les seuls à employer cette technique qui consiste à exciter les minéraux d'un grain d'astéroïde à l'aide d'un faisceau d'électrons, explique le professeur de cosmochimie. En couplant ce procédé à un microscope électronique à balayage, nous sommes capables d'obtenir en quelques minutes des informations très précises sur la structure et la nature chimique des différents minéraux qui composent l'échantillon, ainsi que sur les conditions physico-chimiques dans lesquelles chaque minéral s'est formé.* »

Cette première série d'analyses vise entre autres à établir l'inventaire minéralogique des échantillons prélevés à la surface de Bennu. « *La coexistence dans un même échantillon de carbonates riches en calcium et d'autres riches en magnésium pourrait par exemple signifier que les fluides hydrothermaux responsables de leur formation ont changé de composition au cours du temps. Cela nous donnerait des informations précieuses sur la dynamique interne de l'objet céleste qui est à l'origine de Bennu* », illustre le chercheur.

Au Centre de recherches pétrographiques et géochimiques<sup>3</sup> (CRPG), près de Nancy, deux autres équipes se focalisent plus particulièrement sur les constituants chimiques de Bennu. Un premier groupe s'intéresse aux isotopes de l'azote et des gaz rares tels que le néon ou le xénon. Ces analyses, qui nécessitent de détruire l'intégralité de l'échantillon en le chauffant avec un laser, visent à retracer l'origine de ces fines particules qui reflètent l'environnement dans lequel le Soleil s'est formé il y a un peu moins de 4,6 milliards d'années.

### Remonter le temps avec la distribution isotopique

La seconde équipe du CRPG, quant à elle, a reçu des particules sous forme de sections de grains polis, enchâssés dans une résine dont la surface est finement polie. « *Sur chacun de ces échantillons, nous pouvons réaliser des centaines de prélèvements de quelques micromètres de diamètre sur un micromètre de profondeur en les pulvérisant avec le faisceau d'ions très focalisé de la sonde ionique* », explique la cosmochimiste Laurette Piani. L'infime quantité de matière ainsi recueillie va ensuite être transférée dans un spectromètre de masse. La sonde ionique permet de mesurer avec une grande précision la concentration des différents isotopes d'un même élément chimique cible comme l'oxygène, l'hydrogène ou le magnésium. « *En déterminant la composition isotopique de chacun de ces éléments, nous allons pouvoir mettre en évidence certains des processus ayant abouti à la formation des grains qui constituent actuellement la surface de Bennu* », poursuit la scientifique.

Bennu compte parmi les objets les plus primitifs de notre Système solaire, et les roches qui le constituent témoignent des événements ayant accompagné l'effondrement de gaz et de poussières dont le Soleil est issu. « *Nos analyses visent notamment à déterminer le contexte et la chronologie de la formation des premiers solides dans le*

*disque protoplanétaire qui s'est mis en place autour de notre étoile quelques millions d'années après sa naissance* », souligne Laurette Piani.

### Préciser le rôle des astéroïdes dans l'apparition de la vie

Grâce aux analyses préliminaires effectuées par la Nasa, nous avons déjà la certitude que Bennu contient des argiles. Les fragments de l'astéroïde se révèlent également riches en carbone. L'agence spatiale américaine assure par ailleurs y avoir détecté des composés organiques qui pourraient s'apparenter à des acides aminés. La présence simultanée de ces trois composants vient renforcer l'hypothèse selon laquelle les astéroïdes auraient joué un rôle important dans l'émergence de la vie sur Terre, en délivrant les ingrédients nécessaires à son apparition via les impacts survenus la fin de la formation de notre planète<sup>4</sup>.

Des centaines de chercheurs à travers le monde s'emploient actuellement à compiler un maximum d'informations sur la composition chimique et les propriétés physiques des échantillons. « *Tout l'enjeu sera de parvenir à relier ces données collectées à l'échelle microscopique avec celles obtenues au niveau macroscopique, lors du survol de l'astéroïde, pour tenter de savoir quels événements ont abouti à cet amas de roches et de débris à la fois très poreux et peu dense* », explique Patrick Michel qui supervisera ce travail au sein de la mission Osiris-Rex. Au cours des prochaines semaines, les 38 laboratoires du consortium vont enchaîner les études scientifiques. Une partie de leurs conclusions sera dévoilée lors de la « Lunar and Planetary Science Conference » qui se tiendra à Houston, du 11 au 15 mars prochain. Nul doute que des révélations seront au rendez-vous. ▮

► Désassemblage délicat pour récupérer les particules d'astéroïde récoltées par Osiris-Rex (Centre spatial Johnson, Texas).

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



© NASA



# Un nouvel anticorps dédié à la lutte contre le cancer

VIVANT



**BIOLOGIE** Une molécule capable de contrecarrer l'un des principaux mécanismes de résistance des tumeurs aux traitements anticancer et d'améliorer ainsi la survie des patients... C'est ce que pourraient avoir réussi à développer des chercheurs lyonnais.

PAR KHEIRA BETTAYEB

**C**hirurgie, chimiothérapie, radiothérapie, mais aussi, depuis quelques décennies, thérapies ciblées et immunothérapie... l'arsenal thérapeutique contre le cancer n'a jamais été aussi important. Problème, à l'instar des bactéries qui peuvent devenir insensibles aux antibiotiques, les cellules cancéreuses peuvent elles aussi développer une « résistance » aux traitements anticancer, et leur échapper. Vaincre ce phénomène est donc crucial pour améliorer la survie à long terme des patients.

Or, voilà qu'une molécule développée en France, à Lyon, pourrait aider à relever ce défi. Et ce, de façon « universelle », pour tous les types de traitements anticancer chimiques existants. « Fruit de près de deux décennies de recherche, notre molécule s'est avérée très prometteuses lors de deux études, publiées en août 2023 <sup>1&2</sup> », se réjouit Patrick Mehlen, directeur du Centre de recherche en cancérologie

de Lyon<sup>3</sup>. « Ce potentiel nouveau traitement constitue une nouvelle approche thérapeutique originale. Tout n'est pas encore gagné. Mais l'espoir est grand de le voir venir enrichir l'arsenal thérapeutique et améliorer la lutte contre différents cancers aujourd'hui très difficiles à traiter », commente Éric Solary, chercheur à l'Institut Gustave Roussy<sup>4</sup> et membre du conseil d'administration de la Fondation ARC pour la recherche sur le cancer.

## Anticorps thérapeutique

De quoi s'agit-il concrètement ? D'un anticorps monoclonal (produit en laboratoire), baptisé NP137. « Comme les anticorps fabriqués par notre système immunitaire lors d'une infection, cet anticorps est capable de bloquer spécifiquement un composé. Lequel consiste ici en une protéine présente dans la plupart des cancers : la nétrine-1 », détaille Patrick Mehlen. L'aventure scientifique qui a mené à ce composé a commencé il y a plus de vingt ans. Le biologiste lyonnais et son groupe travaillent alors sur un processus qui fait défaut dans les cellules cancéreuses : la mort cellulaire programmée, ou apoptose, qui permet aux cellules infectées ou anormales de s'autodétruire. L'équipe s'intéresse notamment à un récepteur cellulaire capable d'induire l'apoptose : une protéine appelée DCC<sup>5</sup>, identifiée initialement lors de travaux portant sur les tumeurs du côlon. Or, l'action de ce récepteur peut être bloquée par une protéine... la fameuse nétrine-1, cible privilégiée de l'anticorps NP137 ! D'où l'intérêt des chercheurs pour cette molécule.

Lors de premiers travaux chez la souris en 2004<sup>6</sup>, l'équipe avait fait une découverte significative : alors que la nétrine-1 était connue surtout pour guider le développement des neurones chez l'embryon, ils découvrent que chez l'adulte, elle peut aussi favoriser la survenue du cancer colorectal. Au fil des années, les chercheurs lyonnais apportent la preuve de l'implication de la nétrine-1 dans plusieurs autres types de cancers dits « solides » (du sein, du poumon, de la peau...) et « liquides » (touchant les éléments du sang, comme le lymphome). S'impose alors à eux l'idée de bloquer la nétrine-1 pour tuer les cellules cancéreuses. Leur concept prend forme en 2014, avec le développement de l'anticorps NP137 grâce à des fonds levés par Netris-Pharma, une start-up médicale créée en 2008. Enfin, après des études précliniques chez la souris puis l'obtention des autorisations nécessaires, le groupe lance en 2017 une première étude visant à tester cet anticorps chez l'humain. Ce sont les résultats de cet essai de phase 1, impliquant 14 patientes atteintes d'un cancer avancé de l'endomètre (paroi interne de l'utérus), qui ont été publiés dans une des deux études parues en août dernier<sup>7</sup>.

Résultat : non seulement NP137 s'est avéré non toxique, mais il a de plus stoppé la progression de la maladie chez plus de la moitié des patientes (8 sur 14). Mieux, chez l'une d'elles, les chercheurs ont noté après six semaines de traitement une réduction de plus de 50 % des métastases. Forts de ces résultats, ils ont alors administré à des souris atteintes d'un cancer de l'endomètre NP137, associé à une

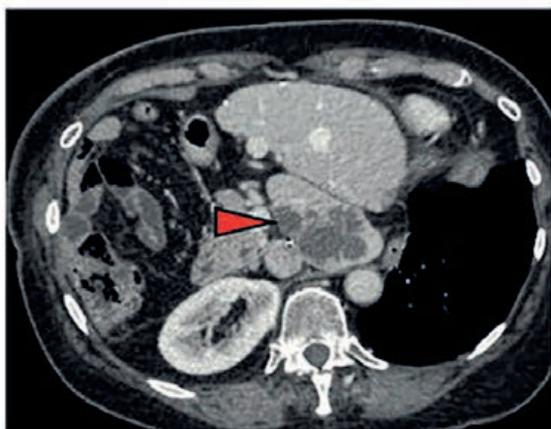
chimiothérapie (carboplatine-paclitaxel). Cette combinaison s'est révélée plus efficace que la chimiothérapie seule, et permettrait non seulement de réduire les tumeurs mais aussi potentiellement d'atténuer leur résistance aux traitements.

### Des résultats prometteurs

Selon de plus récents travaux chez la souris<sup>8</sup>, NP137 atténuerait aussi la résistance aux traitements d'immunothérapie. Via quel mécanisme ? Lors de la seconde étude publiée en août 2023<sup>9</sup>, codirigée par Cédric Blanpain, chercheur à l'Université libre de Bruxelles et Patrick Mehlen, les scientifiques ont réalisé plusieurs expériences de biologie cellulaire et de génétique chez des souris atteintes d'un cancer cutané épidermoïde (un cancer de la peau sévère) et sur des cellules tumorales humaines. Au final, il est ressorti que le blocage de la nétrine-1 par l'anticorps NP137 permet de contrecarrer un des principaux mécanismes de résistance des tumeurs : la « transition épithélio-mésenchymateuse ».

Cette transition permet aux cellules cancéreuses proliférantes de changer de statut et d'acquiescer la propriété de « casser » le socle sur lequel elles reposent, la matrice extracellulaire. Elles ont alors accès au reste du corps via le système circulatoire et peuvent par conséquent métastaser et ainsi échapper aux traitements. « Ces dernières – appelées cellules mésenchymateuses –, ont tendance à moins se multiplier, ce qui les rend moins sensibles à la chimiothérapie. De plus, elles produisent des molécules qui les cachent, comme des molécules qui inhibent le système immunitaire ; ce qui peut les rendre résistantes à l'immunothérapie », explique Patrick Mehlen. « Cibler cette transition épithélio-mésenchymateuse est un objectif majeur poursuivi depuis plusieurs années par beaucoup de chercheurs. L'équipe de Patrick Mehlen est la première à l'avoir atteint grâce à NP137 », relève Éric Solary.

Reste toutefois à s'assurer rigoureusement que cet anticorps permet bien d'inhiber le phénomène de résistance chez l'humain. « C'est justement là tout l'enjeu de quatre nouveaux essais cliniques de phase 2 cette fois, qui sont en cours et qui concernent plusieurs types de cancers », révèle Patrick Mehlen. Les résultats de ces différentes études devraient être disponibles dans les mois à venir. « S'ils sont probants, nous pourrions alors passer aux essais de phase 3, pour confirmer l'efficacité de cet anticorps sur plus de patients (jusqu'à 500) et demander une autorisation de mise sur le marché », conclut le biologiste. Un véritable espoir dans la lutte contre le cancer. ■

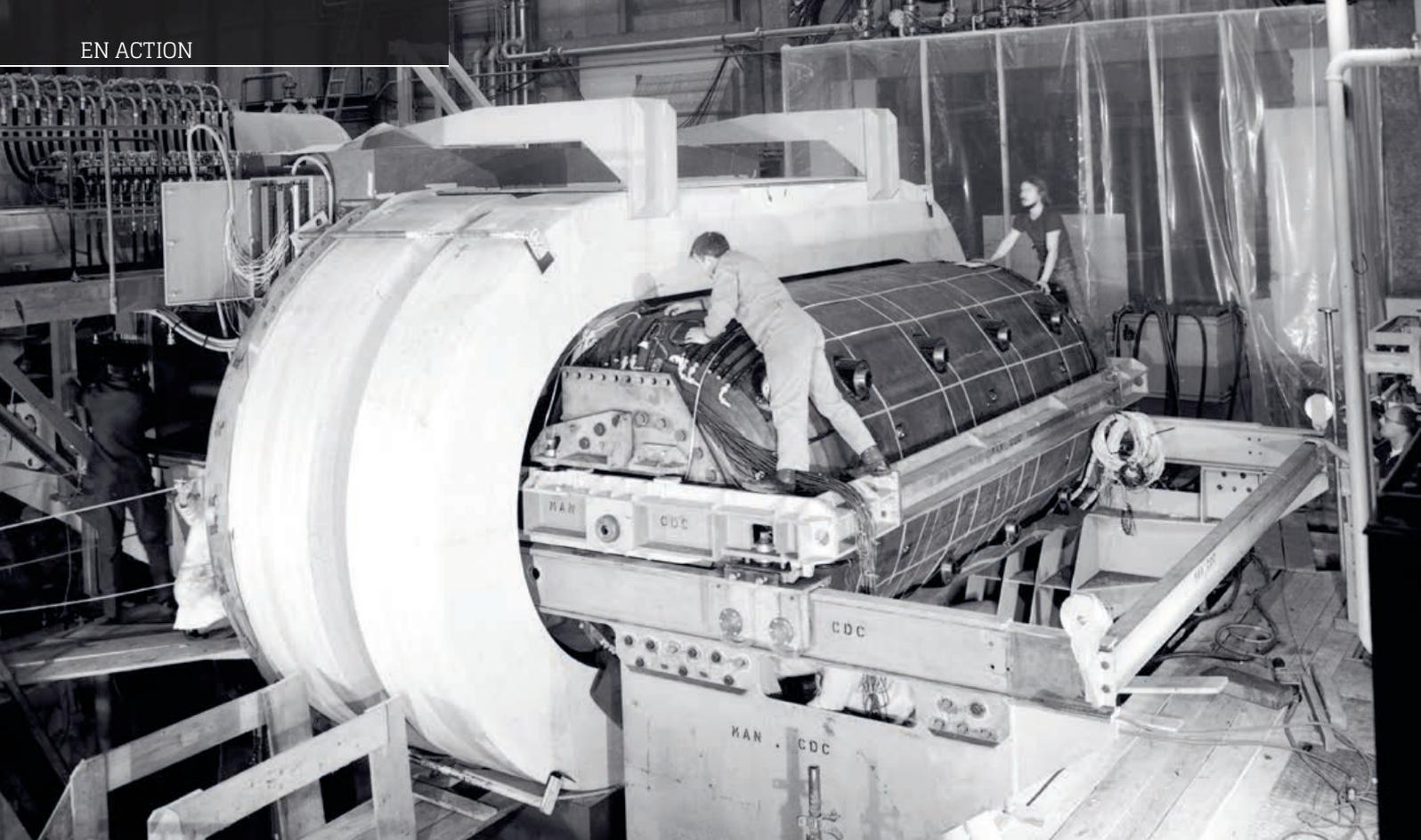


▲ Scanners montrant le foie d'une patiente avant le traitement avec l'anticorps NP137 (en haut) et le foie de la même patiente après un mois de traitement (en bas). On observe une nette diminution des métastases.



[Lire l'intégralité de l'article sur lejournal.cnrs.fr](#)

1. P. A. Cassier et al., *Nature*, 2 août 2023. 2. J. Legrand et al., *Nature*, 2 août 2023. 3. Unité CNRS/Inserm/Université Claude Bernard Lyon 1/Centre anticancéreux Léon Bérard. 4. Au sein de l'unité Analyse moléculaire, modélisation et imagerie de la maladie cancéreuse (CNRS/Inserm/Institut Gustave Roussy/Université Paris-Saclay). 5. Initiales de « deleted in colorectal cancer » pour « supprimé dans le cancer colorectal ». 6. L. Mazelin et al., *Nature*, 2 septembre 2004. 7. cf. note 1. 8. B. Ducarouge et al., *Cell Death Differ*, octobre 2023. 9. cf. note 2.



© 1970-2024 CERN

# Aux origines du modèle standard

## MATIÈRE

En 1973, grâce à la chambre à bulles Gargamelle, l'équipe d'André Lagarrigue, au Cern, démontrait l'existence de courants neutres dans l'interaction faible. Un résultat qui permettait d'unifier en une seule théorie deux interactions fondamentales qu'on pensait jusqu'ici distinctes : la force électromagnétique, responsable de l'attraction/répulsion entre particules chargées électriquement, et la force faible, responsable de la radioactivité bêta. Le développement de cette théorie, dite « électrofaible », aboutira quelques années plus tard à l'édification du modèle standard, achevé en 2012 par la découverte du boson de Higgs et qui décrit l'ensemble des particules et des forces qui composent et régissent la matière connue.

La découverte de la « force » faible remonte aux années 1930, quand le physicien Enrico Fermi a proposé l'existence d'une interaction expliquant la désintégration radioactive bêta, qui se manifeste, dans le noyau atomique, par la transformation d'un neutron en proton, accompagnée de l'émission d'un électron et d'un neutrino. À la fin

**PHYSIQUE** Il y a 50 ans, une équipe française était à l'origine d'une découverte qui conduira à l'élaboration du modèle standard de la physique des particules.

PAR MARGOT MICHEL

des années 1950, les développements du modèle de Fermi postulent que cette interaction faible est « portée » par une particule médiatrice encore non observée mais baptisée « W » pour « weak ». En effet, selon la théorie quantique des champs, les interactions fondamentales entre particules de matière (aussi appelées « fermions ») sont « portées » par l'échange d'autres particules appelées « bosons ». La portée de ces interactions dépend alors de la masse de la particule médiatrice : plus sa masse est importante, plus la portée de la force sera limitée. Le photon, particule médiatrice de la force électromagnétique, est de masse nulle : la portée de cette interaction est donc infinie.

## ► Installation de la chambre à bulles du détecteur Gargamelle au Cern, en 1970.

Mais le modèle de Fermi posait un problème majeur : « La masse de cette particule médiatrice devait être élevée, en cohérence avec une force de courte portée. Mais une masse non nulle aurait signifié que la symétrie fondamentale de la théorie était brisée, et la description de l'interaction faible par échange de bosons ne pouvait plus fonctionner », précise Claude Charlot, directeur de recherche au Laboratoire Leprince-Ringuet<sup>1</sup> à l'École polytechnique.

### La théorie électrofaible

Quelques années plus tard, Martinus Veltman et Gerard t'Hooft ont reformulé le modèle pour obtenir des résultats sans infinis dans les calculs. S'appuyant sur ces calculs, Sheldon Glashow, Steven Weinberg et Abdus Salam élaborent la théorie électrofaible. « Aux bosons électriquement chargés  $W^+$  et  $W^-$  déjà prédits par les théories faibles précédentes, la théorie électrofaible ajoute un troisième intermédiaire, le boson neutre  $Z^0$  », raconte Delphine Blanchard, doctorante en histoire des sciences au Centre Alexandre-Koyré<sup>2</sup>. Un hypothétique boson neutre, dont l'existence devrait se manifester par l'observation d'un « courant neutre » en plus des « courants chargés » dus aux bosons  $W^+$  et  $W^-$ .

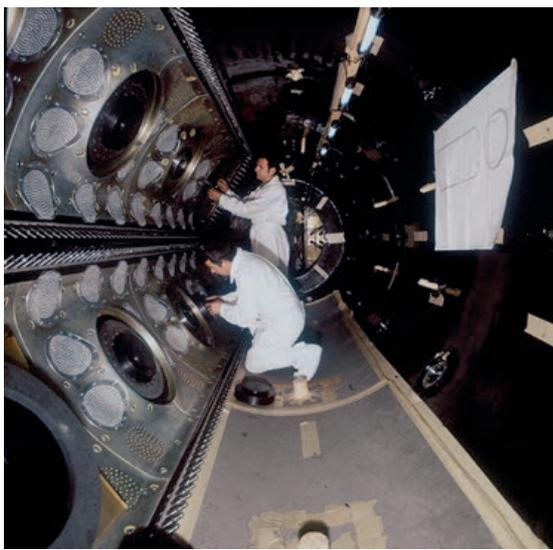
### Le projet Gargamelle

À la fin des années 1960, André Lagarrigue propose alors au Cern une série d'expériences sur l'interaction faible en exposant un faisceau de neutrinos et d'antineutrinos dans la chambre à bulles Gargamelle. « L'idée de sa construction est née à la conférence de Sienne en 1963. Elle faisait 4,8 mètres de long, 2 mètres de diamètre et contenait environ 12 mètres cubes de fréon », se rappelle Bernard Degrange, directeur de recherche émérite au CNRS. « Le liquide est préalablement détendu pour être dans un état de pré-ébullition. L'énergie d'ionisation déposée localement par une particule chargée crée des bulles sur son passage. Des flashes éclairent l'intérieur du corps de la chambre et permettent de photographier les traces des particules chargées à l'aide des caméras », explique Claude Charlot.

L'observation des courants neutres ne figurait alors qu'en huitième position sur la liste des choses à faire avec Gargamelle. « Lors des événements dans la chambre à bulles, il y avait huit vues stéréoscopiques, qui nous permettaient d'analyser les résultats sous plusieurs angles différents », se souvient Bernard Degrange. Dès la première expérience de la chambre en 1971, des interactions de neutrinos produisant un muon ou un électron sont observées, signa-

tures du processus de courant chargé. Restaient 20 à 30 % d'événements qui ne comportaient ni muon ni électron à l'état final : ils pouvaient être dus soit à des neutrons, soit aux courants neutres tout récemment prédits. « C'est pourquoi, en 1971, on décide de mesurer aussi ces événements », ajoute Bernard Degrange. Deux types d'événements étaient particulièrement recherchés : l'interaction d'un neutrino avec un électron dans le liquide, et l'interaction d'un neutrino avec un hadron – un proton ou un neutron.

Mais comment savoir si l'on est en présence de courants neutres ou juste d'interactions de neutrons ? « Quand l'interaction de neutrinos produisait un neutron à l'extérieur du volume visible, l'interaction était classée "candidat courant neutre". D'après les observations, il existait forcément des interactions neutrinos à courant neutre », explique Claude Charlot. Résultat : au mois de juillet 1973, les chercheurs confirmèrent 166 événements hadroniques et un événement électronique. « Au cours du même mois, l'annonce de la découverte est faite au Cern par Paul Musset, et un papier pour chaque type d'événements sera envoyé à la revue scientifique *Physics Letters*, publiée le 3 septembre 1973 », résume Delphine Blanchard.



© 1970-2024 CERN

▼ Vue de l'intérieur de la chambre à bulles de Gargamelle.

### Émergence du modèle standard

En 1974, l'existence des courants neutres est confirmée par le groupe d'Argonne aux États-Unis, utilisant une chambre à hydrogène de 12 pieds, ainsi que par les expériences Harvard-Pennsylvania-Wisconsin et CalTech du laboratoire Fermi, ce qui ouvrira la voie à l'élaboration du modèle standard de la physique des particules. L'observation directe des bosons  $W$  et  $Z$  en 1983 par les collaborations UA1 et UA2 du Cern – qui vaudra à Carlo Rubia et Simon van der Meer le prix Nobel 1984 –, puis celle du boson de Higgs en 2012 au LHC, qui vaudra le prix Nobel 2013 à François

Englert et Peter Higgs – complèteront et conforteront définitivement le modèle.

Toutefois, s'il reste à ce jour la meilleure description du monde subatomique, ce modèle standard laisse de nombreuses zones d'ombre : il n'explique par exemple ni les échelles de masses des différentes générations de quarks et de leptons, ni l'origine du champ de Higgs, ni la nature de la matière noire postulée par les astrophysiciens pour expliquer la formation et le maintien des galaxies et des amas galactiques. Autant d'énigmes que devra résoudre la physique du XXI<sup>e</sup> siècle... II



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

1. Unité CNRS/École polytechnique. 2. Unité CNRS/EHESS/MNHN.



# Ces plantes qui envahissent le monde

© TONINO DE MARCO / BIOSPHOTO

VIVANT 

**ÉCOLOGIE** Moins médiatisées que les espèces animales invasives, les plantes exotiques envahissantes n'en sont pas moins féroces et se révèlent de redoutables concurrentes pour les plantes locales. Avec à la clé, des impacts négatifs sur les écosystèmes.

PAR MARIE PRIVÉ

À Marseille, il n'y a pas que les touristes qui ont colonisé les Calanques. Une autre menace, plus insidieuse, vient elle aussi peser sur l'équilibre en péril de cet écosystème du pourtour méditerranéen. Des plantes exotiques originaires d'autres continents – griffe de sorcière, figuier de Barbarie ou encore agave d'Amérique – ont tellement proliféré sur le sol des Calanques qu'elles menacent des plantes plus petites, fragiles et endémiques telles que l'emblématique astragale de Marseille. De 2017 à 2022, ce sont 200 tonnes de ces

plantes exotiques envahissantes qui ont ainsi dû être arrachées au cours de coûteuses opérations d'éradication, mobilisant de nombreux scientifiques, entreprises spécialisées, bénévoles... et même, un hélicoptère !

Moins médiatisées que les espèces animales exotiques invasives – frelon asiatique et moustique tigre en tête –, les espèces végétales exotiques envahissantes n'en constituent pas moins une vraie menace pour les écosystèmes planétaires. Sur les dix espèces exotiques envahissantes les plus répandues dans le monde, listées dans le rapport 2023<sup>1</sup> de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES), le « Giec de la biodiversité », sept sont d'ailleurs des plantes, comme le lantier, le robinier faux-acacia ou la jacinthe d'eau.

En France métropolitaine, la liste des plantes exotiques envahissantes ne cesse de s'allonger : l'hélianthe en forêt de Fontainebleau (Île-de-France), la jussie dans les zones humides, l'herbe de la pampa avec ses plumeaux blancs désormais si répandue dans l'Hexagone que les fleuristes l'ont adoptée dans leurs bouquets, la renouée du Japon, ou encore la fameuse griffe de sorcière très prisée des

▲ Hippopotame au milieu de jacinthes d'eau, au parc Kruger (Afrique du Sud). La jacinthe d'eau, originaire d'Amérique du Sud, fait partie des espèces végétales exotiques les plus envahissantes dans le monde.

jardiniers pour ses qualités de couvre-sol et qu'on peut désormais observer des côtes méditerranéennes jusqu'à la pointe du Finistère. Des espèces dont les origines se situent respectivement en Amérique du Nord, en Amérique du Sud (pour la jussie et l'herbe de la pampa), en Asie orientale et en Afrique du Sud.

### Une conséquence de la mondialisation

Certaines plantes exotiques ont une telle capacité à proliférer et à envahir les milieux où elles sont introduites qu'elles sont même qualifiées de « super envahissantes ». Les territoires d'outre-mer sont particulièrement touchés par ces espèces très performantes : « *en Polynésie française, 70 % de la surface de Tahiti est envahie par Miconia calvescens, un arbre originaire d'Amérique centrale et du Sud* », témoigne Céline Bellard, chercheuse CNRS au laboratoire Écologie, systématique et évolution<sup>2</sup>. Surnommé le « cancer vert », le miconia a été retrouvé plus récemment en Martinique en 2017, puis en Guadeloupe en 2020, menaçant l'équilibre fragile de ces écosystèmes insulaires.

Comment ces végétaux ont-ils atterri si loin de leur milieu d'origine ? L'introduction de ces plantes exotiques est intimement liée aux déplacements intercontinentaux effectués par les colons européens à partir du XV<sup>e</sup> siècle. « *C'est ni plus ni moins l'héritage de Christophe Colomb*, souligne Jonathan Lenoir, écologue, chercheur CNRS au laboratoire Écologie et dynamique des systèmes anthropisés<sup>3</sup>. *Les explorateurs ont ramené des espèces indigènes d'Amérique en Europe, et à l'inverse, ceux qui sont partis s'installer dans les colonies ont exporté là-bas les plantes qu'ils affectionnaient.* »

La mondialisation, l'industrie, le commerce, l'agriculture et les nombreux déplacements internationaux ont fait le reste et expliquent le nombre croissant de plantes exotiques introduites à travers le monde au fil du temps, avec une nette accélération depuis les années 1970. « *On a introduit ces végétaux en masse dans les jardins, les villes, sur les ronds-points, le long des routes*, raconte Laurence Affre, écologue à l'Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale<sup>4</sup> (IMBE), *parce qu'ils sont jolis, avec leurs couleurs et leurs formes inhabituelles.* » C'est précisément ce qui est arrivé avec le miconia, introduit en 1937 à Tahiti comme plante ornementale dans un jardin botanique privé.

Problème : une fois introduites dans un nouveau milieu, les plantes exotiques ne se contentent pas de « rester plantées là ». Contrairement à ce que suggère l'expression, les plantes se déplacent ! Elles disposent en effet d'un large arsenal de vecteurs de dispersion pour « s'échapper » et parcourir des distances parfois très longues. Les graines issues de leur reproduction peuvent ainsi être transpor-

“*En Polynésie française, 70% de la surface de l'île de Tahiti est envahie par Miconia calvescens, aussi surnommé le « cancer vert ».*”

tées par les humains, sous les semelles de leurs chaussures ou les pneus de leurs véhicules, mais aussi par les animaux via leur pelage ou leurs déjections, par le vent ou encore par l'eau.

### Reproduction et développement plus efficaces

Or, si « seulement » 6 % des plantes exotiques introduites hors de leur territoire d'origine deviennent envahissantes d'après l'IPBES, leur propagation a un impact bien réel sur la biodiversité dont on commence à prendre toute la mesure. Les espèces végétales exotiques envahissantes provoquent notamment « *une dégradation des écosystèmes, avec une diminution de l'abondance des plantes indigènes et une modification importante des caractéristiques du sol* », détaille Laurence Affre. Avec ses feuilles gigantesques, *Miconia calvescens* a ainsi la capacité d'étouffer complètement la végétation environnante, qui ne par-

▲ Garde nature portant des feuilles de *Miconia calvescens* dans la forêt humide de Nouvelle-Calédonie.



© NICOLAS-ALAIN PETIT / BIOSPHOTO

1. <https://www.ofb.gouv.fr/actualites/publication-du-rapport-de-lipbes-sur-les-especes-exotiques-envahissantes> 2. Unité CNRS/AgroParisTech/Université Paris-Saclay. 3. Université de Picardie Jules Verne. 4. Unité CNRS/Aix-Marseille Université/Avignon Université/IRD.

vient plus à capter la lumière. « *On assiste alors à la formation de forêts composées exclusivement de miconia qui détruisent l'habitat des espèces endémiques et les menacent d'extinction, en Polynésie et dans les Antilles notamment* », indique Céline Bellard.

C'est que les végétaux transportés hors de leur milieu d'origine disposent d'avantages redoutables sur les plantes locales : lorsqu'ils sont introduits dans une nouvelle région géographique, ils se retrouvent dépourvus des ennemis présents dans leur aire d'origine et qui limitaient leur population. Sans les espèces animales herbivores, les agents pathogènes ou les parasites contre lesquels elles devaient lutter, « *ces plantes peuvent allouer davantage de ressources à leur développement et à leur reproduction, contrairement aux plantes indigènes qui doivent toujours utiliser une partie de leur énergie pour combattre leurs ennemis traditionnels* », explique Laurence Affre.

De plus, lorsqu'une plante exotique est introduite, les espèces autochtones se retrouvent dans une situation de « naïveté » face à cette nouvelle plante : n'ayant pas co-évolué avec elle, les espèces indigènes n'ont pas pu développer les armes biologiques pour se défendre ou se protéger si jamais cette nouvelle plante devenait envahissante. C'est particulièrement vrai dans les territoires insulaires qui, avec leurs écosystèmes clos et isolés, sont particulièrement vulnérables aux invasions biologiques : le nombre de plantes exotiques dépasserait désormais le nombre de plantes indigènes sur plus d'un quart des îles dans le monde, selon l'IPBES.

### Une réglementation insuffisante

Face à ce constat préoccupant, les leviers d'action semblent encore insuffisants. Côté législation, les mesures se révèlent disparates : 83 % des pays sont dépourvus de réglementation nationale spécifique sur les espèces exotiques envahissantes. Ils sont néanmoins de plus en plus nombreux à établir des listes de contrôle et des bases de données officielles répertoriant ces espèces (196 pays



© GUY THOUVENIN / ROBERT HARDING HERITAGE VIA AFP

Très à la mode dans les années 1970, l'herbe de la pampa s'est « échappée » des jardins et se retrouve désormais sur tout le territoire français.

en 2022). L'Union européenne a mis en place en 2014 une liste réglementaire des espèces jugées préoccupantes (88 à ce jour, dont 41 plantes) et soumises à des restrictions strictes de détention, d'importation, de vente ou de culture. Mais le nombre d'espèces concernées par cette liste est trop faible, selon les scientifiques.

Les moyens de lutte contre les plantes exotiques envahissantes se sont fortement développés au cours de la dernière décennie. Pour éradiquer celles qui posent problème, l'arrachage reste la méthode la plus commune : « *C'est efficace mais ça demande beaucoup de travail*, concède Élise Buisson, chercheuse à l'IMBE et coordinatrice scientifique d'un programme ayant permis l'éradication des griffes de sorcière sur l'île de Bagaud, dans le Var. *En raison de la banque de graines en dormance dans le sol, on doit revenir chaque année pour arracher de nouveau les nouvelles germinations qui font surface.* »

Plus complexes et chronophages, les techniques de lutte biologique font aussi partie des solutions explorées par la recherche, même si l'introduction de nouvelles espèces fait toujours peser un risque sur les écosystèmes... La colonisation de *Miconia calvescens* a par exemple pu être ralentie à Tahiti par l'introduction d'un champignon pathogène au début des années 2000.

Lutter contre les plantes envahissantes doit enfin passer par une nécessaire prise de conscience de la société, au-delà du seul cercle des spécialistes. « *Il faut sensibiliser le grand public, qui doit comprendre pourquoi il ne faut pas introduire certaines espèces dans de nouveaux milieux, et surtout informer les décideurs politiques pour qu'ils agissent à la hauteur des dommages causés par les invasions biologiques* », insiste Laurence Affre, qui regrette qu'aujourd'hui encore, on trouve des plantes exotiques reconnues comme envahissantes en vente libre dans les jardinerie françaises, comme l'arbre aux papillons ou la luzerne arborescente... II

Ramassage de jussie d'eau dans le Gard. Sa prolifération met en danger les écosystèmes locaux et gêne la navigation.



© CIRIL FRÉSCILLON / CHIMICO / CNRS IMAGES

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

# LES IDÉES



*Une mafia où le silence est roi  
et des bulles dont les chercheurs  
font toute une histoire.*

# La mafia, le silence et l'anthropologue

Après vos premières enquêtes ethnographiques menées dans plusieurs régions du sud de l'Europe, vous vous êtes intéressée à la « mafia ». Cela vous a amenée à développer, notamment dans les ouvrages *Mafiacraft* (2021) et *La Nuit de la parole* (2023), un nouveau paradigme que vous appelez « anthropologie du silence ». En quoi consiste cette démarche ?

**Deborah Puccio-Den**<sup>1</sup>. C'est d'abord une démarche critique : l'anthropologie s'est essentiellement basée sur des entretiens avec des « informateurs » et la question du silence y a rarement été abordée du point de vue de la méthode, or elle était essentielle pour moi car mon objet d'étude, la mafia sicilienne, est silencieux. En effet, son mode d'existence dans la société et au monde est le silence. Il m'a donc été nécessaire de fabriquer un outillage méthodologique différent, inspiré des méthodes d'enquête utilisées et en partie inventées par les magistrats antimafia comme Giovanni Falcone et les militants antimafia en Italie, pays berceau de Cosa Nostra.

Dans *Mafiacraft*, je reviens sur les stratégies d'enquête que j'ai dû mettre en place lorsque j'ai commencé à travailler sur la mafia il y a près de trente ans, et sur les répercussions de ces choix méthodologiques sur le plan



© EMMANUELLE CORNEFIMSH

SOCIÉTÉS

**ENTRETIEN** Comment étudier une organisation criminelle dont une des raisons d'être est de nier son existence même ? Pour y parvenir, Deborah Puccio-Den a développé un nouveau paradigme : l'anthropologie du silence.

PROPOS RECUEILLIS PAR WARDIA MOHAMED

théorique et épistémologique. Le silence est alors devenu un outil d'enquête puissant, au fort potentiel heuristique.

**Que signifie, dans le cadre de vos travaux, le terme « silence » ?**

**D. P.-D.** Ce n'est pas un phénomène défini de façon négative par la privation de mots, de bruits, de sons et de significations. Je montre au contraire que le silence autour de la mafia peut être caractérisé par une surabondance de mots qui essaient de la définir sans y parvenir, jusqu'à ce que le droit impose une parole performative. De plus, on a souvent défini la mafia à partir de ce qu'elle n'est pas, contribuant à l'entourer de mystère, à la sacraliser ; je considère le silence comme une modalité d'action, qui a une force et un pouvoir, utilisée par certains groupes sociaux, dont la mafia.

**Quel est le rôle du silence dans ce type d'organisations ?**

**D. P.-D.** Plusieurs « repentis » m'ont

raconté leur carrière criminelle : ils avaient tué des centaines de personnes sans jamais prononcer de leur vie les mots « meurtre » ou « massacre ». Quand les « hommes d'honneur » parlent de ce qu'ils font, ils ne disent pas « *Je vais tuer telle personne, de telle manière* » mais « *Je vais faire ce travail/cette chose* ». Ce silence (omerta) permet de ne pas formuler les choses dans son cerveau.

Dans cette imprécision du langage s'ancre une action qui n'a pas de sens réel pour eux. Donc pour un homme d'honneur, le langage n'est pas un outil descriptif de la réalité mais un moyen pour s'en détourner. Les crimes de la mafia existent dans cet espace du langage que j'appelle « silence », où on ne peut pas dire les choses pour ce qu'elles sont. Ainsi, à chaque interrogatoire ou procès, lorsque des processus de parole sont mis en œuvre, les hommes d'honneur sont obligés de prendre acte de ce qu'ils ont fait et de voir que Cosa Nostra est une organisation criminelle. Une double identité est explorée par



À lire :

*La Nuit de la parole. Écouter le silence, Deborah Puccio-Den, Société d'ethnologie de Nanterre, juin 2023, 192 p.*

*Mafiacraft. An Ethnography on Deadly Silence, Deborah Puccio-Den, The University of Chicago Press, avril 2021, 294 p.*

1. Directrice de recherche au CNRS, au Laboratoire d'anthropologie politique (CNRS/EHESS).



© PIERO GUERRINI/GAMMA-RAPHO

les hommes d'honneur qui sont à la fois pères de famille et assassins, sans que la personne et le personnage ne coïncident parfaitement.

#### Le silence leur permet de supporter leurs actes ?

**D. P.-D.** Absolument. La perception de ce que l'on fait quand on ne parle pas de ce que l'on est en train de faire est totalement différente. C'est ce qui permet à l'intenable de tenir. Les « mafieux » prennent conscience de leurs actes quand ils deviennent « repentis » et doivent les décrire aux procureurs et aux juges qui exigent leurs témoignages. Ce passage du silence à la parole déclenche des crises existentielles terribles : les hommes d'honneur se révèlent être, comme le disait le repentis Antonino Calderone, des « hommes du déshonneur ».

Le premier repentis de l'histoire italienne, Leonardo Vitale, a sombré dans la folie à cause de la culpabilité lancinante qu'il a ressentie à partir du

moment où il a avoué ses crimes et en a pris conscience. Cette contradiction peut conduire à des formes de schizophrénie. Aujourd'hui, les repentis ont un statut qui leur permet d'exister en tant que tels, cette transition est moins dramatique parce qu'ils sont pris en charge par l'État.

#### Par quels termes les membres de la mafia désignent-ils leur organisation ?

**D. P.-D.** Lorsque le juge Giovanni Falcone est parvenu à susciter la parole du premier repentis de la mafia Tommaso Buscetta, il a été étonné de l'entendre dire : « *La mafia n'existe pas, c'est une invention littéraire ou de journalistes. Notre association criminelle s'appelle Cosa Nostra et ses membres ne sont pas appelés "mafieux" mais "hommes d'honneur"* ». Ce concept émique de « Cosa Nostra » – « Notre Chose » en français – a ouvert tout un univers de sens, de pratiques et de représentations. Il est en effet

Des accusés derrière les barreaux lors du procès de la mafia à Palerme, le 12 février 1986.

beaucoup plus prégnant que le terme vide de « mafia » pour les hommes d'honneur car il désigne l'ensemble des « choses » qu'ils ont en commun, en particulier l'honneur. Pour eux, cela n'indique pas une valeur morale mais recoupe un ensemble de substances partagées, la première d'entre elles étant le sang.

#### Vous notez par ailleurs que le passage du silence à l'écrit peut donner une nouvelle dimension à ce type d'organisations. Pouvez-vous nous expliquer comment ?

**D. P.-D.** Pour Cosa Nostra, ce passage s'est opéré à un moment précis de son histoire : celui de l'arrestation du chef sanguinaire des Corleonesi, Totò Riina, en 1993. Ceci marque la fin de ladite « stratégie de la terreur » qui a fait plus d'un millier de morts en Italie, entre massacres (attentats contre Falcone

“On a souvent défini la mafia à partir de ce qu'elle n'est pas, contribuant à l'entourer de mystère, à la sacraliser.”

et Borsellino en 1992), homicides et « guerres » entre groupes mafieux.

Ces guerres ont aussi provoqué beaucoup de défections des membres des familles perdantes, qui sont devenus des collaborateurs de justice ou des repentis parce qu'ils ne se reconnaissent pas dans ces modes d'actions « terroristes », ou par peur d'être assassinés. Cosa Nostra, qui comptait 5 000 membres, a presque été décimée. À ce moment-là, Bernardo Provenzano, le bras droit de Totò Riina dans sa campagne d'extermination de ses ennemis, entreprend une œuvre de pacification interne en se posant comme le grand médiateur et pacificateur. Il vit alors en contumace et écrit des lettres, les *pizzini*, pour régler les contentieux internes à Cosa Nostra : « avant de verser du sang, mieux vaut d'abord laisser couler de l'encre<sup>2</sup> ».

**Mais comment l'encre peut-elle devenir aussi persuasive que le sang ?**

**D. P.-D.** Quand Provenzano s'impose comme le chef charismatique de Cosa Nostra, les rituels d'initiation sont en net recul et ce sont alors ses correspondants qui sont désignés comme « hommes d'honneur ». Ils gardent sur eux les *pizzini*, comme une sorte de carte d'identité, un faire-valoir de leur appartenance à Cosa Nostra. Ces documents permettent de définir les contours de l'association et la hiérarchie en son sein, la police ne tardera d'ailleurs pas à identifier les *pizzini* comme des instruments de reconnaissance des « mafieux » et de la « mafia » et ainsi à répondre pour la

première fois à la question « Qu'est-ce que la mafia ? » du point de vue de la mafia elle-même.

Grâce à son usage de l'écriture, Provenzano devient la figure centrale de Cosa Nostra. Il passe ses journées dans son « bureau », écrit sur sa machine à écrire Olivetti, garde toutes les lettres qu'on lui envoie et recopie toutes celles qu'il envoie pour devenir la mémoire vive et panoptique de toutes les affaires de l'association. Cette connaissance lui donne un pouvoir unique parce qu'il est le seul à détenir des informations sur tout le monde. Cela lui donne le pouvoir de chef. Provenzano a même créé une langue que ses correspondants étaient forcés d'emprunter pour lui écrire : ce n'est ni de l'italien, ni du sicilien. D'autres chefs ont essayé de l'imiter pour s'imposer sans y parvenir. Il a aussi construit un code secret

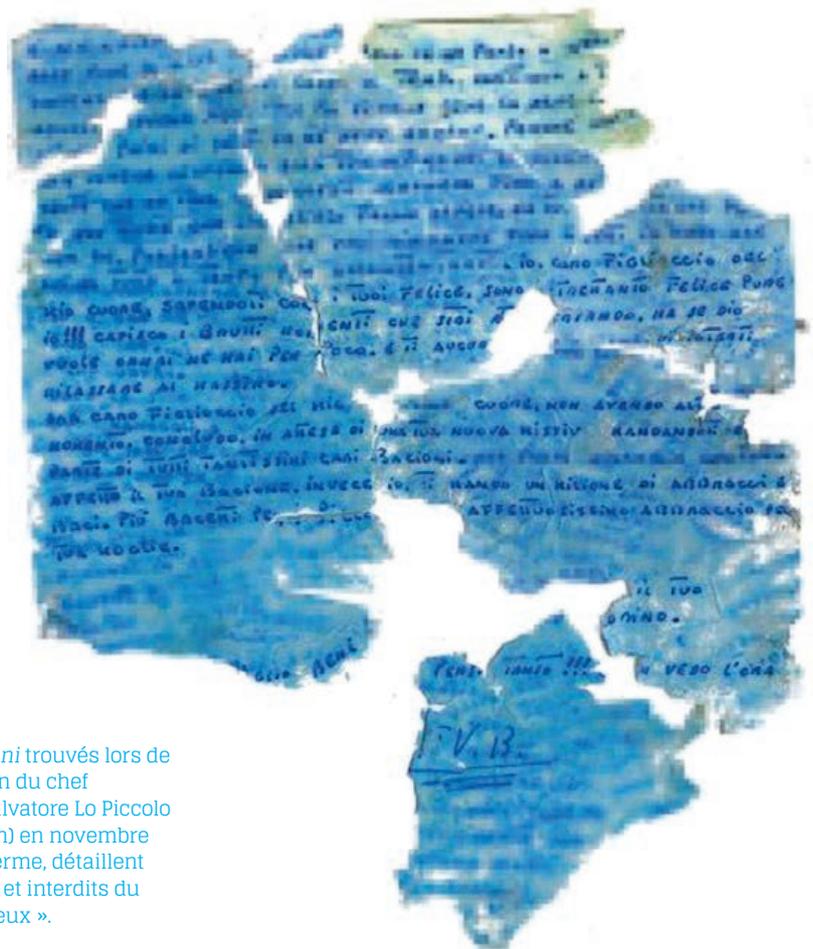
numérique, attribuant un numéro à chaque membre de Cosa Nostra. Évidemment, il s'est attribué le numéro 1.

**Cette « révolution numérique » de Cosa Nostra a-t-elle vraiment chassé le silence ?**

**D. P.-D.** L'introduction de l'écrit dans un monde de silence a été une révolution politique mais lorsqu'on passe du fonctionnement de ce réseau épistolaire à l'analyse du contenu des lettres, on s'aperçoit que cette écriture fonctionne comme du silence : elle continue de ne pas dire les choses. L'écriture mafieuse est ainsi une autre modalité d'action du silence. ||



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



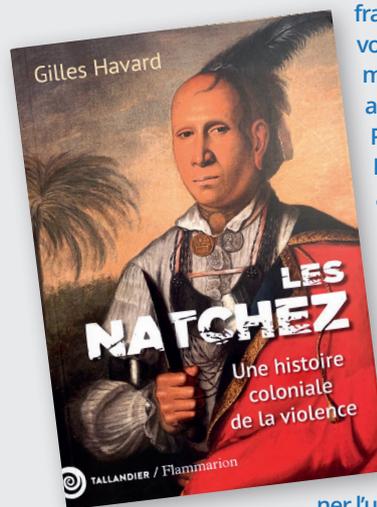
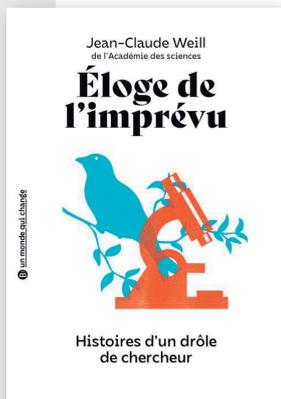
Les *pizzini* trouvés lors de l'arrestation du chef mafieux Salvatore Lo Piccolo (dit le Baron) en novembre 2007, à Palerme, détaillent les devoirs et interdits du « bon mafieux ».

2. Deborah Puccio-Den, « Dieu vous bénisse et vous protège ! La correspondance secrète du chef de la mafia sicilienne Bernardo Provenzano (1993-2006) », *Revue de l'histoire des religions*, 2 | 2011 <http://journals.openedition.org/rhr/7778>

## Itinéraire de chercheur

Court et facile à lire, le livre du biologiste et épidémiologiste Jean-Claude Weill, membre de l'Académie des sciences, raconte sa vie de chercheur sous la forme d'un dialogue avec un jeune étudiant. Une occasion pour l'académicien d'expliquer comment la recherche se fait et se déroule, mais aussi de livrer quelques anecdotes sur ses confrères et consœurs. Au-delà des sciences, *Éloge de l'imprévu* traite aussi de la question de savoir comment réussir sa vie professionnelle, les itinéraires menant à la réussite pouvant être nombreux et parfois... imprévisibles !

*Éloge de l'imprévu. Histoires d'un drôle de chercheur, Jean-Claude Weill, Belin Éducation, coll. « Un monde qui change », septembre 2023, 176 p., 19,90 €.*



## Histoire coloniale

En 1729, à 300 km au nord de La Nouvelle-Orléans, les Natchez massacrent soudainement des colons français installés dans leur voisinage. Les représailles, féroces, mènent ce peuple amérindien au bord de la disparition. Pourtant, depuis l'arrivée des Français plusieurs années auparavant, la bonne entente régnait et les échanges culturels et commerciaux allaient bon train. Que s'est-il vraiment passé ? C'est sur cette énigme qu'a enquêté l'historien Gilles Havard, à grand renfort de sources orales comme écrites. Une manière aussi, selon l'auteur, de questionner l'usage de la violence dans un contexte colonial.

*Les Natchez. Une histoire coloniale de la violence, Gilles Havard, Tallandier/Flammarion, janvier 2024, 608 p., 26,90 €.*

## À lire

## Médecine

Véritable fléau des temps modernes, le cancer ne cesse d'impacter nos sociétés. Destiné au grand public, cet ouvrage du médecin-chercheur Jacques Robert

expose les avancées majeures réalisées ces dernières années dans la compréhension et la prise en charge des cancers. Comment les cancers surviennent-ils ? Comment sont-ils dépistés ? Ou encore, quels sont les traitements

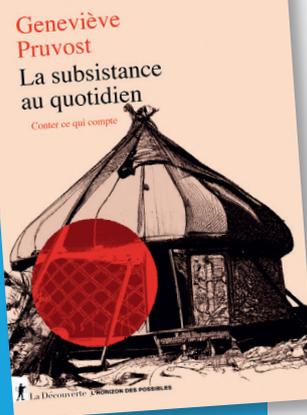
innovants en usage actuellement ? Voici quelques-unes des questions auxquelles l'auteur apporte des éléments de réponse, sans occulter tous les défis que doit encore relever la science dans sa lutte contre cet ennemi intérieur.

*Cancer, l'ennemi intérieur, Jacques Robert, Préface d'Axel Kahn, CNRS Éditions, janvier 2024, 325 p., 25 €.*



*Modes de vie* Geneviève Pruvost compile dans cet ouvrage les travaux de dix ans d'enquête sur la subsistance dans une société mondialisée, régie par nos rythmes de consommation-production. La sociologue, médaillée de bronze du CNRS, nous propose une plongée dans le quotidien d'une maisonnée de boulangers-paysans qui tentent de développer leur activité tout en s'intégrant au mieux au biotope dans lequel ils se trouvent. Le récit de cette réflexion et de cet engagement montre que des alternatives à la société capitaliste, telle qu'elle existe aujourd'hui, résistent, voire gagnent du terrain.

*La subsistance du quotidien. Conter ce qui compte, Geneviève Pruvost, La Découverte, coll. « L'horizon des possibles », février 2024, 504 p., 28 €.*



## Épidémies

Sous la houlette de deux instituts du CNRS, CNRS Biologie et CNRS Écologie et Environnement, un panel de scientifiques dresse un état des lieux des connaissances acquises sur le SARS-CoV-2, et proposent de retracer « l'histoire naturelle du virus » responsable du Covid-19. Émergence, évolution, modélisation, prévention... cet ouvrage est essentiel pour mieux comprendre la recherche en virologie et en épidémiologie, et mieux appréhender les pandémies qui, sans nul doute, viendront à nouveau déstabiliser nos sociétés.

*L'ère des pandémies. Covid : les avancées de la recherche, Florence Débarre et Françoise Praz (dir.), Préface d'Arnaud Fontanet, CNRS/Le Cherche Midi, février 2024, 176 p., 19 €.*



# Quand la recherche rêve de bulles

© PHOTOPQR/LE PARISIEN/MAXPPP

**Les BD consacrées à la science se multiplient, battant pour certaines des records de vente (*Le Monde sans fin* de Jean-Marc Jancovici a été le livre le plus acheté en France en 2022). Comment expliquer cette attirance mutuelle ?**

**Boris Pétric**<sup>1</sup>. D'une part, on a le monde de la BD qui cherche de nouveaux sujets et qui trouve des enquêtes sérieuses et détaillées auprès des scientifiques. D'autre part, on a de plus en plus de scientifiques qui ont envie de se lancer dans cette aventure. La société s'intéresse à ce que font les scientifiques qui, par conséquent, doivent faire des efforts pour aller vers ces publics. Les retours d'expérience sont pour la plupart positifs, car ils montrent souvent que tant les bédésistes que les scientifiques tirent un sentiment de satisfaction de



E. COLL. PERS.

## SOCIÉTÉS

**ENTRETIEN** Certaines bandes dessinées consacrées à la science sont devenues de véritables best sellers et de nombreux scientifiques ont adopté ce support comme outil de médiation, voire d'écriture. Boris Pétric, anthropologue, revient sur le succès de cette rencontre.

PROPOS RECUEILLIS PAR MAXIME LEROLLE

cette écriture collective, dans une forme d'enrichissement mutuel qui n'opère pas de distinction entre les domaines du créatif et du scientifique.

### Pourquoi cet intérêt des scientifiques pour la bande dessinée ?

**B. P.** Ce qui est magique dans la BD, c'est son succès populaire qui permet d'entrer en dialogue avec la société. Avec près de 85 millions d'exemplaires, tant de BD que de mangas, achetés en 2022 pour un chiffre d'affaires de

921 millions d'euros, le secteur représente un quart des ventes de livres en France et 10 % du chiffre d'affaires du marché de l'édition<sup>2</sup>.

Par ailleurs, la BD fournit des moyens efficaces pour lutter contre d'autres formes de récits, comme les fake news, qui contredisent les études scientifiques. C'est par exemple l'enjeu du livre illustré *Tout comprendre (ou presque) sur le climat* (CNRS Éditions) qui combat le climatocépticisme. Derrière cette question de la média-

1. Anthropologue et directeur de recherche au CNRS au Centre Norbert Elias (CNRS/Aix-Marseille Université/Avignon Université). 2. Voir : <https://actualitte.com/article/9706/edition/la-bande-dessinee-en-france-chiffres-et-etat-des-lieux> 3. <https://lafabriquedesecritures.fr/>

► Festival international de la bande dessinée, édition 2023, Angoulême.

tion, il y a un réel enjeu social à ce que les scientifiques s'emparent de la BD pour montrer comment se fabriquent le savoir et les données scientifiques, tout en évitant des discours à charge, très polarisés.

**Pour d'autres, la BD constitue une nouvelle manière d'écrire, voire de faire de la recherche. Dans quelle mesure cette pratique modifie-t-elle la façon de produire et de transmettre des connaissances ?**

**B. P.** Participer à l'écriture d'une BD, de quelque manière que ce soit, apporte beaucoup à la pratique de la recherche, car elle permet de se poser deux questions fondamentales. Premièrement, la question de la narration : comment raconter mon enquête ? quelle forme va-t-elle prendre ? Cette question en apparence technique en recèle une autre : comment se fabrique la connaissance ? et donc comment montre-t-on ce processus ? Cette interrogation est centrale dans les processus de co-création éditoriale, au terme desquels les scientifiques apparaissent en tant que co-auteurs de la bande dessinée.

Secondement, la question de l'ellipse. Alors qu'un scientifique se singularise par son statut d'expert accumulant des connaissances précises depuis des années, la BD doit, dans une seule bulle, synthétiser des informations qui, autrement, occuperaient des pages, voire des dizaines de pages. Par conséquent, tout scientifique qui s'engage dans cette aventure doit accepter de réduire et densifier la réalité dans une bulle.

**Toutes les disciplines scientifiques sont-elles concernées par cette vogue éditoriale ?**

**B. P.** On observe un plus grand volume de publications en sciences dites « dures », avec des BD sur le spationaute Thomas Pesquet ou l'astrophysicien Hubert Reeves, qu'en sciences humaines et sociales (SHS). Toutefois, l'apport de la BD aux SHS en particulier est fondamental : puisqu'on travaille sur des humains, il

est crucial que notre savoir puisse être débattu, contesté, mais surtout enrichi par ces échanges avec le public. De manière générale, toutes les sciences ont intérêt à collaborer avec les disciplines artistiques qui se posent la question du récit. Celle-ci nous invite à revenir aux problèmes de philosophie des sciences et aux implications éthiques, philosophiques, déontologiques et épistémologiques de nos recherches.

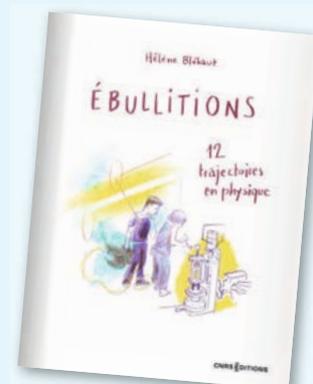
D'une certaine façon, écrire en BD nous prémunit de devenir des techniciens, des professionnels de l'expertise, en nous obligeant à sortir d'un langage scientifique ésotérique, notre fameux jargon. Cependant, définir et raconter le protocole scientifique en BD est un art exigeant qui requiert l'acquisition de nouvelles compétences en narration et en ellipse.

**Vous avez à ce propos fondé la Fabrique des écritures ethnographiques<sup>3</sup>. Pourriez-vous présenter cette structure ?**

**B. P.** Face aux évolutions de la société, les chercheurs doivent également changer. De fait, l'écriture scientifique classique n'est pas la seule manière d'écrire. C'est pourquoi j'ai créé, il y a dix ans, la Fabrique des écritures ethnographiques et, en 2020, le Salon des écritures alternatives. Dans les deux cas, l'idée était de s'emparer des moyens contemporains de production (podcast, BD, film, etc.), qui sont autant de formes alternatives d'écriture, en fédérant des acteurs scientifiques jusqu'alors éclatés. Dans ce réseau, nous partageons des pratiques et des réflexions épistémologiques, y compris nos expériences ratées. On a depuis créé une véritable dynamique pour réfléchir à ces questions d'écriture, loin d'être seulement formelles mais qui sont rarement enseignées en France. ||

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

## À lire



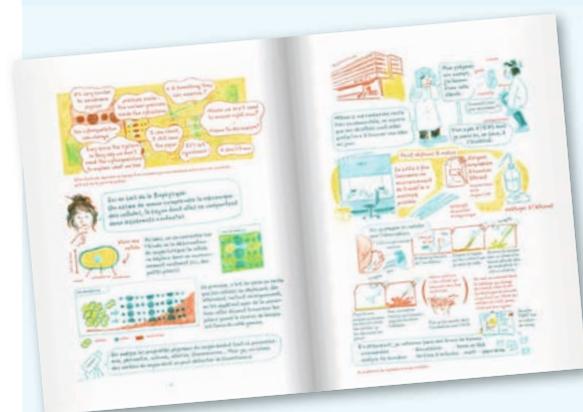
### Découvrir la physique en bande dessinée

Si vous avez toujours rêvé de savoir comment se déroule le quotidien dans un laboratoire de recherche en physique, cette bande dessinée est faite pour vous. À travers les portraits de six hommes et six femmes qui occupent des postes variés dans différents laboratoires CNRS (chercheuse, ingénieur d'études, directrice de laboratoire, doctorant, etc.), l'illustratrice et autrice Hélène Bléhaut nous propose une visite colorée des coulisses de la recherche. De la construction de puissants lasers à la compréhension de la mécanique des cellules vivantes, en passant par l'étude des particules élémentaires, cette BD est incontournable pour les plus jeunes d'entre nous qui souhaiteraient s'orienter vers des études scientifiques, mais aussi pour tous les curieux.

**Ébullitions. 12 trajectoires en physique, Hélène Bléhaut, CNRS Éditions, février 2024, 112 p.**

**À retrouver sur :**

<https://www.inp.cnrs.fr/fr/ebullitions>





de Denis Guthleben,  
historien au CNRS

# Jean Zay? C'est la République!

**20** juin 1944. Deux semaines après le débarquement allié en Normandie, des miliciens de Vichy extraient un détenu de la prison de Riom, dans le Puy-de-Dôme, au prétexte de le transférer à Melun. Arrivés près de Cusset dans l'Allier, ils l'assassinent, jettent son corps dans une crevasse et le recouvrent sous un éboulement. Jean Zay n'avait pas 40 ans. Plus qu'un homme, c'est un symbole que les meurtriers ont cherché à faire disparaître ce jour-là : une incarnation de la République, ainsi que le relève son biographe Olivier Loubes<sup>1</sup>.

## Républicain de cœur et d'âme

Né à Orléans en 1904, Jean Zay accomplit un brillant parcours au sein de l'École républicaine. Il entreprend ensuite des études de droit, rejoint le parti radical, la Ligue des droits de l'Homme, et écrit dans les colonnes du journal que dirige son père Léon – *Le Progrès du Loiret*, devenu *La France du Centre* en 1927. Inscrit au barreau d'Orléans l'année suivante, il est élu député du Loiret en 1932 et ne tarde pas à apparaître comme une étoile montante de son parti, dont il contribue à préparer le ralliement en 1935 à un rassemblement populaire associant socialistes et communistes.

ments qui se succèdent jusqu'en septembre 1939, et pour cause : le jeune ministre met toute la force de ses convictions et de son engagement au service de la République, bâtissant une œuvre immense non seulement en faveur de l'enseignement et de sa démocratisation, mais aussi dans le champ de la culture – on lui doit le Festival de Cannes ! – ou dans celui de la recherche scientifique.

## Vers le CNRS

En juin 1936, la recherche a fait pour la première fois son entrée au gouvernement avec l'instauration d'un sous-secrétariat d'État rattaché à l'Éducation nationale. Pendant trois mois, Jean Zay travaille ainsi de concert avec Irène Curie – car pour la première fois aussi, avec le Front populaire, des femmes font leur entrée au gouvernement... bien qu'elles soient encore privées du droit de vote ! Puis, à partir de septembre 1936, la grande chercheuse ayant exprimé son souhait de retrouver son laboratoire, le physicien Jean Perrin est appelé à prendre sa suite : « Ce sous-secrétaire d'État septuagénaire et glorieux déploya aussitôt la fougue d'un jeune homme, l'enthousiasme d'un débutant, non pour les honneurs, mais pour les moyens d'action qu'ils fournissaient », se souvient quelques années plus tard dans ses mémoires, *Souvenirs et solitude*, un Jean Zay rempli d'admiration.

N'est-ce pas dans ce domaine, qui lui était pourtant étranger, que l'héritage de Jean Zay est le plus édifiant ? Ses réalisations permettent en tout cas de distinguer l'homme d'État qu'il a été, des hommes et femmes politiques qui ont laissé une trace souvent plus fugace dans notre histoire. À la tête de son ministère, Jean Zay n'a pas asséné ses certitudes à la communauté savante, mais a su en écouter les attentes et apporter un soutien sans faille à celui qui les défendait avec le plus d'inspiration. Avec Jean Perrin, Jean Zay a ainsi installé la science au cœur de la société, et auprès des plus jeunes surtout, en créant le Palais de la Découverte. Ensemble, ils ont aussi conçu et bâti une nouvelle organisation de la recherche, en jetant les bases du CNRS. Et si l'on se demande pourquoi la signature de Jean Zay ne figure pas sur le décret fondateur de notre établissement, le 19 octobre 1939, une dernière précision s'impose : il a choisi de quitter son ministère le 2 septembre 1939, à la veille de la déclaration de guerre de la France au Troisième Reich, pour revêtir son uniforme de sous-lieutenant et rejoindre la IV<sup>e</sup> armée française en Lorraine... II

*“Avec Jean Perrin, Jean Zay a installé la science au cœur de la société [...]. Ensemble, ils ont aussi conçu et bâti une nouvelle organisation de la recherche, en jetant les bases du CNRS.”*

Les élections législatives du 26 avril et du 3 mai 1936 consacrent la victoire de cette coalition : à partir du 4 juin, le Front populaire prend en main le destin de la France. Léon Blum accède à la présidence du Conseil, tandis que Jean Zay, à 31 ans, reçoit le portefeuille de l'Éducation nationale. Il conserve cette fonction capitale dans tous les gouverne-

1. *Jean Zay*, Olivier Loubes, Éditions Armand Colin, 2012.



FONDATION 

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

**SOUTENEZ-NOUS**

Site web : [fondation-cnrs.org](http://fondation-cnrs.org)

Par courrier à la Fondation CNRS : 3, rue Michel-Ange - 75016 Paris

**CONTACTS**

Téléphone : 01 44 96 44 49

E-mail : [contact@fondation-cnrs.org](mailto:contact@fondation-cnrs.org)

# CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS

#15 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)