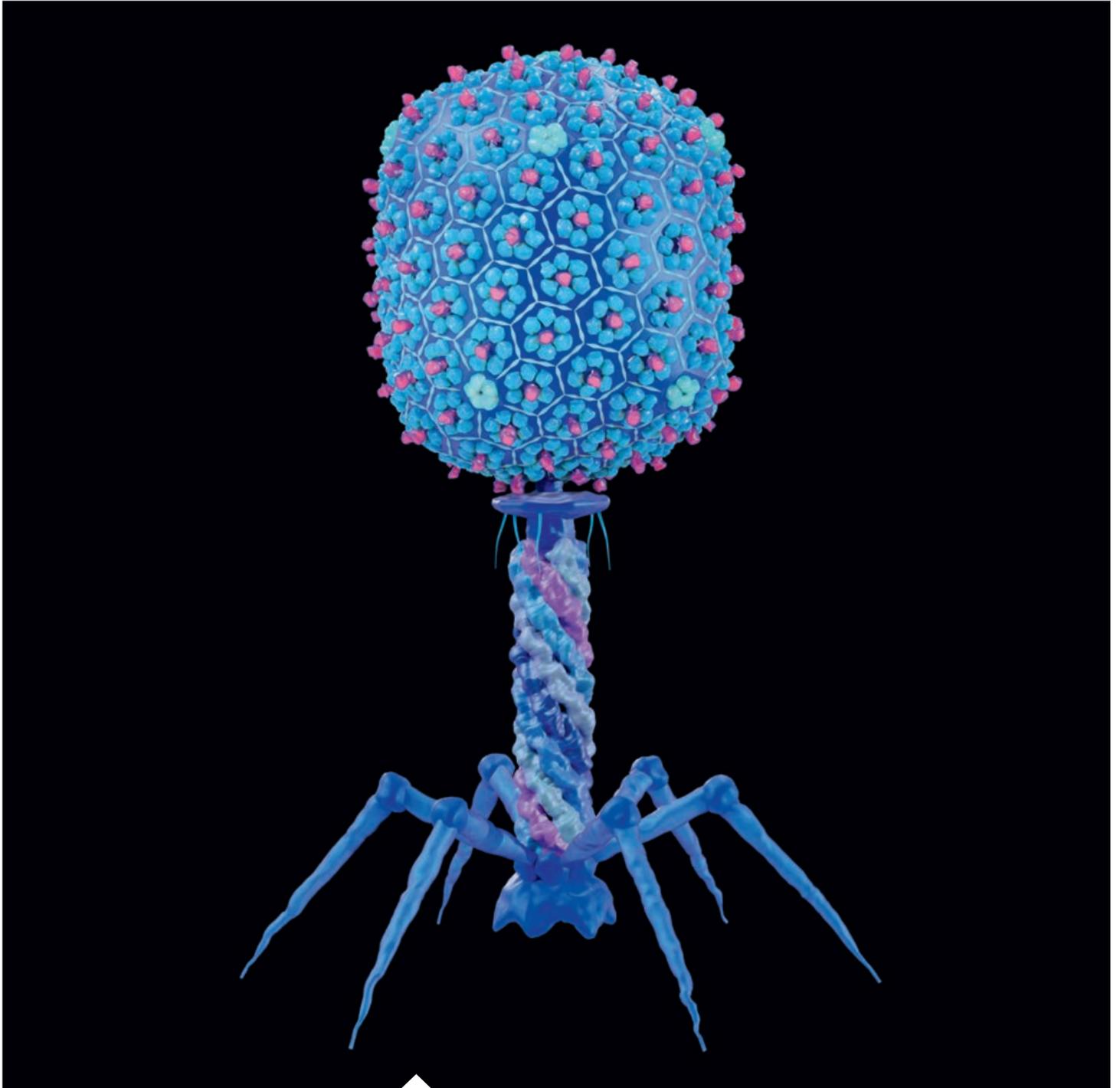


Trimestriel n° 319
AVRIL 2025

CNRS

LE JOURNAL



UNIVERS
Le Big Bang à portée
de télescope

DOSSIER
**Pathogènes : résister
aux résistances**

PORTFOLIO
Drones : la Terre
vue du CNRS

KUMIKO KOTERA
Conteuse de
cataclysmes cosmiques



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° 027 188 - BPC - Société anonyme - 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 Jellamio - 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



Retrouvez-nous chez



Rédaction :

3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16

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

Antoine Petit

Directeur de la rédaction :

Jérôme Guillbert

Rédacteur en chef :

Saman Musacchio

Rédacteurs en chef adjoints :

Laure Cailloce, Yaroslav Pigenet

Rédacteurs :

Sophie Félix, Mehdi Harmi, Marina Julienne

Maxime Lerolle, Laurence Stenvot

Ont participé à ce numéro :

Anaïs Culot, Grégory Fléchet,

Morgane Gillard, Mathieu Grousson,

Émilie Martin, Vahé Ter Minassian,

Louise Mussat, Matthieu Stricot

Secrétaire de rédaction :

Fabien Maréchal

Direction artistique :

David Faure

Iconographes :

Anne-Emmanuelle Héry, Sophie Léonard

et Valérie Delchambre

Gestionnaire :

Mathieu Chatellier

Assistant de direction :

Frédéric Roman

Impression :

Roto France Impression

25 rue de la Maison Rouge, 77185 Lognes

ISSN 2261-6446

Dépôt légal : à parution



Photos CNRS disponibles à :

contact-mediathèque@cnrs.fr

<https://images.cnrs.fr>

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

En couverture :

Illustration de bactériophage.

© Tumeggy/Science Photo Library

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

Abonnez-vous gratuitement sur :

» lejournald.cnrs.fr/abojournal

Suivez l'actualité de la recherche avec le CNRS



L'Année des géosciences bat son plein ! De la rentrée 2024 à l'été 2025, en partenariat avec le CNRS et le ministère de l'Éducation nationale, cet événement vise à sensibiliser le public à l'importance des sciences qui étudient notre Terre. Il s'inscrit dans une démarche éducative essentielle : former les jeunes générations, futurs citoyens et professionnels, à mieux comprendre et anticiper les défis de notre société. Après tout, ce sont elles qui prendront en charge, par leurs compétences et leurs rêves, l'avenir de notre société.

Cette initiative s'adresse en priorité aux enseignantes et enseignants, en leur fournissant des ressources pédagogiques adaptées pour intégrer les géosciences aux programmes scolaires. CNRS Terre et Univers (l'institut national des sciences de l'Univers du CNRS) – aux côtés du Bureau de recherches géologiques et minières, du Muséum national d'histoire naturelle et de la Société géologique de France – joue un rôle clé en mettant à disposition des contenus scientifiques accessibles et rigoureux.

L'Année des géosciences représente une opportunité unique d'enrichir les pratiques pédagogiques et de lier les concepts scientifiques aux enjeux environnementaux, sociétaux, économiques et culturels, comme d'ailleurs les programmes invitent à le faire. Elle permet aussi de mettre en avant la démarche scientifique, un outil essentiel pour développer l'esprit critique et former des citoyens éclairés, capables de lutter contre les révisionnismes et les vérités alternatives.

Les géosciences ouvrent également de nombreuses perspectives professionnelles dans des secteurs cruciaux : gestion des ressources naturelles, adaptation au changement climatique, prévention des risques environnementaux...

En mettant l'accent sur la diversité des métiers et la féminisation de la discipline, cette année spéciale souhaite encourager les vocations, notamment auprès des jeunes filles. À travers des actions concrètes dans les établissements scolaires, qui peuvent être déterminantes pour l'orientation des élèves, les scientifiques du CNRS et de ses partenaires joueront un rôle moteur pour rapprocher science et éducation.

Le CNRS est un acteur engagé dans l'action publique pour que son expertise scientifique éclaire l'ensemble des décideurs. Sa capacité reconnue à animer des expertises scientifiques collectives lui permet d'éclairer les politiques publiques, qu'il s'agisse, à l'échelle nationale, de former 18 000 fonctionnaires d'État aux enjeux climatiques et à l'érosion de la biodiversité en 2024, ou d'accompagner les collectivités locales grâce à ses observatoires, laboratoires et personnels.

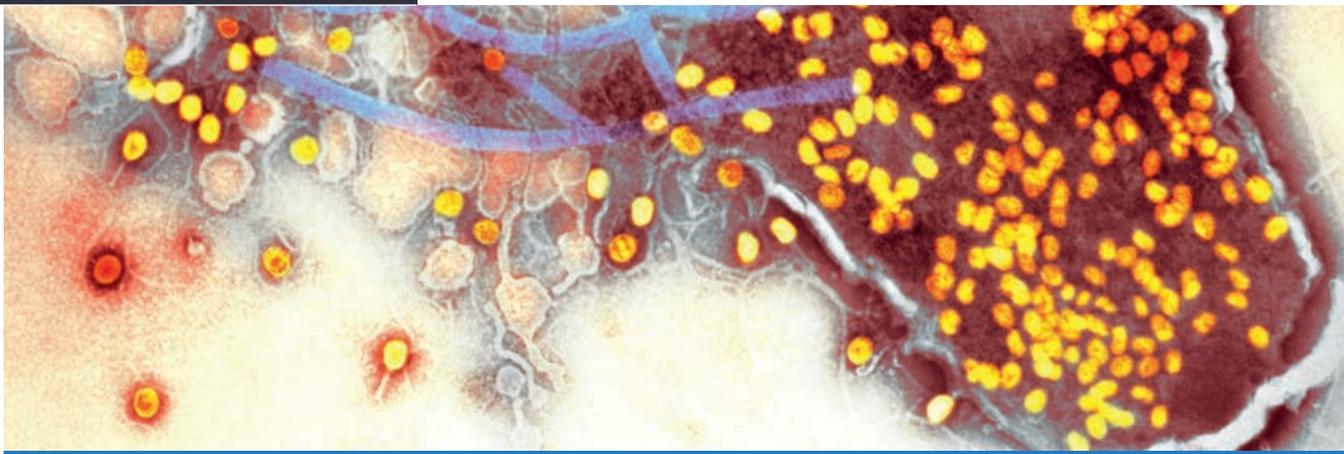
Aujourd'hui, plus que jamais, la société a besoin de science. À travers l'Année des géosciences, le CNRS réaffirme son engagement : une recherche d'excellence au service de la formation et du corps enseignant, et donc au service de la société.

*“L'Année des
géosciences
représente
une opportunité
unique d'enrichir
les pratiques
pédagogiques.”*



Nicolas Arnaud
Directeur de CNRS Terre et Univers

© SCIENCE PHOTO LIBRARY/DEPT. OF MICROBIOLOGY, BIOCENTRUM/BILELGA



GRAND FORMAT

17

Antibiotiques et antifongiques : résister aux résistances.....	18
Bactériophages, quand la médecine devient virale.....	20
Antifongiques : les mycoses résistent.....	24
La Terre vue du CNRS.....	28
Le Big Bang à portée de télescope.....	34



6

« Le CNRS affirme ses ambitions scientifiques et ses priorités pour les cinq ans à venir »

© CYRIL BRÉSEILLON / CNRS IMAGES

EN PERSONNE

5

« Le CNRS affirme ses ambitions scientifiques et ses priorités pour les cinq ans à venir »	6
Hommage à Alain Fuchs, ancien président du CNRS	10
Brèves	13
Kumiko Kotera, conteuse de cataclysmes cosmiques	14



50

Ces étoiles qui explosent sans disparaître

© ILLUSTRATION NASA/ESA, L. HUETAK (ETS-O)

EN ACTION

39

Quand la Méditerranée s'est vidée	40
Sur la route des gens du voyage	42
Des réseaux intelligents pour les énergies renouvelables	46
Arthur, premier robot archéologue en eaux profondes	48
Ces étoiles qui explosent sans disparaître	50
Le tricot, métamatériau du quotidien	52
Eaux usées traitées, une source sous-exploitée	54
« Préserver le débat démocratique contre la haine et le mensonge »	56



60

Les parcs africains, ou l'histoire d'un colonialisme vert

© L. SIBON/ALBAEA

LES IDÉES

59

Les parcs africains, ou l'histoire d'un colonialisme vert ...	60
Hedy Lamarr, le génie scientifique éclipsé par la beauté ...	64

LA CHRONIQUE

L'interdisciplinarité en marche	66
---------------------------------------	----

EN PERSONNE

Ils et elles incarnent la science d'aujourd'hui, ont mené celle d'hier, inventent celle de demain. Leur point commun? Polir au plus près les outils technologiques ou structurels pour viser plus loin...

«Le CNRS affirme ses ambitions scientifiques et ses priorités pour les cinq ans à venir»

ENTRETIEN Le CNRS vient de signer avec l'État le Contrat d'objectifs, de moyens et de performance pour la période 2024-2028. Président-directeur général de l'organisme, Antoine Petit en commente les points clés.

PROPOS RECUEILLIS PAR SOPHIE FÉLIX

Depuis les années 1990, le contrat d'objectifs et de performance (COP) est un document stratégique réglementaire signé entre un établissement public et l'État, via les ministères de tutelle. Il permet aux opérateurs de l'État de définir leurs priorités et leurs objectifs, ainsi que des indicateurs de performance et de suivi. Depuis 2023, le ministère en charge de l'Enseignement supérieur et de la Recherche signe des contrats d'objectifs, de moyens et de performance (COMP), incluant un aspect de ressources financières et humaines. Cet accord pluriannuel sert de feuille de route pour l'établissement et d'outil de planification et de contrôle pour l'État.

Quelles sont les priorités que le CNRS se fixe dans son Contrat d'objectifs, de moyens et de performance (COMP) 2024-2028 ?

Antoine Petit Ce contrat quinquennal dessine une feuille de route pour l'organisme, pour que le CNRS puisse continuer à faire rayonner la science française dans le monde. À travers ce COMP, le CNRS affirme ses ambitions scientifiques et ses priorités pour les cinq ans à venir.

Faire de la recherche fondamentale au meilleur niveau international reste, bien sûr, le cœur du métier de l'organisme. Nous avons donc tenu à inclure dans le COMP un « carnet scientifique » qui identifie une quarantaine de priorités scientifiques, regroupées en sept domaines, pour lesquelles nous avons décrit quelles contributions marquantes nous nous donnons comme objectifs pour les cinq prochaines années. Elles ne couvrent évidemment pas l'ensemble des activités de recherche des équipes et des laboratoires du CNRS, mais elles découlent des travaux de prospective réalisés dans les instituts du CNRS. Chaque institut visera à engager un pourcentage significatif de ses moyens sur ces priorités.

Pour conduire cette recherche, il est également capital de renforcer les outils et axes transversaux qui soutiennent notre politique scientifique :

“Faire de la recherche fondamentale au meilleur niveau international reste le cœur du métier de l'organisme.”



© CYRIL FRÉSILLON/CNRS IMAGES

► Antoine Petit présente le COMP aux responsables d'unité du CNRS, le 12 décembre dernier, à Paris.

les très grandes infrastructures de recherche et aussi la science ouverte.

Par ailleurs, lors de la conception de ce contrat, nous avons tenu compte des recommandations du Comité international, mis en place sous la responsabilité du HCERES, qui a évalué le CNRS en 2024. Nous avons ainsi choisi de placer les questions de ressources humaines et d'attractivité en priorité, dès les premières pages, faisant écho également aux résultats de la consultation des agents CNRS réalisée au second semestre 2023. Nous souhaitons conduire une politique RH ambitieuse pour attirer, soutenir et retenir les meilleurs talents, tant pour les scientifiques que pour les agents en appui, notamment en développant une culture du mentorat et de l'inclusion à tous les niveaux.

Le CNRS s'engage également à travers son schéma directeur « Développement durable et responsabilité

sociétale », qui vient de paraître. Ces enjeux seront ainsi directement intégrés dans la stratégie et dans les activités de l'organisme.

Ce COMP identifie six grands défis transverses auxquels l'organisme a l'ambition de contribuer de façon substantielle à moyen terme. Pourquoi ce choix ?

A. P. Nous avons déjà fait cet exercice dans le précédent contrat. Cette démarche a produit un effet bénéfique, enclenchant une dynamique visible, transverse à tout l'établissement, sur des enjeux majeurs. Elle a aussi permis de mieux expliquer ce que nous faisons à l'extérieur de notre sphère de l'enseignement supérieur et de la recherche. Les défis du COP 2019-2023 restent évidemment d'actualité ; les actions lancées vont se poursuivre. Pour cette nouvelle période, nous avons choisi d'identifier

en complément six nouveaux grands défis transverses : le cerveau, les matériaux du futur, l'instrumentation sans limites, la vie dans l'Univers, l'IA générative pour les sciences, et les sociétés en transitions.

L'objectif est de mobiliser les dix instituts du CNRS de manière coordonnée et de structurer les communautés scientifiques qui pourront apporter à ces sujets des contributions substantielles et pluridisciplinaires dans les prochaines années. En particulier, nous y consacrerons une partie significative des recrutements de nouveaux chercheurs et chercheuses permanents. Ces six thématiques nous paraissent aujourd'hui suffisamment matures scientifiquement pour que cette mise en lumière donne des résultats significatifs.

Le CNRS entend maintenir sa position d'acteur clé de la science



mondiale. Comment cela se traduit-il dans ce contrat ?

A. P. Les collaborations aux niveaux européen et international restent une priorité pour le CNRS. C'est d'autant plus important aujourd'hui dans un contexte géopolitique général compliqué, dans lequel il faut défendre non seulement nos valeurs – liberté de la recherche, libre circulation des idées et des scientifiques, intégrité scientifique, égalité de genre... –, mais aussi les intérêts de la Nation, de l'Europe et leurs souverainetés.

Nous avons fêté en 2024 le quarantième anniversaire des programmes-cadres européens pour la recherche et l'innovation, dont le CNRS est le premier bénéficiaire. Il nous faut maintenir cette dynamique et amplifier notre action pour augmenter la présence du CNRS – et, plus généralement, des établissements français – dans les appels à projet européens, construire un espace européen de la recherche compétitif et promouvoir nos valeurs à l'échelle européenne.

“Mettre la recherche fondamentale au service d'un progrès durable pour toute la société.”

C'est pourquoi nous contribuons de manière très active à la construction du prochain programme-cadre (FP10) et nous entendons mettre à profit tous nos leviers d'influence, comme le réseau européen G6.

Au niveau international, le réseau que le CNRS a construit depuis 85 ans contribue largement au rayonnement de la recherche française. Nous disposons pour cela de différents outils performants et des 11 bureaux de représentation internationale du CNRS. Nous proposons d'ores et déjà

aux universités françaises volontaires de nous accompagner dans le développement de ces coopérations internationales – l'idée est de jouer « équipe France » pour que ces coopérations répondent aux priorités de chacun. Cela nous permettra aussi d'ajouter une dimension de formation et d'échanges d'étudiantes et étudiants à notre stratégie.

Et qu'en est-il du rôle du CNRS dans les programmes nationaux ?

A. P. En 2021, l'État a lancé un plan d'investissement d'envergure, France 2030, qui vise à positionner le pays comme un leader dans les technologies de demain. Côté recherche, cela se traduit par des programmes nationaux pour renforcer les efforts de la recherche française. Le CNRS joue un rôle majeur dans ce plan, à travers différents volets. En particulier, grâce à sa capacité unique à mobiliser des compétences variées issues de nombreux domaines scientifiques, le CNRS pilote ou copilote près de

Le COMP 2024-2028 a été présenté en avant-première à l'ensemble des directrices et directeurs d'unités du CNRS, rassemblés le 12 décembre pour la première fois depuis les festivités des 80 ans du CNRS. Cette journée exceptionnelle, à la Maison de la Mutualité, à Paris a été l'occasion de partager la feuille de route stratégique du CNRS, ses chantiers prioritaires et ses ambitions internationales pour les prochaines années. Mélangeant annonces, réflexions sur des enjeux institutionnels, échanges avec des partenaires et personnalités, et témoignages scientifiques, ce rendez-vous a aussi démontré la continuité que seul le CNRS peut offrir entre recherche fondamentale et innovation au service de la société, avec la remise de la médaille d'or du CNRS 2024 à Edith Heard et des médailles de l'innovation aux trois lauréats et lauréates de l'année.

l'innovation au sein du CNRS de façon à « donner envie » à un nombre croissant de personnels de recherche d'initier des actions de transfert de leurs résultats, y compris concernant les projets à impact sociétal et environnemental (PISE).

Le contrat signé avec l'État est désormais, à la différence des années précédentes, un contrat d'objectifs et de performance, mais aussi de moyens. Qu'est-ce que cela change pour le CNRS ?

A. P. J'avais appelé, lorsque j'ai été reconduit en 2022 à la présidence du CNRS, à mettre en place un véritable contrat d'objectifs et de moyens, vertueux car engageant les deux signataires. Je reste convaincu qu'il est indispensable de mettre en regard les objectifs qui sont fixés au CNRS avec les moyens dont il dispose, aussi bien *via* la subvention pour charge de service public que *via* ses ressources propres. Pour cela, il faut partager avec l'État une vision pluriannuelle de l'évolution du budget du CNRS.

Ce COMP est une première étape. Élaboré avec le ministère en charge de la Recherche, qui en est cosignataire, il nous engage et doit nous aider à remplir nos missions d'employeur, d'opérateur de recherche, de coordinateur d'infrastructures de recherche et, maintenant également, d'agence de programme. Ce COMP signe notre engagement à mener une recherche fondamentale au meilleur niveau international et à la conduire au service de la société. C'est essentiel, car il n'y a pas de grand pays sans grande ambition scientifique. ||

trois quarts des programmes PEPR lancés ou en cours de lancement, dont tous les PEPR exploratoires. Et il participe, *via* ses équipes, à tous les autres ou presque, ainsi bien sûr qu'au nouveau programme national « Recherche à risque ».

Par ailleurs, fin 2023, l'État a confié une mission supplémentaire au CNRS : l'agence de programmes « Climat, biodiversité, sociétés durables », qui apportera une aide à la décision aux décideurs publics sur la base des connaissances sur le fonctionnement du Système Terre dans sa globalité. Fort de sa pluridisciplinarité, le CNRS participera également aux activités de toutes les autres agences confiées à nos partenaires académiques.

Quelles actions le CNRS entend-il mettre en œuvre pour partager les connaissances acquises ?

A. P. Le CNRS se donne une ambition et une responsabilité : mettre la recherche fondamentale au service d'un progrès durable pour toute

la société. La demande sociale de connaissances scientifiques n'a jamais été aussi forte, même si, paradoxalement, les « anti-sciences » sont très audibles, et les *fake news* et contrevérités, très répandues. Nous souhaitons donc amplifier nos actions pour éclairer les décideurs et décideuses, les citoyennes et citoyens sur de grands enjeux de société, notamment avec la Mission pour l'expertise scientifique, des actions auprès du public scolaire et l'ouverture sur notre campus de Meudon d'un centre de médiation scientifique.

Le CNRS poursuivra et consolidera aussi la politique très volontariste menée depuis plusieurs années pour faciliter le transfert de la recherche vers le monde économique. En premier lieu, nous renforcerons le programme de prématuration, son articulation avec les SATT, la stratégie « filières » et le déploiement du réseau des ingénieurs transfert. Pour aller plus loin, nous nous efforcerons d'accroître la culture de

Hommage à Alain Fuchs, ancien président du CNRS

Président du CNRS entre 2010 et 2017, Alain Fuchs est décédé le 8 décembre 2024. La communauté de la recherche rend hommage à un enseignant-chercheur passionné, à un pédagogue et à un dirigeant visionnaire de la recherche et de l'enseignement supérieur français.

Le chercheur

Alain Fuchs a une formation d'ingénieur chimiste à l'École polytechnique fédérale de Lausanne. Dès son doctorat à l'université Paris-Sud-Orsay en 1983, il choisit comme domaine d'étude la thermodynamique moléculaire. Désireux de mieux comprendre les aspects microscopiques du mouvement des molécules dans les phases condensées, il effectue en 1986 un postdoctorat à Édimbourg, où il s'initie aux méthodes de simulation moléculaire, alors encore relativement confidentielles. Revenu en France, il crée à Orsay une petite équipe de chimie physique moléculaire, important ces techniques de modélisation numérique.

Développant les méthodes de dynamique moléculaire et de Monte Carlo¹ des phases condensées, il contribue à leur essor à la fois sur le plan académique, mais également par de nombreuses collaborations industrielles. Au cours du temps, il focalise sa recherche sur la simulation du comportement des fluides confinés dans les matériaux nanoporeux et de leurs transitions de phase. Il conservera cette activité scientifique tout au long de sa carrière, participant à des projets et collaborations nationaux et internationaux – des moments qu'il qualifiait de « *respiration scientifique* ».

François-Xavier Coudert, engagé en 2008 comme chercheur par Alain Fuchs dans son équipe ; actuellement directeur de recherche au CNRS.

1. La méthode de Monte Carlo utilise des calculs aléatoires pour simuler le comportement des molécules.

Le directeur de laboratoire

Alain Fuchs a été un visionnaire déterminé. Sa première contribution majeure à la structuration de la recherche fut la création du Laboratoire de chimie physique² (LCP) sur le campus d'Orsay. Établi en 2000, le LCP résulte de la fusion de trois laboratoires : le Laboratoire de physico-chimie des rayonnements, le Laboratoire de chimie théorique et le Laboratoire de chimie physique des matériaux amorphes. Alain Fuchs a investi toute son énergie pour mettre en place un laboratoire axé sur des études mécanistiques dans des domaines variés.

Le LCP a ainsi intégré plusieurs équipes de biophysique et a su créer un pôle puissant de théoriciens physico-chimistes. La synergie entre ces théoriciens et les expérimentateurs a permis d'importantes avancées dans plusieurs domaines.

Je tiens à souligner que le succès de la création du LCP repose sur la volonté, la conviction et le dynamisme d'Alain Fuchs. C'est grâce à son engagement que la fusion des trois laboratoires a été possible, établissant des bases solides pour un grand laboratoire de chimie physique. Sa vision de la chimie physique, l'impulsion qu'il a donnée aux projets scientifiques et à l'organisation du laboratoire demeurent présentes aujourd'hui.

Mehran Mostafavi, successeur d'Alain Fuchs à la direction du LCP ; actuellement vice-président recherche à l'université Paris-Saclay.

2. Aujourd'hui l'Institut de chimie physique (unité CNRS/université Paris-Saclay).



“Le succès de la création du Laboratoire de chimie physique repose sur la volonté, la conviction et le dynamisme d’Alain Fuchs.”

▼ Alain Fuchs en octobre 2017, à Paris. Il quitte alors la direction du CNRS pour la présidence de Paris sciences & lettres (PSL).

Le directeur d'école d'ingénieurs

Assurément, Alain Fuchs aura été un grand directeur de l'École nationale supérieure de chimie de Paris, de 2006 à 2010. Pédagogue passionné, il a profondément réformé l'offre de formation, en l'articulant avec la recherche menée au sein de l'école et les attentes des milieux professionnels. C'est peu de dire qu'Alain était très apprécié de ses étudiants, dont il soutenait les activités culturelles, sportives et festives. Il fut tout autant apprécié des personnels qu'il avait su embarquer dans sa transformation.

Fort d'une « grande habileté stratégique et diplomatique », selon l'AERES¹, Alain a su mener une politique de partenariats complémentaires tant avec l'ancienne Université Pierre-et-Marie-Curie² qu'avec le pôle de

recherche et d'enseignement supérieur ParisTech. Il a structuré la recherche autour de deux grands départements (Henri-Moissan pour « matériaux, énergie, procédés » et Charles-Friedel pour « chimie moléculaire et vivant »), en n'oubliant jamais de rendre hommage à ces deux grands noms dans l'histoire de Chimie Paris.

Fin 2009 et début 2010, il a été un acteur majeur du lancement de l'université PSL. Il a alors été l'initiateur de l'idée du premier cycle « sciences et lettres » – reflet de son fort intérêt pour les sciences humaines et sociales –, aujourd'hui devenu le Cycle pluridisciplinaire d'études supérieures.

Michel Mortier, adjoint et successeur d'Alain Fuchs à Chimie Paris, puis son conseiller au CNRS ; actuellement directeur général de la Fondation CNRS.

1. Ancienne Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur. Le Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (Hcéres) lui a succédé en 2014. 2. Aujourd'hui, Sorbonne Université.

Le président du CNRS

Pendant huit ans, Alain Fuchs a été chez lui au CNRS. La partie n'était pourtant pas gagnée d'avance, tant il avait pris ses fonctions dans des circonstances délicates. C'était en 2010 : les universités, partenaires naturels du CNRS, étaient appelées à devenir autonomes. Quelle place devait en retour occuper l'organisme ? À cette question, Alain apporta une réponse simple : le rôle du CNRS était d'accompagner la montée en puissance des universités, en jouant pleinement ce rôle de partenaire de confiance – et même de référence.

Ainsi naquit la « politique de sites », formule aujourd'hui amplement diffusée, mais qu'il contribua largement à imposer. Ce n'était pas qu'une formule, puisqu'il s'engagea lui-même fortement dans l'accompagnement des sites, bientôt suivi par les directeurs d'institut. Nous avons à présent le recul nécessaire pour en mesurer les résultats. L'émergence des sites est une réalité, qui ne s'est pas construite contre le CNRS, mais avec lui.

Pour la mener à bien, il fallait tout à la fois une vraie vision de l'enseignement supérieur et de la recherche, et une compréhension profonde des ressorts institutionnels et humains de la science telle qu'elle se fait. Alain avait l'une et l'autre, et jamais chez lui le président n'a effacé le chimiste – parfois caustique, souvent drôle, toujours brillant. S'il était chez lui au CNRS, c'est parce qu'il n'était jamais aussi heureux que dans les laboratoires. Pendant huit ans, il a sillonné la France et le monde au service de la science, inspirant toute une génération, à laquelle nous appartenons.

Philippe Baptiste, directeur de CNRS Sciences informatiques et directeur général délégué à la science du CNRS pendant la présidence d'Alain Fuchs ; actuellement ministre chargé de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

Nicolas Castoldi, directeur des affaires juridiques du CNRS et délégué général à la valorisation du CNRS pendant le mandat d'Alain Fuchs ; actuellement directeur délégué auprès du directeur général d'Assistance publique-Hôpitaux de Paris (AP-HP).

Alain Fuchs à PSL : une ambition pour l'université

En 2012, à peine nommé à la direction de l'École normale supérieure (ENS), j'ai proposé à Alain Fuchs, alors président du CNRS, de créer un dispositif de professeurs attachés, grâce auquel des chercheurs CNRS pourraient participer à l'enseignement de l'ENS. Alain adopta l'idée immédiatement, et sa détermination jointe à son habileté permit de faire adopter ce projet face aux oppositions conservatrices.

Cet exemple me semble emblématique d'une ambition qui a porté son action, celle du développement d'universités où recherche et formation sont intimement liées. C'est dans cette perspective qu'il a décidé de candidater à la présidence de PSL en 2017, afin de créer, selon ses

Alain Fuchs vu par les responsables administratifs

Alain Fuchs était un visionnaire, un manager à l'écoute de ses équipes. Dirigeant d'une rare clairvoyance stratégique, il a su transformer et fédérer des organisations. C'est sur ces projets que nous avons eu le privilège de l'accompagner et de partager son énergie inépuisable et son audace. À Orsay, il a orchestré avec talent la fusion de trois laboratoires pour créer le Laboratoire de chimie physique. À la tête de l'ENSCP, il a transformé l'établissement en le projetant vers l'avenir, renforçant son rayonnement tout en le connectant davantage au monde socio-économique. Au CNRS, il a créé et mis en place la nouvelle gouvernance du CNRS et a marqué durablement l'institution en impulsant la politique de sites.

Son esprit critique, toujours constructif, stimulait des idées nouvelles. Sa confiance en ses équipes révélait le potentiel de chacun. Rigoureux et audacieux, il savait aussi manier l'humour avec finesse, apportant légèreté et convivialité même dans les moments de grands défis. Alain laisse un héritage d'excellence et d'inspiration. Ce fut un honneur de travailler à ses côtés.

Marie-Hélène Papillon, secrétaire générale de Chimie Paris et directrice adjointe administrative de CNRS Sciences biologiques durant les mandats d'Alain Fuchs ; actuellement déléguée régionale Île-de-France Villejuif du CNRS.

Mireille Moulin, directrice adjointe administrative au CNRS sous Alain Fuchs ; actuellement directrice du soutien à la recherche à l'université Paris Dauphine-PSL.

Hélène Maury, directrice de cabinet d'Alain Fuchs au CNRS ; actuellement déléguée régionale à l'Inserm.

“Pendant huit ans, il a sillonné la France et le monde au service de la science, inspirant toute une génération.”

mots « une université digne de ce nom, qui choisit ses étudiants et les forme dans un environnement dynamique de recherche, de création et d'innovation au meilleur niveau international ». Pari réussi, puisqu'Alain Fuchs, grâce à son talent politique, a fait franchir à PSL des étapes décisives – de la sélection par le jury Idex à la création du Grand Établissement – pour l'imposer dans un système complexe et globalement hostile, gardant constamment en ligne de mire les meilleurs exemples internationaux.

Marc Mézard, ancien directeur de l'ENS ; actuellement professeur à l'université Bocconi, à Milan.

Françoise Combes, présidente de l'Académie des sciences

Astrophysicienne à l'Observatoire de Paris, professeur au Collège de France, Françoise Combes a été élue le 17 décembre 2024 présidente de l'Académie des sciences, après en avoir été la vice-présidente. Spécialiste des galaxies, elle est médaille d'or du CNRS 2020.



© FREDERIQUE PLUSLEMAN/CNRS IMAGES

Élisabeth Guazzelli, prix Gay-Lussac Humboldt

La Fondation Alexander von Humboldt a décerné à Élisabeth Guazzelli, directrice de recherche émérite au CNRS, le prestigieux prix Gay-Lussac Humboldt, qui récompense des travaux de recherche exceptionnels et favorise les échanges scientifiques entre la France et l'Allemagne. Experte en mécanique des fluides, elle a révolutionné l'étude des suspensions et des fluides complexes, établissant de nouveaux paradigmes en rhéologie granulaire.



© COLL. PERS.

Cyril Moulin, directeur d'appui aux partenariats publics

Docteur en océanologie et lauréat de la médaille de bronze du CNRS en 2005, Cyril Moulin dirige le Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, puis devient directeur adjoint de CNRS Terre et Univers. Il œuvre à la Direction générale de la recherche et de l'innovation, puis au cabinet de la ministre de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, et rejoint le CNRS en janvier 2025 comme directeur de l'appui aux partenariats publics.



© COLL. PERS.

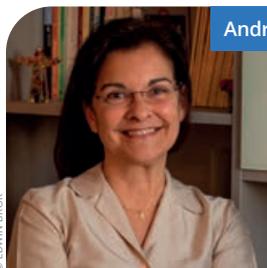
Quatre nouveaux délégués en région

Vanessa Tocut, ancienne directrice adjointe administrative de l'institut CNRS Terre et Univers, est déléguée régionale Hauts-de-France depuis le 1^{er} novembre 2024. Muriel Sinanidès, auparavant directrice déléguée aux cadres supérieurs du CNRS, est devenue déléguée régionale Bretagne et Pays de la Loire le 1^{er} janvier 2025. Jérôme Vitre et Laurent Barbieri, jusqu'alors respectivement délégué régional de CNRS Occitanie et délégué régional de CNRS Rhône Auvergne, sont nommés délégué régional Provence-Corse et délégué régional de CNRS Occitanie Est à partir du 1^{er} février 2025.

Légions d'honneur

Jean Tirole, économiste et médaille d'or 2007 du CNRS, a été élevé au grade de commandeur de la Légion d'honneur. Thibault Damour, physicien et médaille d'or 2017, ainsi que Catherine Jeandel, océanologue et géochimiste, ont été promus officiers. Sophie Brouard, immunologiste et directrice de recherche, a été nommée chevalier, tout comme Michel de Labacherie, ancien responsable des infrastructures de recherche en sciences de l'ingénieur, et Catherine Pelachaud, informaticienne spécialiste des systèmes intelligents.

Andrea Dessen



© EDWIN BROK

Nouvelles directions à Ottawa et Washington

Jan Matas, géophysicien et directeur de recherche au CNRS, a pris la tête du bureau de représentation du CNRS à Washington le 1^{er} janvier 2025. Il dirigeait depuis 2022 le bureau du CNRS

à Ottawa, après avoir exercé des fonctions clés au niveau de l'international à l'université de Lyon et à l'ENS de Lyon. Andrea Dessen, chercheuse en biologie structurale et lauréate de la médaille d'argent du CNRS, lui a succédé à Ottawa au 1^{er} février. Directrice de recherche à l'Institut de biologie structurale, elle a aussi dirigé un projet de recherche international hébergé au sein du Laboratório Nacional de Biociências (Brésil).



Jan Matas

© VALÉRIE CHARBONNEAU/UNIV. OTTAWA

Kumiko Kotera, conteuse de cataclysmes cosmiques

UNIVERS

PORTRAIT Spécialiste des rayons cosmiques de haute énergie et médaille de bronze du CNRS en 2016, Kumiko Kotera vient de prendre la tête de l'Institut d'astrophysique de Paris (IAP).

PAR LOUISE MUSSAT

« **M**on rêve, c'était de devenir écrivain. J'ai toujours aimé écrire, j'en ai toujours eu besoin. » Ce rêve, Kumiko Kotera l'a réalisé en janvier, en publiant *L'Univers violent*, un livre dans lequel elle raconte qu'elle est finalement devenue... astrophysicienne. De renom.

À 42 ans, elle a été nommée fin 2024 à la direction de l'Institut d'astrophysique de Paris (IAP)¹. Elle est la première femme à occuper ce poste depuis la création de l'établissement, en 1937. « *J'ai tout réaménagé !* », dit-elle en entrant dans son bureau zen et lumineux, qu'une grande fenêtre ouvre sur le boulevard Arago. Orchidées, calligraphies, posters vintage de l'IAP... On y trouve aussi des photos de drôles d'antennes dressées dans le désert – le prototype de GRAND, un détecteur de neutrinos d'ultra haute énergie dont elle est la cocréatrice et qui doit contribuer à révolutionner rien de moins que notre compréhension des phénomènes les plus violents de l'Univers.

Percer les secrets du cosmos ne faisait pourtant pas partie de ses plans initiaux. « *Au collège, je me suis dit que vouloir devenir écrivain, ça n'était pas très sérieux... Mes parents, d'origine japonaise, avaient la fibre scientifique – mon père était même chercheur en chimie au CNRS –, de sorte que j'avais accès à de nombreux livres et magazines scientifiques. J'étais particulièrement sensible aux histoires d'astronomie, à la poésie qu'elles dégagent, au vertige qu'elles me procuraient. Alors, je me suis mis en tête de devenir astrophysicienne.* »

Kumiko Kotera opte pour un bac S mais, puisque la filière des astres est saturée, lui assure-t-on alors, elle choisit d'intégrer d'abord une école d'ingénieurs, par sécurité. L'Ensta, à Paris, a la bonne idée de proposer aussi un cursus d'astrophysique approfondi. Encouragée par Jérôme Perez², son mentor, « *véritable conteur de sciences* », elle enchaîne avec un master 2 d'astronomie et d'astrophysique à l'institut qu'elle préside aujourd'hui. « *Je suis clairement une enfant de l'IAP !* », observe-t-elle en riant.

C'est donc là, « *en famille* », qu'elle embraie en 2006 sur un doctorat sur les rayons cosmiques. Leur nom est un peu trompeur – il ne s'agit pas de rayonnement, mais de noyaux atomiques ultra énergétiques. Les astronomes soupçonnent qu'ils sont engendrés par des phénomènes violents, comme l'explosion d'une étoile en supernova. Mais, avant d'atteindre la Terre, ils sont déviés par les divers champs magnétiques qu'ils rencontrent, de sorte que l'on peine à en retrouver la source.

Le boom de l'astronomie transitoire

Heureusement, supernovas et autres monstres cosmiques génèrent aussi des neutrinos. Étant neutres, ces particules sont insensibles aux champs magnétiques et voyagent en ligne droite jusqu'à la Terre. Les détecter permet donc de retrouver l'astre colérique qui les a enfantées.

« *Je crois que ce qui m'enthousiasme le plus, c'est le nouveau regard que ces particules offrent sur le cosmos, résume la chercheuse. Jusqu'à récemment, l'image que l'on se faisait de l'Univers était plutôt paisible, et puis, voici moins de deux décennies, le boom de l'astronomie transitoire*



À lire :
L'Univers violent,
de Kumiko Kotera,
Albin Michel, 2025,
304 pages.

« *J'étais particulièrement sensible aux histoires d'astronomie, à la poésie qu'elles dégagent, au vertige qu'elles me procuraient.* »



► «Je suis clairement une enfant de l'IAP!», affirme Kumiko Kotera.

À l'époque, Kumiko aspire à «porter un projet d'envergure, à même de changer la donne pour la communauté». Au printemps 2014, son collègue Olivier Martineau³ lui soumet l'idée d'un concept inédit qu'il fomenté depuis des années avec un homologue chinois. Il s'agit d'utiliser des antennes radio pour capter des neutrinos 1 000 à 10 000 fois plus énergétiques que ceux capturés par IceCube et qui seraient issus de cataclysmes extrêmement violents – tels que des collisions d'étoiles à neutrons (cadavres stellaires ultra denses) ou des supernovas super lumineuses. «J'ai tout de suite embarqué», raconte la chercheuse avec émotion. *J'ai eu un vrai coup de foudre professionnel pour Olivier.*

Dix années ont passé et le projet GRAND⁴ mobilise plus d'une centaine de scientifiques à travers le monde. C'est que le défi est de taille. Les neutrinos d'ultra haute énergie⁵ pleuvent sur Terre avec un taux inférieur à... 1 par kilomètre carré et par siècle! Et, comme les autres neutrinos, ils n'interfèrent que très rarement avec la matière. «Ce qui ne veut pas dire jamais!», souligne Kumiko.

Pour avoir une chance de déceler l'un de ces événements rarissimes, les astronomes ont donc besoin de déployer des détecteurs sur une surface gigantesque, à l'abri de tout signal parasite⁶. Voilà pourquoi ils ont installé leur prototype de GRAND au milieu du désert de Gobi, en Chine, là où, loin de la civilisation, des massifs entiers de roches sédimentaires courent jusqu'à l'horizon.

Quand un neutrino traversant la croûte terrestre interagit avec un atome de roche, il produit une particule qui s'échappe de la terre, avant de se désintégrer dans l'atmosphère, créant une cascade de particules secondaires. En interagissant avec le champ magnétique terrestre, celles-ci produisent un signal radio spécifique. C'est cette sorte de signature sans faille du passage du neutrino que les équipes de GRAND entendent saisir, grâce à une myriade d'antennes radio simples disséminées dans le Gobi.

a commencé. » Dans les années 2010, les astronomes ont en effet mis la main sur les ondes gravitationnelles, émises par des phénomènes brusques et fugaces, tout comme les rayons cosmiques. «On peut aujourd'hui croiser tous les signaux en provenance du ciel et faire ce que l'on appelle de l'astronomie multi-messager.»

Chasseuse de cataclysmes

En 2009, son doctorat en poche, Kumiko Kotera s'envole vers l'université de Chicago, puis vers le California Institute of Technology (Caltech), pour des postdoctorats. En 2012, elle est recrutée en poste à l'IAP. L'année suivante, l'instrument IceCube, installé dans la glace de l'Antarctique, réalise une découverte fracassante. Il détecte pour la première fois deux neutrinos de très haute énergie, ouvrant une nouvelle fenêtre sur l'Univers.

1. CNRS/Sorbonne Univ. 2. Unité de mathématiques appliquées (Ensta Paris, Inst. polytechnique de Paris/CNRS/Inria). 3. Labo. physique nucléaire et hautes énergies (LPNHE, CNRS/Sorbonne Univ.). 4. Giant Radio Array for Neutrino Detection. 5. De 10^{17} à 10^{20} électronvolts. 6. Depuis cet entretien, l'expérience KM3Net/ARCA a annoncé avoir décelé le neutrino le plus énergétique jamais détecté : <https://tinyurl.com/neutrino-KM3Net>

“J’ai accepté ces nouvelles fonctions, car j’estime qu’il est nécessaire d’œuvrer pour la collectivité.”



© PENGFEI ZHANG, GRAND COLLABORATION

« Nous avons déjà installé 46 antennes sur 300, et c’est l’aventure !, relate la chercheuse. Le site est très reculé, on ne l’atteint qu’après trois heures de piste. Nous logeons dans des préfabriqués, au milieu de rien, et ne nous autorisons qu’une douche par semaine. Mais la dynamique de groupe, notamment avec nos collègues chinois, est très bonne, malgré nos différences culturelles. » Un autre prototype de GRAND est aussi en construction dans la pampa argentine.

« Le côté artisanal de la recherche »

En 2023, Kumiko Kotera quitte temporairement Paris, les steppes chinoises et la pampa pour rejoindre les bois de l’université Penn State⁷, en tant que chercheuse invitée⁸. Elle y emmène son mari, spécialiste d’intelligence artificielle au CEA, également invité par l’institution américaine, ainsi que leurs deux enfants, alors âgés de 7 et 9 ans.

« J’ai beaucoup de chance de l’avoir à mes côtés, dit-elle de son époux. Son expertise en traitement de données est précieuse pour GRAND, dans lequel il s’implique. Et puis, il prend largement la moitié de la charge mentale d’une vie de famille. Sans cela, en tant que femme, c’est difficile d’en arriver là professionnellement. »

▼ Kumiko Kotera au pied d’une antenne du projet GRAND (destiné à déceler des neutrinos ultra énergétiques), sur le site du prototype, dans le désert de Gobi, en Chine.

Peu de temps avant son départ, elle s’était vu proposer le poste de directrice de l’IAP. « Mais je n’étais pas tout à fait prête, concède-t-elle. D’une part, j’étais en train d’écrire mon livre ; d’autre part, j’avais besoin de me reconnecter avec le côté artisanal de la recherche, de mettre les mains dans les données, les analyser, faire des calculs et des simulations. À Penn State, qui compte parmi les contributeurs de GRAND, les conditions étaient idéales pour que je puisse à la fois écrire et réfléchir à des solutions pour améliorer l’efficacité de l’observatoire. »

Quand elle revient, en 2024, Kumiko Kotera se sent plus sereine. Son livre est quasiment achevé, GRAND est en passe d’être optimisé (moins d’antennes pour une même sensibilité), et elle saisit les rênes de l’IAP. « J’ai accepté ces nouvelles fonctions, car j’estime qu’il est nécessaire d’œuvrer pour la collectivité. » De même qu’il sera vital pour elle de continuer à écrire comme elle respire, et d’arpenter encore le Gobi et la pampa en quête de son graal cosmique : « Nous attendons nos premiers neutrinos d’ultra haute énergie pour 2030. » ||

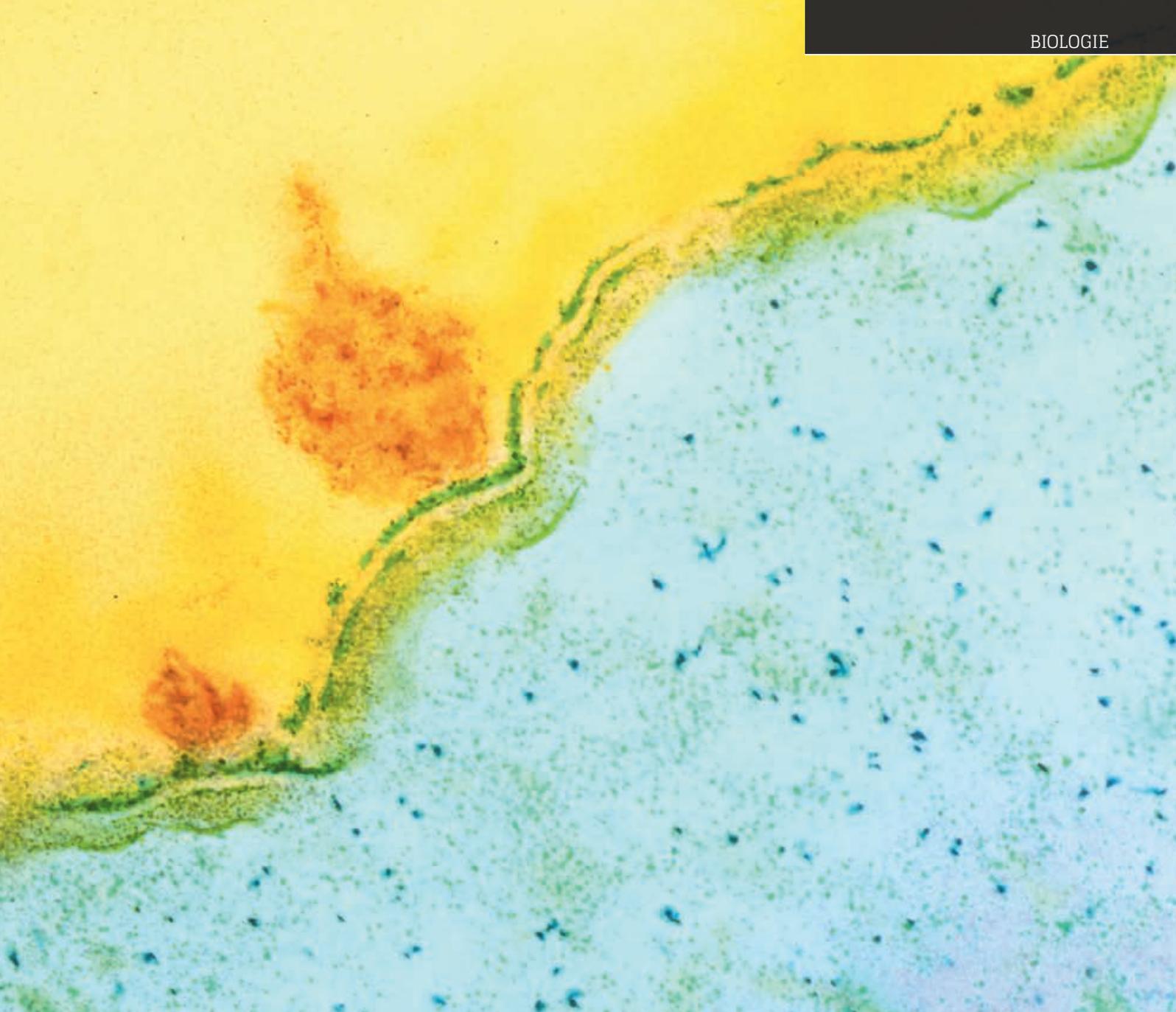
7. Université d’État de Pennsylvanie. 8. Via le programme Fullbright.

GRAND FORMAT

C'est Darwin qui serait content! Mycoses et bactéries résistantes aux traitements constituent un péril, mais démontrent une évolution... à laquelle nous devons à notre tour nous adapter. Bonne nouvelle: pour cela, nous avons des idées.

Pour entraver la progression des bactéries résistantes aux antibiotiques, des scientifiques ressuscitent une solution vieille d'un siècle, les bactériophages – des virus qui ne s'attaquent qu'aux bactéries. En parallèle, une autre menace émerge, moins médiatisée, les champignons résistants aux antifongiques. Des mycoses que les scientifiques surveillent de très près.

Ce bactériophage T4 (en orange) est vu en microscopie électronique à transmission juste après qu'il a injecté son ADN viral à une bactérie (en bleu).



Antibiotiques et antifongiques
***Résister aux
résistances***

Bactériophages, quand la médecine devient virale

VIVANT 

Peu de solutions existent pour lutter contre les bactéries pathogènes antibiorésistantes. Pourtant, une méthode fait ses preuves depuis plus d'un siècle, la phagothérapie – l'utilisation de bactériophages, des virus spécialisés dans l'attaque de bactéries.

PAR MEHDI HARMI

Dérèglement climatique mondial, crises de la biodiversité, pollution « éternelle » généralisée... Ces dernières années, les périls que l'humanité génère, pour elle-même comme pour l'ensemble du monde vivant, s'accumulent. À l'initiative de l'OMS, cette liste s'est encore allongée après que les souches bactériennes multirésistantes aux antibiotiques ont été désignées comme autant de menaces à prendre au sérieux.

Selon une publication parue dans *The Lancet*¹, les bactéries antibiorésistantes seraient impliquées dans près de 5 millions de décès à travers le monde en 2019. Un chiffre qui pourrait doubler d'ici à 2050, estime un rapport² commandé par le gouvernement britannique en 2014.

Pour entraver cette épidémie de moins en moins silencieuse, peu de solutions s'offrent à nous. L'une d'entre elles, la moins médiatisée, consiste à utiliser un type particulier de virus pour combattre et éliminer les bactéries antibiorésistantes. Pour la plupart formés d'une tête et d'une queue au bout de laquelle émergent des appendices semblables à des pattes, les bactériophages ont la particularité de ne s'attaquer qu'à certains génotypes de bactéries. Une arme de plus pour la médecine personnalisée ?

Une découverte ancienne

La phagothérapie (l'idée d'utiliser des virus afin de soigner des personnes infectées par des bactéries pathogènes) n'est pas nouvelle. Découverts de façon indépendante au début du siècle dernier par les bactériologistes Frederick Twort et Félix d'Hérelle,



© INSTITUT PASTEUR/ARCHIVES FÉLIX D'HÉRELLE



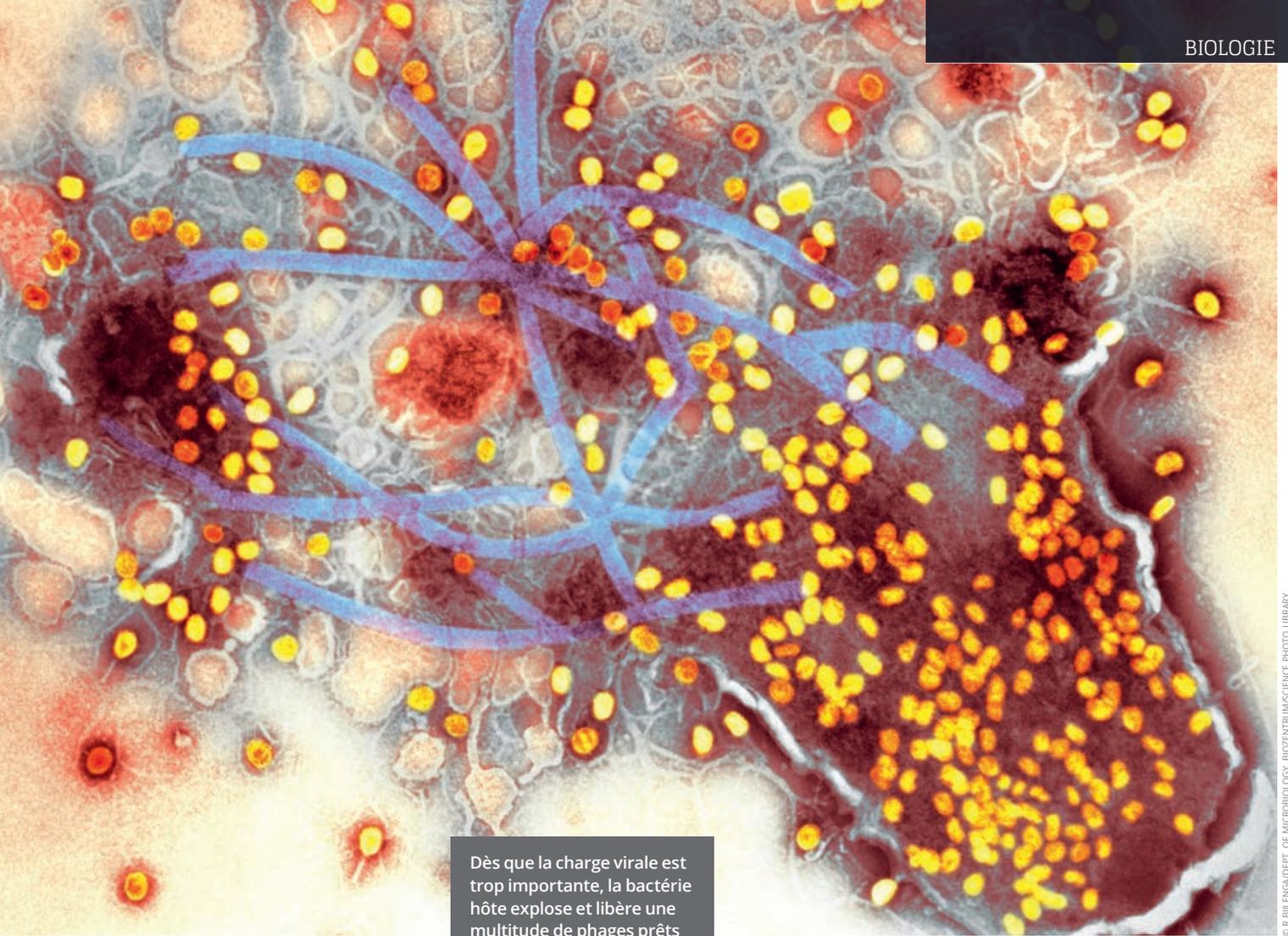
© INSTITUT PASTEUR/ARCHIVES SOCIÉTÉ DE PATHOLOGIE BACTÉRIENNE

les bactériophages, communément appelés « phages », ont d'abord été identifiés comme des agents capables de lyser (dégrader) des colonies bactériennes.

« D'Hérelle s'est tout de suite intéressé à cette propriété, en pensant qu'il pouvait en tirer avantage, notamment en tant que thérapie dans le traitement des infections bactériennes », rappelle Anne Chevallereau, chercheuse au laboratoire Microbiologie moléculaire et biochimie structurale³, à Lyon, et membre du groupement de recherche (GDR) Phages.fr.

Ainsi, bien avant l'avènement des antibiotiques (en 1944, avec la commercialisation de la pénicilline), les microbiologistes disposaient déjà d'une arme redoutable de précision contre les bactéries. Or c'est l'« arme chimique » que sont les antibiotiques qui a pris le pas sur son pendant biologique.

Félix d'Hérelle (à gauche) et Frederick Twort ont découvert les phages au début du xx^e siècle.



Dès que la charge virale est trop importante, la bactérie hôte explose et libère une multitude de phages prêts à infecter d'autres bactéries.

« La décadence des bactériophages a commencé au tournant des années 1940-44, quand un article publié par une société américaine de médecins affirmait qu'il n'y avait pas de preuve de l'efficacité des phages, qu'ils ne semblaient pas meilleurs que les antibiotiques, voire étaient pires que ces derniers, note Rémy Froissart, chercheur au laboratoire Maladies infectieuses et vecteurs : écologie, génétique, évolution et contrôle⁴, à Montpellier. Notons qu'en France, on trouvait encore les bactériophages dans le Vidal, référence de la pharmacopée, jusqu'en 1977. » Le chercheur, membre du réseau Phages.fr, précise : « Il faut garder en tête que les antibiotiques sont des armes de destruction massive et, à ce titre, ils

sont particulièrement efficaces, et ce, même chez des malades dont on ne connaît pas l'identité de l'agent infectieux. » Grâce à eux, l'humanité a grappillé quelques années d'espérance de vie. Mais elle s'est aussi forgé une pléiade d'ennemis de plus en plus redoutables qui pourraient arborer pour credo : « Ce qui ne nous tue pas nous rend plus fortes. »

Des cibles privilégiées pour les phages

Aujourd'hui, soit plus de quatre-vingts ans après l'arrivée des antibiotiques, pointe Anne Chevallereau, « le nombre de souches bactériennes pathogènes multirésistantes ainsi que leur prévalence forcent et poussent les scientifiques du monde à reconsidérer l'approche bactériophage ». Si bien qu'en 2017, l'OMS a publié une liste d'agents pathogènes prioritaires pour la recherche et le développement de nouveaux antibiotiques⁵.

Parmi ces agents figurent des *Pseudomonas*, des *E. coli*, des staphylocoques, des *Klebsiella* ou encore des *Acinetobacter*. Ces souches bactériennes sont devenues les cibles privilégiées des spécialistes des bactériophages. Car, bien qu'hyper efficaces, les antibiotiques ont un effet

“Avec les antibiotiques, l'humanité a gagné en espérance de vie, mais s'est aussi forgé des ennemis dont le credo pourrait être: « Ce qui ne nous tue pas nous rend plus fort. »”

1. « Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis », Murray, Christopher J L et al., *The Lancet*, vol. 399, n° 10325.
2. <https://bit.ly/40YKmJD> 3. MMSB, unité CNRS/université Claude Bernard-Lyon 1.
4. Migevec, unité CNRS/IRD/université de Montpellier. 5. <https://bit.ly/3QdwgiO>

collatéral de taille, leur non-spécificité. « *Au contraire, les bactériophages sont extrêmement spécifiques* », s'enthousiasme Rémy Froissart. Une façon de réaliser la médecine qui n'a donc rien à voir avec celle menée à l'aide des agents chimiques tels que les antibiotiques.

« *Lorsqu'on utilise des bactériophages, il est impératif de connaître l'agent étiologique – l'agent qui crée la maladie, précise le chercheur. Or on sait de plus en plus que l'essentiel des maladies sont souvent provoquées par plusieurs pathogènes.* » Voilà ce qui a favorisé le recours aux antibiotiques plutôt que le développement de bactériophages, qui sont spécifiques d'un seul génotype bactérien à la fois.

« *Cela souligne bien qu'au sein de la médecine pratiquée en Occident, qui est principalement symptomatique, tout est un peu fait à l'aveugle, poursuit Rémy Froissart. Et, à ce titre, les médecins se trompent assez souvent (voir, par exemple, l'emploi inapproprié, encore aujourd'hui, d'antibiotiques contre des angines virales), ce qui en soi n'est pas un problème fondamental, mais montre clairement que la volonté d'utiliser les phages plutôt que les antibiotiques relève d'une médecine différente.* »

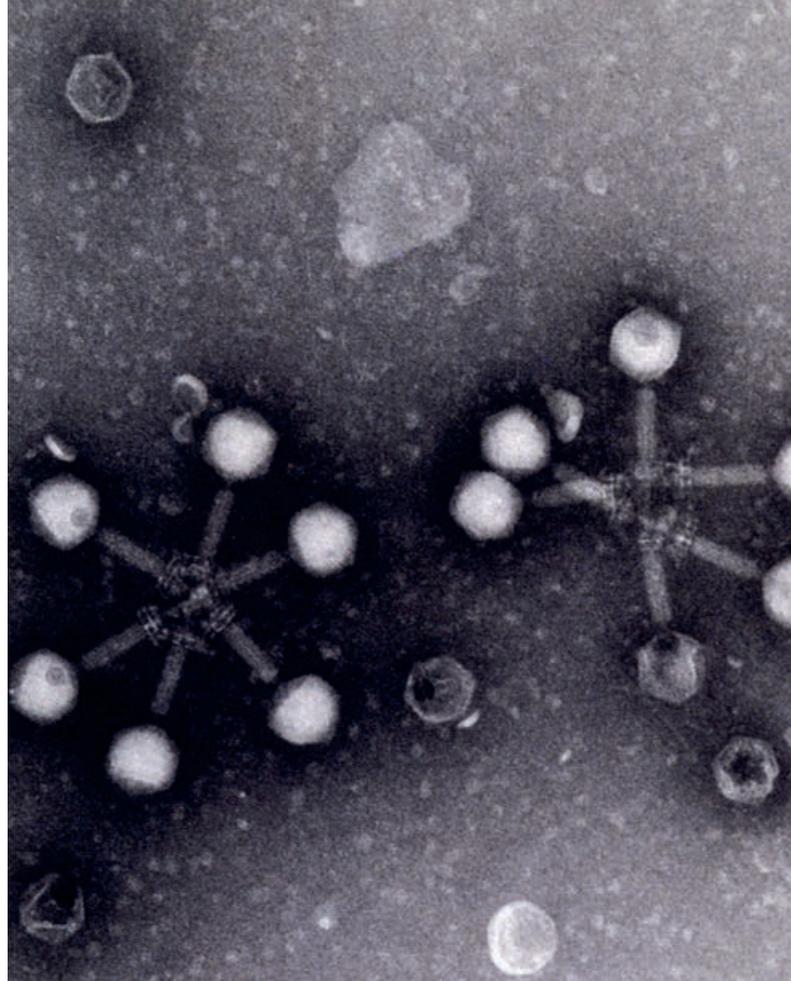
Mener des essais cliniques

La recherche sur l'emploi des bactériophages dans le cadre de la phagothérapie est un travail de longue haleine. Certes, quelques phages sont aujourd'hui utilisés comme traitement compassionnel pour des patients en impasse thérapeutique. Mais il est désormais impératif de prouver à nouveau leur efficacité, du fait de leur exclusion du Vidal, en menant des essais cliniques.

L'intérêt des médecins pour les phages est largement corrélé aux nombreux bénéfices de ces derniers en comparaison avec les antibiotiques. Spécifiques de leurs cibles, les phages sont aussi et surtout peu toxiques.

« *Un autre avantage réside dans leur propriété d'auto-amplification, spécifique aux virus, ajoute Rémy Froissart. Pas besoin de commencer un traitement avec une grande quantité de phages, car ils se multiplieront in situ avec le temps.* » De plus, ces virus, une fois qu'ils ont éliminé leur cible, ne s'accumulent pas dans l'organisme, mais disparaissent simplement, faute de cibles.

“Depuis l'émergence de la vie sur la Terre a lieu ce que les scientifiques appellent « la course à l'armement ». Phages comme bactéries n'y échappent pas.”



En revanche, comme avec les antibiotiques, l'utilisation de bactériophages a aussi tendance à induire des résistances chez les bactéries. Un problème de taille pour les scientifiques ? Pas exactement.

Dans les relations proie/prédateur, chacun essaie de prendre le dessus sur l'autre – soit pour mieux échapper à l'assaillant, soit, au contraire, pour mieux cibler sa proie. Ainsi, depuis l'émergence de la vie sur la Terre a lieu ce que les scientifiques appellent « la course à l'armement ». Phages comme bactéries n'y échappent pas.

Aujourd'hui, pour Anne Chevallereau comme pour Rémy Froissart, le but est d'identifier les divers mécanismes de résistance – et donc d'adaptation – que déploient les bactéries lors d'attaques répétées de phages, afin d'exploiter ces mécanismes contre les bactéries elles-mêmes.

Les scientifiques cherchent en général à isoler des phages qui s'en prennent spécifiquement à certains types de récepteurs se trouvant à la surface des bactéries, comme les récepteurs LPS (lipopolysaccharides). « *Mais, précise le chercheur, on peut aussi chercher à cibler des protéines membranaires comme des porines⁶, ou encore des pompes à efflux⁷.* »

Toutefois, dès lors que l'on emploie les phages pour s'attaquer uniquement à un récepteur ou à une protéine, la bactérie s'adapte et trouve ainsi la parade. C'est la raison qui a poussé les microbiologistes à penser une approche

6. Porine : protéine transmembranaire formant des canaux.

7. Pompe à efflux : complexe protéique membranaire bactérien permettant notamment le relargage d'antibiotiques dans le milieu extracellulaire.



Bactériophages donnés par Frederick Twort, conservés à l'Institut Pasteur et analysés par Vieu, Croissant et Dauguet en 1963.

© INSTITUT PASTEUR/CHARLES DAUGUET

différente, fondée sur l'utilisation d'un cocktail de phages ciblant différents récepteurs ou canaux des bactéries. « La question qui se pose aujourd'hui, révèle Rémy Froissart, c'est de savoir si, lors d'une thérapie, on utilise plusieurs phages en même temps, ou bien si l'on doit les administrer de façon séquentielle, les uns à la suite des autres. »

Utiliser les résistances contre les bactéries

Les scientifiques semblent favoriser cette seconde option. Car, en utilisant les phages ainsi, on peut, d'une certaine manière, orienter l'adaptation des bactéries et donc orienter leur devenir. C'est pourquoi l'étude des résistances des bactéries vis-à-vis des phages est cruciale. « On utilise désormais ces résistances contre les bactéries, explique Rémy Froissart. On les pousse vers des culs-de-sac évolutifs afin de s'en débarrasser définitivement. »

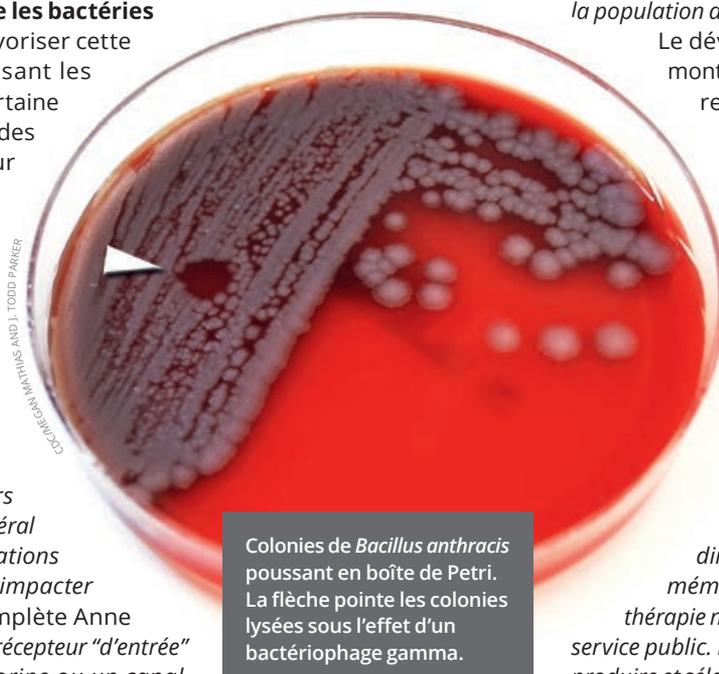
« Cette approche demande à la bactérie de s'adapter à plusieurs phages à la fois, ce qui est en général plus difficile. De plus, ces adaptations nécessaires à sa survie peuvent impacter directement sa physiologie, complète Anne Chevallereau. Par exemple, si le récepteur "d'entrée" du phage se trouve être une porine ou un canal

permettant l'entrée et la sortie de molécules nécessaires à sa survie, comme une pompe à efflux, alors la physiologie de cette bactérie pourrait s'en trouver fortement perturbée. »

Rémy Froissart va même plus loin, en évoquant une approche combinatoire mêlant phagothérapie et antibiothérapie : « Ce qu'il y a d'intéressant, lorsqu'on cible par exemple une pompe à efflux, c'est qu'en réponse, la bactérie va inhiber la synthèse de cette pompe. Malheureusement pour elle, cette absence la rend sensible à tous les antibiotiques, car c'était grâce à elle qu'elle pouvait relarguer dans son environnement proche les antibiotiques qui la menaçaient. » Dans ce cas, l'utilisation d'antibiotiques en fin de protocole thérapeutique donnerait le coup de grâce aux bactéries ayant développé des résistances vis-à-vis des phages.

« Mais, dès que l'on propose cela, les médecins nous regardent avec les yeux écarquillés, car, aujourd'hui, le traitement de base pour lutter contre une infection bactérienne reste l'emploi des antibiotiques et, à ce jour, aucun ne les utiliserait a posteriori, constate Rémy Froissart. Pourtant, si on fait le parallèle avec les traitements contre le cancer, on utilise bien différentes techniques : radiothérapie, chimiothérapie, immunothérapie... Ces approches sont de plus en plus précises et s'attaquent avec toujours plus de précisions au cœur du problème, en diminuant grandement la taille de la population des cellules cancéreuses. »

Le développement de la phagothérapie montre à quel point il faut réapprendre et repenser la médecine telle qu'on la pratique aujourd'hui dans la lutte contre les bactéries antibiorésistantes. « Mais c'est aussi une question d'infrastructures. Tant que nous restons dans le giron d'une médecine spécialisée ou pour des traitements compassionnels, cela reste faisable, estime Rémy Froissart. Alors que quand on décidera d'utiliser ces traitements pour des indications non compassionnelles, il va falloir mettre en place des infrastructures qui n'existent pas encore. Cela veut dire aussi réfléchir et transformer énormément notre système de soin. La phagothérapie n'aura de futur que dans un contexte de service public. Puisque, typiquement, on a besoin de produire et sélectionner les phages au cas par cas. » II



Colonies de *Bacillus anthracis* poussant en boîte de Petri. La flèche pointe les colonies lysées sous l'effet d'un bactériophage gamma.

CHEGEM KHARILIS AND J. TODD PARKER



Antifongiques : les mycoses résistent

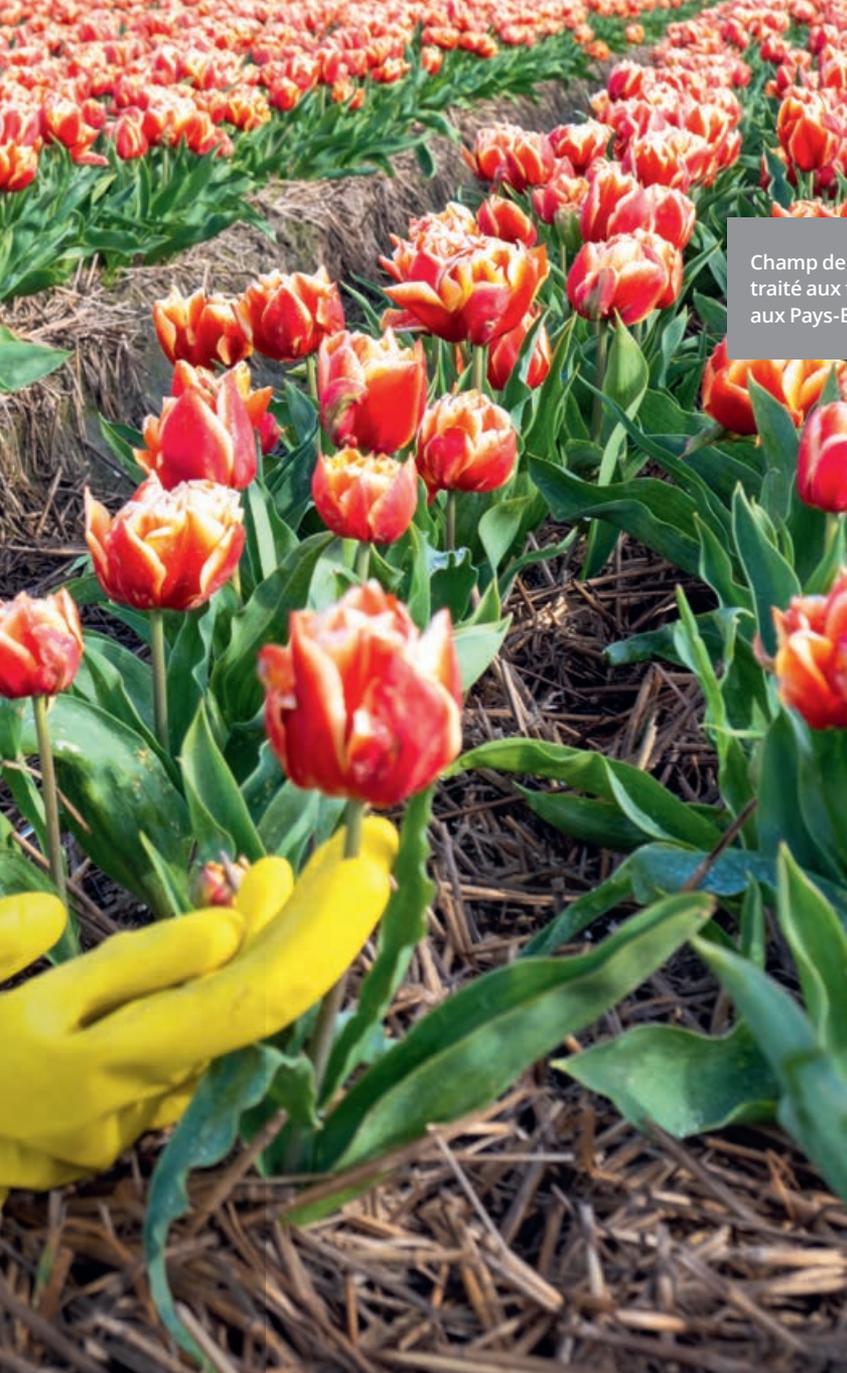
VIVANT 

SANTÉ Les mycoses résistantes aux médicaments antifongiques se multiplient. Notamment parce que les traitements contre les champignons pathogènes sont utilisés aussi bien en agriculture qu'en santé humaine et animale.

PAR MARINA JULIENNE

D'un côté, une hausse du nombre de patients infectés par *Aspergillus fumigatus*, un microchampignon pathogène présent dans la terre. De l'autre, des centaines de bulbes de tulipes destinés à embellir les nouvelles terrasses de l'hôpital de Besançon. C'est parce qu'elle avait un pied dans la recherche, au laboratoire Chrono-environnement¹, et l'autre dans la clinique, en tant que responsable du laboratoire de parasitologie-mycologie du CHU local, que Laurence Millon, avec son équipe, a pu établir le lien entre les deux.

C'était en 2019, alors que la résistance de certaines mycoses aux antifongiques n'était quasiment pas médiatisée. « *On parle encore peu de ce sujet*, commente Laurence Millon, *car les infections par des champignons touchent moins de personnes que les infections par des virus ou des bactéries.* » Dans leurs formes courantes, ces infections peuvent ne pas présenter de gravité particulière. Mais, dans leurs



Champ de tulipes traité aux fongicides, aux Pays-Bas.

climatique et de l'augmentation des échanges internationaux », comme le souligne le rapport de l'OMS, mais surtout parce qu'ils sont de plus en plus résistants aux traitements.

En effet, les mêmes antifongiques servent en santé humaine, en santé animale, en agriculture et en horticulture. Comme c'est le cas pour les antibiotiques trop prescrits, auxquels les bactéries sont devenues résistantes, l'utilisation massive d'antifongiques entraîne une diminution progressive de leur efficacité.

Cela fait déjà une quinzaine d'années que les biologistes hollandais rapportent dans des publications scientifiques une progression inquiétante de la résistance aux antifongiques aux Pays-Bas, notamment pour les infections causées par *Aspergillus*. Ils ont établi sur place un lien avec les quantités importantes de fongicides déversées sur les cultures de fleurs dans des zones habitées.

“En 2013, nous avons isolé, chez un patient agriculteur, une souche résistante d'Aspergillus au principal traitement existant.”

formes invasives, elles affectent des personnes qui présentent par ailleurs de graves pathologies liées au système immunitaire (cancer, sida, maladie respiratoire chronique) ou des patients ayant reçu une greffe de moelle ou d'organe. Elles sont alors dramatiques, le risque de mortalité dépassant les 50 % !

Une surveillance croissante

Les mycoses résistantes aux antifongiques font l'objet d'une surveillance croissante. En 2022, l'OMS a publié la première liste de 19 champignons² particulièrement dangereux (par exemple, *Cryptococcus neoformans*, *Candida auris*, *Aspergillus fumigatus* et *Candida albicans*), non seulement parce que « l'incidence et la portée géographique des maladies fongiques s'étendent dans le monde entier sous l'effet du réchauffement

« Cela nous avait mis la puce à l'oreille, relate Laurence Millon. En 2013, nous avons isolé à l'hôpital de Besançon, chez un patient agriculteur de profession, une souche résistante d'Aspergillus au principal traitement existant, le voriconazole. Nous avons alors fait des prélèvements non seulement sur les terres qu'il cultivait, sur les poussières issues des filtres de son tracteur, mais aussi à son domicile, car nous savons que les spores se diffusent sur des distances importantes et restent en suspension très longtemps dans l'air, les sols, le compost. Et nous avons effectivement trouvé des spores porteuses d'une mutation de résistance (TR34) dans un des lieux fréquentés par cet agriculteur. De ce fait, leur inhalation était très probable. »

Quelques années plus tard, la même équipe est surprise par le cas d'un autre patient, employé dans une scierie. Celui-ci a subi un traumatisme de la face sur son lieu de

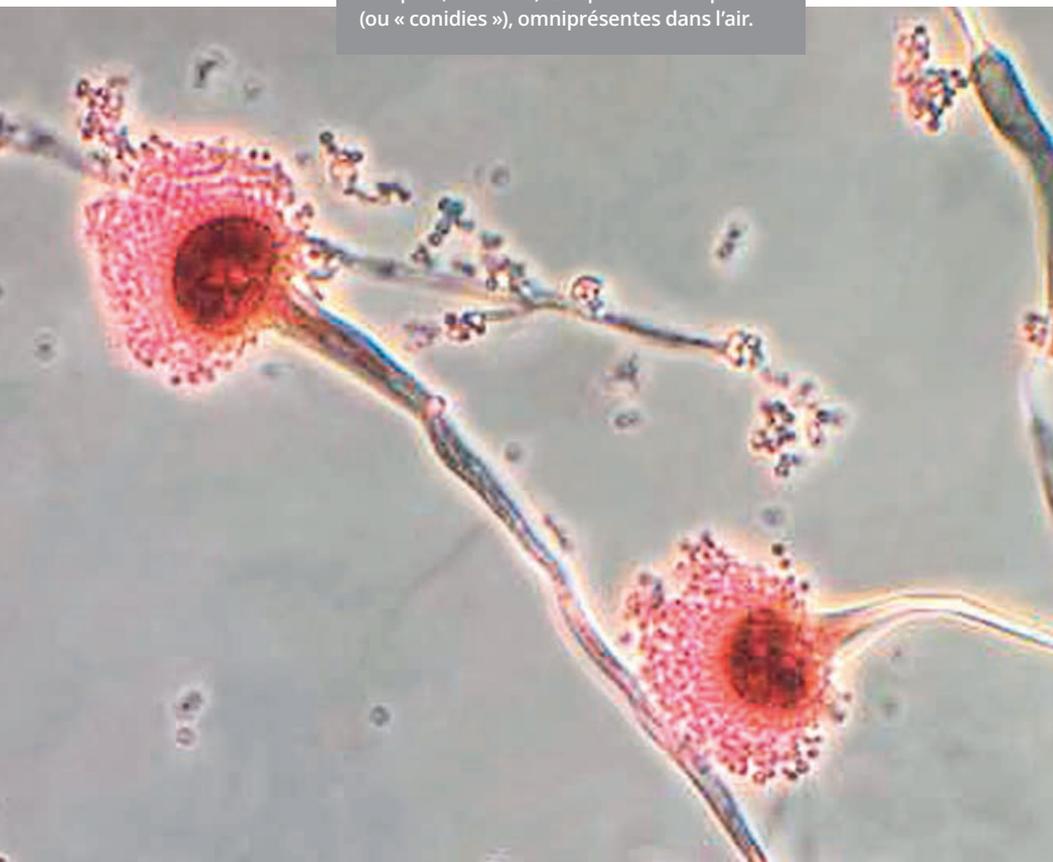
1. Unité CNRS/Université Marie-et-Louis-Pasteur, Besançon. 2. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240060241>

travail et, alors qu'il était en bonne santé avant l'accident, il a développé ensuite une infection sinusienne gravissime, résistante au traitement. « Dans les scieries, les planches sont souvent trempées dans des bains remplis de fongicides azolés pour lutter contre les champignons lignivores [qui attaquent le bois], puis mises à sécher dehors. Ce qui explique qu'il a été contaminé par une souche d'*Aspergillus* résistante lors de l'accident et que les sols aient été eux aussi largement contaminés, comme les prélèvements que nous avons faits dans une vingtaine de scieries utilisant les mêmes pratiques l'ont prouvé. »

L'horticulture biologique comme solution

À l'hôpital de Besançon, à la suite de la contamination des terrasses, tous les bulbes ont été retirés et remplacés l'année suivante par des bulbes issus de l'horticulture biologique, cultivés sans fongicides. Le résultat ? En 2019, 69 isolats d'*Aspergillus fumigatus* résistants aux azolés avaient été détectés dans la terre ; en 2020, des prélèvements réalisés avec le même mode opératoire ont permis de constater que le taux de résistance était passé de 71 % à moins de 3 % en un an.

Aspergillus fumigatus est une moisissure (vue ici au microscope optique) qui vit de la matière en décomposition (plantes, fruits, compost, humus...). Elle produit des spores (ou « conidies »), omniprésentes dans l'air.



© IMAGE CDC/US DEPARTMENT OF HEALTH & HUMAN SERVICES

“Aux Pays-Bas, on atteint des niveaux de résistance très élevés, de l'ordre de 20 à 30% de souches résistantes chez les patients.”

Le « coupable » a donc été formellement identifié. Mais, sachant qu'il est illusoire d'imaginer que l'horticulture diminue rapidement et drastiquement le recours aux fongicides, comment combattre cette résistance ?

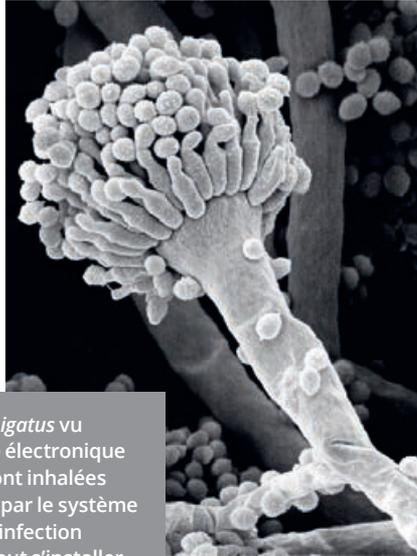
« Alors que les bactéries sont des organismes procaryotes, sans noyau, que les antibiotiques peuvent détruire sans nuire aux personnes malades, les champignons³ sont, comme les êtres humains, des organismes eucaryotes, dont les cellules sont dotées d'un noyau, rappelle Thierry Noël, responsable de l'équipe Candida au laboratoire Microbiologie fondamentale et pathogénicité⁴. Il est donc difficile de trouver des traitements qui s'attaquent aux champignons sans nuire dans le même temps à la santé des êtres humains porteurs de mycoses ! » C'est, entre autres, pourquoi il existe seulement quatre classes de médicaments antifongiques disponibles pour les infections les plus graves, contre une dizaine de familles d'antibiotiques.

Pression de sélection

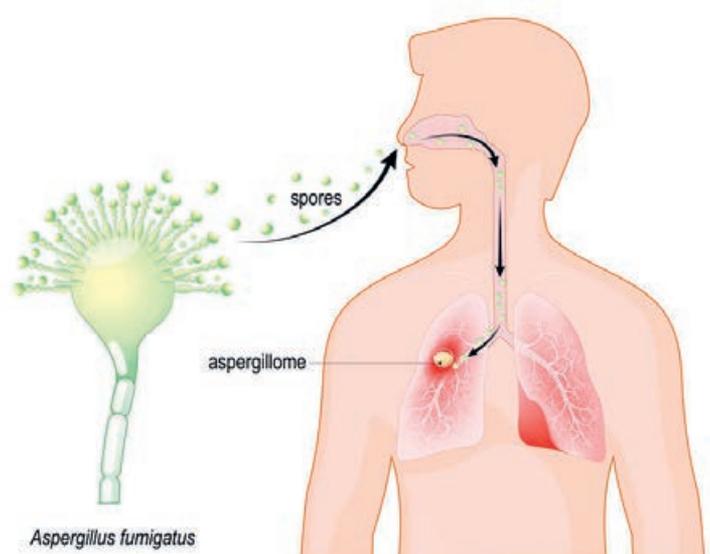
Les antifongiques les plus courants sont des traitements dits « azolés ». Ceux-ci bloquent la production d'un composant important de la membrane cellulaire des champignons, l'ergostérol, « qui ne se trouve pas chez l'humain, précise Thierry Noël, mais qui est un équivalent de notre cholestérol ».

Or, lorsque les fongicides azolés sont appliqués dans l'environnement, ils favorisent, par pression de sélection, les souches d'*Aspergillus* adaptées à ces molécules azolées. En conséquence, des souches résistantes aux fongicides azolés se développent.

« Aux Pays-Bas, on atteint des niveaux de résistance très élevés, de l'ordre de 20 à 30 % de souches résistantes chez les patients, alors qu'en France, nous ne dépassons pas, pour l'instant, les 5 ou 6 % », observe Laurence Millon. Mais ces résistances imposent tout de même, depuis quelques années, de réaliser désormais de façon systématique un « antifongogramme », c'est-à-dire une analyse biologique permettant de détecter une mycose résistante, donc un possible échec thérapeutique.



À gauche, *Aspergillus fumigatus* vu en 3D par un microscope électronique à balayage. Les spores sont inhalées et, en général, éliminées par le système immunitaire. Sinon, une infection des voies respiratoires peut s'installer, l'aspergillose (ou « aspergillome »).



© D. GREGORY & D. MARSHALL VIA WELLCOME COLLECTION CC BY 4.0 - SCHEMA © DESIGNUA/SHUTTERSTOCK.COM

« Si le patient est porteur d'une telle mycose résistante, nous sommes donc obligés de lui proposer un autre traitement, efficace contre toutes les formes de mycoses, mais avec des risques d'effets secondaires graves », commente Laurence Millon. Compte tenu des niveaux trop élevés de résistance, les médecins des Pays-Bas, eux, sont déjà contraints de prescrire tout de suite, en première intention, cet antifongique plus toxique.

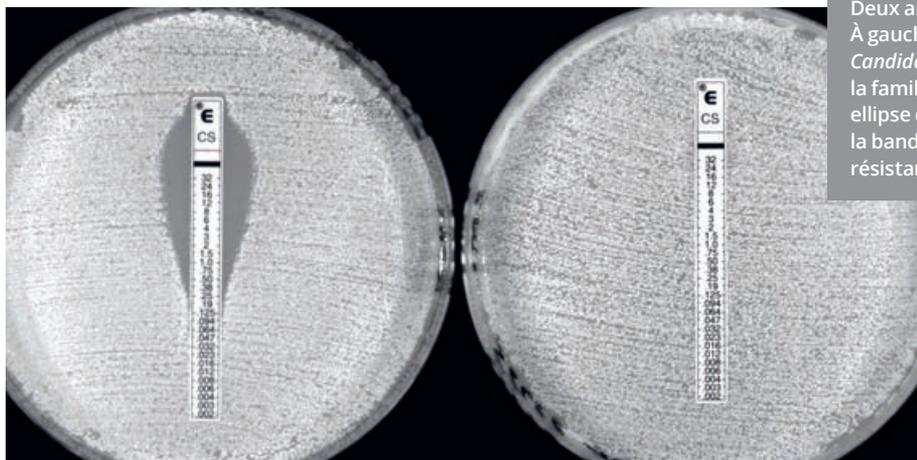
Trouver de nouveaux traitements

Pourrait-on imaginer une autre solution ? À Bordeaux, Thierry Noël a démarré il y a quelques années des recherches sur un traitement des *Candida* responsables d'infections vaginales qui serait basé sur l'immunothérapie, sans recourir aux antifongiques.

« Il s'agit d'apprendre au propre système immunitaire du patient à reconnaître l'infection par ce pathogène, puis à s'en défendre, détaille le chercheur. Mais, pour l'instant, nous n'en sommes qu'aux expérimentations sur la souris. »

En France, on estime que 16 000 personnes ont contracté une infection fongique sévère entre 2012 et 2022, souligne Fanny Lanternier, la responsable du Centre national de référence des mycoses invasives et des antifongiques (CNRMA), qui suit de près l'évolution de ces pathologies à l'Institut Pasteur. Et, dans le monde, celles-ci seraient responsables chaque année de 1,6 million de décès.

Un projet de recherche européen⁵ vient par ailleurs d'être lancé, impliquant une vingtaine de nations (des pays européens, mais aussi l'Australie, l'Afrique du Sud, le Canada, etc.). Il doit permettre, dans un large éventail de zones géographiques (dont l'Union européenne et l'Afrique), de détecter l'émergence d'une résistance aux antifongiques à double usage – santé humaine et agriculture – et, grâce à des outils de surveillance par échantillonnage d'air, d'étudier plus particulièrement le risque d'exposition à *Aspergillus fumigatus* résistant aux antifongiques. **II**



Deux antifongigrammes sur milieu nutritif. À gauche, celui d'une souche de la levure *Candida sp.* sensible à un antifongique de la famille des échinocandines (on voit une ellipse d'inhibition de croissance autour de la bandelette). À droite, celui d'une souche résistante, qui a envahi toute la boîte de Petri.

© MAXIMIE LEFRANC, MFP, ÉQUIPE CANDIDA ET PATHOGENOTE.

3. Les organismes du règne fongique sont définis par le fait d'être des eucaryotes, mais aussi d'être dépourvus de chlorophylle, de se nourrir par absorption, d'avoir un organisme dépourvu de feuilles, tiges et racines, etc.
4. MFP, unité CNRS/université de Bordeaux.
5. <https://www.jpiaamr.eu/projects/gap-afr/>



1. L'Amundsen, navire de la Garde côtière canadienne et unique brise-glace de recherche du pays, évolue dans le fjord Archer, sur la côte est de l'île d'Ellesmere, au Nunavut. Une fois leur destination atteinte, les scientifiques à bord immobiliseront le bateau et déploieront toute une batterie d'instruments océanographiques pour enregistrer sur une longue période des mesures spécifiques : température, salinité, courants... L'opération aide à étudier le système interconnecté atmosphère-glace-océan et à comprendre l'impact des changements qui sont en cours sur les écosystèmes marins.

TERRE

SOCIÉTÉS

TECHNOLOGIE Petits ou grands, à rotor ou à voilure fixe, les drones entrent peu à peu dans le quotidien des scientifiques du CNRS. Ils leur offrent une vision depuis de faibles altitudes jusqu'alors difficiles d'accès et hors de portée des satellites. Sites archéologiques, canopées et étendues d'eau se font ainsi tirer le portrait. Prenons de la hauteur !

TEXTE PAR MEHDI HARMİ

La Terre vue du CNRS



© CYRIL FRÉSILLON/CEFE/CNRS IMAGES

2. Au-dessus d'un plan d'eau, même à une faible altitude, un drone est vulnérable : une chute, et toute l'expérience s'en trouve compromise. Alors, les biologistes du Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CEFE) ont muni leur « collègue à hélices » de bouées, à la manière d'un hydravion. Ce drone prend part à la campagne d'observation de cétacés en Méditerranée. Envoyé à 200 mètres d'altitude, il est programmé pour prendre une photo toutes les 2 secondes, mais reste limité à des vols de 20 minutes.

3. Des chercheurs du CEFE ont immortalisé ce groupe de cinq globicéphales (avec deux adultes et trois juvéniles) au large de Carthagène, en Espagne. Ils menaient une expérience olfactive pour étudier les capacités des mammifères aquatiques à goûter et à sentir. Les résultats pourraient permettre d'identifier des molécules répulsives afin, par exemple, de maintenir les animaux à distance de zones dangereuses.



© BERTRAND BOUCHARD/CEFE/CNRS IMAGES



© THOMAS NICQ/HALIMA UMR 8164/CNRS IMAGES

4. À perte de vue, des milliers de ronds petits ou grands, sertis de noir, évoquant des cercles de fées... Ce sont les tombes de la grande nécropole de Kerma, située sur l'île de Saï, entre deux bras du Nil, au Soudan. Pris à 150 mètres d'altitude, le cliché dévoile une surface d'un peu plus de 2,5 hectares de sépultures plurimillénaires, dont les plus grandes mesurent près de 40 mètres de diamètre.

5. Ce drone muni de capteurs sert à mesurer les concentrations en dioxyde de carbone et en méthane au-dessus de la tourbière de Frasne, dans le Doubs, lors d'une campagne d'étude sur le devenir de ces gaz à effet de serre. Dans les zones humides de ce type, la matière organique se décompose mal et s'accumule sous forme de tourbe. Le carbone y est alors stocké durant des millénaires. Avec les changements climatiques et les activités humaines, ces écosystèmes se dérèglent – ce qui impacte notamment le piégeage du carbone – et tendent à émettre davantage de gaz. Pour anticiper les évolutions futures, le Service national d'observation des tourbières scrute celle de Frasne depuis 2008.



© HUBERT RAGUET/CNRS IMAGES



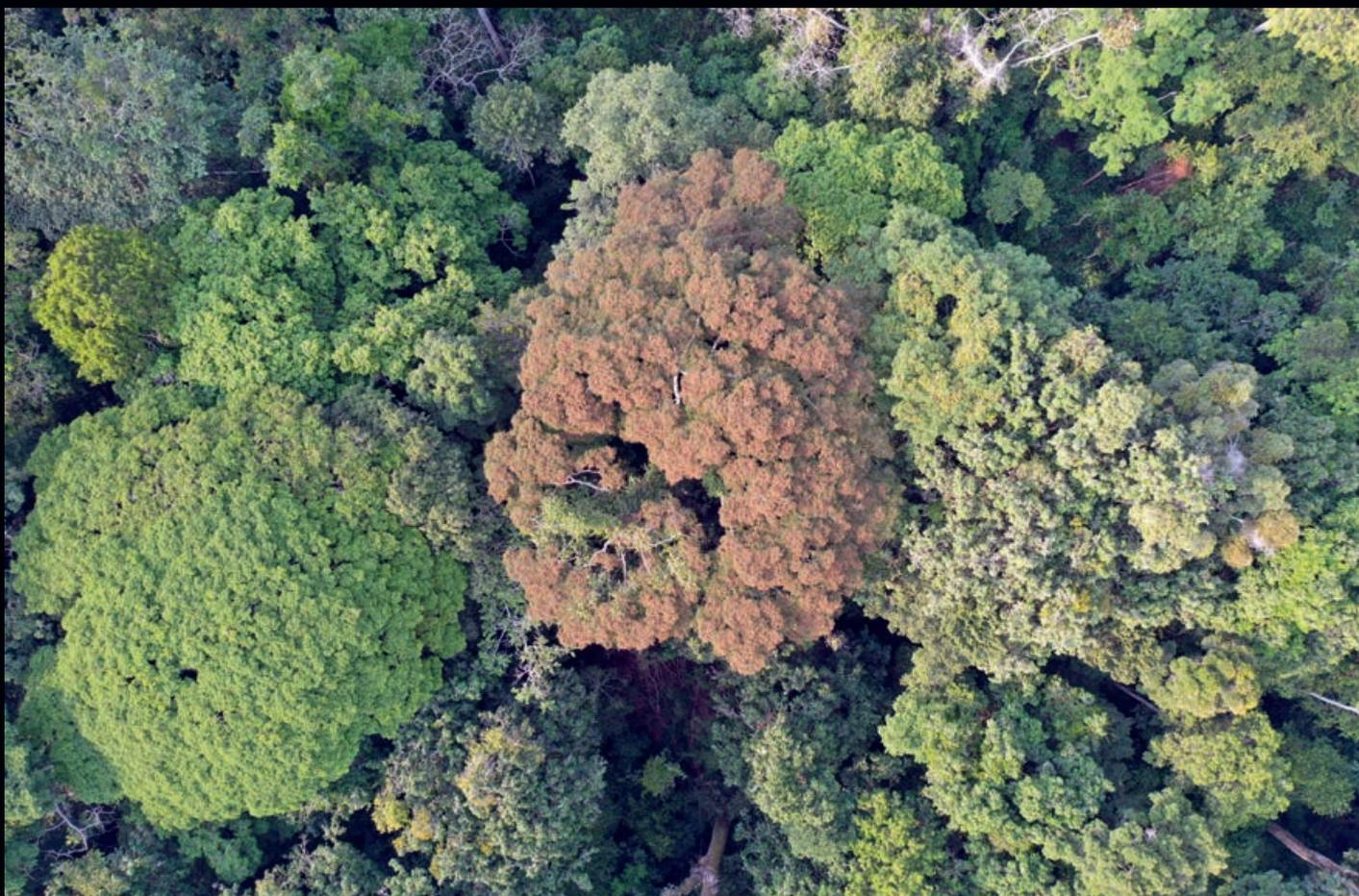
© FABRICE MONNAP/ARTHEUS/CNRS IMAGES

6. Sur un vert quasi immaculé se détachent quelques pierres délimitant un espace. À y regarder de plus près, on s'aperçoit que ce sont les vestiges d'une structure funéraire édiflée par les premières tribus nomades des steppes d'Asie centrale. Des chercheurs de Monaco, de Russie et de Mongolie ont saisi cette image au cœur de la vallée de Salbyk, dans la république de Khakassie (Fédération de Russie). Là, les scientifiques utilisent des drones pour tester de nouvelles techniques d'enregistrement de l'information archéologique fondées sur la modélisation 3D – dont la photogrammétrie, qui permet de déterminer la forme, les dimensions et la situation d'un objet dans l'espace à partir de plusieurs prises de vues.

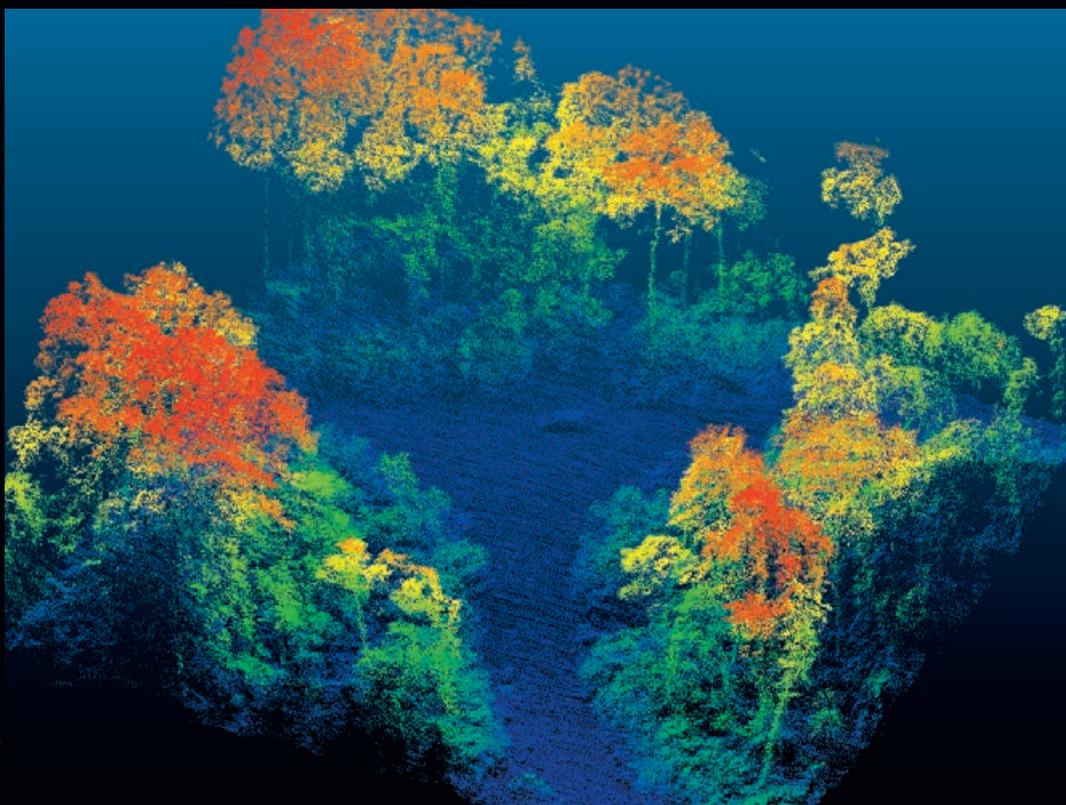


© THIBAUT VERGOZ/IGELGP/PRESHINE/IRD/CNRS IMAGES

7. Une course d'élan, et hop ! Le drone à voilure fixe (de type eBee) lancé par Patrick Wagnon, un glaciologue du programme Pressions sur la ressource en eau et en sol dans l'Himalaya népalais (Preshine), prend son envol sur le glacier Changri-Nup, au Népal. Il y réalisera une modélisation en 3D de ce glacier dit « noir », car couvert de débris rocheux provenant des versants escarpés du lit encaissé. L'objectif des scientifiques est de mesurer l'impact des variables climatiques sur des glaciers, de déterminer l'évolution de leur bilan de masse, ainsi que de confronter les données sur le climat avec les usages et la gestion des ressources en eau par des sociétés locales, dont les besoins s'accroissent.



© RAPHAËL RÉUSSIER, INDJAMP



© MAXIME RÉGOU-MÉCHAIN, INDJAMP

8. Vues du ciel, les forêts offrent toujours un spectacle saisissant. Chaque arbre se différencie de son voisin par ses couleurs, sa forme et la superficie de son couvert végétal. Grâce aux drones, les photos de canopées deviennent monnaie courante et permettent un suivi de la phénologie (étude de l'apparition d'événements périodiques) et du fonctionnement d'une forêt, ici par les chercheurs du projet Biodiversa+ CoForFunc, dans le nord du Congo. Le cliché du bas, en fausses couleurs, a également été acquis par drone, à l'aide d'une caméra munie d'un Lidar – technologie utilisant le calcul des distances et des intensités lumineuses de manière très précise afin de cartographier en 3D un environnement. Ici, les couleurs correspondent à la hauteur des points mesurés par rapport au sol.

Carte des bassins d'attraction gravitationnelle de notre univers proche établie à partir du relevé Cosmicflow-4.



Le Big Bang à portée de télescope

UNIVERS

COSMOLOGIE Campagnes d'observation « grand format », méthodes d'analyse des données novatrices, développements théoriques tous azimuts... L'astrophysique et la cosmologie entrent dans une ère de précision à même de percer tous les mystères du cosmos. Y compris celui de ses origines.

PAR MATHIEU GROUSSON

Des filaments blancs qui jaillissent comme des feux d'artifice dans la nuit... « Grâce à cette image [à gauche], nous avons une vision de là où nous nous situons dans l'Univers, de l'endroit où nous vivons », s'enthousiasme Aurélien Valade, astrophysicien au Centre de physique des particules de Marseille (CPPM)¹. En analysant la position et la vitesse des 56 000 galaxies du relevé Cosmicflow-4, il est parvenu avec son équipe à cartographier les bassins d'attraction gravitationnelle de notre univers proche. Ce qui permet d'y localiser précisément la Voie lactée – au cœur du superamas de Shapley.

Ce résultat a pu être obtenu grâce à la nouvelle version enrichie du catalogue Cosmicflow, mais aussi en s'appuyant sur une technique d'analyse optimisée des données observationnelles. Cette pluie d'observations fournit aux théoriciens de nouvelles armes pour s'attaquer à la question des origines et de l'évolution de l'Univers. Car, à ce jour, toutes les observations semblent confirmer les grandes lignes de ce que l'on appelle le « modèle cosmologique standard » – il y a 13,8 milliards d'années, notre Univers a émergé d'un état extrêmement chaud et dense qui, sous l'effet de l'expansion, s'est ensuite refroidi et structuré, laissant petit à petit apparaître le gigantesque réseau de galaxies que l'on peut observer aujourd'hui.

Si ce modèle fait encore largement consensus, il demeure sommaire et laisse de nombreuses questions en suspens. Quels ont été les tout premiers instants de l'Univers ? Comment la matière est-elle apparue ? Sous l'effet de quelles forces s'est-elle structurée ? En comparaison, le sujet de notre localisation cosmique, résultat d'un méticuleux travail de cartographie des

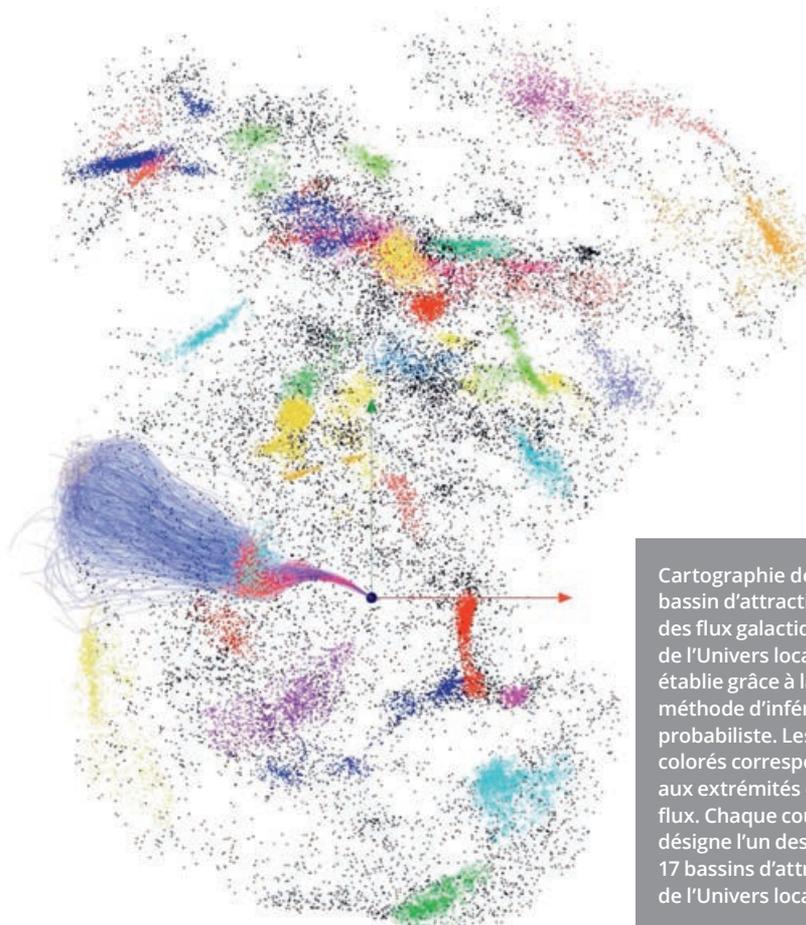
amas de galaxies qui nous entourent dans un rayon de 1 milliard d'années-lumière, pourrait paraître anecdotique. Cette information renferme pourtant de précieux indices sur les processus à l'œuvre dans l'Univers.

Les astrophysiciens ont donc mesuré la vitesse d'un échantillon de galaxies, à partir de quoi ils ont déduit la structure des flux gravitationnels qui entraînent celles-ci vers les régions les plus denses. Jusqu'alors, les analyses de ce type se fondaient sur une méthode statistique.

« Mais, tempère Aurélien Valade, elle nécessite la formulation de nombreuses hypothèses et le recours à une série d'approximations qui reviennent à laisser de côté une partie de l'information contenue dans les données. »

Cartographier l'univers local

Pour remédier à ce problème, les scientifiques ont développé une méthode dite d'« inférence probabiliste ». Fondée sur l'intelligence artificielle, elle consiste à engendrer numériquement d'innombrables configurations et à assortir chacune d'elles d'une probabilité de compatibilité avec les observations. « Nous avons ainsi obtenu 1 000 configurations compatibles avec les données, ce qui confère in fine à notre carte des bassins gravitationnels



Cartographie des bassins d'attraction des flux galactiques de l'Univers local établie grâce à la méthode d'inférence probabiliste. Les points colorés correspondent aux extrémités de ces flux. Chaque couleur désigne l'un des 17 bassins d'attraction de l'Univers local.

© A. VALADE, N. L. LEBRON, D. POMARÈDE, R. B. TULLY, Y. HOFFMAN, S. PEIER, AND E. KOURKCHI

1. Unité CNRS/université Aix-Marseille.



Télescope de 8,4 mètres de l'observatoire Vera C. Rubin, au Chili. L'installation participera aux grands relevés qui permettent d'enquêter sur les tout débuts de l'Univers.

une très grande robustesse », se félicite le spécialiste. Si les chercheurs confirment bien l'existence du superamas Laniakea, leurs résultats, au contraire de ceux publiés précédemment, indiquent que la Voie lactée résiderait plutôt au sein du bien plus vaste superamas de Shapley.

« Dans un premier temps, nous avons appliqué notre méthode à des données simulées, détaille Aurélien Valade. Avec cette reconstruction des bassins gravitationnels de l'univers local, nous l'avons testée pour la première fois sur des données réelles. Et, actuellement, nous la mettons en œuvre pour déterminer précisément un paramètre mal connu du modèle cosmologique standard. »

Dans le modèle cosmologique standard, ce paramètre, appelé « $f\sigma 8$ », décrit l'intensité de l'agrégation de la matière dans l'Univers. De sa valeur dépendent le nombre et la taille des amas de galaxies ainsi que l'ensemble de la structure gravitationnelle du cosmos.

Un potentiel de découverte extraordinaire

Pour connaître la valeur $f\sigma 8$, les membres du CPPM ont collaboré avec Mickaël Rigault. Astrophysicien à l'Institut de physique des 2 infinis², à Lyon, il y dirige le groupe de recherche en cosmologie de la collaboration ZTF. Celle-ci vise à créer un catalogue de plusieurs milliers de supernovas de type 1a – des explosions stellaires dont la luminosité est constante, ce qui permet de connaître avec précision leur distance et, ainsi, de mieux approximer

la valeur de $f\sigma 8$. Et ce n'est qu'un début ! Comme le prédit Dominique Fouchez, du CPPM, « le développement de nouvelles méthodes statistiques, telles ces méthodes d'inférence probabiliste, combiné avec l'arrivée massive de nouvelles données des grands relevés, comme ceux du télescope au sol Vera Rubin et du satellite Euclid, ont un potentiel de découverte et de remise en cause extraordinaire ! »

Un avis partagé par les spécialistes des tout premiers instants de l'Univers. Ils voient dans ces futurs catalogues (avec leurs centaines de millions de galaxies et d'autres objets célestes) la possibilité de remonter jusqu'à la trace de la genèse du cosmos – précisément, jusqu'à une phase appelée « inflation » et qui, entre 10^{-36} et 10^{-33} seconde après le Big Bang, aurait vu la taille de l'Univers multipliée par un facteur vertigineux d'au moins 10^{26} . Cette hypothèse, formulée au début des années 1980, a l'avantage de résoudre plusieurs énigmes, notamment le fait que le cosmos semble parfaitement plat.

“On ne sait ni comment s'est déroulée l'inflation, ni pourquoi elle s'est arrêtée, ni comment la matière qui constitue actuellement l'Univers a émergé.”

Le schéma général de la théorie de l'inflation a été validé par les données du satellite *Planck* qui, voilà une dizaine d'années, a produit la carte la plus précise du fond diffus cosmologique (la première lumière émise par l'Univers, 380 000 ans après le Big Bang). Pour autant, on ne sait ni comment s'est déroulée l'inflation, ni pourquoi elle s'est arrêtée, ni comment la matière qui constitue actuellement l'Univers a ensuite émergé de cette phase d'expansion exponentielle.

Soubresauts quantiques

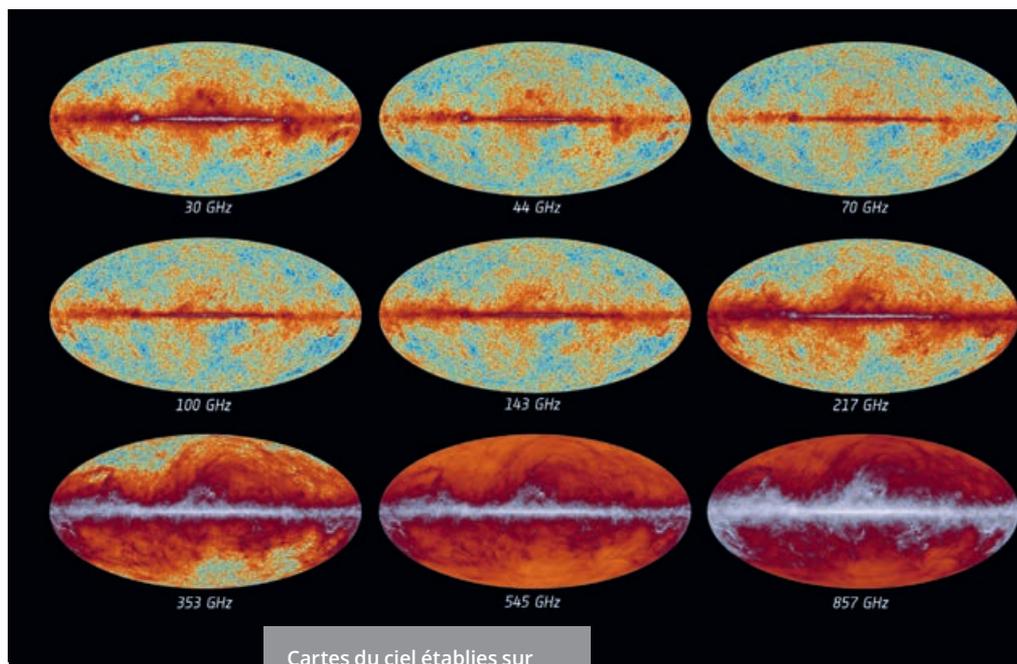
Une partie de la réponse pourrait résider dans les vastes relevés galactiques en cours. Selon le scénario de l'inflation, les structures à grande échelle de l'Univers résulteraient d'un « étirement » des soubresauts quantiques de l'espace-temps des origines. C'est autour d'eux que la matière se serait ensuite effondrée sur elle-même pour former les étoiles, les galaxies et la totalité de la toile cosmique.

Par conséquent, anticipe Sébastien Renaux-Petel, astrophysicien à l'Institut d'astrophysique de Paris³ (IAP), « on espère que des données suffisamment précises sur la distribution de la matière dans l'Univers permettront de déduire des informations sur les détails du scénario de l'inflation et sa cause ».

Il faudra alors confronter ces données observationnelles à celles calculées à partir des différents modèles d'inflation. Hélas, les équations issues de ces modèles, qui combinent relativité générale et mécanique quantique, sont souvent d'une redoutable difficulté.

Pour la contourner, le chercheur, en collaboration avec Lucas Pinol, du Laboratoire de physique de l'École normale supérieure (LPENS)⁴, et Denis Werth, de l'IAP, a récemment proposé une méthode numérique qui permet de calculer les conséquences observationnelles de toute théorie de l'univers primordial. « Jusqu'ici, on essayait de calculer le signal d'intérêt à la fin de l'inflation, alors que l'Univers

2. Unité CNRS/Université Claude Bernard-Lyon 1. 3. Unité CNRS/Sorbonne Université. 4. Unité CNRS/ENS-PSL/Sorbonne Université/Université Paris Cité.



Cartes du ciel établies sur neuf bandes de fréquence grâce aux 15,5 premiers mois d'observation de la mission *Planck*.

© ESA & THE PLANCK COLLABORATION

est déjà d'une très grande complexité, explique Sébastien Renaux-Petel. De notre côté, nous avons fait le choix de résoudre numériquement la totalité de l'évolution des quantités à prédire depuis le début de l'inflation. On produit ainsi des données au-delà du nécessaire, mais avec l'avantage de partir d'un état de l'Univers beaucoup plus simple, à une époque où l'espace-temps n'était soumis qu'aux fluctuations quantiques du vide. » Une astuce qui pourrait mettre l'inflation à portée de télescopes et qui a valu aux trois théoriciens de recevoir le prix Buchalter de cosmologie 2023 !

Trous noirs primordiaux

Le chercheur a récemment proposé avec Angelo Caravano, son collègue à l'IAP, un formalisme permettant d'étudier des modèles inflationnaires caractérisés par des fluctuations quantiques de très grande intensité. Jusqu'alors, cette possibilité était hors de portée des approximations

Image issue de la simulation Euclid Flagship qui va de l'univers local actuel (à gauche) jusqu'à l'époque où il avait environ 3 milliards d'années (à droite), au début de la formation des amas de galaxies.



Vue d'artiste montrant une galaxie en formation pendant l'ère de réionisation, quelques centaines de millions d'années seulement après le Big Bang.

© NASA, ESA, CSA, JOSEPH OLUMSTED (STSC)

usuelles, qui ne prennent en compte que des fluctuations de basse intensité. Or on pense qu'à la fin de la période d'inflation, des soubresauts quantiques intenses auraient pu engendrer des trous noirs primordiaux.

Ces trous noirs non issus d'étoiles ont été imaginés il y a plusieurs décennies par le cosmologiste anglais Stephen Hawking. Et ils ont été récemment invoqués pour expliquer la découverte par le télescope spatial *James Webb* d'une abondance inattendue d'amas de galaxies très anciens, mais déjà très denses.

À la recherche du fond diffus gravitationnel

Les théoriciens ont mis à profit cette nouvelle méthode pour explorer différents scénarios. Et certains s'avèrent particulièrement déroutants.

Tandis que notre univers local est depuis longtemps sorti de l'inflation, certaines parties de l'univers primordial demeurent en état d'inflation éternelle. « *Dans ce cas, la relativité générale indique que pour un observateur situé dans une région hors inflation, celles qui y demeurent apparaissent sous la forme d'un trou noir*, note Sébastien Renaux-Petel. *C'est la première fois qu'une telle prédiction*

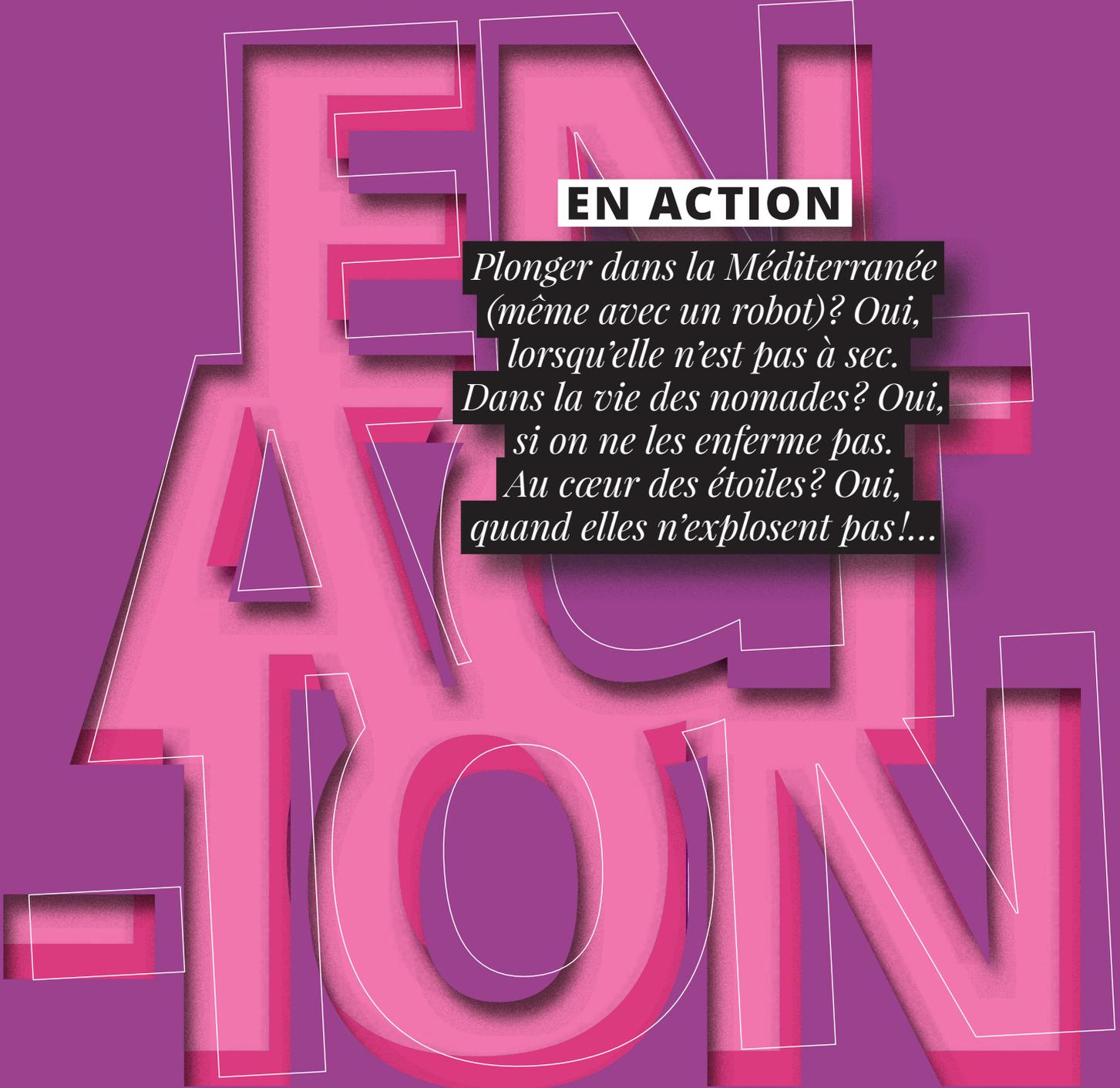
est réalisée ! » Avec son collègue, ils ont calculé la façon dont les fluctuations de très grande amplitude peuvent générer des ondes gravitationnelles. Des ondes qu'une prochaine génération de détecteurs pourrait observer.

Tout ceci reste spéculatif, mais, comme le précise Danièle Steer, du LPENS et directrice du groupement de recherche Ondes gravitationnelles, « *avec la mise en service de l'Einstein Telescope, prévue à l'horizon 2040, ou de l'interféromètre spatial LISA, dont le décollage est envisagé pour 2035, il est possible que l'on parvienne à détecter un fond diffus cosmologique constitué des ondes gravitationnelles émises par l'Univers dans ses tout premiers instants.* »

Ce fond diffus gravitationnel permettrait aux astronomes de regarder, au-delà du fond diffus cosmologique, la toute première lumière constituée des photons émis 380 000 ans après le Big Bang. « *Cela nous renseignerait alors sur l'inflation et, en particulier, sur la possible existence de trous noirs primordiaux* », indique Danièle Steer.

Reste que, *a priori*, les prémices de l'inflation resteront pour toujours hors de portée des observations, ce qui fait dire à son collègue Vincent Vennin : « *Il y a aujourd'hui un cadre général permettant la prise en compte de fluctuations quantiques de très grande amplitude durant l'inflation. S'il reçoit une confirmation observationnelle, par exemple du fait de la mise en évidence de trous noirs primordiaux, il sera renforcé dans son ensemble.* » Dans ce cas, théorie et observations permettraient de remonter le fil du temps quasiment jusqu'au Big Bang. Nous saurions alors où nous habitons... mais également d'où nous venons ! ||

“Ce fond diffus gravitationnel permettrait aux astronomes de regarder au-delà du fond diffus cosmologique.”

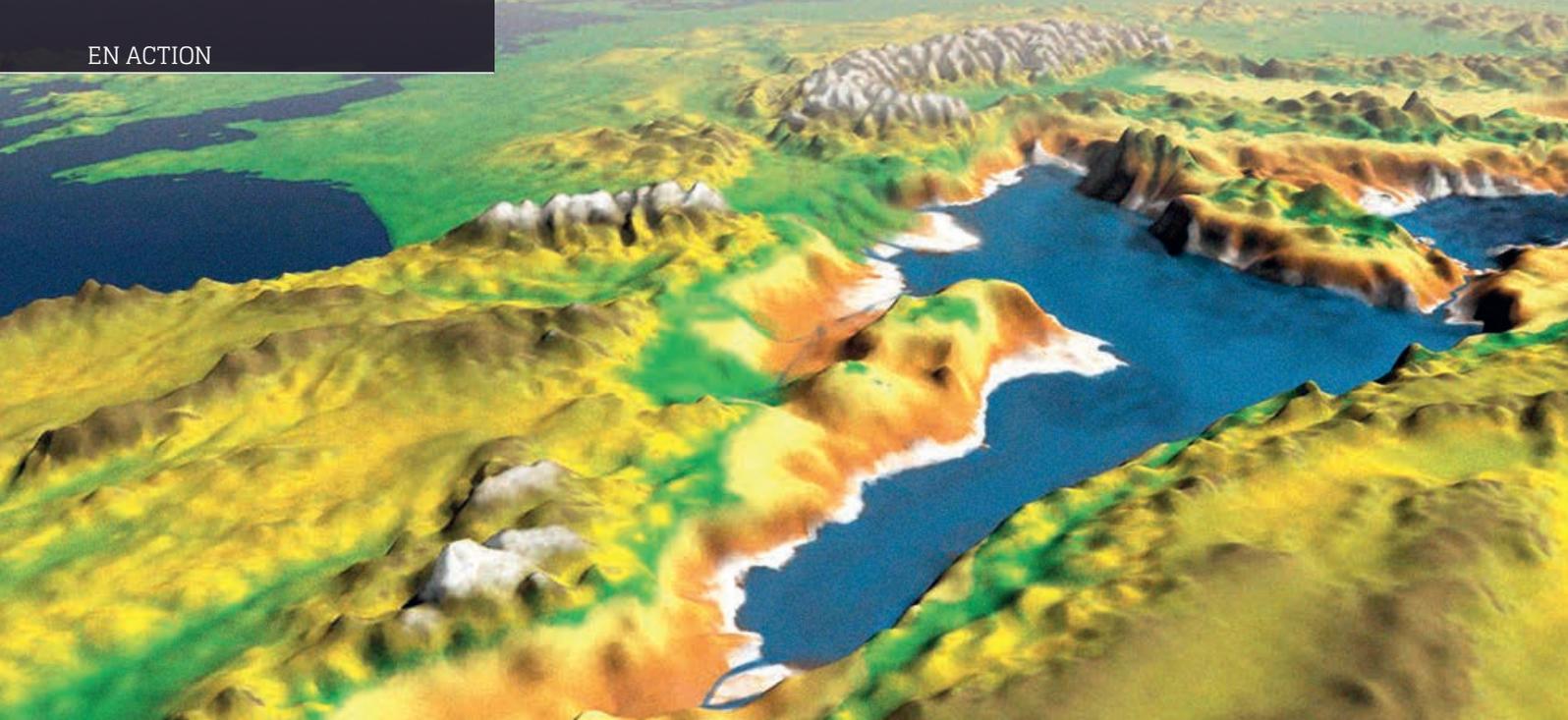


EN ACTION

*Plonger dans la Méditerranée
(même avec un robot)? Oui,
lorsqu'elle n'est pas à sec.*

*Dans la vie des nomades? Oui,
si on ne les enferme pas.*

*Au cœur des étoiles? Oui,
quand elles n'explorent pas!...*



Quand la Méditerranée s'est vidée

TERRE ●

GÉOLOGIE C'était il y a plus de 5 millions d'années : la mer Méditerranée s'est asséchée, laissant place à un désert de sel à perte de vue. Retour sur la dernière grande crise hydrologique du bassin méditerranéen.

PAR MORGANE GILLARD

Cet épisode dramatique dans l'histoire de la région méditerranéenne est aujourd'hui connu sous le nom de « crise de salinité messinienne ». Il a été mis en évidence pour la première fois dans les années 1970, à la suite de la découverte d'énormes dépôts de sel et de gypse pouvant atteindre 3 kilomètres d'épaisseur. Cet épisode, daté de 5,97 à 5,33 millions d'années, témoigne d'une crise hydrologique sévère qui, à son paroxysme, a entraîné l'assèchement de vastes portions de ce bassin.

Comment s'est déroulé ce cataclysme ? Qu'est-ce qui a pu le déclencher ? Et quelles furent ses conséquences, notamment sur l'écosystème ? Ces questions ont fait l'objet d'une nouvelle étude¹ dirigée par des chercheurs du CNRS et de l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP)², et publiée dans la revue *Nature Communication*.

Les modélisations du mouvement des plaques lithosphériques du bassin méditerranéen révèlent ce qui s'est passé il y a environ 6 millions d'années. La poussée de l'Afrique contre l'Eurasie entraîne alors la fermeture

temporaire du détroit de Gibraltar. Couplée à une baisse globale du niveau des océans, cette obstruction va isoler la Méditerranée des eaux de l'océan Atlantique.

Le niveau de la mer se mettra alors à diminuer sous l'effet de l'évaporation. Une situation que les apports des fleuves et des rivières ne suffiront pas à compenser. Le creusement de profonds canyons – tel celui des gorges de l'Ardèche – ainsi que les traces d'érosion des zones côtières sont d'ailleurs révélateurs de cette crise hydrologique sans précédent dans l'histoire géologique de la région. Le niveau de la Méditerranée, suppose-t-on souvent, a ainsi pu baisser de plus de 1 kilomètre.

Une évolution en deux temps

La Méditerranée s'est-elle donc vraiment retrouvée à sec voilà 5,6 millions d'années ? Pour Giovanni Aloisi, géologue à l'IPGP et auteur principal de l'article, la réponse est plus complexe qu'un simple oui ou non : « *Les résultats de notre étude suggèrent que la crise de salinité messinienne s'est divisée en deux phases. Durant la première, qui a duré environ 35 000 ans, la Méditerranée n'était en réalité pas totalement déconnectée de l'océan Atlantique. Des échanges restreints ont pu avoir lieu entre les deux bassins, ce qui a permis de maintenir un niveau marin haut. Toutefois,*

► Vue d'artiste de l'ouest du bassin méditerranéen il y a environ 5 millions d'années.

l'écoulement de la Méditerranée vers l'Atlantique n'était pas suffisant pour permettre le maintien d'un équilibre chimique entre l'eau de mer et le sel dissout. La mer a donc commencé à se concentrer en sel, jusqu'à permettre la précipitation, le dépôt et la lente accumulation de halite (sel gemme) dans le fond du bassin, notamment dans sa partie orientale. »

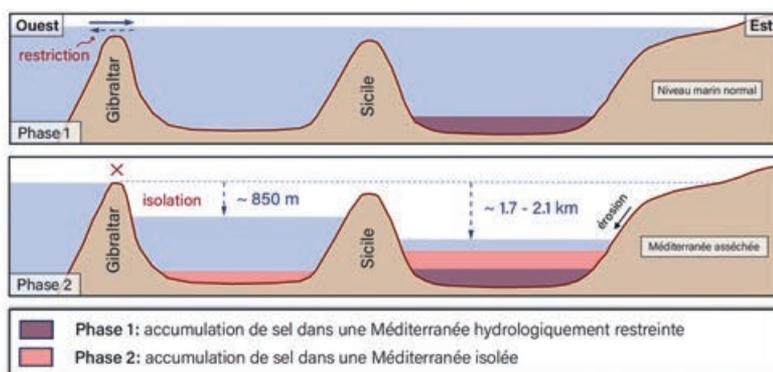
Entre 5,97 et 5,6 millions d'années, l'eau de la mer Méditerranée se transforme alors lentement en saumure, avant que la situation dégénère. Vers 5,6 millions d'années, l'abaissement progressif du niveau de la Méditerranée va finalement entraîner son isolement total. Sous l'effet de l'évaporation, le niveau marin va alors diminuer très rapidement. « C'est le début de la deuxième phase, explique le chercheur. En seulement 10 000 ans, la Méditerranée va

“L'assèchement de certaines zones a ouvert des voies de passage terrestres permettant d'expliquer l'apparition d'une faune nouvelle sur des îles.”

alors perdre 70 % de son volume d'eau ! Par endroits, notamment dans les bassins situés à l'est de la Sicile, la baisse du niveau de la mer va même atteindre 1,7 à 2,1 kilomètres. Cette situation va entraîner la précipitation et le dépôt rapide d'une importante masse de halite. Il est probable que de vastes zones des marges, mais aussi du fond de la mer, se soient alors retrouvées totalement asséchées. »

Pour bâtir ce scénario, Giovanni Aloisi et ses collègues ont analysé le rapport d'abondance de deux isotopes stables du chlore (le ^{37}Cl et le ^{35}Cl), à partir d'échantillons de halite provenant de puits de forage réalisés en mer

► Les deux phases de la crise de salinité messinienne : le sel s'accumule d'abord dans un bassin méditerranéen rempli de saumure, puis dans une Méditerranée isolée de l'océan Atlantique.



Méditerranée. Ces deux isotopes, présents dans l'eau, sont en effet mobilisés lors de la cristallisation du sel... à un détail près. Le ^{37}Cl , plus lourd, a tendance à entrer préférentiellement dans la phase cristallisée, laissant s'échapper l'eau enrichie en ^{35}Cl . Le développement d'un modèle mathématique a permis d'interpréter ces données en termes de taux de précipitation et de hauteur d'eau.

« Nos données montrent clairement une transition brutale vers 5,6 millions d'années, confirme le géologue, avec une chute rapide du niveau de la mer et un dépôt massif d'évaporites. Elles soutiennent également l'hypothèse d'une inondation brusque du bassin il y a 5,33 millions d'années, que de précédentes études expliquent par la rupture soudaine du seuil de Gibraltar. » Les eaux de l'Atlantique se seraient alors déversées dans le bassin asséché. Un déluge lui aussi cataclysmique, qui n'aurait mis que quelques années à remplir à nouveau la Méditerranée.

Et les lapins colonisèrent les Baléares

Ces résultats viennent également étayer l'hypothèse, émise par de précédentes études³, que cette baisse du niveau marin, en provoquant une décompression rapide du manteau terrestre, a pu favoriser des éruptions volcaniques dans le bassin. Un pic de magmatisme a effectivement été daté à cette même période.

De même, l'assèchement de certaines zones a ouvert des voies de passage terrestres permettant d'expliquer l'apparition d'une faune nouvelle sur des îles méditerranéennes, comme les Baléares. « À cette même période, on voit soudainement apparaître des lapins et d'autres rongeurs sur ces îles, ce qui suggère que ces espèces ont pu profiter de cette phase de bas niveau marin pour coloniser de nouveaux milieux, indique Giovanni Aloisi. Quant à l'impact sur le climat, il semble que la perte de cette énorme masse d'eau ait influencé au moins légèrement la circulation atmosphérique globale et le régime des pluies sur les Alpes. »

Le géologue précise d'ailleurs que, si le climat était légèrement plus chaud durant le Miocène (période géologique s'étendant d'il y a 23 à 5 millions d'années) qu'il ne l'est actuellement, ce n'est pas tant la température, mais le régime hydrologique du bassin qui a principalement contribué à son assèchement, notamment le fait qu'il ait été déconnecté de l'Atlantique. À moins que la tectonique des plaques n'entraîne une nouvelle fermeture du détroit de Gibraltar, il n'y a donc pas lieu de s'inquiéter qu'un tel épisode se reproduise, même dans le contexte actuel du réchauffement climatique. II

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

1. « Chlorine isotopes constrain a major drawdown of the Mediterranean Sea during the Messinian Salinity Crisis », G. Aloisi, J. Moneron, L. Guibourdenche et al., *Nature Communications*, 18/11/2024 : doi.org/10.1038/s41467-024-53781-6 2. Unité CNRS/IPGP/Université Paris Cité. 3. [Nature.com/articles/ngeo3032](http://nature.com/articles/ngeo3032)



© VALENTIN MERLIN

Sur la route des gens du voyage

SOCIÉTÉS 

ENQUÊTE L'anthropologue Lise Foisneau partage le quotidien de communautés roms depuis dix ans. Elle a mis en ligne un site sur lequel les « gens du voyage » peuvent retrouver les noms des membres de leur famille internés ou assignés à résidence dans la période 1939-1946.

PAR MARINA JULIENNE

Depuis dix ans qu'elle circule en camping-car ou en caravane, elle n'a jamais quitté la France. Elle ne compte plus, en revanche, les étapes sur les aires d'accueil pour « gens du voyage » et aux dépôts d'archives d'une soixantaine de départements : Hérault, Loiret, Loire-Atlantique, Creuse, Indre-et-Loire, Drôme... Rencontrer l'anthropologue Lise Foisneau¹, c'est découvrir une histoire largement ignorée et un « monde rom » d'une complexité extrême, organisé autour de lieux, de relations, d'échanges qui nous sont parfaitement étrangers et que l'on ne peut appréhender qu'en partageant leur quotidien. Ce terrain de recherche est devenu partie intégrante de l'existence de Lise et de son mari, Valentin Merlin, photographe, embarqué avec elle dès 2015 dans une aventure qui se poursuit aujourd'hui avec leur enfant, âgé de 2 ans.

Mais qui sont-ils, ces Roms de Provence auxquels elle s'intéresse et qui se regroupent au gré de leurs déplacements dans différentes *kumpanji* (compagnies) qu'elle a pu, pour certaines, intégrer ? « *Il m'a fallu plusieurs mois pour comprendre à quel point je devais sortir des catégories rigides au moyen desquelles l'ethnographie s'est appliquée à décrire l'identité de ces collectifs* », raconte Lise Foisneau.

Pour donner une idée de la difficulté à établir des catégories, il faut savoir que, dans ce monde des « gens du voyage » (terme choisi par l'administration), il y a des Roms désignés comme « hongrois », qui se disent « gitans » quand ils parlent à des *gadjé* (tous ceux qui ne sont pas roms) car, selon eux, « *le terme gitan, s'il n'inspire pas la confiance, du moins inspire-t-il le respect* ». D'autres se présentent comme « *tsiganes* » seulement s'ils sont dans une relation

► En 2018, Lise Foisneau (de dos) montre à ses voisines des photos prises quarante ans plus tôt au même endroit, sur l'aire d'accueil de Saint Menet (Marseille).

de proximité. En effet, ce mot, associé aux personnes d'Europe de l'Est et à la pauvreté, suscite la méfiance. « Mais, entre eux, ils parlent le "romanès", se disent Roms (Kalderash, ou Tchuraras, ou Lovaras, selon les cas), et/ou Roms "de Marseille", "de Toulon", ou "de Fréjus" pour ceux qui circulent en Provence », raconte la chercheuse. Par ailleurs, on trouve aussi des « voyageurs HLM », qui n'habitent plus en caravane depuis longtemps...

Surtout, comme Lise Foisneau le démontre, une *kumpania* n'est pas « simplement » un groupe familial réuni par les liens du sang. Sa composition repose sur un ensemble de relations liant entre eux des lieux, des êtres humains, des animaux, des caravanes, pendant une durée indéterminée. « C'est d'ailleurs ce qui explique que nous avons pu, avec Valentin, vivre dans différentes compagnies, n'ayant nous-mêmes aucun lien familial avec des Roms », explique Lise Foisneau.

S'inviter sur une aire d'accueil

Pourquoi alors cet intérêt pour ce sujet ? « À la fin de mon adolescence, je me suis liée avec deux jeunes filles roms roumaines qui venaient d'arriver en France, se souvient-elle. Notre amitié m'a donné envie, lorsque je me suis trouvée en master d'histoire, d'étudier un collectif de Roms hongrois venus en France pendant la "grande migration des chaudronniers", en 1860. Et j'ai suivi ce groupe familial "Delore" jusqu'à la fin de la guerre, en 1946. »

Lise Foisneau s'interroge ensuite sur ce que leurs descendants sont devenus et quitte l'histoire pour un doctorat en anthropologie, « car le prisme des archives policières, administratives ou folkloriques ne délivre qu'une

► Lise Foisneau sur son terrain de recherche, les aires d'accueil pour gens du voyage, qu'elle parcourt en caravane ou en camping-car.

“Roms? Gitans? Tsiganes? Tchuraras? Kalderash? Certains sont aussi « voyageurs HLM ».”

minuscule partie de la vie des gens et biaise le regard ; il me paraissait fondamental de rencontrer les familles dont j'avais décrit les parcours ».

Mais comment s'inviter sur des aires réservées aux gens du voyage ? Pas question pour Lise de passer par des intermédiaires – associations ou services sociaux. Son compagnon, Valentin, alors étudiant en sociologie, peut prouver en préfecture qu'il n'a pas de domicile fixe depuis au moins six mois, ce qui leur permet de devenir officiellement « gens du voyage ».

Lise et Valentin achètent alors leur première caravane – « une *Tabbert double essieu* » – et, munis du « livret de circulation » (obligatoire jusqu'en 2017), ils s'installent *incognito* sur une aire de Marseille. « Les gestionnaires de l'aire d'accueil n'auraient pas apprécié la présence d'observateurs. En revanche, nous avons expliqué à nos voisins que nous étions là pour écrire l'histoire des Roms de Provence. »

Mais, rapidement, ces « étudiants » sont suspectés d'être des infiltrés au service de l'administration. « L'histoire aurait pu s'arrêter là mais, parmi les centaines de photos de carnets anthropométriques collectés pour mon master se trouvait celle du grand-oncle d'un de nos voisins, descendant de la famille Delore que j'avais étudiée. » Ouf !

Et la loi française créa les « nomades »

Depuis 2015, le travail anthropologique que Lise Foisneau¹ réalise auprès des Roms de Provence croise les recherches historiques qu'elle mène en parallèle sur la situation des nomades pendant la Seconde Guerre mondiale. Pour comprendre l'oppression dont ont été victimes ces populations, il faut remonter à la loi du 16 juillet 1912, par laquelle les députés français créent la catégorie administrative des « nomades ». Elle oblige « tout adulte ou enfant présentant le caractère ethnique particulier aux romanichels, bohémiens, tziganes et gitanos », quelle que soit sa nationalité, à faire viser à l'arrivée et au départ de chaque commune un carnet anthropométrique comprenant toute sorte d'informations : photos du visage, mesures de la tête, longueur de l'oreille droite, des doigts médius et auriculaire gauches, etc.

Motif de cette législation : instaurer une « mesure de protection contre les Romanichels », perçus comme « essentiellement dangereux ». Le fichier de quelque 36 000 dossiers de nomades qui est ainsi constitué trouvera son « utilité » dès la Seconde Guerre mondiale.

1. Chargée de recherche au CNRS, à l'Institut d'ethnologie et d'anthropologie sociale (Ideas, unité CNRS/Aix-Marseille Université).



© CYRIL PRESILVON/CNRS IMAGES



► Michel et Anna Lagréné-Ferret découvrent la liste des noms des personnes enfermées au camp de Montreuil-Bellay (Maine-et-Loire), où Michel fut lui-même interné avec sa famille et où il effectua ses premiers pas.

Le 6 avril 1940, avant même l'arrivée du maréchal Pétain au pouvoir, les députés de la III^e République adoptent un décret qui ordonne l'assignation à résidence ou l'internement des nomades. Il ne reste plus à l'administration qu'à l'appliquer, en arrêtant ceux qui sont répertoriés depuis plusieurs décennies, les privant ainsi de tout moyen de subsistance.

« Entre octobre 1940 et septembre 1944, deux systèmes anti-nomades ont coexisté en France, explique Lise Foisneau : celui voulu par l'occupant, qui les déporta ou les enferma dans l'un des 60 camps français prévus à cet effet, comme les camps de Montreuil-Bellay et de Jargeau (Loiret), qui étaient les plus importants ; et celui lié au décret républicain de 1940, en fonction duquel ils pouvaient aussi être assignés

à résidence. Certains ne retrouveront leur liberté qu'en juillet 1946, car ce décret ne sera aboli qu'un an après la fin de la guerre ! » Tortures, famines, déportations, actions de résistance : les Roms ont tout vécu de la guerre. Mais qui s'en souvient ?

Aujourd'hui, Lise Foisneau se bat symboliquement, par articles interposés, pour que les historiens débattent de ce sujet. Ce n'est en effet que dans les années 1980-1990 qu'ont paru en France les premiers articles universitaires sur la place des nomades au cours de

la guerre. « Mais ces études ont été rédigées essentiellement à partir de documents administratifs, sans que les récits des personnes concernées ou de leurs descendants aient été recueillis », signale Lise Foisneau. Comme si leurs paroles n'étaient pas crédibles, à la différence de celles des autres victimes – communistes, juifs, résistants... –, dont les témoignages ont toujours été abondamment sollicités.

Provoquer la discussion

« En soutenant que les mesures anti-tsiganes n'avaient pas pour but "leur destruction" mais "la correction d'un mode de vie", l'administration a finalement privé les victimes françaises de toute réparation matérielle et symbolique, dont les descendants des Roms allemands, par exemple, ont pu bénéficier, ajoute Lise Foisneau. Le décret de 1940 relevait-il d'une politique de "persécution raciale" ? Ne faudrait-il pas qualifier de "génocide" le traitement fait à ces populations, maintenues dans un régime de ségrégation territoriale et administrative, au motif qu'elles auraient un mode de vie différent ? »

En conclusion de son livre *Les Nomades face à la guerre (1939-1946)*, paru en 2022 chez CNRS Éditions, elle s'interroge sur la légalité de la constitution par l'État d'un groupe privé de ses droits fondamentaux. Et assume « un geste politique » appelant au courage d'une investigation exhaustive des racines, processus, décisions et complicités qui ont conduit à la mort d'un grand nombre de personnes arbitrairement regroupées dans la catégorie "nomades" ».

En attendant que s'ouvre cette discussion scientifique, Lise Foisneau transforme sa recherche en action. Pour remédier à l'absence de listes mémorielles des voyageurs persécutés durant la Seconde Guerre mondiale, elle a mis en ligne la base de données « NOMades : Mur des noms des internés et assignés à résidence en tant que "Nomades" en France de 1939 à 1946² ». Ce site a pour mission de nommer les victimes françaises de la

“ Les récits des personnes concernées ou de leurs descendants n'ont quasiment jamais été recueillis. Comme si leurs paroles n'étaient pas crédibles, à la différence de celles des autres victimes. ”

En bref

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

persécution et du génocide des romans et voyageurs – camp par camp pour l'internement, département par département pour l'assignation à résidence.

Ces listes pourront être complétées par des contributions individuelles étayées sur des archives. « *Imaginez, s'anime la chercheuse, vous êtes dans votre caravane, le soir, vous tapez le nom de l'un de vos ancêtres, grand-père ou grande-tante, et vous pouvez retrouver l'endroit où il a été détenu. C'est important, non ?* »

Tandis que Lise Foisneau se demande comment les Roms vont utiliser ce site, son mari ramasse les Duplo avec lesquels leur fils vient de construire un camping-car. Demain, ils regagnent l'appartement où ils séjournent plusieurs mois par an – le temps de l'écriture, pour Lise, celui de l'édition des photos, pour Valentin. Sur ses clichés, pas d'enfants pieds nus ni de moustachus à la guitare auxquels toute une imagerie d'Épinal sur les « gitans » nous a habitués. Mais du béton et des barbelés.

« *Je constitue une archive de l'"encampement" des gens du voyage, explique Valentin Merlin. En 2024, les descendants ayant résisté à la sédentarisation forcée ne peuvent toujours pas choisir librement leur lieu de vie, et demeurent enfermés dans un réseau d'aires d'accueil d'une qualité environnementale souvent désastreuse.* » II

▲ Capture d'écran de [Murdennomades.mmsh.fr](https://murdennomades.mmsh.fr)
Chaque point bleu correspond à l'un des 60 camps où des nomades furent internés.



© LISE FOISNEAU/MURDENOMADES.MMSH.FR

2. <https://murdennomades.mmsh.fr/>

CONVENTION DES RESPONSABLES D'UNITÉ

Le CNRS a rassemblé des centaines de directeurs et directrices de laboratoire lors d'une convention, à Paris, le 12 décembre 2024. La feuille de route stratégique de l'organisme, ses priorités européennes ainsi que les défis scientifiques à venir leur ont été présentés – sans oublier, entre autres, des annonces sur la simplification administrative et les conditions de travail.

INAUGURATION DU RÉSEAU ALUMNI

Lancé le 16 janvier, CNRS Alumni (<https://alumni.cnrs.fr/fr>) réunit toutes celles et ceux qui y ont travaillé – qu'ils soient en mobilité ou engagés dans de nouvelles carrières. Conçu pour encourager les échanges, l'entraide et le rayonnement, ce réseau mondial comptait déjà 5 000 membres un mois après sa création. Il s'appuie sur une plateforme proposant actualités, événements et groupes thématiques. Guillaume Stahl, ancien directeur de La Turbine Sciences (Annecy), en est le délégué général.

JOURNÉES OCÉAN ET MER

Le CNRS a accueilli les « Journées Océan et Mer » en son siège, à Paris, les 3 et 4 février. Un rendez-vous organisé par le Groupement de recherche (GDR) Omer pour mettre en lumière la recherche interdisciplinaire sur les océans, les jeunes carrières scientifiques et les collaborations internationales, avec un focus sur l'interface science/politique et les enjeux globaux.

MISSION POUR L'EXPERTISE SCIENTIFIQUE

Trois ans après sa création, la Mission pour l'expertise scientifique (MPES) du CNRS s'apprête à restituer trois expertises collectives institutionnelles en 2025 : les plastiques dans l'agriculture et l'alimentation, les éoliennes en mer, ainsi que les terres rares, essentielles à la transition énergétique.

POUR UN PROGRAMME EUROPÉEN DE RECHERCHE AMBITIEUX

Les six grands organismes de recherche européens du G6 appellent à un programme-cadre FP10 renforcé. Dans une déclaration commune, ils soulignent la nécessité d'un fonds européen dédié à la recherche fondamentale, de simplifications administratives et d'investissements stratégiques, notamment en intelligence artificielle.

Des réseaux intelligents pour les énergies renouvelables

SOCIÉTÉS



NUMÉRIQUE



La forte croissance de la production d'énergies renouvelables oblige à réorganiser le système électrique. Des réseaux intelligents s'adaptent à une production à la fois décentralisée et variable, et en optimisent la distribution.

PAR MATTHIEU STRICOT

« *La gestion des réseaux électriques, aujourd'hui répartie entre les gestionnaires du Réseau de transport d'électricité (RTE) et ceux des réseaux de distribution, mobilise d'ores et déjà des centaines de milliers de producteurs d'électricité, qui seront vraisemblablement des millions dans quelques années. Comment continuer à gérer un système de plus en plus complexe tout en assurant sa résilience et son accessibilité économique ?* », s'interroge Gille Debizet, aménagiste et prospectiviste des flux au Laboratoire de sciences sociales PACTE¹.

Le fonctionnement d'un système électrique repose sur une contrainte physique centrale : à chaque instant, la puissance consommée sur le réseau doit être égale à la puissance produite, aux pertes près. En France, la production électrique dépend pour l'essentiel d'infrastructures fournissant de l'électricité en continu : les centrales nucléaires assurent les trois quarts de la production électrique nationale, les barrages hydroélectriques, 11 %, et les centrales thermiques à flamme (combustion de fioul,

gaz et charbon), 8 %. S'y ajoutent depuis plusieurs décennies les sources d'énergie renouvelables – éolien (6 %) et solaire (2 %) en tête –, en plein essor. Mais la puissance de sortie de ces énergies varie selon la vitesse du vent ou le taux d'ensoleillement, difficilement prévisibles.

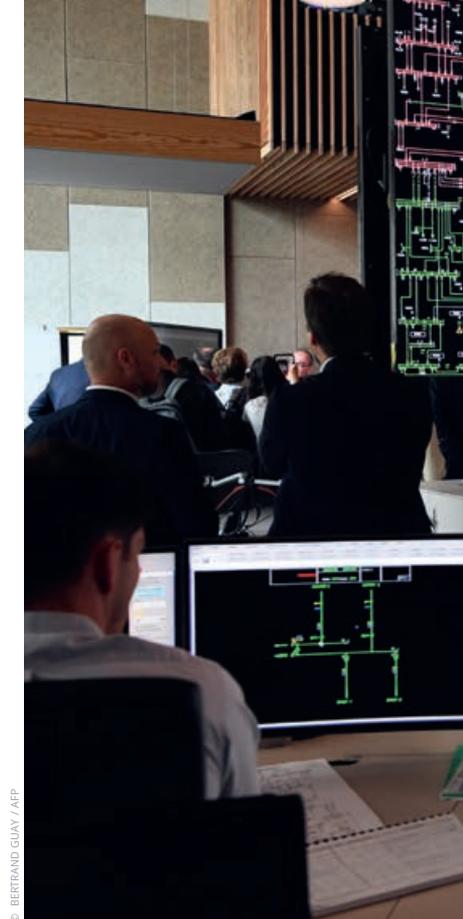
Or le gestionnaire de réseau doit maintenir à chaque instant l'équilibre entre production et consommation – en pilotant la quantité d'électricité produite par des centrales classiques, en vendant ou achetant l'électricité en surplus ou manquante sur le marché européen, voire par anticipation des moments critiques, en invitant les consommateurs à la modération.

Des réseaux et des stocks

Pour pallier le déséquilibre entre production et consommation, le stockage semble une solution privilégiée. Problème, l'électricité se stocke assez mal à long terme et en grande quantité. Car le stockage doit transformer l'électricité en une autre énergie.

C'est le cas des centrales hydroélectriques qui, grâce au pompage-turbinage, peuvent convertir l'énergie électrique à la demande grâce à l'énergie potentielle de pesanteur². Mais on ne peut pas déployer partout des barrages hydroélectriques, aux fortes contraintes géographiques et environnementales.

Alors, qu'en est-il des batteries électrochimiques, telles celles des véhicules électriques ? Si cette technologie est relativement viable pour du stockage individuel, l'investissement nécessaire à leur production et à leur entretien



© BERTRAND GUAY / AFP

1. Unité CNRS/Université Grenoble Alpes. 2. L'eau dans le réservoir se trouve à une hauteur plus élevée que celle de la rivière, en aval. L'eau du réservoir possède donc une énergie potentielle gravitationnelle. L'eau qui s'écoule à travers le barrage est convertie en énergie cinétique.



► Salle de contrôle du réseau électrique RTE, à Montigny-le-Bretonneux, en 2022.

ne permet pas un modèle économique tenable pour du stockage en masse sur du long terme. Sans oublier l'impact environnemental et géopolitique de l'extraction de lithium, un composant essentiel de cette technologie.

À défaut de stocker aisément l'électricité, on peut en flexibiliser la consommation, notamment grâce à des réseaux intelligents (*smart grids*) gérés de façon décentralisée. Nouredine Hadjsaïd, professeur à Grenoble INP et directeur du Laboratoire de génie électrique de Grenoble³, souligne : « Ces réseaux intelligents, à la croisée des réseaux physiques et des technologies de l'information et de la communication, offrent davantage de possibilités de pilotage et d'observabilité du réseau et ainsi de faire face à une variation rapide des énergies renouvelables. »

Des smart grids aux communautés énergétiques

Nombre d'initiatives locales expérimentent les *smart grids* en plaçant le consommateur au centre du processus de transition énergétique. Le paquet législatif européen « Une énergie propre pour tous les Européens », adopté en 2019, facilite l'initiative de la part des particuliers, des entreprises et des collectivités locales dans la mise en place d'énergies renouvelables.

Dans un quartier, des habitants peuvent par exemple se regrouper pour installer des panneaux solaires sur des écoles. « Ces dernières ne consommant que peu d'énergie pendant les week-ends et les vacances scolaires, l'énergie qu'elles produisent peut, à ce moment-là, être rediffusée dans le quartier, en alimentant, par exemple, une piscine ou une

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

patinoire », relève Pierre Fouilhoux professeur à l'université Sorbonne Paris-Nord, au Laboratoire d'informatique de Paris-Nord⁴.

Le déploiement de circuits courts consiste principalement à établir des circuits financiers de proximité, que l'on qualifie désormais de « communautés énergétiques ». Certains collectifs d'autoconsommation rassemblent ainsi des milliers de membres. Leur nombre double chaque année depuis cinq ans.

« Ces collectifs hétérogènes rassemblent des producteurs, des "prosommateurs"⁵ et des consommateurs échangeant de l'électricité via le réseau public, résume Gilles Debizet. À l'initiative de ce type d'opérations, on retrouve aussi bien des municipalités et des bailleurs sociaux que des développeurs privés d'énergie renouvelable. »

Des sociétés coopératives citoyennes peuvent aussi porter ces opérations d'autoconsommation collective.

« Ces sociétés investissent dans des équipements de production et vendent le plus souvent l'électricité injectée au tarif garanti, explique l'aménagiste. Ancrées dans leur territoire, elles travaillent en intelligence avec les institutions territoriales. Elles rassemblent des personnes physiques et morales qui font le choix, par délibération collective, d'investir dans les énergies renouvelables et de réinvestir généralement les gains financiers au niveau local. »

Le risque ? Que l'autoconsommation individuelle exacerbe l'individualisme sociale au détriment de la solidarité collective, observe Gilles Debizet : « Si des millions d'entités autoconsommant individuellement leur production, elles réduisent d'autant leur contribution au financement du réseau public. Qui plus est, leur relative résilience pourrait les conduire à refuser les efforts de solidarité aujourd'hui assurés par le réseau public. Le financement du réseau pèserait davantage sur les consommateurs les moins autonomes, entraînant par là une fracture entre les ménages propriétaires investissant dans l'autoproduction et ceux qui ne le peuvent pas, faute de revenus suffisants ou du fait de difficultés techniques de mise en œuvre – dans l'habitat collectif, par exemple. »

Si la dispersion de la production et les *smart grids* sont d'indéniables problématiques techniques, ils n'en restent pas moins des questions politiques. II

3. Unité CNRS/Université Grenoble Alpes. 4. Unité CNRS/Université Sorbonne Paris-Nord. 5. Personne qui participe à la production de l'objet qu'elle va consommer et qui devient par là même un acteur responsable du monde qu'elle façonne.

Arthur, premier robot archéologue en eaux profondes

© FRÉDÉRIC OSADA, DRASSM



TERRE

ARCHÉOLOGIE Voici un robot aux performances et à la polyvalence inédites en archéologie sous-marine. Il dévoile les trésors des épaves comme les mystères de la vie jusqu'à 2 500 mètres de profondeur. Vincent Creuze, roboticien, vous présente *Arthur*, le nouveau roi des abysses.

PROPOS RECUEILLIS PAR MATTHIEU STRICOT

Les robots produits jusqu'alors ne pouvaient pas descendre à plus de 500 mètres de profondeur. *Arthur*, mis à l'eau en 2022 et conçu en collaboration avec le Drassm¹, est capable d'atteindre 2 500 mètres. Quelles sont ses particularités ?

Vincent Creuze² Autonome, il peut embarquer conjointement toutes les technologies développées sur nos robots précédents. Il possède un système d'éclairage puissant et prend des photos et vidéos en très haute définition. Les caméras, qui enregistrent et restituent les images en direct au pilote, sont installées dans une sphère en verre de gros diamètre. Les images nous permettent, par la suite, de réaliser des modélisations en 3D.

Passé cette première étape, *Arthur* utilise l'aspirateur pour dégager le sédiment, avant d'utiliser ses griffes pour récupérer les objets et les déposer dans une caisse de prélèvement. Les algorithmes de pilotage lui permettent d'être suffisamment stable et précis pour recueillir les objets délicatement. Nous avons ainsi réussi à prélever, sans aucune casse, un bijou de la taille d'un grain de café et d'autres, plus gros, tels qu'un bassin romain en bronze pesant 5 kg. Une fois le travail terminé, le robot remonte tous les objets prélevés.

À bord du bateau, le système de pilotage permet aux archéologues de diriger eux-mêmes les robots sans l'assistance d'un pilote professionnel,

ce qui offre des temps de réaction plus rapides. Qui plus est, la salle de contrôle peut recevoir simultanément les équipes de quatre robots.

De quelle façon avez-vous pallié les contraintes inhérentes aux grandes profondeurs ?

V. C. Il y a bien sûr des problématiques liées à la pression – jusqu'à 250 kg/cm². Nous avons donc conçu des systèmes remplis d'huile pour les moteurs, les systèmes de prélèvement et les actionneurs, afin de compenser la pression extérieure. Mais le robot serait incapable de tracter seul son câble ombilical jusqu'à ces profondeurs. C'est pourquoi nous avons conçu un garage de 700 kg, sous la forme d'une grande cage suspendue sous le bateau par un câble d'acier de 2,6 km, qui fournit l'alimentation électrique et transmet les données par fibre optique.

Quand le garage est proche du fond, un treuil interne déroule un câble souple de 50 mètres relié au robot, qui peut ainsi évoluer aisément. La cage contient également des caissons électroniques destinés à convertir les données. Une fois la mission terminée, le robot revient

1. Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines. 2. Professeur des universités et responsable de l'équipe Robotique sous-marine au Laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier (Lirmm, unité CNRS/université de Montpellier).

► Le véhicule sous-marin téléopéré *Arthur* sur l'épave de la *Lune*, à Toulon (Var), en 2022.

au garage, remonté ensuite par le treuil du navire. À 2 500 mètres, plus de quarante minutes sont nécessaires pour remonter le robot. En Méditerranée, le temps se dégrade très vite. Nous devons donc anticiper la météo, afin de remonter la cage sur le pont en sécurité.

Arthur a été imaginé pour être facilement réparable. Cela s'est révélé être un atout majeur lors de sa première plongée, dans le canal de Sicile, en 2022. Quels sont vos souvenirs de cette mission ?

V. C. Pendant une semaine, nous étions à une vingtaine d'heures du port le plus proche. Un jour, *Arthur* a subi une panne. Mais, ayant à notre disposition tous les éléments et les compétences pour y remédier, nous avons pu le réparer dans la nuit.

Cette mission internationale, réalisée sous l'égide de l'Unesco, avec des scientifiques de sept pays, est probablement la plus belle à laquelle j'ai participé. Des épaves antiques reposaient à 900 mètres de profondeur. L'une d'elles contenait des colonnes destinées à la construction d'un temple. C'était spectaculaire.

De plus, il n'y avait aucune pollution lumineuse. La nuit, nous pouvions admirer des myriades d'étoiles et des étoiles filantes. Le soir, des dauphins et des baleines nageaient autour du bateau. Ce fut une expérience merveilleuse.

En quoi les qualités d'Arthur nous permettent-elles d'en savoir plus sur le monde des profondeurs ?

V. C. Sur les images prises par le robot, on peut observer des animaux et des végétaux. J'ai en mémoire l'épave du *Francesco-Crispi*, un bateau de croisière italien coulé pendant la Seconde Guerre mondiale, reposant par 500 mètres de fond. Il était recouvert de massifs de corail blanc exceptionnels. La photogrammétrie [une technique consistant à effectuer des mesures d'une scène à l'aide de photos afin d'en réaliser un modèle 3D, Ndlr] du navire a permis aux biologistes

de récupérer les données pour réaliser un modèle 3D de ce corail, afin d'étudier son rythme de croissance, notamment.

Avoir des biologistes à bord permet également de nous éclairer sur ce qu'on peut prélever ou non. En effet, des objets archéologiques peuvent abriter des organismes biologiques rares. Dans d'autres cas, nous remontons à bord des objets couverts de concrétions qui peuvent contenir des micro-crustacés ou des petits bouts d'éponges. Les biologistes peuvent alors faire des prélèvements d'ADN.

Comment l'étude des épaves et des abysses peut-elle nous apporter des informations sur la fragilité de ces écosystèmes ?

V. C. Les épaves sont des concentrateurs de vie. Elles font office de nid pour de nombreuses espèces. Par ailleurs, elles créent des écosystèmes particuliers, avec des paramètres spécifiques de courantologie [science qui étudie les mouvements internes des masses d'eau, des courants marins, Ndlr] ou de chimie, avec la dissolution des éléments métalliques de la coque, par exemple. Dans les fonds marins, on observe aussi, malheureusement, les effets de la pêche en profondeur. Les chaluts sont parfois utilisés à plus de 1 000 mètres. Les panneaux métalliques qui les encadrent peuvent détruire une épave en la traversant. Parfois, le filet peut complètement enrober l'épave et rester sur place, continuant de capturer inutilement des poissons pendant des décennies et empêchant tout accès aux robots.

Cartographier les épaves permet à l'État de protéger les plus remarquables, en mettant en place des zones d'exclusion. Lors des plongées des robots, les biologistes peuvent également mesurer la température en eaux profondes et la quantité d'oxygène dissous, contribuant ainsi à l'étude de l'impact du changement climatique sur les écosystèmes. ||



Lire l'intégralité de l'entretien sur lejournale.cnr.fr

En bref

CHICAGO À PARIS

Avec l'ouverture de son campus à Paris, en décembre dernier, l'université de Chicago consolide son partenariat avec le CNRS.

Au cœur de cette collaboration, Discovery, le centre de recherche international (IRC) dédié à relever les défis majeurs de demain – dont le climat, la santé, la transition énergétique et les technologies de pointe.

FRANCE DEEPTech A 1 AN

French Deeptech, qui réunit 300 acteurs du secteur et dont le CNRS est membre fondateur, a fêté son premier anniversaire. À cette occasion, l'association a délivré ses conclusions sur les grands enjeux de l'écosystème deeptech, pour en faire émerger et croître de véritables champions.

ERASMO, LA VOITURE AUTONOME EUROPÉENNE

Le projet ErasmO, porté par un consortium réunissant le CNRS et des industriels tels que Renault, repousse les limites de la voiture autonome, en s'appuyant sur le système de positionnement européen Galileo. Grâce à des avancées technologiques majeures, le programme européen vise à améliorer la sécurité routière, tout en ouvrant la voie à une conduite autonome adaptée aux environnements urbains complexes.

UN PARTENARIAT SUR L'AVION DU FUTUR

L'Institut de recherche de chimie Paris (IRCP, CNRS/Chimie ParisTech-PSL) et Safran Tech ont lancé Camelia, un laboratoire commun dédié aux alliages métalliques innovants pour l'aéronautique. Il combine modélisation numérique et expérimentations pour concevoir des matériaux plus légers et performants, répondant aux enjeux de décarbonation et d'environnements extrêmes. Ce projet prolonge quinze années de collaboration fructueuse entre l'IRCP et Safran Tech.



Ces étoiles qui explosent sans disparaître



© COLL. PERS.

UNIVERS

ASTROPHYSIQUE

Les naines blanches sont des cadavres d'étoiles ultra compacts à l'origine de prodigieuses explosions, les novas. Un phénomène différent des supernovas.

PROPOS RECUEILLIS PAR VAHÉ TER MINASSIAN

Qu'est-ce qu'une « nova » ?

Piercarlo Bonifacio¹ Le terme a été introduit au XVI^e siècle par l'astronome danois Tycho Brahe qui, dans *De nova stella*, a décrit l'apparition puis la disparition d'une étoile dans la constellation de Cassiopée. Le mot a longtemps été employé pour désigner toutes les apparitions temporaires d'astres. Avant que, dans les années 1930, on réalise que deux phénomènes différents se cachent derrière ces événements. D'une part, les « supernovas », des explosions surpuissantes d'étoiles massives en fin de vie ; d'autre part, les « novas », des déflagrations un peu moins brillantes se déclenchant à la surface de certains objets très particuliers, les « naines blanches ».

Que sont ces naines blanches ?

P. B. Une naine blanche est le stade ultime de plus de 90 % des étoiles de la galaxie. Lorsqu'un petit astre comme le Soleil a achevé de brûler son combustible, c'est-à-dire quand il a cessé de convertir son hydrogène en hélium, il éjecte ses couches extérieures, ne conservant que son noyau. Dans son cœur, la matière devient si dense qu'elle finit par se déstructurer et « dégénérer » : elle forme un plasma d'électrons et d'ions dont le comportement cesse d'obéir à la Loi des gaz parfaits, qui relie la pression au volume et à la température. Par une étonnante manifestation macroscopique d'un phénomène de physique quantique faisant intervenir

1. Piercarlo Bonifacio est directeur de recherche au CNRS, au laboratoire Galaxies, étoiles, physique et instrumentation (Gepi, unité CNRS/Observatoire de Paris-PSL).

► **Vue d'artiste d'une naine blanche attirant la matière de son étoile compagnon. Pression et température s'élevaient dans l'enveloppe gazeuse de la naine blanche, jusqu'à l'explosion.**

le Principe d'exclusion de Pauli (qui interdit à ces particules d'occuper les mêmes niveaux d'énergie), les électrons se mettent alors à produire collectivement une « pression de dégénérescence », qui s'oppose à la gravité et permet au corps céleste de maintenir sa cohérence. Cela stoppe l'effondrement.

Au bout du compte, on obtient un objet très compact, d'une masse comparable à celle du Soleil pour un volume proche de celui de la Terre, et dont le cœur, fait d'hélium ou d'oxygène et de carbone « dégénérés », supporte une fine atmosphère d'hélium et d'hydrogène « ordinaires ».

Les novas se forment dans ces enveloppes externes. Comment ?

P. B. Une nova fait intervenir un couple d'astres en rotation l'un autour de l'autre : l'un est une étoile qui continue à brûler son combustible, l'autre, une naine blanche qui attire et capture une partie de l'hydrogène de son compagnon. Cette matière n'arrive pas directement sur l'objet – elle s'emmagasine d'abord autour de lui dans un « disque d'accrétion », puis tombe petit à petit vers sa surface, augmentant progressivement la pression et la température de son enveloppe gazeuse. Lorsque cet échauffement dépasse les 10 millions de degrés à la base de l'atmosphère, des réactions de fusion nucléaire démarrent, aboutissant au déclenchement d'une énorme explosion thermonucléaire.

Au cours de ce processus, le gaz accumulé est soufflé et éjecté à travers l'espace à des vitesses de l'ordre de 1000 km/s, enrichissant le milieu interstellaire de l'équivalent d'une ou plusieurs masses terrestres d'hydrogène. La naine blanche revient ensuite à son état initial.

Comment ces phénomènes sont-ils classés ?

P. B. Traditionnellement, on distingue les novas « classiques » (dont une seule explosion est connue sur des

périodes historiques) des novas « récurrentes » (qui se sont manifestées à plusieurs reprises, par intervalles de quelques dizaines d'années). Les théories modernes suggèrent que l'on a affaire au même processus et qu'en réalité, toutes les novas sont répétitives. C'est-à-dire qu'au bout d'un temps plus ou moins long, le disque d'accrétion entourant les naines blanches se remplit à nouveau d'hydrogène, créant les prémices d'un autre cataclysme.

À ce sujet, il est important de mentionner un autre phénomène susceptible de se produire à l'intérieur de ces couples : la destruction complète de la naine blanche. Sous certaines conditions, l'accumulation de l'hydrogène sur la surface peut ne pas se terminer en nova. L'atmosphère s'alourdit peu à peu, créant une pression supplémentaire sur le cœur

“Les théories modernes suggèrent que toutes les novas sont répétitives.”

de l'astre, dont l'équilibre est rompu lorsque sa masse devient très exactement 1,44 fois supérieure à celle du Soleil. Des réactions de fusion nucléaire surviennent. En se répandant à travers l'astre à des vitesses supersoniques, elles aboutissent en quelques secondes à sa désintégration totale. On obtient alors ce que l'on appelle une « supernova de type 1a ».

Pourquoi les astronomes s'intéressent-ils à ces objets ?

P. B. D'abord, parce que les novas sont de formidables chandelles cosmiques – ces explosions sont si brillantes qu'on peut les détecter jusque



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

dans les autres galaxies et s'en servir comme indicateurs de distance. Ensuite, à cause de la physique étonnante de ces phénomènes, qui dépasse largement les connaissances actuelles. L'explosion d'une nova résulte d'une suite de réactions nucléaires, encore mal comprise, qui porte le gaz à des températures de plus de 100 millions de degrés. Et le choc qu'elle crée produit dans le milieu interstellaire des radiations gamma d'un niveau d'énergie bien supérieur à celui que l'on peut espérer atteindre en laboratoire par cette voie. Enfin, en raison du rôle joué par ces objets dans la nucléosynthèse.

En juin 2024, la Nasa a annoncé l'explosion de la nova récurrente T Coronea Borealis (T CrB) d'ici la fin de la même année. Vous préparez-vous à cet événement ?

P. B. Les novas récurrentes sont intéressantes, car, en suivant leurs évolutions, on peut espérer accéder à des informations sur la façon dont se créent les supernovas de type 1a. Ces dernières jouent un rôle très important dans la nucléosynthèse, car ce sont elles qui fabriquent l'essentiel du fer que l'on trouve dans l'Univers. On connaît une douzaine de novas récurrentes au sein de notre galaxie.

T Coronea Borealis se trouve être la plus proche et l'une des plus brillantes. Elle a été observée en 1946, en 1866 et, peut-être, en 1787, ce qui suggère que sa prochaine manifestation est imminente – c'est-à-dire que ce cataclysme pourrait survenir n'importe quand entre aujourd'hui et 2028. Cependant, plusieurs de mes confrères ont cru que l'on pouvait être plus précis. En vain, car je constate que l'explosion de T CrB n'a pas été annoncée.

Ce qui n'est pas étonnant. Une nova récurrente n'est pas un phénomène périodique. D'un cycle à un autre, il y a des différences. Cela fait trente ans que l'on me parle de la prochaine explosion de cette nova, et je l'attends toujours ! **||**

Le tricot, métamatériau du quotidien

© ULRIKE MAI / PIXABAY



Si la recherche en physique est souvent associée à des infrastructures techniques aussi gigantesques que le LHC, il lui arrive aussi de s'intéresser aux objets du quotidien. « J'ai depuis très longtemps un intérêt marqué pour les matériaux de la vie ordinaire qui présentent des propriétés extraordinaires, explique ainsi Audrey Steinberger, chargée de recherche CNRS au Laboratoire de physique¹. Ma motivation originelle pour l'étude de la physique remonte au collège, quand j'ai appris qu'un solide est normalement plus dense que sa phase liquide, alors que, à l'inverse, la glace flotte sur l'eau. »

Cet intérêt va la conduire jusqu'à la thèse et au-delà. C'est durant son postdoctorat qu'Audrey Steinberger s'intéresse aux propriétés étonnantes d'un matériau a priori peu exotique, le tricot. « Une de mes collègues était mordue de tricot et m'a appris à tricoter, se souvient la scientifique. Le tricot est à la fois léger, résistant et extrêmement déformable. Or ce n'est pas du tout commun de cumuler ces propriétés. J'ai alors commencé à me poser plein de questions sous l'angle de la physique des matériaux. »

Des interrogations qui vont devenir un véritable projet de recherche. « Quand je me compare aux chercheurs en mécanique du textile, je me dis que nous avons des approches

MATIÈRE

PHYSIQUE Léger, doux, résistant, déformable et parfois moche, le tricot n'est pas qu'un objet du quotidien. C'est aussi un métamatériau dont les propriétés extraordinaires intéressent beaucoup les physiciens.

PAR MARTIN KOPPE

très différentes, observe Audrey Steinberger. Alors qu'ils s'intéressent aux détails du matériau, je recherche des modèles minimaux où je ne vois plus le tricot comme un textile, mais comme un métamatériau frictionnel. J'étudie le tricot mais, à travers lui, j'étudie des métamatériaux et des assemblages de fibres désordonnés. »

Des propriétés dictées par la structure

La déformabilité du tricot vient de sa structure, où le fil forme des boucles entrelacées (aussi appelées « mailles »). Lorsqu'une chaussette ou un pull sont déformés, ce sont les boucles qui se déforment, pas le fil en lui-même.

► Le point de jersey vu à l'endroit.

« Ce détail est essentiel, souligne Audrey Steinberger. D'ailleurs, un matériau artificiel dont les propriétés sont dictées par sa structure s'appelle un métamatériau. Ce sont normalement des objets de pointe fabriqués en laboratoire, mais le tricot appartient à la vie quotidienne. »

Dans un article² publié fin 2024 avec Jérôme Crassous, professeur à l'université de Rennes et membre de l'Institut de physique de Rennes³, et Samuel Poincloux, professeur assistant à l'université Aoyama Gakuin (Japon), Audrey Steinberger a présenté une étude menée sur des tricotés en jersey – le mode de fabrication le plus courant et le plus facile à réaliser avec des machines industrielles. Ces travaux s'appuient sur une modélisation numérique des systèmes de fibres en friction réalisée par Jérôme Crassous et sur un système expérimental développé par Audrey Steinberger pour vérifier et confirmer les résultats simulés.

Plusieurs états d'équilibre possibles

Première observation : le tricot (ou la chaussette) possède des formes d'équilibre multiples. Le tricot parvient à épouser la forme du corps et peut ensuite être plié pour être rangé à plat, passant aisément d'une forme à une autre. Toutefois, si on tire trop fort sur une chaussette, elle va garder une partie de cette déformation en mémoire.

Il existe donc plusieurs états d'équilibre possibles, que le tricot peut conserver sans l'influence de forces extérieures. C'est tout le contraire pour un gant en latex qui va toujours revenir à sa conformation initiale. En réalité, la forme générale du tricot dépend de l'historique de ses déformations. Audrey Steinberger et ses collègues ont montré que cette mémoire provient de la friction solide au niveau des points de contact entre les fils.

« Si l'on pose un bloc-notes sur un exemplaire de CNRS Le journal et que l'on penche ce dernier, le calepin va d'abord être retenu par sa friction solide, jusqu'à ce que l'angle soit trop grand et que le bloc se mette à glisser, détaille la chercheuse. On retrouve cette notion dans les avalanches et les milieux granulaires. Nous avons prouvé que l'on rencontre un concept similaire dans le tricot, qui conserve sa forme



© XAVIER LASSABLIÈRE

▼ Audrey Steinberger près du dispositif expérimental : une machine à tricoter (au premier plan) et une machine de traction biaxiale (à gauche).

► À gauche : agencement des fils d'un jersey. À droite : sa géométrie. Les fils y sont modélisés par l'assemblage de segments cylindriques connectés par des ressorts représentant les forces de traction, flexion et torsion.

en l'absence de forces extérieures. Mais, contrairement aux objets élastiques classiques, plusieurs configurations d'équilibre existent pour les tricotés. »

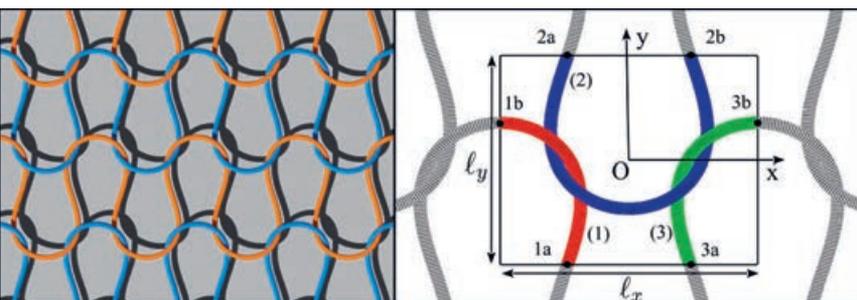
La géométrie du tricot (un réseau de boucles entrelacées) est définie par le rapport entre le diamètre du fil et la longueur de fil prise dans chaque maille. Tous les tricotés présentant le même rapport vont se comporter de la même façon du point de vue physique. La forme du tricot est ainsi déterminée par les dimensions du rectangle dans lequel s'inscrit une maille, mesurées par rapport à la longueur de fil par maille. Chaque forme de rectangle correspond à un point d'équilibre particulier du tricot au repos. En outre, plus la friction augmente, et plus il existe de points d'équilibre possibles différents.

Pourquoi la chaussette est confortable

« Samuel Poincloux voulait savoir s'il existait un état d'équilibre bien défini, et nous avons découvert qu'il y en avait plusieurs, explique Audrey Steinberger. Mais l'un d'eux est remarquable : le point terminal peut servir de référence pour toutes sortes d'expériences mécaniques sur le tricot. Il nous permet de mener des travaux reproductibles et de mieux comparer les résultats. C'est ce qui manquait jusqu'à présent à la recherche sur le tricot. »

Et ces travaux ont fourni aux chercheurs la réponse à une autre question : qu'est-ce qui rend les chaussettes tricotées confortables, serrées au niveau de la cheville, moins ailleurs ? Cette configuration est rendue possible par l'existence de plusieurs points d'équilibre différents, alors que l'ensemble tient par le jeu des frictions.

Ces résultats demeurent trop fondamentaux pour être exploités par l'industrie textile. Mais ils ouvrent un champ de recherche qui pourrait aboutir à l'élaboration de nouveaux matériaux antichocs et antivibrations. II



© JÉRÔME CRASSOUS



© WIRESTOCK, CREATORS/SHUTTERSTOCK.COM

Eaux usées traitées, une source sous-exploitée

MATIÈRE ◀

CHIMIE Changement climatique, pressions démographiques, inquiétudes sur la qualité de l'eau du robinet... Face à ces défis, comment garantir l'approvisionnement en eau et préserver les ressources ? La réutilisation des eaux usées traitées (Reut) figure parmi les solutions.

PAR ANAÏS CULOT

Face à la multiplication des sécheresses estivales et au déficit hydrique croissant, les nappes phréatiques et les cours d'eau montrent des signes d'épuisement. La France se trouve désormais confrontée à un défi majeur : garantir l'accès à l'eau pour tous en préservant ses ressources naturelles. Apparue depuis peu dans le débat public, la réutilisation des eaux usées traitées (Reut) s'avère une piste sérieuse pour pallier le manque d'eau douce. L'idée ? Réinjecter directement dans le circuit des usages de l'eau tout juste traitée.

L'épuration ordinaire confie la dernière phase du retraitement au cycle naturel de l'eau. Au contraire, dans la Reut, les eaux usées subissent un traitement poussé de purification supplémentaire. Elles sont ensuite redistribuées de façon contrôlée pour des usages variés : irrigation agricole, nettoyage de voirie ou encore lutte contre les incendies.

En France, la Reut reste marginale – moins de 1 % du volume des eaux usées traitées. Sa marge de progression est donc particulièrement grande, au regard des 87 % d'eaux usées réutilisées par Israël.

La Reut n'est pourtant pas née de la dernière pluie. Elle apparaît dès le milieu du xx^e siècle, avec de premiers projets autour de l'irrigation agricole en Californie. Des années 1970 à 1990, elle se développe en Israël,

en Australie, puis à Singapour, où elle doit compenser la rareté de l'eau – encore à des fins agricoles ou pour produire indirectement de l'eau potable. En Europe, la pratique devient stratégique dans les années 2000, notamment en Espagne et en Italie.

Une pratique qui ne demande qu'à croître

Son adoption tardive en France s'explique par la disponibilité relative de l'eau potable... jusqu'à récemment. « La sécheresse de 2022 a révélé la vulnérabilité de notre territoire, précise Julie Mendret, spécialiste des procédés pour la Reut à l'Institut européen des membranes¹. La Reut est devenue une priorité du Plan Eau, lancé par le gouvernement

► Les eaux usées traitées servent au nettoyage de la voirie, à l'agriculture, à la lutte anti-incendie...

en 2023, qui ambitionne d'atteindre 10 % de réutilisation d'ici à 2030. » Principale consommatrice d'eau en France, l'irrigation agricole représentait, avec l'arrosage des espaces verts, environ 80 % des usages de la Reut en 2022.

D'avantage de projets ciblant d'autres applications, comme le nettoyage de voirie et l'hydrocurage² des canalisations, prennent désormais de l'ampleur. Parmi ceux-ci, le projet Jourdain. Ce programme global de valorisation circulaire de l'eau, piloté par l'agence publique Vendée eau, vise à récupérer les eaux usées de la station d'épuration des Sables-d'Olonne pour les retraiter dans une station d'affinage. Elles seront ensuite acheminées dans une zone végétalisée, avant de se mélanger aux eaux de rivière et d'alimenter, *in fine*, l'usine de production d'eau potable, où elles seront à nouveau purifiées.

Unique en Europe, ce projet de Reut explore le principe de potabilisation indirecte. Il répond à un problème de disponibilité de l'eau dû à l'affluence touristique et à la pression climatique locales. Le premier prototype en sortie de station d'épuration est prévu pour 2027. La mise en œuvre de cette solution pourrait ensuite apporter un volume additionnel d'environ 2 millions de mètres cubes – soit les besoins en eau de 60 000 personnes³.

Recharger les nappes phréatiques

Dans le Gard, la Reut pourrait recharger artificiellement des nappes phréatiques mises à mal par le changement climatique. C'est le but du projet de recherche fondamentale Aquireuse, financé par la région Occitanie. « Rejeter les eaux usées dans le milieu naturel, c'est envoyer la majorité de ces eaux à la mer, pointe Somar Khaska, hydrogéochimiste à l'université de Nîmes. La Reut permet la mise en place d'une économie circulaire de l'eau qui aide à augmenter la capacité des nappes phréatiques de manière maîtrisée. »

Pour ce faire, son laboratoire a étudié le couplage de trois traitements complémentaires, en vue de filtrer la centaine de molécules (pharmaceutiques, pesticides, etc.) les plus présentes dans les eaux usées. Résultat : plus de 90 % des molécules ciblées dans l'étude ont été extraites des eaux usées. « C'est très prometteur !, affirme Somar Khaska. Par la suite, nous allons aborder l'extraction d'autres polluants. Il y a cependant d'importants enjeux réglementaires, économiques et d'acceptabilité sociale à prendre en compte. »

Car, sans acceptabilité, les projets de Reut ont peu de chances d'aboutir sur le terrain. Les mentalités pourraient néanmoins changer avec une future pénurie d'eau douce. Les recherches menées autour du projet Aquireuse par Karine Weiss, psychologue sociale à l'université de Nîmes, révèlent

“La Reut permet une économie circulaire de l'eau.”

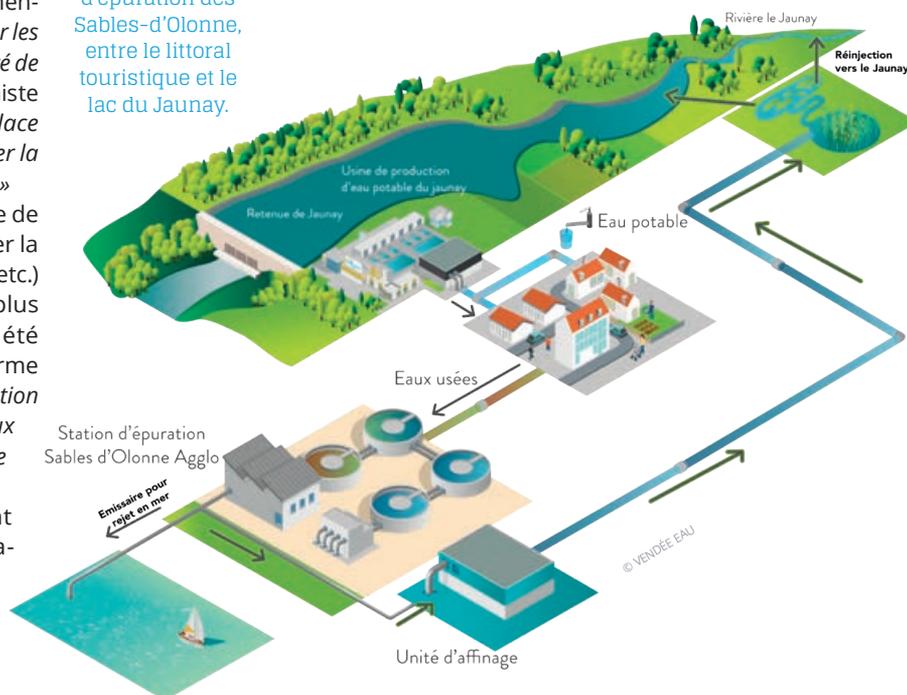
une méconnaissance marquée des citoyens sur la gestion de l'eau et la Reut. Un manque de confiance des populations dans la technologie et un blocage psychologique connu sous le nom de « facteur beurk » freinent l'acceptation sociale de cette pratique.

« Cette étude, souligne Karine Weiss, a révélé le besoin crucial de campagnes informatives claires et de confiance pour que les citoyens puissent se forger une opinion éclairée et s'emparer de la problématique de l'eau en général. »

Si la réutilisation des eaux usées traitées devient une solution flexible et incontournable (mais dont le modèle économique reste à déterminer), elle n'est toutefois pas la panacée. En effet, en zone continentale, la Reut peut entrer en conflit avec d'autres usages (navigation fluviale, refroidissement de centrale nucléaire, barrage hydroélectrique, etc.). Elle doit donc être considérée au cas par cas, selon les besoins locaux. Récupérer cette eau intéresse particulièrement les régions les plus soumises aux restrictions d'eau et aux sécheresses, ainsi que les zones côtières, où elle permet de recycler l'eau douce rejetée par les stations d'épuration, plutôt que de la rejeter directement en mer.

En somme, « face aux défis présents et à venir autour de la disponibilité de l'eau, la meilleure réponse reste la sobriété, conclut Julie Mendret. Nous devons changer nos comportements et réduire nos consommations. » II

► Schéma du prototype en sortie de la station d'épuration des Sables-d'Olonne, entre le littoral touristique et le lac du Jaunay.



1. Unité CNRS/ENSC Montpellier/université de Montpellier. 2. L'hydrocurage consiste à nettoyer en profondeur les canalisations des réseaux – publics ou privés, domestiques comme industriels – grâce à un système de jets sous pression. 3. https://jourdain.vendee-eau.fr/wp-content/uploads/2024-jourdain_ami_opendemo_contexte.pdf

« Préservé le débat démocratique contre la haine et le mensonge »

Qu'est-ce que le blasphème ?

Thomas Hochmann¹ Le mot est souvent utilisé pour désigner un discours hostile ou irrespectueux envers un dogme, une personne ou un objet vénéré par les fidèles d'une religion. L'interdiction du blasphème a des racines très anciennes.

Dans la Grèce antique, le manque de respect envers les dieux pouvait conduire à la mort. C'était un des reproches adressés à Socrate lors de son procès. Dans la Bible (livre du Lévitique), il est dit que « celui qui blasphémera le nom de l'Éternel sera puni de mort : toute l'assemblée le lapidera ».

En Europe, le blasphème est puni de la peine de mort jusqu'à la fin du XVIII^e siècle. En France, certains cas ont marqué les esprits, comme celui du jeune chevalier de La Barre, décapité en 1766 pour avoir tailladé un crucifix et ne pas s'être découvert devant une procession religieuse.

Quand le délit de blasphème est-il supprimé ?

T. H. L'article 10 de la Déclaration des droits de l'homme et du citoyen de 1789 affirme que « nul ne doit être inquiété pour ses opinions, même religieuses ». Le Code pénal de 1791 ne contient aucune infraction de blasphème. Sous la Restauration, en 1819, le législateur fait un pas en arrière et introduit un délit d'outrage à la morale publique et religieuse. L'adoption de la loi sur la presse du 29 juillet 1881 supprime cette disposition.



© ARNAUD LE PILLOUER

SOCIÉTÉS

ENTRETIEN Est-il bien vrai qu'« on ne peut plus rien dire » ? Il est difficile de défendre une régulation de la liberté d'expression qui ne soit pas assimilée à de la censure, et encore plus dans les médias, souligne Thomas Hochmann, chercheur au Centre de théorie et d'analyse du droit.

PROPOS RECUEILLIS PAR MARINA JULIENNE



À lire :

« On ne peut plus rien dire... » - Liberté d'expression : le grand détournement, de Thomas Hochmann, éditions Anamosa, 2025, 72 pages.

Quelle est la situation dans les autres pays ?

T. H. La Cour européenne des droits de l'homme n'exige pas de réprimer l'atteinte aux convictions religieuses, mais accepte qu'un État fasse ce choix. Cependant, les États européens qui connaissent encore une loi contre le blasphème ne l'appliquent presque jamais, même si les rares procès sont grand bruit. Une tendance très marquée à l'abrogation de ces lois est perceptible en Europe. En revanche, le blasphème est puni dans la plupart des pays musulmans (Algérie, Égypte, Iran, etc.), mais aussi en Inde ou en Birmanie.

Le clivage entre les sociétés qui tolèrent le blasphème et celles qui le répriment durement s'est exprimé aux Nations unies tout au long des années 2000, le Pakistan, notamment, poussant à l'adoption de résolutions condamnant « la diffamation des religions ». Mais cette formulation fut abandonnée au profit d'un texte

adopté en 2011 qui condamne « l'incitation à la haine contre des personnes en raison de leur religion ».

La distinction entre blasphème et discours de haine est devenue une question centrale ?

T. H. Oui, on l'a bien vu lors du procès intenté en 2007 par des associations musulmanes contre *Charlie Hebdo* pour la publication de caricatures. Ces dessins enfreignaient peut-être le dogme de l'islam, mais ils n'étaient pas dirigés contre les musulmans. Un point crucial portait sur la couverture. Un dessin de Cabu représentait Mahomet qui se cachait le visage, pleurait et se lamentait : « C'est dur d'être aimé par des cons... ». Cabu avait pris soin d'inscrire un titre qui empiétait sur le dessin et ne pouvait donc en être séparé : « Mahomet débordé par les intégristes ».

Le tribunal souligna que le terme injurieux ne visait dès lors que les intégristes, lesquels « ne peuvent se confondre avec l'ensemble des musulmans (...) ». Le droit français permet, en revanche, de réprimer l'injure,

1. Chercheur au Centre de théorie et d'analyse du droit (CTAD, unité CNRS/université Paris-Nanterre). Il est aussi cotitulaire de la chaire de recherche France-Québec sur les enjeux contemporains de la liberté d'expression (Colibex, unité CNRS/FRQ).



© STÉPHANE MAHÉ/REUTERS

la diffamation et la provocation à la discrimination, à la haine ou à la violence quand elles sont dirigées contre une personne ou un groupe de personnes à raison de leur religion. Il est crucial de bien distinguer entre, d'un côté, l'irrespect d'un dogme ou la critique des intégristes et, de l'autre, l'attaque dirigée contre les musulmans en raison de leur religion.

Qu'en est-il aux États-Unis ?

T. H. L'idée principale y est que l'État ne peut pas intervenir pour réprimer des opinions ou punir des propos parce qu'ils blesseraient des individus. Ainsi, les propos qui offensent les croyants ne peuvent pas être punis, mais les discours de haine non plus. Des néonazis ont été autorisés à défiler en uniforme dans une ville peuplée majoritairement de juifs...

Une formule de la Cour européenne des droits de l'homme est souvent citée : la liberté d'expression protège les propos qui « *heurtent, choquent ou inquiètent* ». Mais cette description correspond mieux au droit des États-Unis ! Les cas où il est permis de restreindre l'expression y sont très étroitement délimités – par exemple, lorsque les propos font

naître un danger manifeste et imminent de violation de la loi. Il faut néanmoins souligner que ce régime, rattaché au premier amendement à la Constitution, ne s'adresse qu'aux pouvoirs publics. Les personnes

“En France, les médias audiovisuels ont interdiction de diffuser des incitations à la haine ou à la violence.”

privées (les individus, les sociétés...), elles, ont parfaitement le droit de restreindre l'expression d'autrui. C'est ainsi que Twitter a pu supprimer le compte de Donald Trump après l'attaque du Capitole, en janvier 2021.

La possibilité d'encadrer davantage les pouvoirs des réseaux sociaux est très discutée aujourd'hui aux

► À Paris, le 11 janvier 2015, lors de la marche en hommage aux victimes des attentats, des manifestants se hissent sur le Monument à la République.

États-Unis, comme ailleurs dans le monde. En Europe, le Digital Services Act (règlement sur les services numériques) a été adopté en 2022. Il vise à mieux encadrer l'activité de ces plateformes et, notamment, à les pousser à supprimer les contenus illégaux sans restreindre excessivement la liberté d'expression.

En France, la liberté d'expression est encadrée également sur les chaînes de télévision.

T. H. Les médias audiovisuels sont soumis à des obligations, prévues notamment dans la loi du 30 septembre 1986 relative à la liberté de communication ainsi que dans les conventions que les chaînes privées doivent signer pour obtenir l'autorisation d'émettre. Il leur est interdit de diffuser des incitations à la haine ou à la violence. Elles doivent promouvoir les valeurs d'intégration et de solidarité, assurer l'honnêteté et l'indépendance de l'information, et respecter le pluralisme de l'expression des courants de pensée et d'opinion.

Le respect de ces obligations est contrôlé par une autorité indépendante – autrefois le CSA, aujourd'hui l'Arcom. Ce système est actuellement mis à l'épreuve par l'apparition de chaînes qui ne font entendre qu'un « courant d'opinion » particulier et ne reculent pas toujours devant la provocation à la haine ou la manipulation des faits. Les chaînes C8 et CNews ont fait l'objet de très nombreuses réprimandes et sanctions par l'Arcom, sans que cela paraisse infléchir leur comportement. Les simples avertissements et les amendes, d'un montant dérisoire au vu de la capacité financière des sociétés concernées, ne semblent pas efficaces.

L'Arcom est récemment passé à la vitesse supérieure, en annonçant ne pas renouveler en 2025 l'autorisation d'émettre de C8 et en prononçant une sanction de 3,5 millions d'euros, en raison d'une séquence où l'animateur vedette de la chaîne avait insulté copieusement un député pendant près de dix minutes.

Pourquoi avoir écarté la candidature de C8, mais retenu celle de CNews ?

T. H. Effectivement, CNews n'est pas plus respectueuse de ses obligations que C8. Pour ne prendre que quelques exemples récents, l'Arcom a sanctionné cette chaîne pour des propos tenus à l'antenne par des intervenants

▲ **Manifestation à Washington, le 18 mars 2024, devant la Cour suprême fédérale. Les juges devaient statuer sur la possibilité pour les autorités de restreindre ce qu'elles considèrent comme de la désinformation, notamment sur les réseaux sociaux.**

“La liberté d'expression n'est pas un vague principe absolu, mais un ensemble de règles.”

qui s'interrogeaient sur le lien entre l'immigration et la prolifération des punaises de lit, qui affirmaient que le ghetto de Varsovie « *était un lieu fait pour préserver du typhus* », ou encore qui qualifiaient les migrants mineurs isolés de « *voleurs* », d'« *assassins* » et de « *violeurs* ». Juridiquement, le non-renouvellement ou le retrait de l'autorisation d'émettre paraissent parfaitement défendables

Néanmoins, il ne s'agit pas de décisions faciles à prendre pour l'Arcom. Nul n'a envie de passer pour un « censeur ». Ceux qui défendent CNews invoquent de manière très efficace la « liberté d'expression » contre tout effort de régulation. En réalité, la liberté d'expression n'est pas une liberté de propager la haine ou le mensonge, mais la rhétorique du « on ne peut plus rien dire » s'efforce de le faire oublier.

Les réactions indignées contre un timide arrêt du Conseil d'État de 2024 sur le pluralisme des courants

d'opinion sont très révélatrices. Le juge ne faisait que rappeler la loi, mais on a parlé sur certains médias de dictature, de guillotine, et même de l'affaire Dreyfus ! Cela est très intimidant.

Vous portez avec des collègues québécois une chaire de recherche sur les enjeux contemporains de la liberté d'expression (Colibex).

T. H. Le projet Colibex a été lancé par le CNRS et les Fonds de recherche du Québec (FRQ) pour développer et faciliter les réflexions sur les défis similaires qui se posent à la liberté d'expression dans les contextes à la fois proches et très différents de ces deux espaces francophones. Il vise à développer la recherche et la formation sur la liberté d'expression, dans une dimension collaborative, interdisciplinaire et internationale.

Nous menons des recherches collectives et nous efforçons de fédérer les travaux sur la liberté d'expression en organisant des séminaires, des colloques ou des actions ouvertes sur la société. La chaire s'organise en quatre axes, confiés chacun à un ou une Québécoise et un ou une Française. Elle accueille également des docteurs et des postdoctorants.

Vous avez sous-titré votre dernier livre *Liberté d'expression : le grand détournement*. Pourquoi ?

T. H. En France et ailleurs, la liberté d'expression est souvent invoquée pour diffuser des discours de haine ou des campagnes de désinformation. Les efforts de régulation tendent à être neutralisés par la prétention qu'« on ne peut plus rien dire ».

Cependant, la liberté d'expression n'est pas un vague principe absolu, mais un ensemble de règles qui permettent précisément de préserver le débat démocratique contre la haine et le mensonge. Le livre cherche à donner une description plus claire du droit applicable, pour combattre la présentation caricaturale de la liberté d'expression. ||





LES IDÉES

*La beauté est parfois cachée,
mais parfois elle dissimule
ce que nous ne savons
– ou ne voulons – pas voir.*

Les parcs africains, ou l'histoire d'un colonialisme vert

Vous avez longuement enquêté sur les politiques de protection de la nature en Afrique depuis la fin du XIX^e siècle, vous appuyant sur plus de 130 000 pages de documents d'archives européennes et africaines. Comment, dans l'esprit des experts occidentaux, a germé cette idée que le continent africain constituait le dernier éden sauvage, qu'il s'agissait de préserver à tout prix ?

Guillaume Blanc¹ Pour comprendre ce mythe, il faut se mettre à la place des botanistes et des forestiers qui partent dans les colonies à la fin du XIX^e siècle, et laissent derrière eux une Europe radicalement transformée par l'industrialisation et l'urbanisation. En arrivant en Afrique, ils sont persuadés d'y retrouver la nature qu'ils ont perdue chez eux.

Cette vision est soutenue par un ensemble d'œuvres relayées par la grande presse. Winston Churchill, en 1907, publie *Mon voyage en Afrique*, dans lequel il décrit le continent africain comme un « vaste jardin naturel » malheureusement peuplé d'« êtres malhabiles ». Dans les années 1930, Ernest Hemingway évoque, dans *Les Neiges du Kilimandjaro*, un continent où les *big five* – ces mammifères emblématiques de l'Afrique que sont le lion, le léopard, l'éléphant, le rhinocéros noir et le buffle – régneraient en maîtres. Depuis, le mythe de cette Afrique édenique a perduré à travers les reportages du *National Geographic* et de la BBC ou, plus récemment, avec la sortie du célèbre film d'animation *Le Roi Lion*.



© HORS-SÉRIE.NET

SOCIÉTÉS

ENTRETIEN Derrière le mythe d'une Afrique sauvage et fascinante se cache une histoire méconnue, celle de la mise sous cloche de la nature au mépris des populations, orchestrée par des experts occidentaux. L'historien Guillaume Blanc raconte.

PROPOS RECUEILLIS PAR GRÉGORY FLÉCHET

Qui furent les principaux acteurs des politiques de protection de la nature en Afrique ?

G. B. La création des réserves de chasse en Afrique à la fin du XIX^e siècle par les colonisateurs européens vise surtout à protéger le commerce des troupeaux d'éléphants, déjà largement décimés par la chasse.

À partir des années 1940, ces réserves deviennent des espaces dédiés presque exclusivement à la contemplation de la faune sauvage – une évolution qui témoigne d'une prise de conscience de l'opinion publique, qui considère comme immoral le massacre de la grande faune.

Les principaux acteurs de cette transformation sont des écologues administrateurs, à l'image de Julian Huxley, le tout premier directeur de l'Unesco, nommé en 1946. On peut également citer Edgar Worthington, qui fut directeur scientifique adjoint du Nature Conservancy (une organisation gouvernementale britannique), ou l'ornithologue Edward Max Nicholson, l'un des fondateurs du World Wildlife Fund, le fameux WWF. À partir des années 1950, ces scientifiques issus de l'administration impériale britannique vont s'efforcer de mettre la science au service du gouvernement de la nature et de celui des hommes.

“À la fin du XIX^e siècle, 65 000 éléphants sont abattus chaque année pour leur ivoire en Afrique de l'Est.”

À l'époque coloniale, la nature africaine semble moins menacée qu'aujourd'hui. N'y a-t-il pas une contradiction à présenter ce continent comme le dernier éden sauvage sur la Terre et, dans le même temps, à alerter sur le risque d'extinction de certaines espèces ?

G. B. Si on prend l'exemple des éléphants, 65 000 animaux sont abattus chaque année à la fin du XIX^e siècle en Afrique de l'Est pour alimenter

1. Chercheur associé au laboratoire Les Afriques dans le monde (CNRS/Sciences Po Bordeaux/Université Bordeaux Montaigne) et au Centre Alexandre-Koyré (CNRS/EHESS/MNHN).



© LI SIBO/XINHUA-REA

le commerce de l'ivoire. À l'époque, les administrateurs coloniaux sont pourtant incapables de réaliser que ce massacre relève de leur propre responsabilité. Car, tout autour des espaces de protection qu'ils mettent en place, la destruction des ressources naturelles se poursuit – ce sont les plantations de cacao en Côte d'Ivoire qui empiètent toujours plus sur la forêt tropicale, ou le développement à grande échelle de la culture du café en Tanzanie et au Kenya.

À mesure que ce capitalisme extractiviste s'intensifie, la protection de la faune et de la flore se renforce *via* la multiplication des zones protégées.

Ceux qui entendent préserver la nature en établissant des réserves de chasse, puis des parcs nationaux, sont aussi ceux qui la détruisent en dehors de ces espaces de protection.

Une initiative baptisée « Projet spécial africain » illustre cette vision de la nature africaine. En quoi consiste cette grande mission écologique ?

G. B. Le Projet spécial africain est lancé à Varsovie en 1960 par l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), sous l'égide des Nations unies. En septembre 1961, une grande conférence internationale est organisée à Arusha, en Tanzanie,

► **Rhinocéros noir, dans la zone de conservation du cratère de Ngorongoro, en Tanzanie.**

afin de promouvoir les programmes de conservation auprès des dirigeants africains arrivés au pouvoir après les indépendances. Elle réunit une centaine d'experts occidentaux ainsi qu'une trentaine de dirigeants africains. D'un commun accord, ces derniers déclarent vouloir poursuivre les efforts accomplis par les colons européens dans les parcs nationaux africains qui ont vu le jour depuis la fin des années 1920. Pour, je cite, « *aider les gouvernements africains à s'aider eux-mêmes* », des experts internationaux sont alors envoyés en Afrique.

Le Projet spécial africain, qui se poursuivra jusqu'à la fin des années 1970, prend donc la forme d'une alliance entre les dirigeants africains et les experts internationaux.

Dans le livre que vous avez publié il y a peu, *La Nature des hommes*, vous rappelez que les institutions internationales ont fortement incité les pays africains à exclure leurs populations des territoires de ce qui allait devenir les parcs nationaux...

G. B. Parmi les institutions impliquées, il y a, d'un côté, les agences des Nations unies comme l'Unesco et

► **Chasse à l'éléphant au Congo, en 1914.**



© UBROGER-MOLLET

la FAO, mais aussi des organisations non gouvernementales, comme l'UICN, le WWF ou la Fauna & Flora International (FFI). Ces deux grandes catégories d'institutions ont tout d'abord servi de machine à reconvertir les administrateurs coloniaux en experts internationaux de la conservation. Ce sont elles qui vont ensuite imposer les mesures conservationnistes à l'intérieur des parcs.

La FAO va, par exemple, conditionner son aide au Kenya, à l'Éthiopie ou à la Tanzanie pour l'achat de matériel agricole à l'acceptation des règles édictées par l'Unesco – à savoir, que soient expulsées les populations qui vivent dans les parcs pour préserver les grands mammifères. C'est donc un véritable système international qui se met en place, dans lequel les agences des Nations unies vont avoir recours à des experts qu'elles vont mandater auprès de l'UICN, du WWF ou de la FFI.

Dans les années post-décolonisation, les dirigeants africains participent eux aussi à cette mythification d'un continent foisonnant de vie, car préservé des activités humaines...

▶ **Le dirigeant éthiopien Hailé Sélassié a profité de la création des parcs pour asseoir son contrôle sur plusieurs territoires.**



G. B. S'ils n'ont pas choisi ce cadre culturel, imposé par les experts internationaux de la conservation, ils savent le mettre au service de leurs intérêts. Au Congo, rebaptisé Zaïre en 1971 par le président Mobutu, ce dernier explique, lors d'une conférence de l'UICN à Kinshasa, que son pays a créé bien plus de parcs que le colonisateur belge qui l'a précédé.

En 1970, près de dix ans après son indépendance, la Tanzanie a de son côté quadruplé son budget dédié aux parcs nationaux. Si son Premier ministre Julius Nyerere n'envisage pas de « passer [ses] vacances à regarder des crocodiles barboter dans l'eau », comme il l'explique dans la presse tanzanienne, il assure que les Occidentaux sont prêts à dépenser des millions de dollars pour observer la faune exceptionnelle de son pays. Il entend alors faire de la nature la plus grande ressource économique de la Tanzanie.

Certains responsables politiques africains mettent aussi à profit le statut de parc national pour contrôler une partie de leur population...

G. B. Pour une nation comme l'Éthiopie d'Hailé Sélassié, la mise en parc de la nature donne la légitimité et les moyens financiers pour aller planter

le drapeau national dans des territoires qui échappent à son contrôle. C'est le cas du Simien, dans le Nord, une zone de maquis contestant le pouvoir central d'Addis-Abeba, de l'Awash, dans l'Est, qui regroupe des semi-nomades vivant avec leurs propres organisations politiques, et de la vallée de l'Omo, dans le Sud, où des populations circulent librement entre l'Éthiopie et le Kenya sans reconnaître les frontières nationales.

En Afrique, la mise sous protection de la nature sauvage se traduit souvent par l'expulsion des peuples dans les zones visées...

G. B. Ce déplacement forcé s'apparente à un véritable tremblement de terre, pour reprendre l'expression du sociologue américain Michael Cernes, qui a suivi les projets de déplacement de populations menés par les Nations unies. Les personnes expulsées sont directement impactées par la création des parcs nationaux, sans en tirer le moindre bénéfice. Une fois réinstallées, elles perdent en effet leurs réseaux d'entraide pour l'alimentation et les échanges socio-économiques.

Sur le plan environnemental, c'est aussi une catastrophe pour le territoire qui les accueille. Car, là où la terre

© NICHOLE SOBECQ/WIREIMAGE.COM





▲ Ces Masais voisins de la zone de conservation du Ngorongoro, en Tanzanie, pourraient voir leur village disparaître avec l'extension du parc.

était en mesure de supporter une certaine densité de bétail et un certain niveau d'extraction des ressources naturelles, la surpopulation et la surexploitation de l'environnement dont parlent les experts de la conservation deviennent réalité. Dans une étude publiée en 2001² tenant compte des lacunes statistiques des archives, deux chercheurs américain et mozambicain ont estimé que, pour l'ensemble des parcs nationaux d'Afrique, entre 1 et 14 millions de personnes avaient été contraintes de quitter ces espaces de conservation au cours du xx^e siècle.

Depuis la fin des années 1990, les politiques globales de conservation de la nature s'efforcent d'associer les populations qui vivent dans ou à côté des aires protégées. Comment se matérialise cette nouvelle philosophie pour les populations ?

G. B. Cette nouvelle doctrine se traduit de différentes manières. En Ouganda, la population va désormais pouvoir bénéficier des revenus du tourisme lié aux parcs nationaux. Mais ceux qui tirent réellement profit

de cette ouverture des politiques globales de conservation sont souvent des citoyens qui acceptent de devenir entrepreneurs ou guides touristiques. Les habitants des parcs n'ont, pour leur part, aucun droit de regard sur la gestion de ces espaces protégés et continuent de s'y opposer, parfois avec virulence.

En associant les populations qui vivent dans les parcs ou à proximité à la gestion de la grande faune qu'ils abritent, la conservation communautaire les incite à attribuer une valeur monétaire à ces animaux. C'est ce qui s'est produit en Namibie. Plus un mammifère est prisé des touristes, comme l'éléphant ou le lion, plus sa valeur pécuniaire augmente et, avec elle, le niveau de protection que lui accorde la population.

Mais *quid* d'une pandémie comme le Covid-19, provoquant l'arrêt de toute activité touristique pendant deux ans ? Eh bien, la faune n'est plus protégée, puisqu'elle n'a plus aucune valeur. Parce qu'il nie la singularité des sociétés auxquelles il déclare vouloir s'adapter, le modèle de la conservation communautaire, qui prétend associer les populations locales, se révèle donc souvent inefficace.

Des mesures destinées à exclure les humains des espaces naturels protégés continuent-elles d'être prises par certains gouvernements africains ?

G. B. De telles décisions restent d'actualité. Les travaux de l'association Survival International l'ont très bien documenté au Cameroun,

“*En Afrique, des millions de personnes ont été contraintes de quitter ces espaces de conservation au cours du xx^e siècle.*”



À lire :

La Nature des hommes – Une mission écologique pour « sauver » l'Afrique,
de Guillaume Blanc,
La Découverte, 2024,
336 pages.

en République démocratique du Congo ou en Tanzanie. En Éthiopie, dans le parc du Simien où je me suis rendu à plusieurs reprises, les dernières expulsions datent de 2016. Cette année-là, plus de 2 500 villageois ont été évacués de force à 35 kilomètres du parc.

Dans les années 2010, le géographe américain Roderick Neumann a recensé jusqu'à 800 meurtres liés à la politique de « *shoot on sight* [tir à vue] » appliquée dans plusieurs parcs nationaux d'Afrique de l'Est. Selon cette doctrine, toute personne qui se trouve à l'intérieur du parc est soupçonnée de braconnage et peut donc être abattue par les éco-gardes. Dans des pays où le braconnage n'est pas passible de peine de mort, de simples chasseurs de petit gibier sont exécutés sans sommation.

En Europe, les règles de fonctionnement des parcs nationaux sont différentes. Si on prend l'exemple du parc national des Cévennes, l'agriculture traditionnelle et le pastoralisme y sont valorisés en tant qu'éléments de la culture locale. Comment expliquer ce « deux poids, deux mesures » ?

G. B. Le parc national des Cévennes abrite plus de 70 % du site des Causses et Cévennes, inscrit sur la liste du Patrimoine mondial depuis 2011. Or la valeur qui conditionne un tel classement est, selon l'Unesco, « *l'agropastoralisme, une tradition qui a façonné le paysage cévenol* ». En revanche, dans le parc éthiopien du Simien, la valeur universelle exceptionnelle invoquée par l'Unesco est « *ses paysages spectaculaires* ». Si les montagnes du Simien ont été classées « en péril » et les populations qui y vivaient ont été expulsées, c'est parce que « *l'agropastoralisme menace la valeur du bien* ».

L'appréciation des rapports homme-nature n'est pas univoque en matière de conservation. Ainsi, en Europe, l'homme façonne la nature et, en Afrique, il la dégrade... ||

2. « From refuge to refugee: the African case », *Public Administration and Development*, mai 2001.

Hedy Lamarr, le génie scientifique éclipsé par la beauté

NUMÉRIQUE

Hedy Lamarr dépose le brevet « Système de communication secrète » le 10 juin 1941, avec son ami compositeur et pianiste George Antheil, auprès de l'Office des brevets et des marques des États-Unis. En quoi consiste cette invention ?

Olga Paris-Romaskevich¹ En pleine Seconde Guerre mondiale, il était crucial de protéger les communications, par exemple celles d'un navire attaquant un sous-marin. En effet, l'ennemi pouvait intercepter le signal envoyé par l'émetteur radio de guidage du navire à destination d'une torpille équipée d'un récepteur radio.

Dans leur brevet, Antheil et Lamarr proposent de recourir à ce qu'on appelle aujourd'hui l'« étalement du spectre par saut de fréquence ». Il s'agit, lors d'une transmission, de passer d'une fréquence radio à l'autre, en suivant un ordre aléatoire et non périodique connu à l'avance par l'émetteur et le récepteur, à la manière d'un code secret.

Isabelle Vauglin² Leur solution est aussi poétique qu'ingénieuse. Les deux inventeurs se sont inspirés du fonctionnement des pianos mécaniques. Dans ces instruments, les trous de cartes perforées (telles celles des premiers ordinateurs) agissent comme des commandes, contrôlant les touches qui doivent être jouées. L'ordre du changement de fréquence qu'ils proposent dans leur brevet n'est autre qu'un morceau de musique joué par un piano !

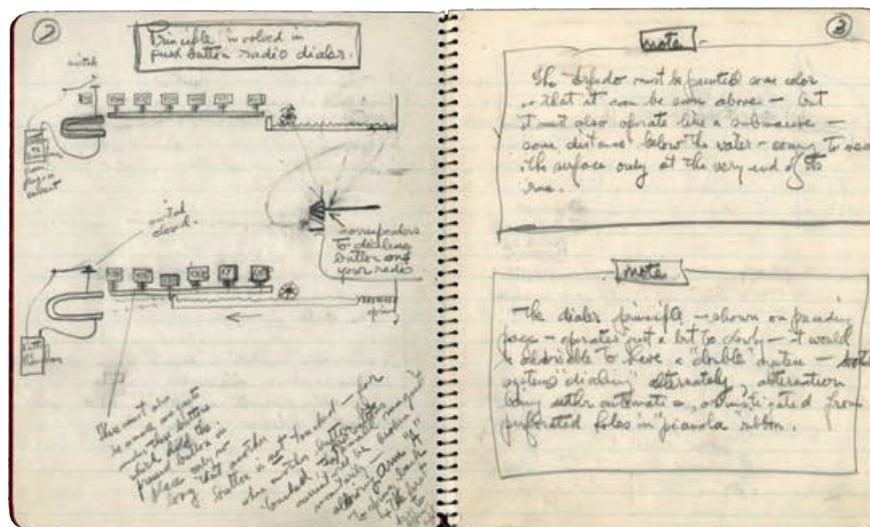


© B. PARIS-ROMASKEVICH, CC BY-SA

© COLL. PERS.

TÉLÉCOMMUNICATIONS L'actrice Hedy Lamarr, décédée il y a 25 ans, avait conçu un système de codage des transmissions de données, utilisé notamment dans les télécommunications. Mais l'histoire n'a longtemps retenu que la star hollywoodienne.

PROPOS RECUEILLIS PAR ÉMILIE MARTIN



© NATIONAL MUSEUM OF AMERICAN HISTORY, ARCHIVES CENTER

▼ **Cahier de notes et schémas détaillant le «Système de communication secrète», dont Hedy Lamarr et George Antheil déposèrent le brevet en 1941.**

Aujourd'hui, l'étalement du spectre par saut de fréquence est utilisé dans beaucoup de technologies de communication (Bluetooth, GPS...). Faut-il se souvenir d'Hedy Lamarr comme la pionnière des télécommunications modernes ?

O. P.-R. Il est important de ne pas tomber dans deux écueils : invisibiliser la contribution d'Antheil et de Lamarr (qui n'ont pas reçu d'éducation scientifique formelle), ou considérer qu'ils

étaient les premiers à proposer le saut de fréquence, une idée dont l'histoire semble compliquée à retracer. En tout cas, des brevets similaires avaient déjà été déposés dans les années 1920 et 1930. Il est probable qu'Hedy Lamarr ait été exposée à ces concepts lorsqu'elle était en Autriche, mariée à Friedrich Mandl, un vendeur d'armes très proche du régime nazi. Hedy Lamarr et George Antheil méritent tous les deux leur juste place



dans l'histoire des sciences. Ils portent le message que la science appartient à tout le monde.

Mais elle n'a été reconnue pour son brevet qu'en 1997. Elle a alors reçu plusieurs distinctions, dont le Bulbie Gness Spirit of Achievement Award, souvent surnommé l'« oscar des inventeurs ». A-t-elle été la victime de son image de beauté ?

O. P.-R. Son intelligence était souvent perçue comme en trop, c'est sûr ! Pour son premier mari, elle n'était qu'une belle poupée. En 1937, Lamarr s'enfuit de ce mariage. Puis, aux États-Unis, c'est un producteur de cinéma, Louis Mayer, qui la « vend » comme « *la plus belle femme du monde* ». Seule sa beauté était reconnue par les hommes qui l'entouraient, et non son intelligence – sauf par Antheil ! Alors qu'ils ont déposé leur brevet, on a demandé à Lamarr de faire un tour du pays pour embrasser les hommes contre l'achat d'obligations de guerre... Ce qu'elle a fait. Elle a misé sur sa beauté pour survivre. Malgré cela, elle n'a jamais arrêté de rêver à des inventions.

I. V. Elle avait une soif de comprendre comment les choses fonctionnent.

Pourtant, la société ne l'a soutenue que dans sa carrière d'actrice, jamais dans ses ambitions scientifiques. Son père a nourri sa passion quand elle était enfant, mais, *in fine*, ses parents ne l'ont pas poussée à poursuivre des études dans ce domaine.

A-t-elle subi l'« effet Matilda », ce phénomène d'invisibilisation des femmes scientifiques au profit de leurs collègues masculins ?

I. V. En quelque sorte. À l'origine, ce phénomène a été conceptualisé par le sociologue Robert K. Merton. Il a étudié la notoriété des scientifiques selon leur position dans la structure hiérarchique où ils travaillaient et constaté que les chefs bénéficiaient souvent d'une reconnaissance disproportionnée au regard de leur contribution réelle. Il a nommé ce mécanisme social l'« effet Matthieu » – référence au passage de l'Évangile selon Matthieu : « *Car on donnera à celui qui a, et il sera dans l'abondance, mais à celui qui n'a pas, on ôtera même ce qu'il a* ».

Plus tard, Margaret Rossiter a repris ce concept pour désigner les femmes scientifiques dont le travail et les découvertes sont minimisées. Elle l'a nommé « effet Matilda », en

► **Bricoleuse et autodidacte, Hedy Lamarr étudie des plans pour réaménager son domaine, dans le quartier de Bel-Air, à Los Angeles, vers 1940.**

hommage à Matilda Joslyn Gage, une militante qui s'est battue pour la reconnaissance des femmes. L'histoire est pleine d'exemples édifiants : Lise Meitner, codécouvreuse de la fission nucléaire avec Otto Hahn, mais oubliée du Nobel en 1945 ; Rosalind Franklin, dont le cliché révélant la structure en double hélice de l'ADN a carrément été volé par Watson et Crick qui, en 1962, ont reçu le Nobel sans elle ; ou encore Jocelyn Bell, dont le directeur de thèse a refusé qu'elle inclue sa découverte du tout premier pulsar dans sa thèse et qui a reçu le Nobel en 1974 à sa place...

O. P.-R. Cet effet se manifeste encore aujourd'hui à tous les échelons de la recherche.

Quelles actions menez-vous pour que la situation évolue ?

I. V. Pour encourager les femmes à embrasser des carrières scientifiques, Femmes & Sciences organise de nombreuses actions, en particulier l'exposition « La science taille XX elles » (en partenariat avec le CNRS) et, chaque année, les journées « Sciences, un métier de femmes ! ». Nous proposons également un programme de mentorat, car les femmes ont besoin d'être aidées et encouragées à prendre leur place dans des environnements qui restent très masculins.

O. P.-R. Les mathématiques fondamentales sont l'une des disciplines les moins féminisées à l'université française. Avec des collègues, nous avons créé « May 12th », une journée internationale de célébration des femmes en mathématiques. J'ai également participé à l'organisation de stages (« Les Cigales ») à destination des lycéennes, dans le but de leur faire découvrir la démarche de recherche en mathématiques. J'ai aussi coécrit l'ouvrage *Matheuses*³, qui explique les mécanismes d'exclusion des filles et des femmes dans les sciences, et dans les mathématiques en particulier. **II**

1. Mathématicienne, chargée de recherche au CNRS au sein de l'Institut Camille Jordan (CNRS/École centrale de Lyon/Insa Lyon/université Lyon 1 Claude-Bernard/université Lyon 3 Jean-Monnet). 2. Astrophysicienne au Centre de recherche astrophysique de Lyon (Cral, unité CNRS/ENS de Lyon/université Lyon 1 Claude-Bernard) et présidente de l'association Femmes & Sciences. 3. *Matheuses – Les filles, avenir des mathématiques*, de C. Perronnet, C. Marc et O. Paris-Romaskevich, CNRS Éditions, 240 pages, 2024.



de Denis Guthleben,
historien au CNRS

L'interdisciplinarité en marche

“ L'année 2025 marque le jubilé de l'interdisciplinarité au CNRS. Il y a tout juste cinquante ans, en effet, le terme faisait son apparition dans notre nomenclature, avec le lancement d'un Programme interdisciplinaire de recherche pour le développement de l'énergie solaire, le Pirdes – car, si l'on adore les mots, au CNRS, on vénère plus encore les acronymes ! Mais il suffit d'observer notre histoire commune pour s'apercevoir que 1975 n'est pas l'année 0 du rapprochement entre les disciplines : l'ambition a précédé la formule...

L'interdisciplinarité avant l'interdisciplinarité

Dès les années 1920, dans son laboratoire de chimie physique comme à l'Institut de biologie physico-chimique (IBPC), fondé avec le soutien d'Edmond de Rothschild, Jean Perrin l'avait noté : « *Dans l'état actuel de la science, le biologiste, le chimiste et [...] le physicien ne peuvent plus travailler isolément.* »

Quelques années plus tard, le principe a inspiré la création des unités originelles du CNRS, comme l'Institut d'astrophysique de Paris (IAP), qui est venu graver dans les murs d'un bâtiment du boulevard Arago, à Paris, l'union de deux disciplines millénaires : l'astronomie et la physique.

“ *L'interdisciplinarité est moins un but qu'un horizon – l'essentiel est de ne jamais cesser d'avancer.* ”

La tâche n'a cependant pas toujours été facile. Jean Zay, en observateur clairvoyant de la communauté savante – et de la nature humaine – l'a constaté dans ses mémoires : « *Quand les hommes sont habitués à travailler à l'écart les uns des autres, il est malaisé de les rapprocher ; leur collaboration loyale suppose de petits sacrifices d'amour-propre, des concessions mutuelles, une confiance réciproque, qui ne naissent point naturellement...* »

La volonté reste identique sur les premiers campus du CNRS : celui de Meudon, en 1939, où se réunissent des chercheuses et des chercheurs de tous les domaines ; puis celui de Gif-sur-Yvette, que l'organisme acquiert à la Libération. Là, le directeur du CNRS, Frédéric Joliot, cherche

à stimuler « *les avantages qu'offre le voisinage de disciplines diverses* ». Or, si un bon voisinage forme un socle favorable à l'union des disciplines, il est loin de suffire pour un organisme qui « *provoque, coordonne et encourage* » la recherche à l'échelle du pays.

D'autres voies sont explorées, telles que des « recherches coopératives sur programme » (RCP) qui visent à résoudre, dans les années 1960, « *des problèmes communs à plusieurs laboratoires et intéressant plusieurs sections du comité national* ». À leur tête, des « directrices » ou « directeurs de problème » (eh oui ! nous avons eu cela aussi, au CNRS) doivent mettre cette association en musique.

Des PIR à la Miti

À partir de 1975, les programmes interdisciplinaires enclenchent une vitesse supérieure, en lien avec des défis de société. Le Pirdes est inauguré après le premier choc pétrolier, en associant les sciences humaines et sociales : des économistes, des sociologues, des géographes. Un peu plus tard, le Piren vient stimuler les recherches sur l'environnement et scruter « *les conditions d'évolution des milieux soumis à diverses pressions humaines* ».

Il y a aussi un Pirmed, conduit par un chercheur au caractère bien trempé, le chimiste Pierre Potier, et consacré aux bases scientifiques des médicaments. Ou un Pirlpsev, pour la prévision et la surveillance des éruptions volcaniques, lancé en réponse à la crise de La Soufrière (survenue en Guadeloupe en 1976) et, accessoirement, pour que Claude Allègre et Haroun Tazieff cessent de s'adresser des noms d'oiseaux par médias interposés – un objectif officiel qui n'a hélas pas été atteint...

Prolongée au fil des années 1980, cette programmation connaît un rebond en 1990, avec l'organisation au palais de l'Unesco d'une session extraordinaire du comité national, qui débouche sur une nouvelle génération de projets autour de l'ingénierie des macromolécules biologiques, des sciences cognitives ou des technologies poussées à leurs limites. Le CNRS a ainsi piloté plus d'une cinquantaine d'actions jusqu'à la création de sa Mission pour l'interdisciplinarité, en 2010.

Depuis 2018, notre Mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (Miti) s'inscrit dans le prolongement de cette longue histoire, où l'interdisciplinarité est moins un but qu'un horizon – l'essentiel est de ne jamais cesser d'avancer. Alors marchons, marchons, et que des collaborations fructueuses abreuvant nos sillons ! ■

CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS

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



Entrez dans
les coulisses
de la recherche



CNRS ÉDITIONS

www.carnetsdescience-larevue.fr

Parce que les maths aussi ont besoin d'une grande exposition!

cnrs

Participez à notre
grande consultation
nationale sur l'avenir
des mathématiques.

Aux maths
citoyennes, citoyens!
Grande consultation
nationale.
Du 10 mars au
30 avril 2025.



Donnez
votre avis.