

CNRS le mag

#324 - TRIMESTRIEL - JUIN 2026

+ Rançongiciels,
« des écosystèmes
criminels organisés »



OBJECTIF LUNES

DOSSIER

BIOLOGIE

Le secret des
cellules baladeuses

PORTFOLIO

Corail: l'or rouge
de Méditerranée

GRAND NORD

La malédiction des
ressources minières



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

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



La banque coopérative
de la Fonction publique

Rendez-vous sur **casden.fr*** ou retrouvez-nous chez



*Coût de connexion selon votre opérateur.

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

CASDEN Banque Populaire – Société Anonyme Coopérative de Banque Populaire à capital variable – Siège social : 1 bis rue Jean Wiener 77420 Champs-sur-Marne – Siren n° 784 275 778 – RCS Meaux – Immatriculation ORIAS n° 07 027 138 • BPCE – Société anonyme à directoire et conseil de surveillance au capital de 207 603 030 euros. • Siège social : 7, promenade Germaine Sablon 75013 PARIS – Siren n° 493 455 042 – RCS Paris – Immatriculation ORIAS n° 08 045 100 • Conception : •becoming • Crédits photos : SolAir • Illustrations : ©Frédéric Rébena • Document à caractère publicitaire et sans valeur contractuelle. Ne pas jeter sur la voie publique.



EN COUVERTURE

Europe, l'une des lunes de Jupiter
© NASA/JPL-CALTECH/SETI INSTITUTE

ÉDITO

CNRS le mag

Rédaction

3, rue Michel-Ange – 75794 Paris Cedex 16
01 44 96 40 00 – lejournal@cnrs.fr

Site internet

<https://lejournal.cnrs.fr>

Anciens numéros

<https://lejournal.cnrs.fr/numeros-papiers>

Directeur de la publication

Thierry Dauxois

Directeur de la communication

Jérôme Guilbert

Directeur de la rédaction

Saman Musacchio

Rédacteur en chef

Yaroslav Pigenet

Rédactrice en chef adjointe

Laure Cailloce

Chefs de rubrique

Mehdi Harmi, Marina Julienne, Maxime Lerolle

Rédacteurs

Cyril Frésillon, Laurence Stenvot

Ont participé à ce numéro

Thomas Allard, Lou Angey, Kheira Bettayeb,
Julie Coquart, Grégory Fléchet,
Maxime Flouriot, Nicolas Guillas,
Sandra Lumbroso (SR), Charlotte Mauger,
Servane Pierre, Matthieu Stricot

Coordinateur éditorial

Fabien Maréchal

Directeur artistique

David Faure

Iconographes

Anne-Emmanuelle Héry, Sophie Léonard
et Valérie Delchambre

Illustrations

Bartholomé Faure-Lédy, Francis Léveillé,
Antoine Levesque, Laura Liedo

Refonte et maquette

pilotées par Laure Cailloce,
avec Pauline Guiraud et David Faure

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-mediatheque@cnrs.fr

<https://images.cnrs.fr>

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

Même exigence scientifique, ambition plus large

CNRS LE MAG EST LA NOUVELLE FORMULE d'un trimestriel que certains d'entre vous connaissent depuis sa création, en janvier 1990. Porté par la rédaction de cnrslejournal.fr – l'une des principales sources francophones d'information scientifique gratuite –, ce magazine se réinvente pour les lecteurs d'aujourd'hui : même exigence scientifique, ambition plus large.

Car, à l'heure de la désinformation et des *fake news*, rigueur et sérieux peuvent – et doivent – rimer avec accessibilité. Avec *CNRS Le Mag*, nous vous proposons une mise en page plus aérée, plus rythmée, et de nouvelles rubriques : dossiers de fond, reportages, portraits, infographies, décryptages, brèves, portfolios, billets de chercheurs... Et, à l'heure où les écrans prennent de plus en plus la place du papier, *CNRS Le Mag* sera également bientôt accessible en version liseuse sur tablettes, smartphones et ordinateurs.

Pour étrenner cette nouvelle formule, nous irons explorer les lunes du système solaire, surveillerons l'invasion des tiques, suivrons les pérégrinations des cellules cancéreuses, ferons des mathématiques sur la plage et apprendrons, entre autres, comment les astronomes s'efforcent de nous protéger d'un impact d'astéroïde.

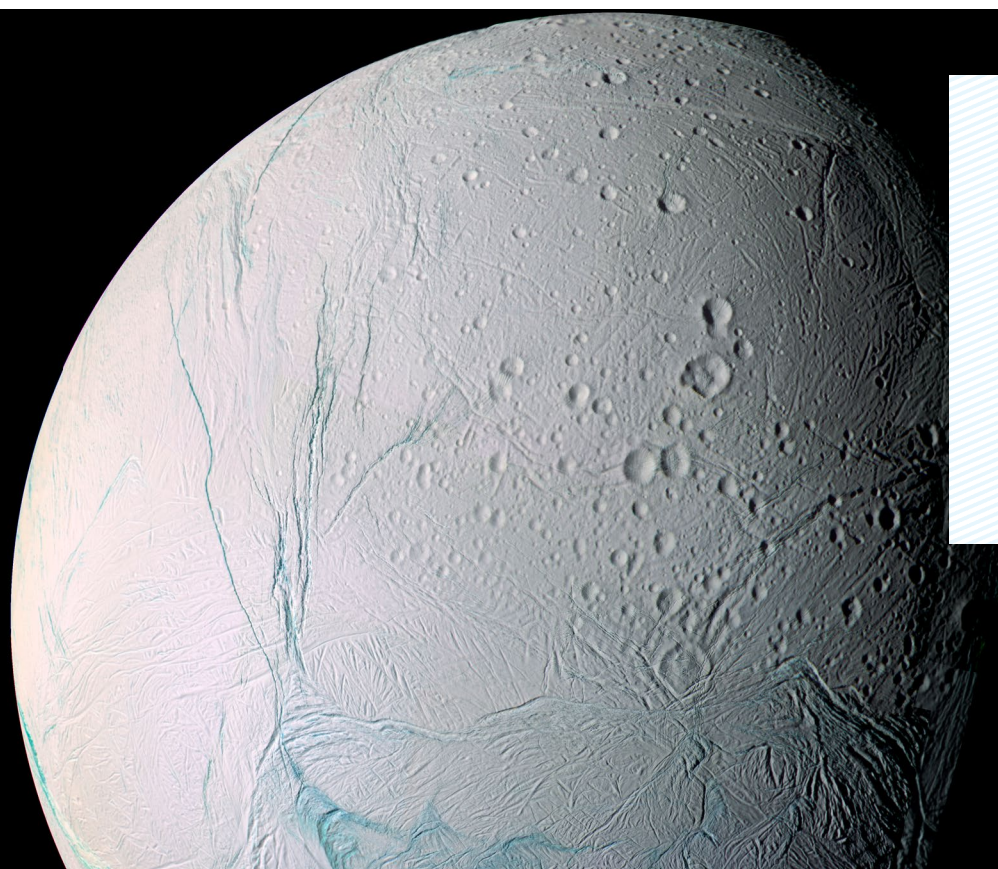
Bref, nous découvrirons la science en train de se faire dans toute son audace... et toute son utilité. ●

Une mise en page
plus aérée,
plus rythmée,
et de nouvelles
rubriques



SUIVEZ L'ACTUALITÉ DE LA RECHERCHE AVEC LE CNRS





18 DOSSIER OBJECTIF LUNES

- 20 Pour quelques pas de plus
- 26 À la poursuite des lunes du Système solaire

- 41 **LE (GROS) MOT DE L'ENVIRONNEMENT**
«Espèce exotique envahissante»
- 42 **EN IMAGES**
L'or rouge de Méditerranée
- 58 **STRATÉGIE**
 - Incendies: la science en renfort
 - Directive sur l'eau: le CNRS en alerte
- 65 **À LIRE/À ÉCOUTER**
- 66 **«LE JOUR OÙ...»**
J'ai été prise dans une tempête aux Kerguelen»



© HUBERT RAGUET/ALHYGES/PPS/OHGE/CNRS IMAGES



© LADISLAV KUBES / ISTOCKPHOTO.COM

- 6 **ZOOM**
- 8 **SUR LA TOILE**
- 9 **C'EST UNE BONNE QUESTION**
Atlantique: des courants à l'arrêt?
- 10 **L'INFOGRAPHIE**
Un télescope au fond de la mer!
- 12 **C'EST DANS L'ACTU**
Tiques sous haute surveillance

AU FIL DES SCIENCES

- 30 **BIOLOGIE** Le secret des cellules baladeuses
- 34 **PHYSIOLOGIE** Marathon: passer le mur des 30 km
- 36 **MATHÉMATIQUES** Les maths à la plage
- 38 **ESPACE** L'Europe s'empare de la défense planétaire
- 48 **GÉOPOLITIQUE** Dans le Grand Nord, la malédiction des ressources minières
- 52 **VIVANT** Dormir comme un lézard
- 54 **INFORMATIQUE** Rançongiciels, «des écosystèmes criminels organisés»



© GONZALO AZUMENDI/LAIF-REA

Abordez l'été avec le CNRS



7 Conférences
démo

ENTRÉE
LIBRE

Les 7 et 22 juillet à 16h
à la Gaîté Lyrique - Paris

#ÉchappéesInattendues

Comment concilier biodiversité et pratiques humaines ? Comment les plus petites espèces organisent-elles leur propre société ? Comment la nature évolue-t-elle dans le milieu urbain ? Les scientifiques du CNRS réalisent des expériences sous vos yeux pour répondre à ces questions, lors de deux conférences-démo.



Entrée libre.
Plus d'infos et inscription sur
echappeesinattendues.cnrs.fr

SOCIÉTÉS

UNE PAGE D'ARCHIMÈDE RETROUVÉE À BLOIS



© ERICA GUILANE-NACHEZ / STOCK.ADOBE.COM

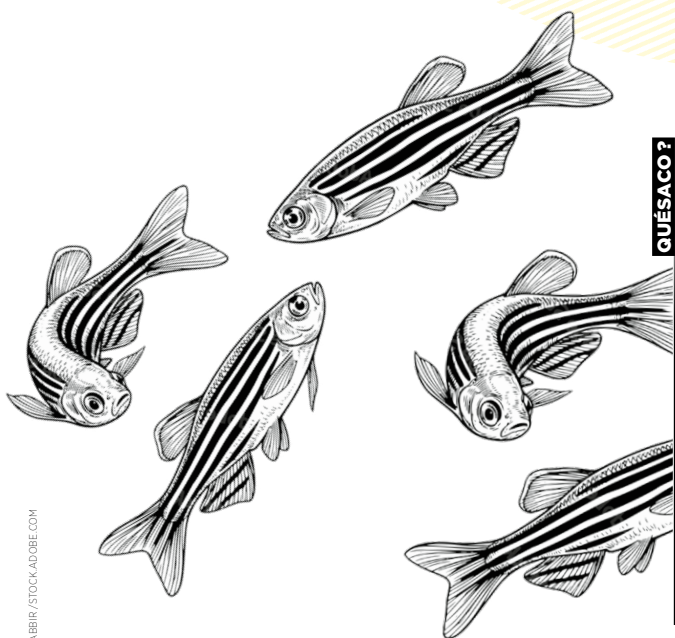
LE PALIMPSESTE d'Archimède, un manuscrit grec du ^xe siècle, contient plusieurs traités d'Archimède de Syracuse. Cependant, il a été en partie effacé au Moyen Âge afin de réutiliser le parchemin pour d'autres écrits. Conservé à Jérusalem puis à Constantinople, il a été documenté par des photographies de Johan Ludvig Heiberg en 1906, avant d'arriver dans une collection privée, en France. Où le ministère de la Culture a autorisé son exportation et sa vente aux enchères, en 1996. Un collectionneur privé, son actuel propriétaire,

a alors acquis le manuscrit. Mais, en cours de route, trois pages ont disparu. Et on les croyait perdues. C'était sans compter sur les travaux de Victor Gysembergh, chercheur du CNRS au Centre Léon Robin de recherches sur la pensée antique, qui a réussi à identifier l'un des feuillets manquants au Musée des Beaux-Arts de Blois. En le comparant aux clichés de Heiberg, aujourd'hui conservés à la Bibliothèque royale du Danemark, il a pu le confirmer avec certitude : il s'agit du feuillet n° 123. Voilà qui ravive l'intérêt de réexaminer tout le palimpseste avec des techniques plus puissantes que celles des années 2000 utilisées au cours d'une première campagne, afin d'envisager une nouvelle lecture des pages alors restées illisibles. *

IL-22

QU'EST-CE QUE ?

Ou interleukine-22. On pensait jusqu'à présent que l'IL-22 était produite par les lymphocytes, des cellules du système immunitaire. Or des chercheurs ont récemment découvert en étudiant le développement du poisson-zèbre que, dans son intestin, certaines de ses cellules spécialisées étaient elles aussi capables d'une telle synthèse. Une aptitude qui leur permet de façonner le microbiote intestinal en cours de développement, palliant ainsi l'absence de système immunitaire chez les individus durant cette période.



© SABBIR / STOCK.ADOBE.COM

MATIÈRE

COMMENT RENDRE L'OPACITÉ TRANSPARENTE

UN CHERCHEUR DU CNRS vient de rendre l'opacité transparente en utilisant... des photons intriqués. Il se trouve que ces derniers possèdent une propriété unique. Ils sont corrélés physiquement entre eux, et cela, même durant la traversée d'un milieu désordonné. Par conséquent, si ces photons forment initialement une image, cette dernière sera conservée après le passage des photons dans un milieu plus ou moins opaque. *A contrario*, la lumière classique, soumise au même changement, voit son information systématiquement détruite. Les photons intriqués, eux, peuvent donc traverser des milieux diffusants (tels des tissus biologiques ou des perturbations atmosphériques) dans lesquels la lumière classique se disperserait. Cette découverte, tout juste publiée dans la revue *Nature Physics*, apporte un éclairage inédit sur un enjeu majeur de l'optique moderne : transmettre le plus fidèlement possible l'information dans tous les types de milieux. ●

VIVANT

Des rôles sociaux flexibles

DANS LES SOCIÉTÉS ANIMALES, humaines ou non humaines, on observe régulièrement des individus qui produisent des

ressources et d'autres qui les captent.

Contrairement à ce que les théories évolutives pouvaient jusqu'alors laisser penser, ces rôles sociaux ne dépendent pas uniquement de prédispositions individuelles. À l'inverse, selon une étude menée chez des souris par des scientifiques du CNRS et de Sorbonne Université, leur répartition et leur stabilisation dans des groupes d'individus émergent d'une dynamique collective reposant sur le hasard des premières interactions et sur l'apprentissage. Les rôles sociaux ne sont donc pas figés, mais dynamiques et très flexibles, permettant à chaque individu de changer de rôle lorsque le système dans lequel il évolue se transforme. ●



© RAWPIVEL.COM



© THE NEW YORK PUBLIC LIBRARY / UNsplash

ARCHÉOLOGIE

Temples de Karnak : restauration et découverte

SUR LE SITE DES TEMPLES DE KARNAK, plus grand complexe religieux de toute l'Antiquité, l'une des principales portes de l'enceinte de Ramsès III vient d'être complètement restaurée et documentée. Érigé lors de la XX^e dynastie et découvert au XIX^e siècle, ce monument est épais de 5,4 m pour une hauteur maximale de 2,97 m. Mais, en grande partie effondré et envahi par la végétation, il a longtemps été négligé par les égyptologues. Les récents travaux ont mobilisé toutes les équipes de recherche du Centre franco-égyptien d'étude des temples de Karnak. Sur le site, une stèle a également pu être dégagée et identifiée. Ce monolithe en grès, d'environ 60 cm de hauteur sur 40 cm de largeur et 10 cm d'épaisseur, représente notamment l'empereur debout devant la triade de Karnak : Amon-Rê, Mout et Khonsou. L'équipe de recherche poursuit des travaux de mise en valeur de la zone nord du grand temple d'Amon-Rê, afin de rendre accessibles au tourisme ces monuments et leur histoire. ✱



CULTURE

Inventer une mathématicienne au cinéma

Olga Paris-Romaskevich, mathématicienne, décortique le film *Le Théorème de Marguerite*, qui a valu à Ella Rumpf le César de la révélation féminine en 2024, et interroge la façon dont le cinéma représente ses consœurs.



NUMÉRIQUE

L'ADN peut-il révolutionner la cryptographie ?

Des chercheurs du CNRS et de l'université de Tokyo ont réussi à utiliser l'ADN synthétique pour créer des codes de chiffrement aléatoires et inviolables. Testée en conditions réelles entre le Japon et la France, cette technologie pourrait changer la donne en matière de cybersécurité.

SUR LA TOILE



ARCHÉOLOGIE

Des fours connectés à l'âge du bronze

Un artefact sans équivalent dans le reste du monde a été mis au jour en 2015 dans le nord de l'Irak : un type de four à deux espaces opératoires connectés datant du Chalcolithique (entre -7 000 et -5 000 ans). Pour comprendre comment de tels fours fonctionnaient, des archéologues ont entrepris d'en construire une réplique. Une expérience qui s'est révélée pleine de rebondissements.



ÉCONOMIE

Pourquoi les salaires résistent aux crises

Même quand l'économie vacille, les salaires tiennent bon. Une bizarrerie qui intrigue les économistes. Pourtant, ce n'est pas un hasard ! Une récente étude révèle un facteur clé : la marge de manœuvre dont disposent les salariés, aussi appelée « pouvoir discrétionnaire ».



GÉOSCIENCES

Guadeloupe : au cœur des gaz volcaniques

Que risque-t-on à vivre non loin d'un volcan ? Jusqu'à présent, on en surveillait les éruptions et les séismes, mais très peu les gaz. En Guadeloupe, des chercheurs enquêtent sur les pentes et dans le cratère de la Soufrière, pour connaître l'impact de ces émanations sur les habitants.

C'EST UNE BONNE QUESTION

La circulation méridienne de retournement de l'Atlantique (Amoc) est un ensemble de courants de circulation d'eaux chaudes, notamment originaires du golfe du Mexique, qui viennent lécher les côtes européennes – et entraînent en partie le Gulf Stream. Son arrêt relève-t-il du scénario de film catastrophe ?

Les eaux de l'Amoc se refroidissent en remontant vers les hautes latitudes, deviennent alors plus denses et plongent vers les abysses, avant de repartir vers l'équateur, puis l'océan Austral. L'Amoc convoie ainsi 7 à 18 millions de mètres cubes d'eau par seconde – « plus de 10 fois le débit de tous les fleuves du monde », décrit Didier Swingedouw, chercheur au sein de l'unité Environnements et paléoenvironnements océaniques et continentaux¹, à Pessac (Gironde).

Mais, selon certains travaux scientifiques, la hausse des précipitations et le réchauffement des eaux océaniques causés par le dérèglement climatique pourraient enrayer cette mécanique, ralentissant fortement l'Amoc. « Si les eaux deviennent plus chaudes sous les hautes latitudes, souligne Didier Swingedouw, cela défavorise le phénomène de convection [échanges de chaleur, notamment, lors des mouvements d'un fluide, Ndlr]. Or ce dernier est un des moteurs principaux de l'Amoc. »

L'Amoc pourrait perdre 51 % de son intensité d'ici à la fin du siècle, a quantifié une équipe de recherche de CNRS Terre & Univers et de l'Institut national de recherche en informatique et en automatique, dans une étude parue en avril². « L'Amoc est particulièrement difficile à modéliser. Les précédentes études envisageaient un ralentissement compris entre environ 0 et 70 % d'ici à la fin du siècle, selon le modèle de climat considéré, avec une moyenne des différents modèles estimée à 32 %, détaille Didier Swingedouw, l'un des coauteurs. Pour obtenir des projections plus

Le dérèglement climatique pourrait enrayer la mécanique



CLIMAT

Atlantique : des courants à l'arrêt ?

précises, nous nous sommes notamment appuyés sur des observations récentes du système climatique, comme l'évolution des températures et de la salinité, qui ont une influence cruciale dans ce phénomène qu'est l'Amoc. »

Quel serait l'effet sur le climat d'un ralentissement de l'Amoc plus fort que prévu ? « Sur le continent européen, des hivers plus froids en 2100 qu'estimé auparavant. Les canicules causées par le réchauffement global ne seraient, quant à elles, pas ou peu atténuées. En termes d'impacts, ce serait la double peine. » Et si l'Amoc ne s'effondrera pas totalement durant notre siècle, ajoute le chercheur, « un arrêt complet à l'horizon 2150 ou 2200 ne peut être exclu ».

Une paralysie du Gulf Stream pourrait-elle s'ensuivre ? Non, assure Didier Swingedouw : « Il ne s'arrêtera jamais, car près de 70 % de l'intensité du Gulf Stream est liée aux vents. Or, tant que la Terre sera ronde et qu'elle tournera, le vent continuera de souffler ». ●

1. Epop (CNRS/Bordeaux INP/Université de Bordeaux). 2. Voir : doi.org/10.1126/sciadv.adx4298



L'INFOGRAPHIE

Le détecteur sous-marin géant KM3NeT est en cours de déploiement à plus de 2000 m de profondeur. Des centaines de lignes verticales pouvant mesurer jusqu'à 700 m de hauteur sont arrimées au plancher océanique. L'objectif : détecter les neutrinos venus du plus lointain de notre Univers. Une gageure, tant ces particules élémentaires interagissent peu avec la matière.

➡ LAURE CAILLOCE AVEC LOU ANGEY
• INFOGRAPHIE ANTOINE LEVESQUE



KM3NeT repose sur deux sites. En Sicile, on observe les neutrinos cosmiques ultra-énergétiques émis lors d'événements extrêmes (explosion de supernova ou fusion d'étoiles à neutrons). À Toulon, on étudie les propriétés fondamentales des neutrinos produits dans la haute atmosphère terrestre.

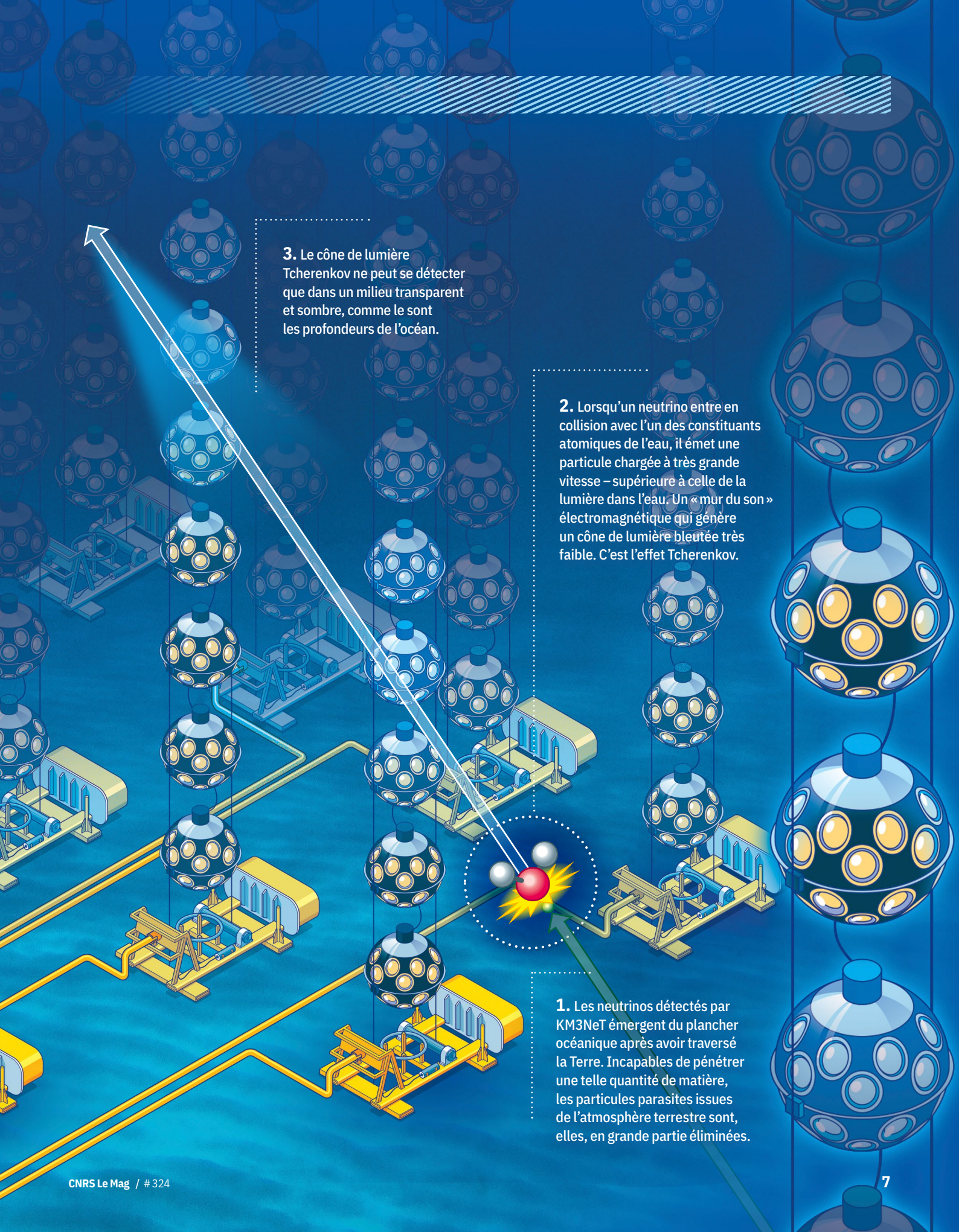
Plusieurs centaines de lignes sont en cours de déploiement. 18 photorécepteurs comme celui-ci équipent chaque ligne. L'instrument couvre un volume d'eau de plus de 1 milliard de mètres cubes.

Un câble de télécommunication sous-marin, comportant conducteurs électriques et fibres optiques, relie l'installation à la terre ferme.

PHYSIQUE

Un télescope au fond de la mer !

44 cm



3. Le cône de lumière Tcherenkov ne peut se détecter que dans un milieu transparent et sombre, comme le sont les profondeurs de l'océan.

2. Lorsqu'un neutrino entre en collision avec l'un des constituants atomiques de l'eau, il émet une particule chargée à très grande vitesse – supérieure à celle de la lumière dans l'eau. Un « mur du son » électromagnétique qui génère un cône de lumière bleutée très faible. C'est l'effet Tcherenkov.

1. Les neutrinos détectés par KM3NeT émergent du plancher océanique après avoir traversé la Terre. Incapables de pénétrer une telle quantité de matière, les particules parasites issues de l'atmosphère terrestre sont, elles, en grande partie éliminées.



↑ *Ixodes ricinus*
est l'espèce de
tique qui pique le
plus les humains.

TIQUES SOUS HAUTE SURVEILLANCE

Avec le printemps sont revenues les tiques, qui peuvent transmettre aux humains la maladie de Lyme, très grave, mais aussi d'autres affections. Pour améliorer les traitements, les chercheurs essaient de mieux comprendre ces acariens.

➞ NICOLAS GUILLAS

Les tiques sont des acariens qui se nourrissent du sang des humains et de la faune, sauvage ou domestique. Elles piquent 1 personne sur 20 chaque année en France, infectant environ 50 000 personnes par la bactérie responsable de la maladie de Lyme. Les individus les plus exposés sont les enfants, qui jouent dans la nature et les parcs, mais aussi les plus de 50 ans, qui jardinent ou se promènent. Car les tiques, contrairement à une idée reçue, ne sévissent pas seulement en forêt ! Elles vivent dans les jardins (1 piqûre sur 4) et entrent dans les maisons, *via* les rongeurs ou les chiens.

Le cycle de développement d'une tique est connu. L'acarien pond ses œufs dans la nature. L'œuf devient une larve, qui attend, postée sur une herbe. Dès qu'un animal comme un rongeur ou un oiseau passe, la larve



Même si la tique n'a laissé aucune trace sur la peau, la maladie peut se révéler plus de six mois après.

s'y agrippe. Elle se nourrit ensuite de son sang, avant de se détacher et de se transformer en nymphe. Après sa première mue, la tique attend qu'un nouvel hôte passe à sa portée pour s'y accrocher. Elle prend alors un second repas de sang, qui lui permet de devenir adulte. Une tique gorgée de sang peut ainsi multiplier son volume par 40 !

Sa piqûre est indolore, car sa salive contient des antidouleurs. Cependant, en se nourrissant du sang des êtres vivants, la tique peut transmettre des virus et des bactéries – y compris lorsqu'elle est une nymphe d'environ 1 mm de diamètre, difficilement repérable.

Dans la grande majorité des cas, aucun pathogène n'est transmis. Une étude de l'Inrae portant sur 2000 tiques ayant piqué un humain (programme CiTIQUE¹, voir page suivante) montre que 27,7 % d'entre elles étaient porteuses d'un agent potentiellement pathogène. Mais celui-ci n'est pas forcément transmis à leur hôte. Ainsi, le risque de contamination à la suite d'une

piqûre reste très faible – entre 1 % et 4 %, selon les régions et l'environnement. Dans tous les cas, il faut être vigilant et retirer rapidement chaque tique de sa peau.

La maladie de Lyme tardive

La principale affection que les tiques provoquent chez l'humain est la maladie de Lyme – « borréliose de Lyme », de son nom exact, d'après la bactérie *Borrelia burgdorferi*. Elle cause des troubles articulaires et neurologiques.

« Lorsque l'acarien transmet la bactérie *Borrelia burgdorferi*, un anneau inflammatoire se développe autour du point de piqûre », décrit l'immunologiste Hugues Gascan, directeur de recherche au CNRS à Angers et spécialiste de la maladie de Lyme. Si la peau devient rouge, il faut se rendre chez le médecin, qui prescrit un antibiotique. En principe, tout risque est alors écarté. Sauf que...

« Cette forme classique de la maladie concerne environ 90 % des individus, mais un autre scénario existe, alerte Hugues Gascan. On peut contracter la maladie de Lyme sans le savoir ! Même si la tique n'a laissé aucune trace sur la peau, la maladie peut se révéler plus de six mois après. » Or les traitements par antibiotiques, prescrits trop tardivement, ne permettent pas toujours d'éliminer l'affection.

On a longtemps douté de cette forme chronique de la maladie, diagnostiquant à tort des troubles psychosomatiques chez des personnes qui présentaient durant plusieurs années des troubles articulaires ou neurologiques difficiles à soigner. Et il a fallu attendre 2025 pour que la Haute Autorité de santé la décrive enfin, sous le terme de « *Post-treatment Lyme disease syndrome* » (PTLDS), aussi appelé « Lyme long ». « Cette forme de la maladie se définit notamment par le souvenir d'une piqûre, des douleurs articulaires, une fatigue qui désocialise et un "brouillard" cérébral, c'est-à-dire des problèmes de concentration et de mémoire », résume Hugues Gascan.

Des difficultés de diagnostic

Si la maladie est désormais identifiée, son diagnostic demeure difficile. Les tests actuels, fondés sur la détection des anticorps, ne sont pas fiables à 100 %. Ils peuvent se révéler négatifs au début de l'infection ou malaisés à interpréter dans les formes tardives. Aucun examen ne permet de détecter avec certitude la présence de la bactérie *B. burgdorferi* dans l'organisme.

Les recherches de Sébastien Bontemps-Gallo, bactériologiste au Centre d'infection et d'immunité de Lille², pourraient aider à établir un diagnostic fiable. →

↓ Tique sous l'œil droit d'un manakin à tête d'or (*Dixiphia erythrocephala*) de Guyane.



© FABRICE MONIA / BIOGÉSCIENCES-DUJON / CNRS IMAGES

“ Notre système immunitaire peine à reconnaître la bactérie *Borrelia burgdorferi*, qui transmet la maladie de Lyme.

+ 80 000 TIQUES DANS LES CONGÉLATEURS

Sans attendre test, vaccin et traitement contre la borréliose de Lyme, il est essentiel de surveiller le développement des différentes espèces de tiques et des nombreux virus et bactéries dont elles sont porteuses. À Champenoux, non loin de Nancy, la microbiologiste de l'Inrae Pascale Frey-Klett coordonne le programme national de recherche participative CiTIQUE depuis 2016.

Et c'est un succès. Plus de 115 000 signalements de piqûres ont été recueillis (via une application, un site ou un formulaire) par des citoyens et des professionnels depuis 2017. Environ 80 000 tiques ont été expédiées de toute la France vers les quatre congélateurs du laboratoire de l'Inrae.

« Connaître la répartition géographique des tiques ainsi que leur contenu en agents pathogènes est important pour aider les médecins à interpréter certains symptômes », pointe Pascale Frey-Klett.

Le programme forme le public et les professionnels, notamment de la forêt, à la prévention contre les tiques partout en France. Et ceux qui le souhaitent peuvent même partager la vie des chercheurs pendant deux jours sur place, manipuler avec eux les pipettes et apprendre à identifier sous le microscope les espèces de tiques.

En France, on en compte une quarantaine, dont *Ixodes ricinus*, qui transmet la bactérie *Borrelia burgdorferi*. Mais, pour l'heure, le programme CiTIQUE n'a trouvé que sept espèces piquant les humains – les autres se nourrissant sur les animaux.

Depuis peu, c'est l'espèce *Hyalomma marginatum* (tique à pattes rayées) qui attire l'attention des chercheurs de l'Inrae. « Cette espèce a piqué des humains en France, précise Jonas Durand, tiquologue et ingénieur de recherche Inrae à Champenoux. Installée dans le Sud-Est depuis quelques années, elle est vectrice du virus de la fièvre hémorragique de Crimée-Congo, potentiellement létale pour l'homme. »

Ce virus a été détecté chez des tiques d'un élevage bovin, dans les Pyrénées, en 2023. Pour mieux repérer la tique à pattes rayées, Jonas Durand collabore avec ses confrères du Cirad, à Montpellier. À l'unité mixte de recherche Astre, les projets HolisTique, puis Arche, ciblent l'acarien invasif. « L'an dernier, parmi 800 tiques du sud de la France que nous avons analysées, 5 % étaient des *Hyalomma marginatum* », révèle le tiquologue.

Comme d'autres espèces, celle-ci remonte vers le nord. Le réchauffement climatique rebat les cartes de répartition des tiques et celles de nos maladies émergentes.

1. Voir : citique.fr/signaler-une-piqure

→ Il étudie des tiques de l'espèce *Ixodes ricinus*, communément appelée « tique du mouton » – celle qui nous pique le plus. « Nous ne connaissons pas encore les biomarqueurs spécifiques des souches de *B. burgdorferi* responsable de la maladie de Lyme en Europe, précise-t-il. Nous les cherchons en étudiant le processus infectieux, c'est-à-dire comment la bactérie circule de la tique à l'humain. »

Capacité d'adaptation et camouflage

Sébastien Bontemps-Gallo a compris l'incroyable capacité de *B. burgdorferi* à survivre, vivre et se multiplier dans des organismes que tout oppose : l'acarien et le mammifère. Le premier vit à la température du milieu ambiant ; le second maintient sa chaleur interne à 37 °C. Pourtant, la bactérie passe de l'un à l'autre et les colonise.

Comment fait-elle ? « Entre deux repas de sang, la tique attend très longtemps, observe Sébastien Bontemps-Gallo. Dans l'intestin de cette tique, la bactérie *B. burgdorferi* doit survivre. Dès que du sang arrive, elle migre vers les glandes salivaires de la tique, pour être transmise à l'animal piqué,



© BERTRAND NICOLAS / INRAE

↑ Dans l'attente de leur analyse, les tiques reçues par courrier dans le cadre du programme de recherche participative CiTIQUE sont stockées dans un congélateur, à la « tiquothèque » du centre Inrae de Champenoux (Meurthe-et-Moselle).



© OLIVIER DUROU / FLORIAN BINETRU / AVESEC / CNRS IMAGES

↗ La diversité des espèces de tiques présentes en Guyane.

puis le coloniser. » Cette capacité d'adaptation de la bactérie est liée à l'expression de ses gènes. « Au laboratoire, explique le bactériologiste, nous supprimons un gène de la bactérie, puis nous remplaçons cette bactérie (mutante) dans la tique. Nous observons si elle résiste aux défenses immunitaires de la tique, puis si elle la colonise. »

Le second atout de *B. burgdorferi* est son camouflage. Notre système immunitaire peut peiner à la reconnaître durablement. Lorsqu'un gène s'exprime, il se traduit en protéines. Celles à la surface de la bactérie, formant son « manteau moléculaire », sont les premières que repère le système immunitaire. Mais « *B. burgdorferi* parvient à échapper aux défenses immunitaires de l'hôte, car elle se revêt de nombreuses protéines de surface différentes », poursuit Sébastien Bontemps-Gallo. Comme *Borrelia* « change de peau », elle complique l'action des anticorps.

Comprendre ce qui se passe à cette échelle est important pour concevoir des tests de détection de la bactérie, mais aussi des vaccins. L'une des protéines de surface de *B. burgdorferi*, appelée OspA, est la cible des stratégies

27,7 %
des tiques portent un agent
potentiellement pathogène

vaccinales. Et plusieurs acteurs avancent dans la recherche d'un vaccin contre la maladie de Lyme. C'est le cas de la société française Valneva, en partenariat avec Pfizer. À l'Institut Pasteur, la chercheuse Valérie Choumet a également obtenu des résultats prometteurs sur un candidat vaccin.

Des globules blancs leurrés

Mais peut-on espérer un jour disposer d'un traitement contre la borréliose de Lyme ? Depuis huit ans, Hugues Gascan, membre du conseil scientifique de la Fédération française contre les maladies vectorielles à tiques, mène des recherches qui pourraient aboutir à un médicament. « Pour savoir si la bactérie peut demeurer présente à bas bruit dans l'organisme plusieurs années après une morsure de tique, explique-t-il, nous avons cherché à identifier des marqueurs biologiques de la maladie chez des patients qui souffrent d'un Lyme long. »

L'immunologiste s'intéresse au fonctionnement des globules blancs, les cellules du système immunitaire. Il a noté que chez les patients atteints de Lyme long, →

“ Nous cherchons un médicament pour que la réponse immunitaire fonctionne à nouveau pleinement.

→ certains globules blancs, les monocytes, se font leurrer par la bactérie *B. burgdorferi*. Dès qu'ils la détectent, ils sécrètent des hormones, les cytokines. Le rôle de ces molécules, dont environ 200 sont connues, consiste à stimuler la réponse immunitaire pour aider à la guérison. Mais quelques-unes jouent un rôle inverse et inhibent la réponse immunitaire pour éviter des phénomènes d'emballement.

Problème : dans le cas du Lyme long, les patients vont produire en abondance certaines de ces molécules antagonistes, qui contrecarrent la réponse immunitaire, empêchant ainsi la guérison. «*Nous cherchons un médicament qui neutralise cet effet contre-productif pour que la réponse immunitaire fonctionne à nouveau pleinement*», précise Hugues Gascan.

Il conduit ces recherches sur un candidat médicament avec sa collègue Sylvie Chevalier, maîtresse de conférences universitaire et praticienne hospitalière

au CHU d'Angers, et avec le docteur Raouf Ghazzi, de l'hôpital de Lannemezan (Hautes-Pyrénées), spécialiste reconnu des formes complexes de la maladie de Lyme. De premiers tests sont en cours chez la souris, en collaboration avec Monica E. Embers, professeure de microbiologie et d'immunologie à l'université Tulane, en Louisiane, et experte renommée internationalement dans le domaine.

L'idée est d'utiliser la combinaison d'un nouveau biomédicament capable de lever l'inhibition de la réponse immunitaire associé à des antibiotiques, afin d'éliminer la présence probable de bactéries résiduelles en cas de Lyme long. La Société d'accélération du transfert de technologies (SATT) Ouest Valorisation, l'opérateur de valorisation de la recherche publique en Bretagne et Pays de la Loire, assure le transfert de technologie du projet. ●

1. Voir : citique.fr

2. CIIL, unité CNRS/Inserm/CHU Lille/Institut Pasteur Lille/Univ. de Lille.



PARTAGEZ
CET ARTICLE



À gauche : la réaction cutanée typique de la borréliose de Lyme – un érythème dit «migrant», car il s'étend autour du point de piqure. Ci-dessus et à droite : tique femelle avant et après avoir bu une grande quantité de sang.

DU 7 AU 18
OCTOBRE
2026

Visites !nsolites

cnrs

Entrez dans
les coulisses
du monde de
la recherche !



Du 7 au 18 octobre 2026, le CNRS vous offre l'opportunité d'accéder à des laboratoires et plateformes expérimentales habituellement fermées au public. Glissez-vous dans la peau d'un paléontologue, passez une nuit à l'observatoire du Puy-de-Dôme ou découvrez le supercalculateur Jean-Zay... Tentez votre chance jusqu'au 20 septembre !



SCIENCE&VIE

fête de la
Science



DOSSIER

Astronomie



Pleine lune sur le pas de tir 39B du Kennedy Space Center, le 1^{er} février 2026, avec le module *Orion* de la mission *Artemis 2* au sommet du lanceur *SLS*.



PAGE 20 Pour quelques pas de plus

PAGE 26 À la poursuite des lunes du Système solaire

OBJECTIF LUNES

Aussi fascinante soit-elle, notre Lune n'est ni le plus massif ni le plus étrange des centaines de satellites naturels qui accompagnent des planètes au sein du Système solaire. Leur diversité suscite toujours questionnements des chercheurs et missions spatiales, mais aussi des ambitions moins scientifiques.

© NASA/MARSHALL SPACE FLIGHT CENTER / SART LOIT

POUR QUELQUES PAS DE PLUS

En avril dernier, la mission *Artemis 2* de la Nasa a réussi une prouesse jamais réitérée depuis la fin du programme Apollo, en 1972 : envoyer des astronautes en orbite autour de la Lune – cette fois, quatre, et à plus de 400 000 km de la Terre, un record. Grâce au succès de cette mission, les États-Unis ont franchi une étape cruciale vers un objectif bien plus ambitieux, le retour d'êtres humains sur la Lune.

Cependant, loin de l'emballement médiatique suscité par *Artemis 2* (avec retransmission en direct sur YouTube des images de la surface de la Lune prises par l'équipage), plusieurs autres programmes spatiaux ont investi de façon plus discrète le champ de l'exploration lunaire lors de la dernière décennie. Et la Chine est sans doute le pays qui a engrangé le plus de nouvelles connaissances sur notre satellite naturel à travers les missions *Chang'e* – nommées d'après la déesse de la Lune dans la mythologie chinoise.

Les deux derniers volets de ce programme ont ainsi récolté des échantillons géologiques dans des régions jusqu'alors inexplorées. En 2020, la sonde *Chang'e 5* a rapporté sur Terre 1,7 kg de fragments rocheux. Ceux-ci ont été prélevés dans un secteur de la face visible (toujours orientée vers la Terre) où l'activité volcanique a perduré bien plus longtemps que dans les autres régions lunaires. Puis, en juin 2024, *Chang'e 6* a réalisé une première. La sonde a récolté près de 2 kg de roches

Longtemps délaissée au profit de Mars, la Lune redevient depuis quelques années une terre d'élection pour les puissances spatiales, Chine et États-Unis en tête. Ce regain d'intérêt pourrait permettre à des humains de fouler à nouveau la surface de notre satellite d'ici à 2030.

➡ GRÉGORY FLÉCHET

et de régolithe (très fine couche de poussière recouvrant la surface des planètes sans atmosphère et des satellites naturels) sur la face cachée de la Lune, au niveau du bassin Pôle Sud-Aitken. Cette dépression de 2 500 km de diamètre a été formée par l'impact d'un gigantesque astéroïde.

Des échantillons peu représentatifs

Avant ces deux engins chinois, seules six missions du programme Apollo et trois sondes du programme soviétique Luna étaient parvenues à rapporter des échantillons du sol lunaire sur la Terre. Au total, les Américains ont recueilli 382 kg de roches, contre à peine 300 g pour les missions soviétiques.

« Ces campagnes d'échantillonnage, menées entre la fin des années 1960 et le milieu des années 1970, se sont toutes déroulées sur la face visible de notre satellite et à proximité de l'équateur, sur des mers lunaires qui sont en fait de grandes plaines volcaniques très lisses où il est facile d'alunir, note Jessica Flahaut, chargée de recherche CNRS au Centre de recherches pétrographiques et géochimiques¹ de Nancy. Or, grâce à la cartographie détaillée de la surface de la Lune réalisée dès la fin des années 1990 par plusieurs observatoires placés en orbite autour de celle-ci, on sait désormais que l'ensemble des échantillons

On sait désormais que les échantillons d'Apollo ont été recueillis au niveau d'une anomalie géochimique.



La mission *Artemis 2* a livré de nombreux clichés de la Lune – ici, le 6 avril 2026. Ces images aident notamment les scientifiques à mieux comprendre la composition de sa surface et sa géologie.

d'Apollo ont été recueillis au niveau d'une anomalie géochimique, qui ne donne donc qu'un aperçu limité de la longue histoire géologique de notre satellite. »

L'analyse des roches collectées dans le cratère Apollo du bassin Pôle Sud-Aitken par *Chang'e 6* a confirmé l'âge très ancien de ce bassin d'impact, soit un peu plus de 4,35 milliards d'années. L'étude des échantillons a aussi permis de dater certains des rares épisodes volcaniques survenus autour de 4,2 et 2,8 milliards d'années sur la face cachée de la Lune. La composition chimique des roches basaltiques formées par les coulées de lave résultant de ce volcanisme a également été caractérisée.

« Bien que cette composition chimique soit différente de celle des basaltes de la face visible, elle s'approche de celle de roches basaltiques déjà échantillonnées par Apollo 12. Cela tend à montrer l'existence de réservoirs chimiques similaires formés dans le manteau lors de la cristallisation de l'océan de magma qui recouvrait la totalité de la Lune au début de son existence », souligne Pierre-Yves Meslin, professeur de cosmochimie à l'université de Toulouse, au sein de l'Institut

de recherche en astrophysique et planétologie (Irap)². Le volcanisme le plus ancien détecté par *Chang'e 6* a pu être induit par la présence d'éléments radioactifs issus du manteau lunaire. Mais cette source de chauffage radioactive ne peut pas expliquer le volcanisme plus récent documenté par les deux dernières missions chinoises. Ce qui laisse ouverte la question de l'origine de ce dernier³.

Confirmer l'existence d'eau lunaire

En attendant de pouvoir élucider cette énigme, la Chine compte repartir sur la Lune d'ici à la fin de l'été. À travers cette nouvelle mission, baptisée *Chang'e 7*, elle entend devenir la première nation à se poser au niveau du pôle Sud, dans le but d'y confirmer l'existence d'eau. « Jusqu'à ce qu'on détecte en 1998 des concentrations d'hydrogène plus importantes au niveau des régions polaires, avec la sonde spatiale Lunar Prospector, on considérait que l'eau était inexistante sur notre satellite », rappelle Jessica Flahaut.

En effet, la formation de la Lune résulte de la collision d'une petite planète de la taille de Mars avec la Terre, il y a environ 4,5 milliards d'années. Et la communauté des planétologues estime que cet impact géant →

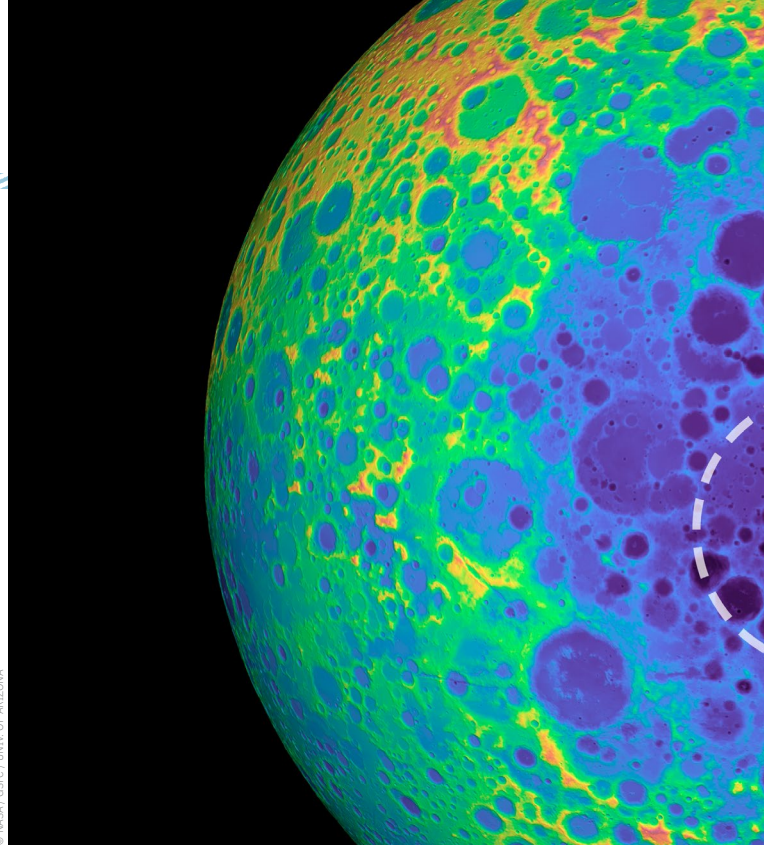
a conduit à la formation d'un anneau de vapeur très chaud, dont seuls les composants les plus réfractaires ont pu condenser pour former la Lune. Quant aux espèces volatiles, dont l'eau, elles ont été principalement réintégrées à la Terre.

Pourtant, de l'eau piégée sous forme de glace a été détectée à proximité du pôle Sud lunaire, dans des cratères constamment plongés dans l'ombre. Là, la température de surface avoisine en permanence -230°C .

C'est l'un de ces cratères que compte investiguer *Chang'e 7*. Pour cela, la mission chinoise aura recours à une sorte de robot sauteur, conçu spécialement pour progresser sur les pentes à 60% de sa paroi interne. «La possibilité de collecter puis d'analyser l'eau provenant de cet environnement préservé laisse entrevoir la possibilité de percer le mystère de l'origine de l'eau sur notre propre planète», s'enthousiasme Jessica Flahaut.

La plupart des puissances spatiales voient également dans la glace d'eau lunaire une ressource exploitable afin de faciliter l'implantation des futures bases lunaires. Une fois extraite, cette eau

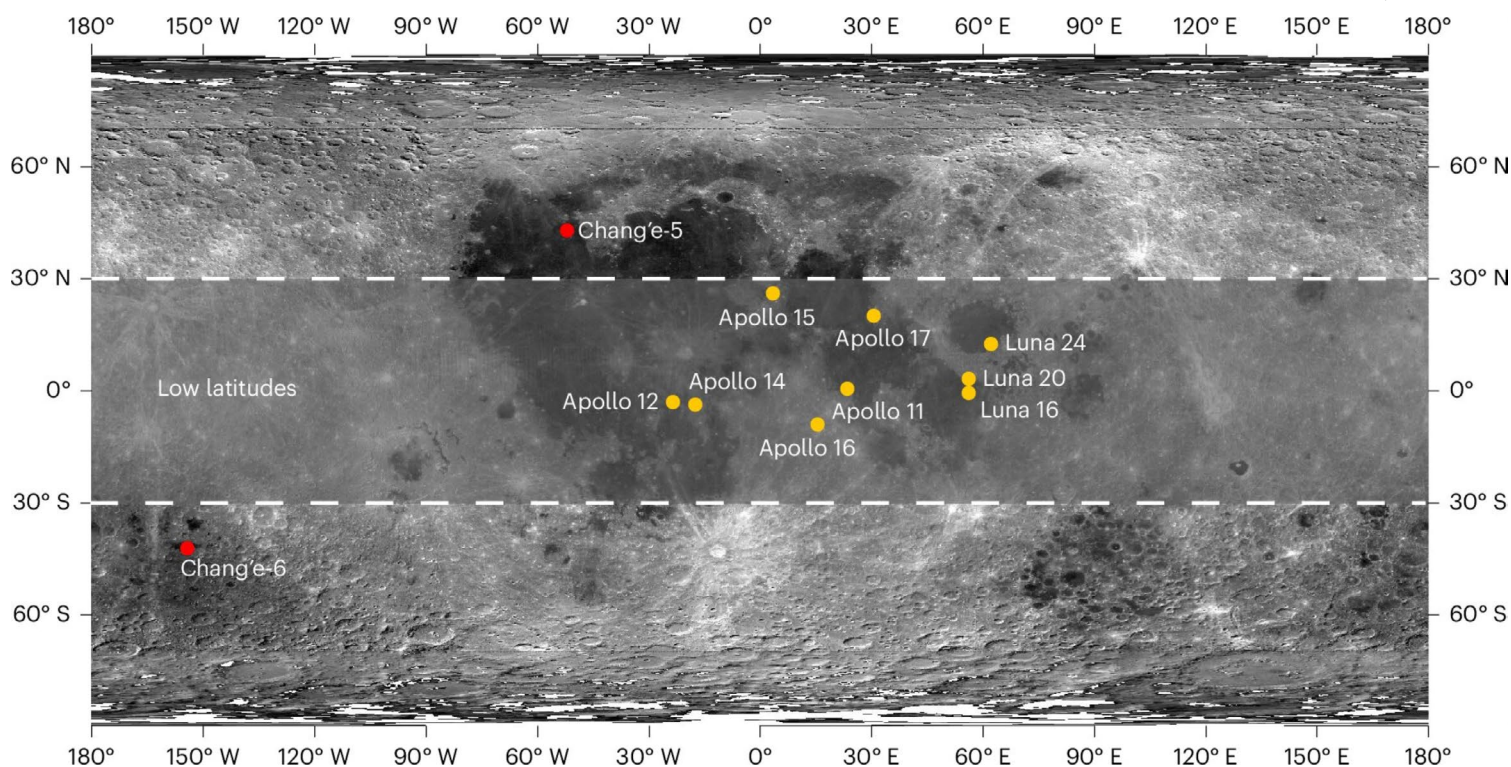
© NASA / GSEC / UNIV. OF ARIZONA

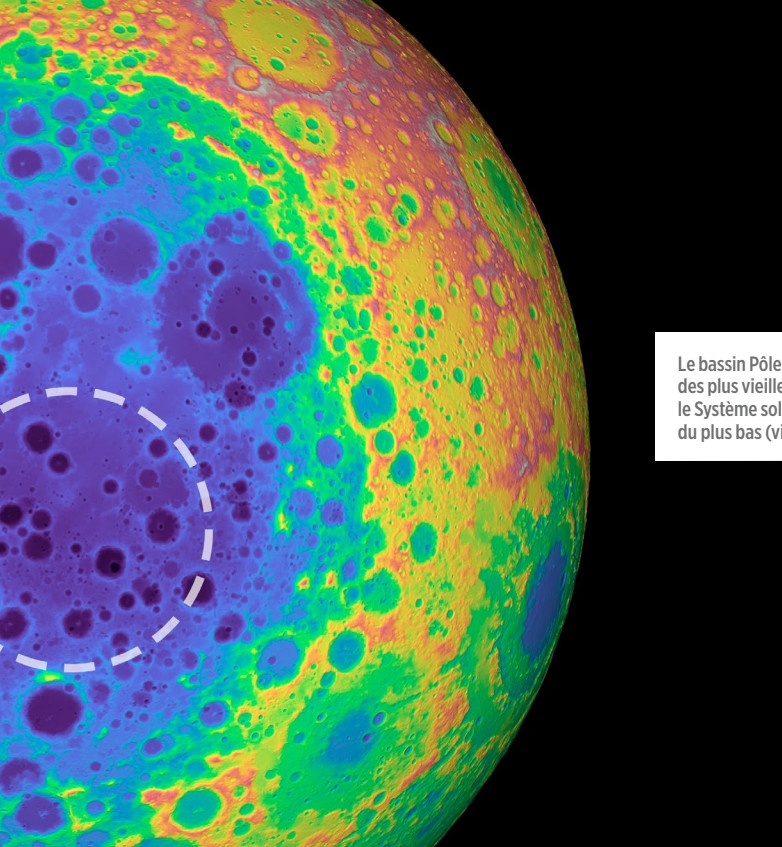


Notre satellite constitue une cible de choix pour de futures campagnes de prospection minière.

Localisation des sites des prélèvements réalisés sur la Lune. Les missions *Apollo* (États-Unis) et *Luna* (Union soviétique) ont aluni à des latitudes basses, et les missions *Chang'e* (Chine) à des latitudes moyennes.

IMAGE : LIN HONGLEI, IGGCAS





Le bassin Pôle Sud-Aitken, sur la face cachée, est l'une des plus vieilles et plus grandes traces d'impact dans le Système solaire. Les couleurs traduisent les altitudes, du plus bas (violet) au plus haut (rouge).

pourrait par exemple servir à produire de l'oxygène, de l'eau liquide consommable par les astronautes des futures bases, ou encore du carburant pour fusée (en séparant l'oxygène de l'hydrogène).

C'est d'ailleurs pour étudier cette possibilité qu'il est prévu que la mission *Artemis 4* atterrisse au pôle Sud. Désormais programmée pour 2028, elle doit être la première à déposer des humains à la surface de la Lune depuis *Apollo 17*, en décembre 1972.

Choisir le pôle Sud pour alunir présente d'autres avantages, explique Pierre-Yves Meslin : « À ces hautes latitudes, il existe aussi quelques endroits à proximité de cratères intéressants où il fait presque jour en permanence, ce qui permet d'y utiliser le soleil comme source d'énergie tout en se protégeant des températures glaciales de la nuit lunaire, qui dure l'équivalent de 14,8 journées terrestres ».

Mais, pour l'heure, nous ne disposons pas d'informations précises sur le niveau d'abondance de la glace d'eau dans les cratères lunaires à l'échelle de notre satellite entier. Aussi le chercheur de l'Irap plaide-t-il pour qu'elle reste un objet d'étude scientifique uniquement.

Des ressources critiques

Outre l'eau, la Lune semble receler de nombreuses ressources. Qui pourraient constituer un véritable catalyseur de son exploration, estime l'astrophysicien Joseph Silk, professeur émérite de cosmologie à Sorbonne Université : « L'incessant bombardement de météorites qu'a connu la Lune pendant plusieurs milliards d'années a conduit à l'accumulation de certains éléments métalliques à sa surface. Pour cette raison, notre satellite constitue aujourd'hui une cible de choix pour de futures campagnes de prospection minière ». La Lune contiendrait par exemple quelque 30 000 tonnes de métaux critiques (palladium,

platine, iridium...) accumulées au fond des nombreux cratères façonnés par les astéroïdes, indique une récente étude publiée par une équipe anglo-saxonne⁴. Au prix actuel du marché de ces métaux relativement rares, cela représenterait, selon ces chercheurs, une valeur potentielle d'environ 1 000 milliards de dollars.

De grandes quantités d'hélium 3 se seraient également accumulées dans la couche supérieure du sol lunaire exposé en permanence au vent solaire. Extrêmement rare sur notre planète (son prix atteint 19 millions de dollars le kilo), l'hélium 3 pourrait servir de combustible dans d'hypothétiques réacteurs à fusion nucléaire.

Néanmoins, c'est surtout dans la perspective de développer l'informatique quantique que la start-up américaine Interlune projette d'extraire cet élément du régolithe à l'horizon 2027. À ce stade, l'entreprise estime qu'il lui faudrait toutefois récolter entre 100 000 et 1 million de tonnes de la poussière lunaire pour espérer recueillir... 1 kg du précieux élément chimique.

Un radiotélescope géant

En théorie, la Lune constitue aussi un site idéal pour installer de futurs observatoires astronomiques de très grande envergure, car elle ne possède pas de véritable atmosphère et l'activité géologique y est limitée. De plus, précise Joseph Silk, « sa face cachée est protégée de toutes les ondes radio provenant de la Terre, émises notamment par les antennes de téléphonie mobile et les radars maritimes ».

Le professeur de cosmologie souhaite mettre à profit ces qualités pour installer un gigantesque radiotélescope basse fréquence sur la face cachée de la Lune. Une telle installation serait en mesure d'observer les âges sombres du cosmos – période de l'histoire de l'Univers située entre l'émission du fond diffus cosmologique, 380 000 ans après le Big Bang, et l'apparition des toutes premières étoiles, 100 millions d'années plus tard.

Deux solutions sont déjà à l'étude pour relever ce défi. La première s'appuierait sur la topographie lunaire, en installant le télescope dans un cratère – à l'image de l'ancien radiotélescope d'Arecibo, situé dans une dépression, sur l'île de Porto Rico. L'autre stratégie, sans doute plus facile à mettre en œuvre, consisterait à déployer un vaste réseau d'antennes sur plusieurs centaines de kilomètres carrés – à l'instar du radiotélescope géant Alma, dans le désert d'Atacama, au Chili. →

Il est encore difficile de trancher quant à la présence d'une graine solide au sein du noyau lunaire.

« Les Américains étudient déjà la possibilité de fabriquer ces antennes sur la Lune à partir du régolithe, pour s'affranchir du coût prohibitif que représenterait l'acheminement depuis notre planète de centaines de milliers de ces dispositifs de détection. Mais il faudra sans doute encore patienter 30 à 40 ans pour qu'un radiotélescope géant commence à observer l'Univers depuis la Lune », admet Joseph Silk.

Ce délai reste toutefois dans la moyenne de celui des grandes installations scientifiques terrestres. Par exemple, le Futur collisionneur circulaire ne doit pas succéder à l'actuel Grand collisionneur de hadrons du Cern, situé près de Genève, avant la fin des années... 2040.

Au cœur de la Lune

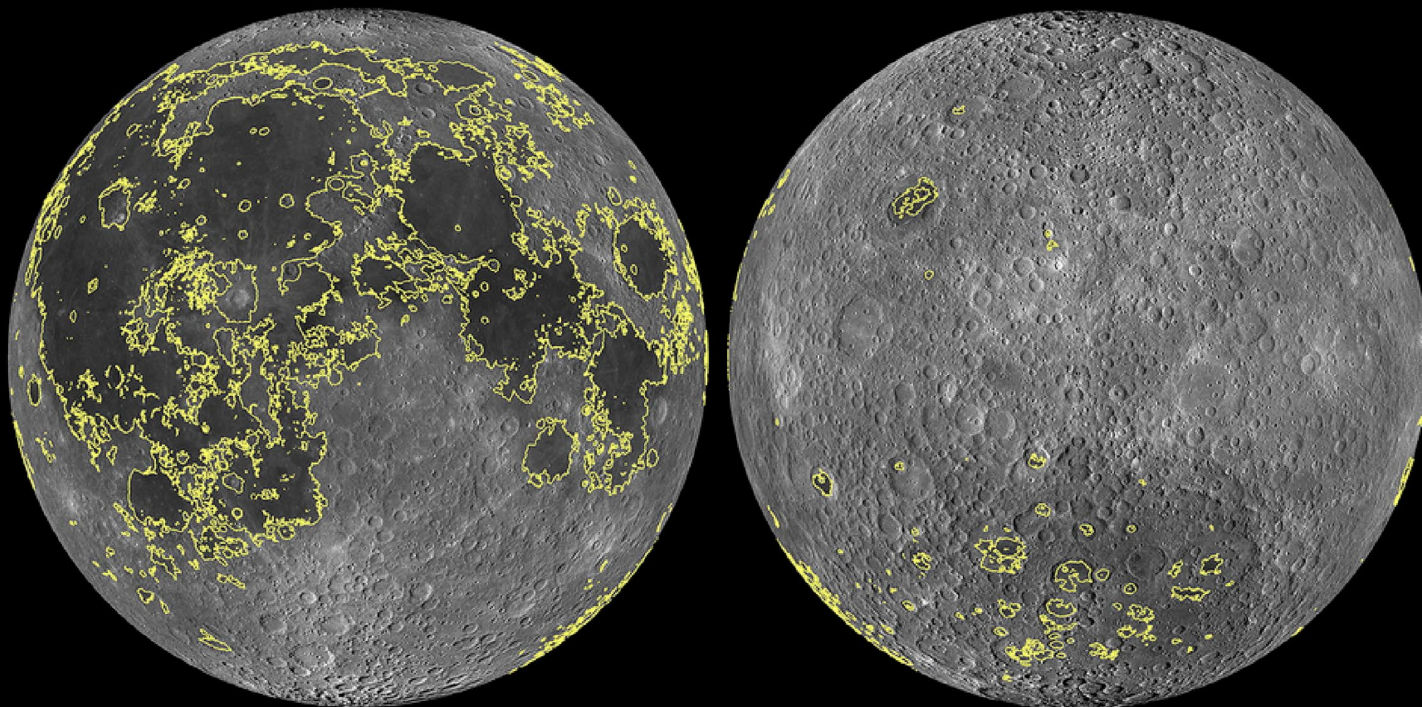
Quand certains voient dans la face cachée de la Lune l'environnement idéal pour révéler les premiers instants du cosmos, d'autres, à l'instar de Nicolas Rambaux, scrutent les profondeurs de notre satellite afin de percer

les mystères de sa structure interne. Pour mener ses investigations, ce professeur de Sorbonne Université au sein du Laboratoire temps espace⁵ s'appuie sur les données issues de la télémétrie laser-Lune.

« Cela consiste à tirer sur différents rétro-rélecteurs (sortes de miroirs installés sur la Lune par des missions spatiales telles qu'Apollo ou Luna) à l'aide du faisceau laser d'un télescope situé sur le plateau de Calern, dans les Alpes-Maritimes, détaille le spécialiste de la mécanique céleste. L'analyse des signaux lumineux renvoyés vers la Terre par chaque rétro-rélecteur permet ensuite d'évaluer avec une grande précision les mouvements de rotation de notre satellite, à partir desquels il est ensuite possible de déduire la taille et la composition de son noyau interne. »

L'équipe de Nicolas Rambaux a croisé ces informations avec la modélisation des forces de pression qui s'exercent à l'interface du noyau et du manteau de la Lune. Elle a ainsi calculé que son noyau avait un diamètre d'environ 760 km et était majoritairement composé d'un métal à la densité proche de celle du fer.

Distribution des dépôts volcaniques (des plaines basaltiques que les premiers astronomes confondirent avec des mers) sur la Lune : à gauche, sur la face visible ; à droite, sur la face cachée.





Vue d'artiste d'un « village lunaire ». L'électricité des panneaux solaire permet de produire de l'eau potable – en faisant fondre la glace dans le sol –, de l'oxygène et de l'hydrogène servant de carburant.

Les chercheurs ont également réuni des indications sur l'existence d'une graine solide au sein du noyau lunaire⁶. Mais il est encore difficile de trancher définitivement quant à la présence d'une telle structure.

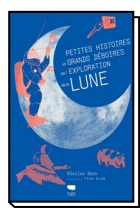
Au fil des prochaines missions d'exploration lunaire, de nouveaux rétroreflecteurs devraient être installés dans des secteurs qui n'en disposent pas encore, comme le pôle Sud. Nicolas Rambaux est donc plein d'espoir : *« En combinant un maillage plus étendu des rétroreflecteurs à la surface de la Lune avec de nouveaux outils de modélisation mieux à même de représenter les phénomènes de marées qui s'y déroulent, nous devrions parvenir à confirmer l'existence de cette graine solide ».*

La sélénographie, qui étudie la surface et le relief de la Lune, a permis de cartographier l'intégralité des deux faces de notre satellite dès la fin des années 1950. Mais, pour l'heure, celui-ci n'a pas dévoilé tous les mystères de sa structure interne. Ce qui ne devrait pas manquer de stimuler la recherche scientifique dédiée à l'étude de la Lune pour de nombreuses années encore. ●



À LIRE

Retour sur la Lune
– Le prochain grand pas de l'humanité,
Joseph Silk,
CNRS Éditions,
256 pages, 2023



Petites Histoires et grands déboires de l'exploration de la Lune, Nicolas Beck, Delachaux et Niestlé, 128 pages, 2026

1. CRPG, unité CNRS/Université de Lorraine.
2. Unité CNRS/Université de Toulouse/Cnes.
3. Voir : doi.org/10.1038/s41586-024-08382-0
4. Voir : doi.org/10.1016/j.pss.2025.106129
5. LTE, unité CNRS/Observatoire de Paris-PSL/ Sorbonne Université.
6. Voir : doi.org/10.1038/s41586-023-05935-7

À LA POURSUITE DES LUNES DU SYSTÈME SOLAIRE

Janvier 1610 : Galilée, grâce à la lunette qu'il a conçue, aperçoit quatre points brillants auprès de Jupiter. Des étoiles ? Impossible, puisque ces points, jour après jour, suivent la planète. Ils en sont donc des satellites ! Voilà comment furent observées pour la première fois des lunes... autres que la Lune. Depuis, pas moins de 111 autres compagnes de Jupiter ont été découvertes, dont 18 attestées rien qu'en 2026 par l'Union astronomique internationale. Le nombre de lunes connues des planètes du Système solaire augmente ainsi sans cesse – seules Mercure et Vénus en sont dépourvues. Le point sur celles qui focalisent les regards de la science.

La diversité des lunes galiléennes

Jupiter est la plus grosse planète du Système solaire. Ses lunes les plus massives sont celles-là mêmes découvertes par Galilée – d'où leur nom de satellites galiléens.

Les deux plus proches de la géante, Io et Europe, sont ainsi soumises à ses forces de marée titanesques, qui imposent déformations et frictions à ces corps solides. L'énergie produite se libère sous forme de chaleur, via une importante activité volcanique. Io est le corps le plus actif géologiquement de tout le Système solaire ! Les rejets de soufre de ses nombreux volcans la recouvrent de teintes jaunâtres caractéristiques.

Europe est, quant à elle, l'une des cibles privilégiées des exobiologistes, car elle abrite un océan d'eau liquide sous une épaisse croûte de glace. En raison du volcanisme induit par les effets de marée dus à la gravité de Jupiter, il est possible que ces fonds océaniques abritent des cheminées hydrothermales analogues à celles qu'on rencontre dans les abysses terrestres.

On sait que des écosystèmes entiers prospèrent dans ces conditions sur notre planète, loin de toute lumière, uniquement grâce à la chaleur et aux nutriments apportés par le volcanisme. Si cela est possible sur la Terre, pourquoi pas sur Europe ?

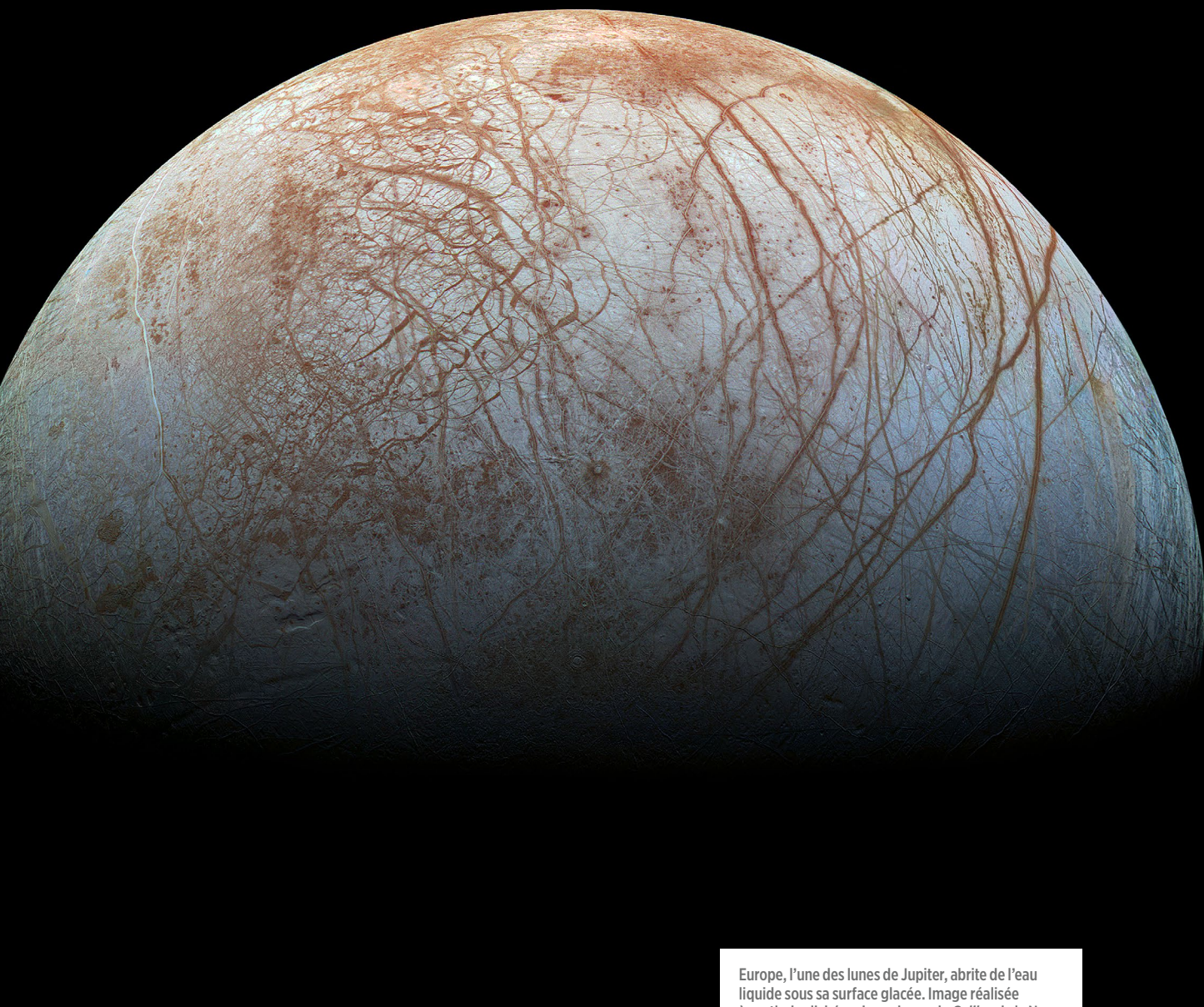
Plus de 400 satellites naturels connus orbitent autour de planètes du Système solaire. Entre la banquise XXL sur Europe, les volcans hyperactifs sur Io ou le cycle du méthane sur Titan, leurs paysages évoquent des décors de science-fiction. Sondes, missions d'exploration et télescopes permettent de mieux comprendre la variété et les caractéristiques de ces lunes, tout en affinant sans cesse leurs différents modèles de formation.

✎ MAXIME FLOURIOT

Les deux autres lunes galiléennes, Ganymède et Callisto, sont également les plus massives et les plus éloignées de Jupiter. « On a quasiment la même fraction de glace dans les deux lunes », remarque Yannis Bennacer, doctorant au Laboratoire d'astrophysique de Marseille¹ et spécialiste des lunes galiléennes.

Néanmoins, Ganymède et Callisto sont moins denses que Io et Europe : « À mesure que l'on s'éloigne de Jupiter, les lunes sont globalement moins denses, avec moins de métaux et une plus forte concentration en glaces ».

Ces deux corps sont toutefois très dissemblables, tant en surface qu'en profondeur, précise le chercheur : « Certaines régions de la surface de Ganymède apparaissent peu cratérisées et très brillantes, suggérant une activité géologique plutôt récente ». Son intérieur est totalement différencié, avec des couches distinctes superposées à la façon d'un oignon, comme pour les planètes telluriques (croûte, manteau, noyau, etc.). À l'opposé, l'intérieur de Callisto n'est que « partiellement différencié. On sait qu'il



Europe, l'une des lunes de Jupiter, abrite de l'eau liquide sous sa surface glacée. Image réalisée à partir de clichés pris par la sonde *Galileo* de la Nasa à la fin des années 1990.

y a eu très peu d'épisodes de fonte de glace d'eau à l'intérieur». Or ce sont précisément ces mécanismes qui permettent à l'eau de remonter vers la surface et aux matériaux plus denses de descendre en profondeur, produisant des couches homogènes et distinctes. Par ailleurs, la surface très cratérisée (donc très ancienne) de Callisto témoigne de son absence de passé géologique.

Lancée par l'Agence spatiale européenne (Esa) en 2023 et attendue dans le système jovien en 2031, la sonde *Juice* devrait nous apporter de nouvelles données² permettant de mieux comprendre ces satellites galiléens.

Cohabitation avec les anneaux

On dénombre 292 satellites autour de Saturne. Dont seulement 7 affichent un diamètre supérieur à 400 km. Le plus notable est Titan, deuxième plus grande lune de tout le Système solaire après Ganymède – et premier satellite découvert autour de Saturne, en 1655, par Christian Huygens. Il s'agit aussi du seul satellite connu

possédant une atmosphère dense. Cela lui permet d'abriter un véritable cycle du méthane, avec des lacs, des rivières, et même des pluies !

Contrairement à ce qu'on a pu observer pour Jupiter, les lunes les plus proches de Saturne sont les plus riches en glace d'eau. Cette répartition des glaces pointe vers un scénario de formation des lunes saturniennes assez différent de celui des lunes galiléennes. La clé du phénomène est peut-être à chercher dans les anneaux imposants de la géante gazeuse.

« Il est possible que les anneaux étaient, à l'origine, beaucoup plus massifs qu'aujourd'hui et qu'ils aient donné naissance à certaines lunes de Saturne, avance Alice Le Gall, enseignante-chercheuse en planétologie au Laboratoire atmosphères et observations spatiales³. Si on prend les satellites par distance croissante à Saturne, on note que Mimas est plus petit qu'Encelade, qui est plus petit que →

Des traces de composés organiques ont été détectées dans les geysers d'eau liquide d'Encelade.

Téthys, lui-même plus petit que Dioné, qui est inférieur en taille à Rhéa. On dirait les Dalton !»

En plus de leur forte concentration en glace, ces corps sont donc aussi de plus en plus grands et massifs à mesure que l'on s'éloigne de la planète. Ce qui, selon Alice Le Gall, oriente vers une théorie intriquant lesdits anneaux aux satellites de la géante.

« Il a pu y avoir une sorte de naissance échelonnée de ces lunes », expose la chercheuse. Autrement dit, elles se seraient formées au fur et à mesure, en dépouillant les anneaux de leur glace. Ayant eu de moins en moins de matière première à disposition, les satellites les plus jeunes et les plus proches de la planète seraient logiquement les plus petits.

Ces lunes intéressent beaucoup les exobiologistes – notamment Encelade, qui émet des geysers d'eau liquide dans lesquels ont été récemment détectées des traces de composés organiques⁴. Comme dans le cas d'Europe, cela pourrait indiquer la présence, sous la glace, d'un océan liquide abritant des micro-organismes.

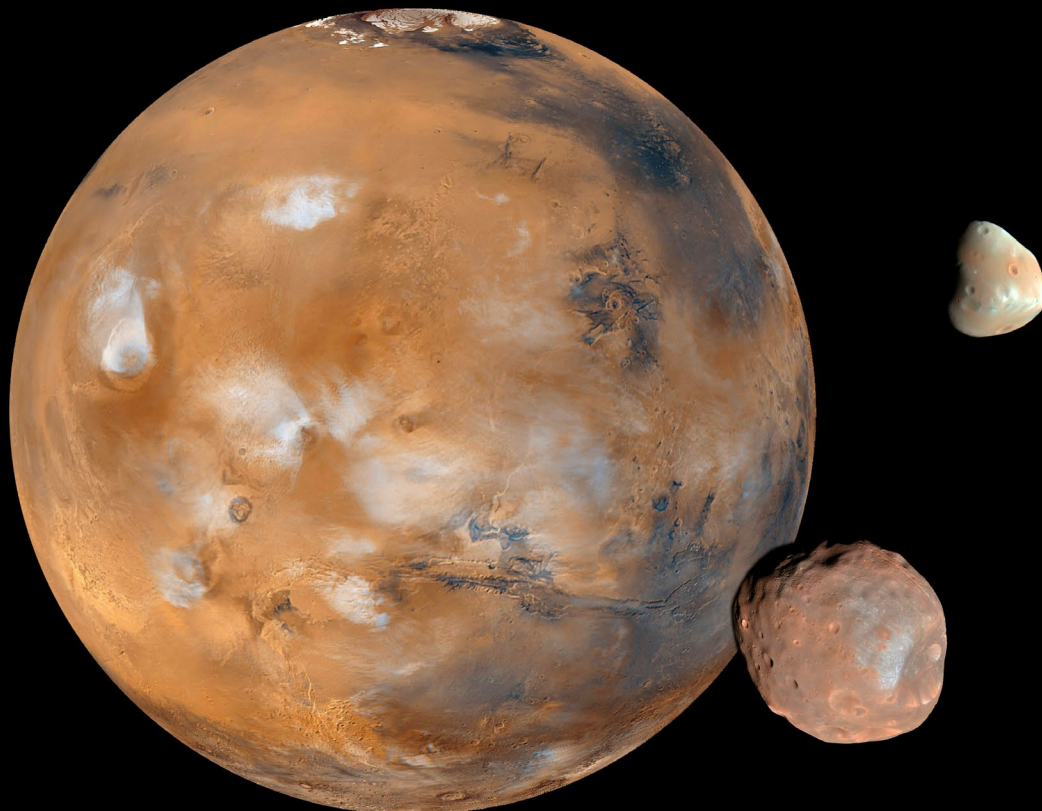
Dans son programme scientifique Voyage 2050, qui prévoit les grandes missions sur la période 2035-2050, l'Esa a d'ailleurs fait d'Encelade une cible prioritaire⁵. La mission L4⁶ aura ainsi pour but d'envoyer une sonde autour d'Encelade et un atterrisseur dessus, pour analyser les geysers. Cet objectif ambitieux nous amènerait à un lancement au début des années 2040, pour une arrivée une décennie plus tard.

Les poids plumes martiens

Phobos et Deimos, qui orbitent autour de Mars, comptent parmi les plus petites lunes du Système solaire : moins de 30km de long pour Phobos et moitié moins pour sa comparse. À la différence de leur planète, ces deux satellites ont été très peu étudiés.

Cela sera bientôt corrigé par la mission *Martian Moons Exploration (MMX)*, menée par la Jaxa, l'agence spatiale japonaise, épaulée par ses homologues française, américaine et allemande. *MMX* doit notamment rapporter des échantillons de Phobos sur la Terre.

Titan est une lune de Saturne. À part la Terre, c'est le seul corps du Système solaire à receler en surface un liquide sous forme stable, qui s'étale ici en lacs dans sa partie nord. Mais il s'agit de méthane et d'éthane (mosaïque de clichés pris par la sonde *Cassini*).



La planète Mars avec ses deux lunes : Phobos, au premier plan, et Deimos.

© NASA / JPL-CALTECH / MSSS / UNIVERSITY OF ARIZONA / MONTAGE : DLR

Pour cette mission, Antonella Barucci, enseignante-chercheuse au Laboratoire d'instrumentation et de recherche en astrophysique⁷, a participé à la conception de l'instrument MMX InfraRed Spectrometer (Mirs). « On a longtemps pensé qu'ils [Phobos et Deimos, Ndlr] pourraient être des astéroïdes capturés par Mars. Ils ont en effet le même **profil spectral** et une composition très similaire aux objets plus primitifs de la ceinture d'astéroïdes [entre les orbites de Mars et de Jupiter, Ndlr] », explique la chercheuse.

Mais cette hypothèse est désormais remise en cause, précise-t-elle. Phobos et Deimos présentent « des orbites très stables autour de Mars, avec une **excentricité** et une inclinaison de l'axe de rotation très petites ». Des caractéristiques généralement observées pour des lunes qui se sont formées à la suite d'un impact avec leur planète.

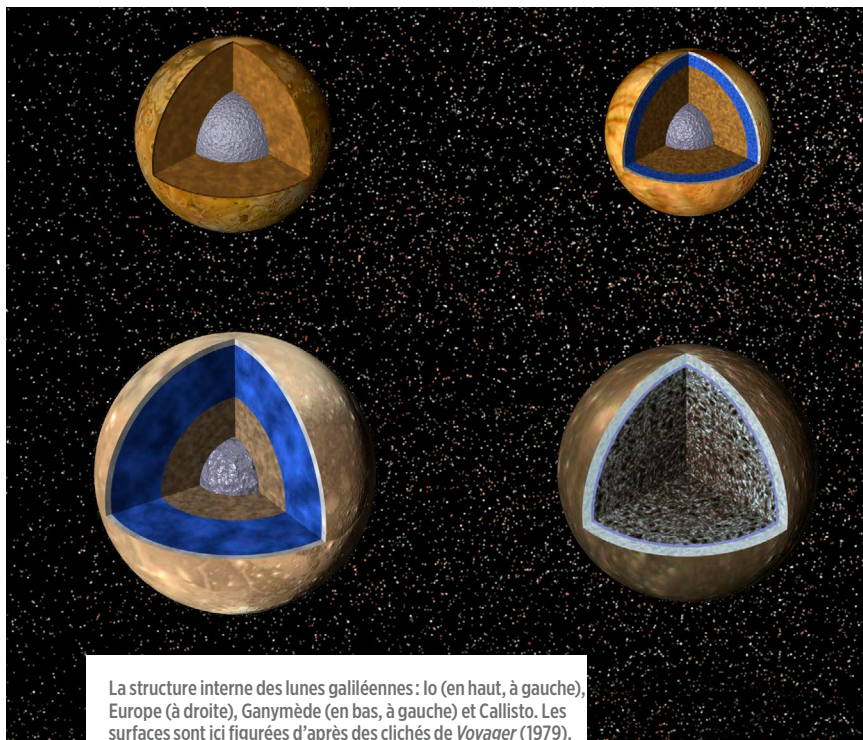
Ces deux scénarios irréconciliables seront au cœur des ambitions de la sonde MMX. Son lancement est programmé en octobre de cette année, pour un retour d'échantillons de Phobos en 2031. ●

🔍 Profil spectral

Spectre de la lumière émise ou réfléchi par un astre. Il permet notamment de déterminer certaines de ses caractéristiques telles que sa température, sa composition chimique interne et/ou celle de son atmosphère, etc.

🔍 Excentricité

Forme plus ou moins allongée de l'orbite d'un corps céleste autour d'un autre.



La structure interne des lunes galiléennes : Io (en haut, à gauche), Europe (à droite), Ganymède (en bas, à gauche) et Callisto. Les surfaces sont ici figurées d'après des clichés de *Voyager* (1979), et les caractéristiques internes, d'après des mesures des champs gravitationnels et magnétiques de la sonde *Galileo*.

1. Lam, unité CNRS/Aix-Marseille Université/Cnes

2. Voir : tinyurl.com/juice-jupiter

3. Latmos, unité CNRS/Sorbonne Université/Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines

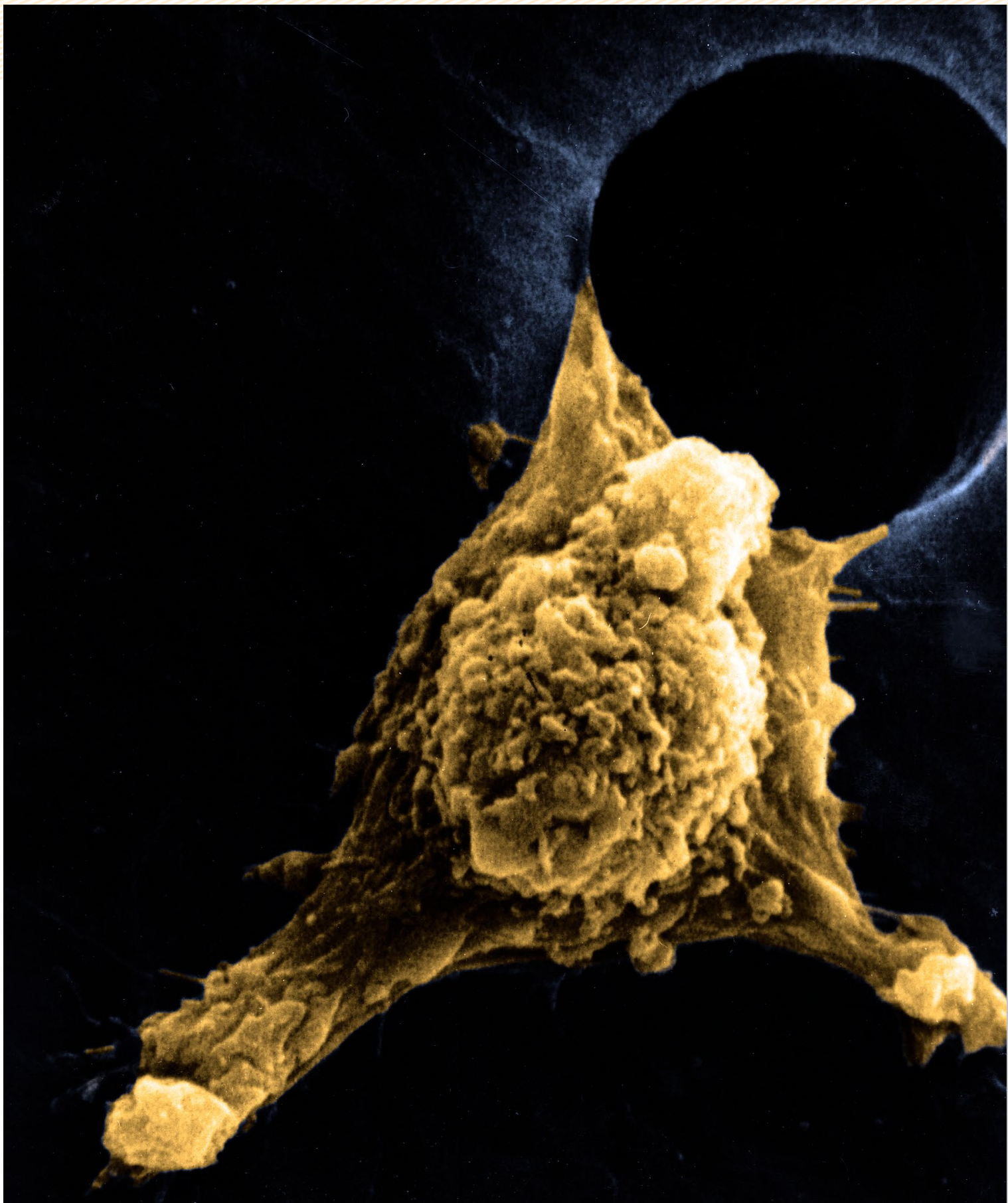
4. Voir : doi.org/10.1038/s41550-025-02655-y

5. Voir : tinyurl.com/Encelade (en anglais).

6. Mission large au coût estimé à 1 milliard d'euros.

7. Lira, unité CNRS/Observatoire de Paris-PSL/Sorbonne Université/Université Paris Cité.

© NASA / JPL-CALTECH



© SUSAN ARNOLD / NIH

← Une cellule cancéreuse s'étire pour « explorer » un pore sur un papier filtre (microscopie électronique colorisée).

LE SECRET DES CELLULES BALADEUSES

LE PHÉNOMÈNE est fascinant. Si on observe attentivement au microscope durant de longues minutes une cellule fibroblaste de peau ou de cartilage en culture dans une boîte de Petri, on la voit ramper ! Et ce, d'elle-même, sans l'intervention d'agents externes, mais grâce à plusieurs processus cellulaires cycliques coordonnés et répétés en boucle. D'abord, la cellule projette une extension large et plate qui s'ancre sur son support, formant ce qu'on appelle un « lamellipode ». Ensuite, la cellule se contracte. Ce faisant, elle décolle sa partie arrière. Puis ce cycle de protrusion, adhésion et contraction recommence, et la cellule avance sur le support... Un cycle assez similaire à la « marche » de l'escargot.

Ce processus de motilité permet aux cellules d'avancer de 10 à 15 micromètres (millièmes de millimètres) par minute. En comparaison, les spermatozoïdes, qui utilisent un tout autre mode de motilité (la nage, grâce à une sorte de queue appelée « flagelle »), peuvent se déplacer 100 à 200 fois plus rapidement.

Il n'empêche : « La motilité cellulaire intratissulaire est un processus fondamental. Elle est indispensable à la formation et au maintien du corps humain et des autres organismes pluricellulaires (constitués de plusieurs cellules), souligne Matthieu Piel, biologiste cellulaire au laboratoire Biologie cellulaire et cancer¹, à l'Institut Curie, à Paris. Mieux décrypter ses mécanismes pourrait ouvrir de nouvelles perspectives en médecine, notamment contre le cancer. »

Tout au long de la vie

La motilité cellulaire intervient dès les premiers instants de la vie, lors du développement embryonnaire – un processus qui débute avec la fécondation et se poursuit jusqu'à la naissance. « Alors, les cellules embryonnaires se déplacent activement sur des distances de plusieurs centimètres.

La capacité d'une cellule à se déplacer sous-tend plusieurs processus biologiques, dont la cicatrisation et... le cancer. Au CNRS, plusieurs équipes s'efforcent de décrypter ses mécanismes moléculaires.

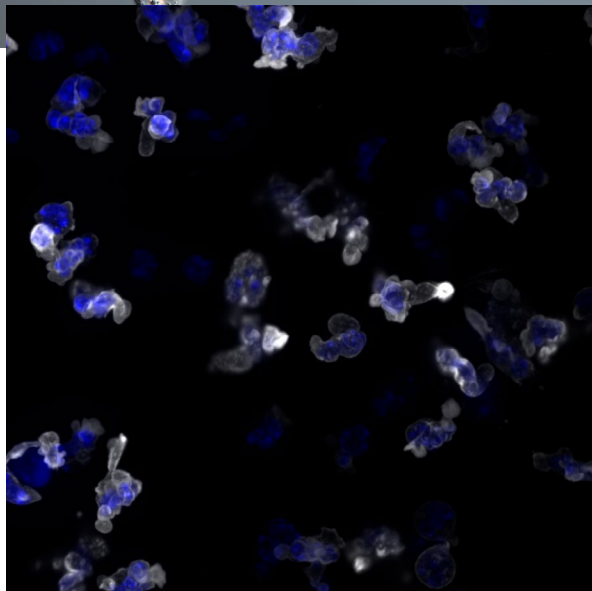
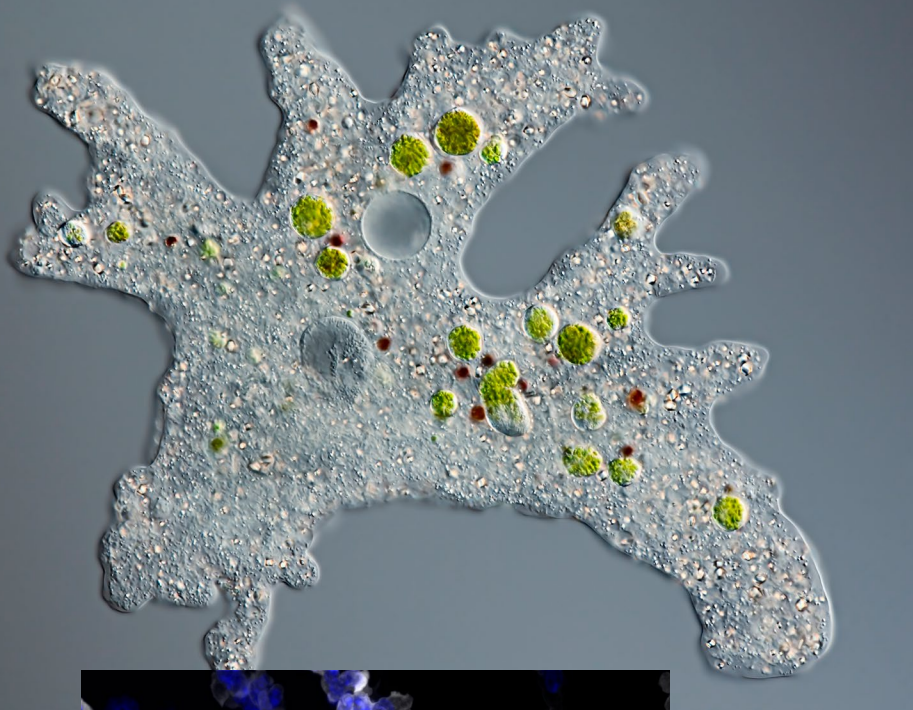
↔ KHEIRA BETTAYEB

Cela, pour gagner des sites spécifiques correspondant à ceux des futurs organes, et ainsi former les tissus et les organes», poursuit Matthieu Piel.

Par la suite, une certaine stabilité semble s'installer... Mais elle n'est qu'apparente ! Car la motilité cellulaire persiste tout au long de la vie. Elle est notamment fondamentale pour la régénération de tissus comme la muqueuse intestinale (qui tapisse l'intérieur de l'intestin). « Ici, la motilité cellulaire est indispensable pour permettre le déplacement des nouvelles cellules produites à la base de ce tissu vers sa surface, précise Danijela Vignjevic, qui étudie ce processus au laboratoire Biologie cellulaire et cancer. Survenant en continu, cette migration directionnelle des cellules épithéliales garantit l'intégrité et la fonctionnalité de la muqueuse intestinale. »

La motilité est également essentielle pour la cicatrisation de la peau. Celle-ci nécessite en effet le déplacement de plusieurs types cellulaires : les cellules immunitaires →

“ Il existe plusieurs modes de motilité cellulaire, qui dépendent du type de cellules et de leur environnement.



Ci-dessus, une amibe et ses pseudopodes. Ci-contre, des cellules qui migrent dans un gel de collagène (en bleu, les noyaux; en blanc, la protéine actine, impliquée dans le mouvement).

→ qui, après avoir été transportées par le sang, se faufilent dans le tissu lésé pour y éliminer les débris et stimuler la réparation; ou bien les fibroblastes, qui transitent vers la zone de la plaie et y prolifèrent afin de reconstruire le tissu.

Pas une motilité, mais plusieurs

Il existe plusieurs modes de motilité cellulaire, qui dépendent du type de cellules et de leur environnement. Celui décrit jusqu'ici est également appelé « motilité mésenchymateuse », car il est adopté par les cellules mésenchymateuses (le mésenchyme est un tissu de soutien embryonnaire). Son mécanisme moléculaire est désormais bien compris.

C'est l'élongation de microfilaments d'actine qui permet, dans un premier temps, la projection d'une extension de la membrane cellulaire. Les molécules d'actine sont un composant majeur du cytosquelette, le réseau de protéines responsable du maintien de

la forme des cellules. Ce sont des complexes protéiques d'adhésion, les intégrines, qui font ensuite que le lamellipode peut adhérer sur son environnement cellulaire.

Situées aux extrémités des fibres d'actine du cytosquelette, ces grosses structures moléculaires permettent à la cellule de s'ancrer à son substrat et de transmettre une force mécanique qui va la propulser vers l'avant. En effet, au même moment, les structures d'adhésion situées à l'arrière de la cellule se désassemblent. Résultat : la partie arrière de la cellule se décolle, la cellule se contracte, ce qui lui permet d'aller de l'avant.

Cette contraction repose enfin sur une autre molécule jouant le rôle de moteur moléculaire, la myosine. Celle-ci se lie aux microfilaments d'actine et utilise de l'ATP (la molécule énergétique des cellules) pour les faire glisser les uns par rapport aux autres, provoquant ainsi la rétraction de la membrane cellulaire.

Se déformer, pousser, nager...

Un second type de motilité cellulaire se révèle tout aussi fascinant : le mode amiboïde. « Même s'il a été découvert plus récemment, il y a quelques décennies, ce processus semble cependant être le mode de migration le plus répandu et ancestral des cellules qui "rampent", observe Matthieu Piel. Il intéresse beaucoup les chercheurs, car il est le mode de motilité des cellules immunitaires et des cellules tumorales les plus agressives – les cellules cancéreuses amiboïdes. »

Comme son nom l'indique, le mode amiboïde rappelle le mouvement des amibes, des parasites unicellulaires très mobiles qu'on retrouve dans les eaux souillées. Là, les cellules rampent en déformant leur membrane plasmique et en émettant des extensions ressemblant à des « pieds cellulaires », des pseudopodes (du grec « *pseudes* » : faux ; et « *podos* » : pied), des structures souvent bulbeuses (« *blebs* ») ou filiformes – alors que les lamellipodes de la motilité mésenchymateuse sont plates et larges.

« Pour les cellules tumorales, on ne parle pas de "podosomes", mais d'« *invadopodes* », pour souligner leur implication dans la capacité de ces cellules à envahir d'autres organes », relève Philippe Chavrier, biologiste au laboratoire Biologie cellulaire et cancer, coauteur d'un récent article faisant le point sur les connaissances sur ces structures.

À l'aide de simulations numériques, Alexander Farutin et ses collègues du Laboratoire interdisciplinaire de physique², à Saint-Martin-d'Hères (Isère), ont pu montrer que l'adjonction de molécules d'actine à l'extrémité en croissance des filaments, accompagnée de leur dissociation à l'autre extrémité, suffit à induire un mouvement de la cellule. Cela sans intervention de la myosine. « Cette découverte, assure le physicien, remet



PARTAGEZ
CET ARTICLE

“ Éluclider les mécanismes de la motilité cellulaire pourrait aider à freiner la formation et la migration de métastases cancéreuses.

en question le dogme classique selon lequel les moteurs moléculaires, en particulier la myosine, sont indispensables à la motilité cellulaire».

Plus récemment, les chercheurs ont découvert un troisième mode de motilité : le déplacement dit « en cheminée », du fait de sa ressemblance avec la technique utilisée par les alpinistes pour escalader des crevasses. « Ce type de motilité permet à la cellule de se déplacer en poussant sur son environnement, un peu comme quand on pousse sur des parois pour grimper », décrit Matthieu Piel, qui a contribué à mieux comprendre ce processus.

Contrairement aux modes précédents, celui-ci ne nécessite aucune adhésion. Il est adopté principalement par les cellules immunitaires et les cellules cancéreuses

mobiles amiboïdes quand elles sont coincées entre deux substrats : microcapillaires sanguins étroits, espaces très serrés entre les fibres de la matrice extracellulaire, etc.

Reste un dernier style : la nage ! Un peu comme les spermatozoïdes mais, cette fois, la propulsion s'effectue grâce à des pagaies moléculaires et non grâce à un flagelle.

« Nos travaux montrent que les cellules immunitaires sont capables de nager grâce à des protéines transmembranaires telles que les intégrines, dont la partie intracellulaire est reliée au cytosquelette, tandis que la partie extracellulaire agit comme une pagaie », détaille Olivier Théodoly, du Laboratoire adhésion & inflammation³, à Marseille.

Des pistes thérapeutiques

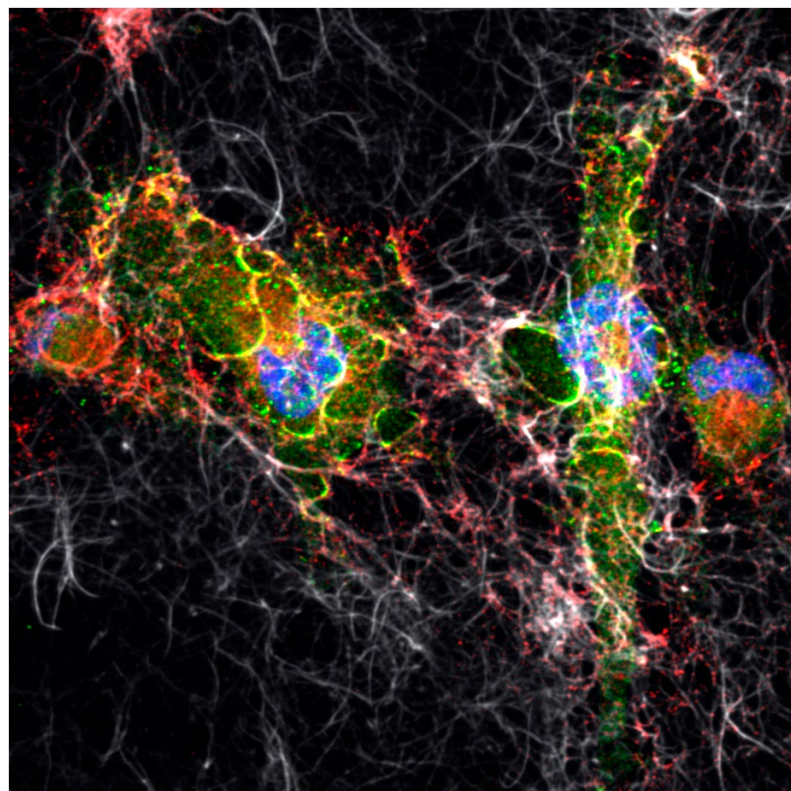
Éluclider les mécanismes de la motilité cellulaire pourrait aider à développer des traitements capables de freiner ou empêcher la formation et la migration de métastases cancéreuses. En 2022, l'équipe de Cécile Sykes, physicienne spécialiste de la matière molle (qui se déforme) au Laboratoire de physique de l'École normale supérieure⁴, à Paris, a présenté un dispositif qui permet de reconstituer la motilité basée sur l'actine.

« Notre système, ambitionne la physicienne, pourrait mener à l'identification de médicaments capable de bloquer spécifiquement la polymérisation d'actine et donc le déplacement de cellules cancéreuses. »

Par-delà les médicaments, une meilleure compréhension de la motilité cellulaire pourrait ouvrir des pistes thérapeutiques mécaniques, et non chimiques. C'est le défi relevé par les équipes du Laboratoire Jean Alexandre Dieudonné (LJAD)⁵, à Nice, ainsi que du Laboratoire de mécanique Paris-Saclay⁶. « Nous espérons développer des “théramécaniques” [pour “thérapies mécaniques”, NdIrl], comme des hydrogels injectables ou des matériaux capables de modifier les propriétés mécaniques (forme, résistance...) des cellules, de leurs composantes ou de leur environnement, et ainsi de freiner leur migration », avance Rachele Allena, au LJAD.

Récemment, elle a proposé une théramécanique consistant à moduler les propriétés géométriques et mécaniques du noyau. Ce composant cellulaire rigide et très volumineux pourrait ainsi être manipulé pour empêcher les déplacements des cellules, notamment cancéreuses, dans les interstices étroits des tissus. Une piste encore exploratoire, mais très prometteuse. ●

↓ Des invadopodes (en vert) dégradent des fibres de collagène (en rouge).



© SANDRA ANTOINE-BALLY & PHILIPPE CHAVIER, INSTITUT CURIE - CNRS UMR144

1. Unité CNRS/Institut Curie.

2. LiPhy, unité CNRS/Université Grenoble Alpes.

3. LAI, unité CNRS/Aix-Marseille Université/Inserm.

4. LPENS, unité ENS/CNRS/Sorbonne Université/Université Paris Cité.

5. Unité CNRS/Université Nice Côte d'Azur.

6. LMPS, unité CNRS/ENS Paris-Saclay/CentraleSupélec.

Lors d'une épreuve très longue, certains coureurs à pied subissent une baisse brutale de performance, souvent au même stade. Des chercheurs expliquent pourquoi et comment le corps réagit alors.

✎ SERVANE PIERRE

Marathon : passer le mur des 30 km

LORS D'UN MARATHON, de nombreux coureurs connaissent une forte baisse de performance aux alentours du trentième kilomètre. Connu sous le nom du « mur des 30 km », ce phénomène physiologique est surtout ressenti par les coureurs amateurs, lorsque leur corps change de carburant pour soutenir l'effort physique. Mais pas de panique ! Avec de l'entraînement et une bonne stratégie nutritionnelle, cette épreuve est parfaitement surmontable.

Au début de l'effort, l'organisme utilise d'abord le glycogène, forme de glucide stockée dans les muscles et dans le foie. *« Ce sont des molécules de taille moyenne qui fournissent de l'énergie très rapidement. Mais ces réserves sont limitées et d'autant plus sollicitées que l'intensité de l'effort est élevée »*, observe Caroline Nicol, enseignante-chercheuse à l'Institut des sciences du mouvement Étienne-Jules Marey¹. Comme l'essence super des automobiles, le glycogène constitue un carburant efficace pour maintenir une vitesse élevée... mais il n'est disponible qu'en quantité limitée.

Chez un coureur amateur, cette réserve est quasiment épuisée aux environs du trentième kilomètre. L'organisme va alors en freiner l'utilisation afin de pouvoir répondre à une éventuelle urgence. Il doit donc trouver une source d'énergie complémentaire s'il veut arriver au bout des 42,195 km d'un marathon.

La transition métabolique vers les lipides

C'est dans les lipides que l'organisme va chercher une nouvelle énergie pour poursuivre l'effort. Toutefois, ces molécules sont plus complexes à dégrader que le glycogène. Ce qui contraint notre corps à répondre différemment à l'effort exigé.

« Les lipides représentent une source d'énergie plus abondante et durable, mais plus lente à activer, fournissant un moindre débit énergétique, précise Arnaud Hays, chercheur au HIPE Human Lab². Le coureur a alors l'impression de ne plus pouvoir fournir la même intensité, d'aller moins vite. »

Chez les coureurs amateurs, ce changement de métabolisme se traduit par une baisse brutale de performance – c'est le fameux « mur des 30 km ». L'organisme abandonne alors son carburant principal de haute performance pour un « mode diesel ».

Crampes et détresse cognitive

Cette transition ne se limite pas à un ralentissement de l'allure. Elle s'accompagne d'une cascade de symptômes physiques. Les jambes et les impacts au sol s'alourdissent. La course, jusqu'alors économique, devient plus coûteuse en énergie. Des crampes peuvent apparaître, liées aux pertes d'eau et de sels minéraux par la transpiration. S'y ajoutent les inconforts gastro-intestinaux. En effet, le sang est détourné vers les muscles au détriment de la digestion³.

La détresse est également cognitive. Le cerveau, grand consommateur de glucose, réagit à la baisse de la glycémie, mais aussi à la déshydratation et à l'hyperthermie. La barre des 30 km est donc autant physique que mentale. *« À ce stade de la course, nous n'avons plus*

“ Chez les sportifs très entraînés en endurance, l'utilisation des lipides va s'établir plus tôt dans l'effort.”



la même énergie ni la même attention, résume Caroline Nicol. Les coureurs sont ainsi plus exposés aux erreurs, voire aux blessures. »

Dans ce contexte, l'entraînement est un indispensable allié. « Chez les sportifs très entraînés en endurance, l'utilisation des lipides va s'établir plus tôt dans l'effort », remarque Arnaud Hays. Ce mécanisme, appelé « *sparing effect* », contribue à préserver les réserves de glycogène jusqu'à la fin de l'effort.

L'entraînement permet même d'augmenter la capacité de stockage du glycogène dans les muscles et le foie. « Une personne non entraînée peut stocker au total entre 300 à 400 grammes de glycogène, contre 600 grammes chez les sportifs », ajoute Arnaud Hays.

Chez les femmes, les réserves lipidiques sont plus importantes que chez les hommes, y compris dans les muscles. Elles présentent également une plus grande superficie de fibres musculaires dites « lentes », particulièrement adaptées à l'endurance.

« Elles mobiliseraient ainsi davantage les réserves lipidiques que les hommes, ce qui constitue un avantage lors d'efforts prolongés », explique Caroline Nicol. Cette caractéristique suggère que la physiologie féminine est naturellement plus adaptée à l'exercice de longue durée.

Une bonne nutrition pour un bon marathon

Lors d'un marathon, le challenge est double : parcourir un peu plus de 42 km et optimiser l'utilisation de ses réserves d'énergie. En amont de la course, certaines

600 g

C'est la quantité de glycogène que peuvent stocker les muscles et le foie des sportifs

stratégies nutritionnelles jouent un rôle déterminant. « Les méthodes récentes reposent sur des techniques de nutrition sur 36-48 heures, notamment un régime hyperglucidique afin d'augmenter temporairement la capacité de stockage, détaille Arnaud Hays. Il convient aussi de ne pas négliger l'hydratation. »

Pendant la course, des stands de ravitaillement proposent des denrées sucrées et salées, ainsi que des boissons. De nombreux coureurs consomment aussi des gels mixtes de glucose et de fructose. Ceux-ci apportent des glucides rapidement assimilables, permettant d'économiser le stock interne de glycogène. Encore faut-il les prendre au bon moment... « Ces apports doivent intervenir avant l'apparition du « mur ». Une fois la fatigue installée, il est déjà trop tard », note Caroline Nicol. Mais les gels et autres mélanges sucrés sont à consommer avec modération. À forte dose, ils provoquent des troubles gastro-intestinaux qui ne sont pas les bienvenus en pleine course.

Maintenant que vous avez le mode d'emploi, il ne vous reste plus qu'à enfiler vos chaussures et à ajuster vos lacets : 42,195 km vous attendent! ●

1. ISM, unité CNRS/Aix-Marseille Université.

2. Unité CNRS/Aix-Marseille Université/Institut Paoli-Calmettes/Université de Toulon.

3. Voir : amu.hal.science/hal-01644944v1 et doi.org/10.1007/s004210000219

LES PIEDS DANS LE SABLE de la plage, nul ne soupçonne la richesse physique et la complexité de ce paysage *a priori* tranquille. Création des vagues, érosion des rochers, infiltration de l'eau de mer dans les sols... Ce milieu fascine physiciens et mathématiciens depuis plus de 200 ans. Au XIX^e siècle, le système d'équations dites « de Navier-Stokes » voit ainsi le jour pour décrire le mouvement global d'un fluide, tel l'eau ou l'air – un moyen de modéliser « *un phénomène en mouvement dans l'espace et le temps* », résume Didier Bresch, directeur de recherche CNRS à l'université Savoie Mont-Blanc¹.

Aujourd'hui, trois projets du Programme et équipements prioritaires de recherche (PEPR) Maths-Vives étudient l'environnement côtier. Car, avec le changement climatique, la montée des eaux affectera les littoraux, les phénomènes climatiques extrêmes s'intensifieront et l'érosion des côtes s'accélérera. Géophysique, océanographie, ou encore mathématiques sont donc mobilisées pour mettre la dynamique de la plage en équations et penser l'aménagement futur des littoraux.

« Nous voulons apporter un éclairage pour les politiques, affirme Didier Bresch. On ne se dit pas qu'on va prévoir, mais qu'on va mieux comprendre. Or, mieux comprendre, c'est mieux décider. »

Par exemple, comment appréhender l'océan et ses milliards de molécules microscopiques ? « À notre échelle d'observation, explique Catherine Choquet, professeure en mathématiques à l'université de La Rochelle², plusieurs effets sont imperceptibles, donc on les a gommés du modèle. » C'est bien ce que font les équations de Navier-Stokes, qui se concentrent sur ce qui importe pour dépeindre une vague perçue à l'échelle macroscopique. Et elles sont encore utilisées dans le contexte actuel de renforcement des phénomènes extrêmes, à l'impact croissant sur la société.

En plus des vacanciers, la plage est un lieu de rencontre de plusieurs pans de la physique et des mathématiques. Trois projets de recherche se consacrent à mieux décrire cet environnement, très sensible au changement climatique.

↳ CHARLOTTE MAUGER

Les maths à la plage

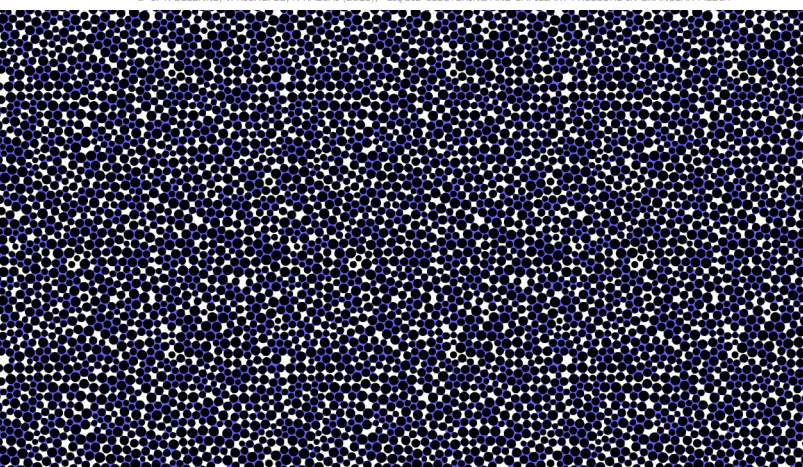
« Il devient encore plus important de les comprendre afin de disposer d'outils de prévision pour les collectivités », pointe David Lannes, directeur de recherche CNRS à l'université de Bordeaux³. Lui-même participe au projet Climaths du PEPR Maths-Vives, visant à mieux caractériser l'apparition et le comportement des vagues extrêmes en milieu côtier.

La science des châteaux de sable

Autre milieu complexe : les grains de sable. Lesquels, rappelle Farhang Radjai, directeur de recherche CNRS à l'université de Montpellier⁴, « peuvent avoir des tailles, des formes et des propriétés de surface variées ».

Or, malgré ses propriétés étonnantes, l'interaction entre l'eau et les grains reste mal connue. Ainsi, quand on construit un château de sable avec du sable mouillé, « l'eau liquide colle les grains de sable entre eux comme elle colle nos cheveux sur notre tête. On parle d'ailleurs de "force capillaire" », précise Farhang Radjai, co-coordonateur du projet ComplexFlows, qui ambitionne de décrire ce monde granulaire et humide.

© J.-Y. DELENNE, V. RICHEFEU, F. RADJAI (2015), « LIQUID CLUSTERING AND CAPILLARY PRESSURE IN GRANULAR MEDIA »



← La force capillaire, ici modélisée par code informatique, permet d'assembler des gouttes d'eau et des grains de sable en un ensemble cohérent et équilibré.



← On distingue trois zones sur la plage : une où le sable est totalement saturé en eau, une où il est sec et, entre les deux, une où il est insaturé – c'est-à-dire que les espaces vides entre les grains de sable y sont partiellement remplis d'eau.

© FARHANG RADJAI

Deux types de matériaux y interagissent : les grains solides et l'eau liquide. D'où l'extrême difficulté à modéliser leur comportement. « Si vous regardez un tas de sable mouillé, c'est de l'eau et du sable. On a des équations pour l'eau et d'autres pour le solide. Mais comment décrire le solide mouillé ?, s'interroge Didier Bresch, lui aussi coordinateur du projet. Et comment le système évolue quand la quantité d'eau augmente ou diminue ? »

S'intéresser aux écoulements granulaires n'est pas anecdotique. Ils transforment nos littoraux via l'attaque de la mer et l'érosion des rochers par les fortes pluies. Dans le cadre de ComplexFlows, précise Didier Bresch, « nous souhaitons mieux appréhender, même grossièrement, l'évolution du trait de côte », mais aussi la tendance des plages à perdre leur sable. En effet, celui-ci constitue « une source qu'on pourrait croire inépuisable, alors que c'est un matériau assez rare », souligne Farhang Radjai.

Des interactions loin des regards

Bien en deçà de la plage, l'eau de mer s'infiltre jusqu'aux nappes phréatiques. « Quand je suis arrivée à La Rochelle, j'ai vu que les habitants avaient dans leurs jardins des puits de captation d'eau claire. Mais ils ne les utilisaient pas, car les puits étaient contaminés par l'eau salée », se remémore Catherine Choquet, porteuse du projet Hydraumath, sur les interactions entre l'eau de mer et l'eau souterraine, et leurs conséquences.

Le risque de salinisation des nappes phréatiques augmente en été, pointe-t-elle : « À force de puiser l'eau claire, l'eau salée remonte à la surface. Or, une fois que la nappe phréatique est salée, le puits n'est plus exploitable ».

Problème, une partie de l'interaction a lieu loin des regards. Mais « on ne peut pas transformer le sol en gryère pour observer la nappe phréatique ! », relève Catherine Choquet. Résultat : « On est obligé de faire des mathématiques pour modéliser ce qu'on ne voit pas ». Avec des surprises à la clé... « On s'est rendu compte que l'eau de mer interagit avec l'eau [claire] en profondeur, là où l'on ne s'y attend pas – comme à Perpignan, où l'on présumait que ce serait en surface. Il y a donc un passage inconnu. »

Climaths, ComplexFlows, Hydraumath : au sein de ces trois projets, la modélisation mathématique prend le relais des expériences en laboratoire et des relevés de terrain. « Les données sont souvent lacunaires, constate Catherine Choquet. Les mathématiques permettent alors de les compléter. » Mais, seules, elles ne suffisent pas.

L'important, appuie David Lannes, « est de travailler en collaboration dès la formalisation du problème et tout du long, d'essayer de bien comprendre les enjeux et le type de données dont on peut disposer, afin d'obtenir un modèle proche de la réalité physique. » La plage ? Un milieu pas si tranquille, au bout du compte... ●

1. Laboratoire de mathématiques (unité CNRS/Univ. Savoie Mont-Blanc).
2. Fédération mathématique de recherche en région Nouvelle-Aquitaine (unité CNRS/Bordeaux INP/La Rochelle Univ./Univ. de Bordeaux/Univ. de Limoges/Univ. de Pau et des Pays de l'Adour/Univ. de Poitiers).
3. Institut de mathématiques de Bordeaux (unité CNRS/Bordeaux INP/Univ. de Bordeaux).
4. Laboratoire de mécanique et génie civil (unité CNRS/Univ. de Montpellier).

L'Europe s'empare de la défense planétaire

LE COMPTE À REBOURS a commencé ! Au printemps 2028, l'Agence spatiale européenne (Esa) lancera une nouvelle mission, *Ramses*¹. Mené en collaboration avec la Jaxa, l'agence spatiale japonaise, ce projet vise à étudier l'un des événements astronomiques les plus attendus des dix prochaines années : le passage de l'astéroïde Apophis tout près de la Terre. Le vendredi 13 avril 2029, ce corps céleste frôlera notre planète à seulement 31 600 km, une distance inférieure à celle où orbitent les satellites géostationnaires de télécommunication (36 000 km environ).

Cette rencontre sans précédent ne passera pas inaperçue. La lumière d'Apophis sera visible la nuit, à l'œil nu, par plus de 2 milliards de personnes dans l'essentiel de l'Europe et de l'Afrique – pour peu que le ciel nocturne soit dégagé. Outre son caractère spectaculaire, « *ce survol de la Terre par Apophis est une expérience naturelle cruciale pour améliorer la défense de notre planète contre les astéroïdes susceptibles de l'impacter* », souligne Patrick Michel, astrophysicien au laboratoire Lagrange², à Nice, et responsable scientifique de cette nouvelle mission.

De la taille de la tour Eiffel

Longtemps restée cantonnée à la science-fiction, la prévention du risque de collision entre notre planète et un astéroïde est devenue une réalité bien concrète. Depuis 2019, l'Esa a ainsi lancé le programme « Sécurité de l'espace », qui contient un volet consacré à la défense planétaire. Celui-ci vise à surveiller et étudier les astéroïdes dangereux, et à réfléchir à des stratégies capables de dévier de telles menaces.

Ce programme a déjà une première mission à son actif, *Hera*. Partie en 2024, elle doit rejoindre fin 2026 l'astéroïde Dimorphos (à environ 11 millions de kilomètres de la Terre) pour réaliser le bilan de la déviation de ce corps par l'impact de l'engin *Dart*³ de la Nasa, en 2022. *Ramses* est donc la deuxième mission du programme.

La mission *Ramses* sera lancée vers l'astéroïde Apophis en 2028. Elle est la pierre angulaire d'un programme de défense contre le risque de collision avec des corps géocroiseurs.

✎ KHEIRA BETTAYEB

→ Illustration de la mission *Ramses* et de sa cible, l'astéroïde Apophis (330 m de diamètre).

« Apophis est un géocroiseur – un astéroïde dont l'orbite autour du Soleil croise par moments celle de la Terre, précise Benoît Carry, astronome adjoint et spécialiste des astéroïdes à l'Observatoire de la Côte d'Azur, à Nice. Ce type d'objets risquent potentiellement d'entrer en collision avec notre planète. »

Autre particularité, Apophis est un astéroïde relativement imposant. Son diamètre est d'environ 330 m, soit la hauteur de la tour Eiffel, pour un poids estimé entre 40 et 50 millions de tonnes. « Le fait qu'un corps aussi gros s'approche si près de notre planète est un événement rare, qui ne se produit qu'une fois tous les quelques milliers d'années », souligne l'astronome. De plus, Apophis voyage à très grande vitesse – environ 12 kilomètres par seconde.

“ S'il frappait la Terre, un astéroïde de la taille d'Apophis pourrait causer des dommages à l'échelle d'un pays entier.





© ESA-SCIENCE OFFICE

Si un tel astéroïde percutait la Terre, «il formerait un cratère de 8 à 10 fois sa taille, soit environ 2,5 km», indique l'astronome niçois. De quoi provoquer «une catastrophe majeure si [la collision] se produisait en milieu urbain – ou un tsunami dévastateur si [l'astéroïde] s'échouait dans un océan. Sans compter qu'il y aurait aussi beaucoup d'éjections de poussière dans l'atmosphère, qui pourraient contribuer à refroidir le climat». Selon Patrick Michel, «les dommages seraient à l'échelle d'un pays tout entier».

« Une opportunité scientifique unique »

Juste après la découverte d'Apophis, en 2004, par des chercheurs de l'université de Hawaï, les astronomes avaient calculé qu'il avait 1 chance sur 37 (soit 2,7%) de frapper la Terre en 2029, soit «la plus haute probabilité de collision jamais estimée pour un astéroïde», relate Benoît Carry. D'où le nom donné à ce corps céleste – Apophis est le dieu égyptien du Chaos et de la Destruction.

Heureusement, dans les semaines qui ont suivi, des observations et des calculs plus précis ont permis d'écarter tout risque de collision avec l'astéroïde. Et cela, non seulement pour 2029, mais aussi pour les 100 prochaines années au moins.

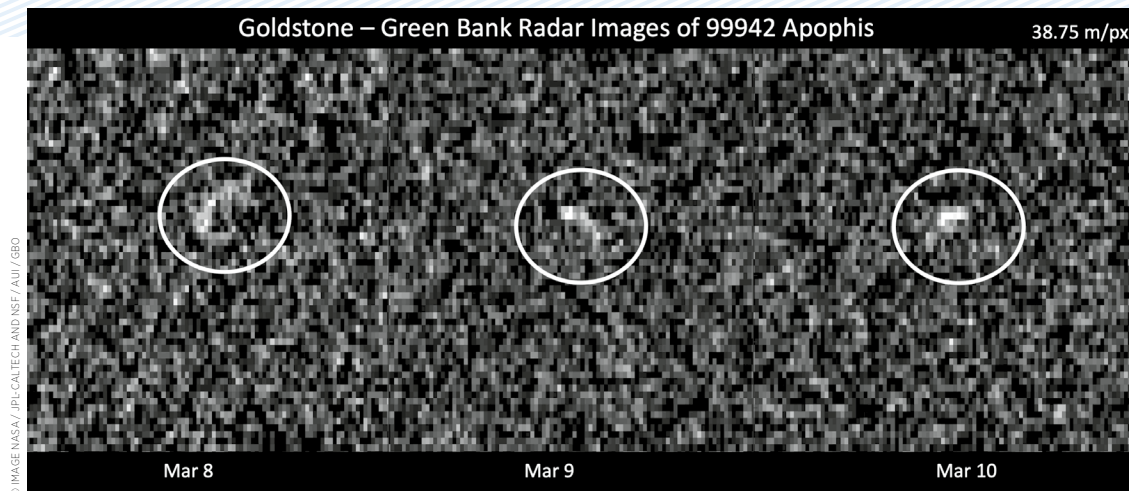


**PARTAGEZ
CET ARTICLE**

Toutefois, lorsque notre planète et l'astéroïde seront proches l'un de l'autre, les chercheurs s'attendent à ce que les forces de marées liées à la gravité terrestre étirent et compriment Apophis. Cela pourrait déclencher des glissements de terrain à sa surface, voire des vibrations internes. Par ailleurs, son orbite et le temps nécessaire pour effectuer un tour sur lui-même devraient s'en trouver légèrement modifiés.

Or, poursuit Patrick Michel, «en plus d'améliorer nos connaissances sur les astéroïdes, l'étude des propriétés et du comportement d'Apophis au plus près de la Terre pourrait aussi aider à définir les meilleures stratégies à développer pour neutraliser de potentiels astéroïdes dangereux. Par exemple, mesurer sa réponse à des forces externes (représentées ici par les forces de marées terrestres) et connaître son niveau de porosité (à savoir, si son intérieur comprend beaucoup de vide ou non) aidera à déterminer la puissance avec laquelle frapper un corps similaire pour le dévier efficacement de la trajectoire de la Terre.»

En pratique, la mission reposera sur une sonde de 2 m de côté, dont l'architecture s'inspirera de celle de la sonde *Hera*. «Comme cette dernière, Ramses comprendra un vaisseau spatial principal et deux →



← Clichés radar d'Apophis, les 8, 9 et 10 mars 2021, lors de son passage au plus près de la Terre. En 2029, l'astéroïde sera encore plus proche de nous.

→ cubesats (satellites miniatures) de 12 kg chacun, dont l'un sera déployé à proximité d'Apophis et l'autre se posera sur l'astéroïde», détaille Patrick Michel. Mais, «comme elle interviendra plus près du Soleil, ses panneaux solaires seront plus petits. Et, pour atteindre Apophis et rester à proximité, elle sera munie de réservoirs plus gros, pouvant contenir 33 % de carburant en plus» que ceux de Hera.

Sonde tripartite et high-tech

Afin d'atteindre ses objectifs, *Ramses* embarquera plusieurs instruments. Parmi ceux-ci figure une caméra hyperspectrale, c'est-à-dire capable de capturer des images en utilisant un grand nombre de bandes spectrales contiguës. Elle permettra de mesurer la composition chimique de l'astéroïde.

Une autre caméra haute résolution couleur prendra des images de l'astéroïde avec une résolution d'environ 10 cm, qui pourra révéler d'éventuels mouvements de sa surface. Enfin, un spectromètre plasma analysera l'environnement de particules chargées autour de l'astéroïde, liées à son passage dans la magnétosphère terrestre (la zone de l'espace sous l'influence du champ magnétique de notre planète).

Quant au cubesat destiné à être déployé à proximité d'Apophis, il embarquera un détecteur et analyseur de poussière (pour en déterminer la composition chimique) et un radar basse fréquence, qui sondera l'intérieur de l'astéroïde. Enfin, le cubesat qui se posera sur Apophis sera muni d'un gravimètre, pour mesurer le champ gravitationnel, et d'un sismographe, pour analyser la propagation des ondes sismiques et révéler la structure interne de l'astéroïde.

«Le radar dans le premier cubesat et le sismographe dans le second sont deux contributions françaises, relève Patrick Michel. Ils illustrent l'expertise mondialement reconnue de notre pays dans le domaine de la mesure de la structure interne des astéroïdes.»

Le lancement de *Ramses* est prévu entre le 20 avril et le 15 mai 2028. Le cubesat renfermant le radar sera déployé en mars 2029, et celui devant se poser sur Apophis, quelques jours avant le passage de l'astéroïde au plus près de la Terre. *Ramses* restera ensuite à proximité de celui-ci jusqu'en août 2029.

En première ligne

Ramses devrait être rejointe par la sonde américaine *Osiris-Apex*⁴, également consacrée à l'étude d'Apophis en 2029. Mais *Osiris-Apex* ne parviendra à proximité de l'astéroïde qu'un mois environ après le passage de celui-ci au plus proche de la Terre. Et ratera donc ce rendez-vous historique avec Apophis. *Ramses* place ainsi l'Esa et la Jaxa en première ligne pour la caractérisation de l'astéroïde lors de cette rencontre unique.

«Si *Ramses* est un succès, conclut Patrick Michel, elle confirmera que l'Europe peut lancer rapidement une mission de reconnaissance vers un astéroïde en approche – sachant que, comme pour Hera, il aura fallu seulement 4 ans pour mettre sur pied cette mission spatiale, au lieu de 15 ans en moyenne, habituellement.» Et de préciser : «Une telle rapidité serait cruciale pour étudier un potentiel corps dangereux et construire un bouclier capable de nous protéger avant que la collision n'ait lieu». ●



À LIRE

La Défense planétaire contre les astéroïdes, Michel Patrick, 208 pages, Odile Jacob, mai 2026.

1. Pour Rapid Apophis Mission for Space Safety (Mission rapide Apophis pour la sécurité spatiale.).
2. Laboratoire Joseph-Louis Lagrange, unité CNRS/Observatoire de la Côte d'Azur/Université Côte d'Azur.
3. Pour Double Asteroid Redirection Test (Test de déviation d'astéroïde double).
4. Pour Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, and Security – Apophis Explorer (Origines, interprétation spectrale, identification des ressources et sécurité – Explorateur d'Apophis).

« ESPÈCE EXOTIQUE ENVAHISSANTE »

Moustique tigre, frelon asiatique, ragondin, ambrosie à feuilles d'armoïse... Toutes ces espèces présentes sur le territoire français sont classées comme étant « exotiques envahissantes ».

« Une espèce végétale ou animale est qualifiée d'« exotique » dès lors qu'elle a été amenée en dehors de son aire de répartition naturelle, au sein d'espaces géographiques qu'elle n'aurait jamais pu atteindre seule », précise Philippe Grandcolas, écologue et directeur adjoint scientifique de CNRS Écologie et Environnement.

Une responsabilité humaine se trouve toujours à l'origine de cette dispersion. « Il peut s'agir d'une dispersion complètement involontaire. Les larves de moustique peuvent par exemple voyager clandestinement dans les matériaux transportés par bateaux », observe Philippe Grandcolas. D'autres espèces, tel le tamia de Sibérie, un petit écureuil présent dans plusieurs départements français, ont été élevées comme animal de compagnie avant que certains individus soient relâchés par des particuliers dans des forêts de l'Hexagone.

« Dans un écosystème classique, les espèces ont évolué en interaction avec des compétiteurs, des prédateurs, des parasites et des pathogènes, détaille Philippe Grandcolas. Mais les espèces exotiques arrivent parfois dans des milieux où elles n'ont aucun antagoniste. Si les circonstances sont particulièrement favorables pour ces espèces,

elles se mettent alors à pulluler et deviennent envahissantes, car il n'y a rien qui les limite spontanément. » Ainsi, sur les 37 000 espèces exotiques répertoriées à travers le monde, près de 3 500 sont devenues envahissantes, ont montré les travaux de l'IPBES¹. Elles menacent alors les espèces autochtones et perturbent les écosystèmes locaux. Les espèces exotiques envahissantes constituent l'une des cinq causes majeures du déclin de la biodiversité dans le monde, estime l'IPBES.

Elles occasionnent aussi de sérieux dommages pour les humains. « Elles peuvent notamment être des réservoirs à pathogènes », s'alarme Philippe Grandcolas. C'est le cas du moustique tigre (*Aedes albopictus*), qui a conquis tout le territoire français métropolitain et peut transmettre des virus causant la dengue ou le chikungunya.

Les dégâts de ces espèces exotiques sur la santé humaine, les cultures agricoles ou la biodiversité représentent des sommes faramineuses. Ces dommages et les frais engagés pour leur gestion coûtent entre 44 et 395 millions d'euros par an à la France² et 27 milliards de dollars dans le monde. Afin d'éviter que la facture s'alourdisse encore, « il est notamment nécessaire de renforcer les contrôles effectués sur les marchandises qui proviennent d'autres pays, et d'agir rapidement dès qu'une espèce exotique menaçante apparaît sur un territoire et qu'elle reste encore maîtrisable », souligne Philippe Grandcolas. Car si la prévention a un coût, celui de l'inaction est encore plus important. ●

© THOMAS ALLARD

Ragondin (*Myocastor coypus*)

Ce mammifère semi-aquatique, originaire d'Amérique du Sud, est inscrit depuis 2016 sur la liste des espèces exotiques envahissantes préoccupantes pour l'Union européenne.



Les espèces exotiques arrivent parfois dans des milieux où elles n'ont aucun antagoniste.

1. IPBES : Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques.

2. Selon les travaux menés en 2021 au laboratoire Écologie, société et évolution (ESE, unité CNRS/AgroParisTech/ Université Paris-Saclay).

L'OR ROUGE DE MÉDITERRANÉE

Le corail rouge, animal de la grande famille des cnidaires (méduses, hydres, gorgones, anémones...), est pêché depuis la Préhistoire sur l'ensemble du pourtour méditerranéen pour être utilisé en joaillerie. Mais sa surexploitation l'a mis en péril. Aujourd'hui, des scientifiques du Laboratoire d'écogéochimie des environnements benthiques¹ de Banyuls-sur-Mer, dans les Pyrénées-Orientales, tentent de protéger cette espèce endémique en étudiant sa biologie et en mettant en place un programme de restauration.

© CYRIL FRÉSILLON & MEHDI HARMİ

📷 CYRIL FRÉSILLON/LECOB/CNRS IMAGES

(sauf p. 45, en haut)

¹. Unité CNRS/Sorbonne Université.



1. Le corail rouge (*Corallium rubrum*) de Méditerranée est une espèce classée en danger à cause de la surpêche et du changement climatique. Pendant des millénaires, il a servi de base à des bijoux. Désormais, sa pêche est sévèrement réglementée. Elle reste possible en France, en Italie et en Tunisie, mais interdite sur les 50 premiers mètres de profondeur dans tout le Bassin méditerranéen. Les scientifiques du Laboratoire d'écogéochimie des environnements benthiques (Lecob), sous l'impulsion de Lorenzo Bramanti, l'étudient dans son environnement naturel ainsi qu'en laboratoire.



2. Créée en 1974 et d'une superficie de 650 hectares, la réserve nationale de Cerbère-Banyuls est un havre de paix pour plusieurs espèces marines, dont le corail rouge. Mais c'est aussi un laboratoire sous-marin pour les scientifiques du Lecob qui, depuis le début des années 2020, préservent et observent l'espèce. Celle-ci se trouve en général entre 10 m et 1000 m de profondeur. À Banyuls, le corail rouge vit par 30 m de fond.



3. Après un doctorat à l'université de Pise puis un premier postdoctorat à Barcelone, déjà sur le corail rouge, Lorenzo Bramanti a posé ses valises au milieu des années 2010 dans les Pyrénées-Orientales, pour un second postdoctorat, encore orienté sur l'étude de cet animal. Spécialiste de la plongée avec recycleur, le biologiste met en œuvre ses connaissances scientifiques pour élaborer un plan de sauvegarde de l'organisme – qui ne croît en moyenne que de 0,6 mm de diamètre par an.

4. Il y a cinq ans, Lorenzo et son équipe ont arrimé six « grottes » artificielles à une trentaine de mètres de profondeur dans de la réserve naturelle de Banyuls (une installation similaire avait déjà été implantée à Monaco). Ces grottes, en ciment, abritent chacune plusieurs coraux mâles comme femelles. Posées à même le sol marin, les cavités permettent d'étudier la croissance, la fécondité ainsi que la reproduction de ces animaux vivant exclusivement en colonies de plusieurs dizaines, voire centaines d'individus. Telles de petits laboratoires sous-marins, les grottes sont modulables – certains paramètres, comme le ratio mâle/femelle, la distance entre les grottes, ou encore la densité d'individus au sein de ces dernières peuvent être modifiés. On qualifie ces conditions expérimentales de « semi-naturelles ».



© LORENZO BRAMANTI / LECOB / CNRS IMAGES



5. Toujours prêt à enfile sa combinaison, Lorenzo Bramanti remonte plusieurs fois par an des plaques de carrelage (20 x 20 cm) qui ont été placées dans les grottes, où elles font office de substrat – et sur lesquelles cinq coraux, au maximum, ont été transplantés ou bien des larves se sont fixées. L'objectif de l'opération : connaître le sexe de chaque corail, afin de comprendre et d'optimiser la fécondation.

6. De retour en laboratoire, Lorenzo effectue plusieurs analyses sur le corail. Il va notamment déterminer le sexe de chaque individu. Pour ce faire, rien de plus simple... On attend la période de reproduction - le corail rouge n'en connaît qu'une seule par an, au mois de juillet. On regarde alors quels individus portent des spermatozoïdes et lesquels portent des ovocytes. À l'issue de la fécondation des ovocytes, les larves sont expulsées par leurs « mères » et peuvent rester dans la colonne d'eau jusqu'à un mois avant de trouver un substrat auquel se fixer.



7. Les chercheurs du Lecob s'intéressent également à l'environnement bactérien du corail rouge. En réalisant diverses analyses biologiques, ils ont déterminé que des bactéries de l'environnement marin produisent des biomolécules (appelées « métabolites ») qui attirent les larves de corail et favorisent leur fixation dans les grottes.



8. Cette année, grâce à l'étude de l'ADN d'un petit corail (ci-dessus), les chercheurs ont pu déterminer que ses géniteurs se trouvaient à une quinzaine de mètres l'un de l'autre, chacun dans l'une des grottes artificielles sous-marines. Ce résultat, *a priori* trivial, vient pourtant balayer une croyance vieille de plusieurs décennies voulant que les coraux rouges ne puissent se reproduire que si les individus se trouvent à quelques dizaines de centimètres les uns des autres. Un résultat que l'on doit en partie au système de grottes modulaires installé à Banyuls. Les scientifiques cherchent aussi à mettre

en place un système hybride de transplantation et de reproduction, à la fois en aquarium et dans les grottes artificielles. Cela permettrait à terme de contribuer à une relative restauration de l'espèce dans son habitat naturel. Selon Lorenzo Bramanti, cette restauration ne peut qu'être passive (en réduisant ou éliminant les causes qui ont mis l'espèce à mal ; par opposition à la « restauration active », soit la réintroduction d'une espèce dans un environnement). Et elle doit se doubler de changements dans les comportements humains – la pêche comme les activités participant aux dérèglements climatiques.



VOIR
LA VIDÉO



DANS LE GRAND NORD, LA MALÉDICTION DES RESSOURCES MINIÈRES



PREMIÈRE VUE, c'est un immense désert blanc. Une gigantesque calotte glaciaire recouvre les quatre cinquièmes de la plus grande île du monde (près de 2 200 000 km²). Et sur ses côtes arides vivent un peu moins de 60 000 personnes. C'est pourtant ce même désert blanc qui a suscité durant des

mois un grave conflit international entre l'Europe et les États-Unis. L'enjeu : la souveraineté du Groenland, territoire constitutif du royaume du Danemark.

Comme d'autres avant lui, Donald Trump s'est laissé prendre au piège de cette «*terre de fascination géologique*», estime l'anthropologue Pia Bailleul¹, autrice d'une thèse sur les ressources naturelles du Groenland. Car, sous la surface des glaces, «*on trouve de tout dans le sous-sol : des diamants, des pierres précieuses comme les rubis, des métaux lourds tels le zinc, le fer et le nickel, ou encore des matières stratégiques, à l'instar des terres rares et du lithium*».

L'Union européenne était consciente des richesses de l'île polaire bien avant la confrontation avec son puissant partenaire d'outre-Atlantique. Elle avait qualifié le Groenland de «*territoire critique et stratégique*» pour sa transition énergétique dès l'Accord de Paris, en 2015, puis à nouveau dans son Pacte vert, en 2019.

Transfert de compétences

Mais que pensent les Groenlandais et Groenlandaises – des Inuits, pour 90 % – de tous ces regards braqués sur leur territoire ? Ambivalente, leur relation aux ressources minières nourrit depuis un demi-siècle le projet autonome de l'île. En 1979, la loi sur l'autonomie du Groenland a transféré aux autorités autonomes du territoire quasi toutes les responsabilités exercées par les autorités danoises. Dès lors, le développement minier est devenu indissociable de la quête d'autonomie groenlandaise.

← Forage expérimental du projet Tanbreez d'extraction de terres rares, dans le sud du Groenland. Un projet passé aux mains d'une société états-unienne en 2024.

La crise internationale autour du Groenland a mis en lumière la richesse de son sous-sol, mais occulté l'exploitation de ces ressources par ses habitants. Tout autour du cercle arctique, les peuples autochtones se mobilisent pour maîtriser la ruée minière sur leurs territoires.

CD MAXIME LEROLLE

En 2009, le dernier changement de régime gouvernemental a établi le transfert des compétences restantes du Danemark au Groenland. Et, six mois plus tard, le Parlement local a voté la première loi minière groenlandaise. Laquelle «*fait du sous-sol la propriété du gouvernement groenlandais*, explique Pia Bailleul, et marque ainsi la souveraineté du Groenland sur son propre territoire».

Au-delà de l'affichage patriotique, cette loi complète la stratégie commerciale dite de la «*zone frontière*». Depuis 1990, celle-ci vise à présenter le Groenland comme un territoire sous-exploité à explorer, afin d'y attirer des industriels étrangers. Dont les géants miniers australiens et canadiens au premier chef, suivis par les pays européens et les États-Unis. En revanche, contrairement aux déclarations de Donald Trump, on n'y voit guère l'ombre d'une compagnie russe ou chinoise...

L'objectif de la stratégie de la zone frontière est aussi bien économique que politique : «*les exportations minières ont vocation à remplacer les subsides danois, qui pèsent jusqu'à la moitié du budget national*», note l'anthropologue.

Un vecteur d'indépendance économique ?

Bien qu'il soit associé à l'indépendance économique du territoire, le développement minier du Groenland n'est pas exempt de contestations au sein de l'île. Ses détracteurs font valoir son coût faramineux.

Afin de s'émanciper totalement des subsides danois, il faudrait construire 24 projets miniers à grande échelle (et autant de barrages hydroélectriques pour les alimenter), à raison de 5 milliards de couronnes danoises (environ →



← La proposition de Donald Trump d'acheter le Groenland a suscité de vives protestations – comme ici, à Nuuk, la capitale du territoire, en janvier 2026.

nationale, en mitigeant la dépendance aux exportations : « *Le Groenland ne se rue pas vers l'indépendance parce qu'il peut prendre le temps de construire son autonomie* ».

L'inclinaison extractiviste au Groenland n'est cependant pas du goût des autres peuples arctiques. « *L'extractivisme raisonné groenlandais est très mal perçu par les autres peuples arctiques, qui subissent un extractivisme Nord-Sud depuis des décennies* ».

Une richesse en trompe-l'œil

Tout comme le Groenland, les régions arctiques et subarctiques qu'il a étudiées sont extrêmement riches en ressources naturelles, abonde Simon Maraude³, auteur

d'une thèse sur des territoires autochtones au Québec et en Suède. L'ouest du Québec recèle or, fer et lithium ; et on trouve fer et forêts dans le nord de la Suède – la compagnie minière nationale fournit à elle seule jusqu'à 80 % du fer européen. Depuis peu, des champs d'éoliennes s'implantent également dans ces espaces venteux et peu peuplés.

Au premier abord, la situation du territoire d'Eeyou Istchee Baie-James (Québec), où vivent les Cris depuis 5 000 ans, ressemble donc à celle du Groenland. Comme sur la grande île, « *les leaders cris ont misé sur le développement minier pour faire de leur nation l'une des plus prospères du Canada*, relate le géographe rennais. Et, de fait, c'est l'une des Premières Nations les plus riches du pays ».

En contrepartie de l'exploitation de leur territoire ancestral, les Cris obtinrent un certain nombre d'emplois dans les mines, des formations locales, etc. « *Mais avaient-ils vraiment le choix ?* », interroge le chercheur. À la différence de leurs voisins groenlandais, les Cris consentirent au développement minier et hydroélectrique – imposé par le gouvernement provincial – plus qu'ils le choisirent.

Les années 1970 marquèrent un tournant : le « *Projet du siècle* » créa neuf barrages hydrauliques pour favoriser l'autonomie énergétique de la province. Barrages qui inondèrent au passage les terres de chasse et de trappe, les cimetières traditionnels et les zones de campement des Cris, alors écartés des consultations. C'est à la suite de cette catastrophe environnementale et sociale que les Cris se mobilisèrent pour réclamer leur intégration au projet minier. Avec quelques succès notables.

La signature de la Convention de la Baie James et du Nord québécois, en 1975, permit notamment de fournir une compensation financière aux communautés locales. « *La question n'était pas d'être pour ou contre le développement,*

→ 670 millions d'euros) par projet – une somme inédite à l'heure actuelle pour de telles infrastructures au Groenland². Des investissements également risqués en raison de la fonte du pergélisol, de l'enneigement, de l'aridité et de l'isolement géographique de l'île arctique.

En conséquence, il est pour l'heure « *difficile de trouver des investisseurs vu les risques, le manque de main-d'œuvre locale et les standards environnementaux très élevés* », assure Pia Bailleul. À ce jour, la stratégie de la zone frontière n'a ouvert que deux mines : celle d'anorthosite, à Qeqertarsuaq, sur la côte ouest, et une autre d'or, dans le sud du pays, au fonctionnement intermittent depuis 2004.

Un autre extractivisme est-il possible ?

Les opposants à l'extractivisme minier font aussi valoir les enjeux environnementaux d'un pays en première ligne du réchauffement climatique. « *Sur ce territoire très peu anthropisé [modifié par l'être humain, Ndlr], chaque mine en activité augmenterait de manière drastique les émissions de gaz à effet de serre et autres pollutions à l'échelle locale* », confirme la chercheuse.

À ces problématiques environnementales s'ajoute une forte demande de redistribution sociale. Refusant de voir leurs ressources naturelles volées par des industriels étrangers, les Groenlandais se mobilisent contre les grands projets miniers – bien qu'ils soutiennent le développement extractiviste sur le principe.

Pour ne pas tomber sous la coupe des compagnies minières, ils plébiscitent un « *extractivisme raisonné* », selon Pia Bailleul, « *avec des mines de 200 travailleurs maximum, une diversification économique pour éviter la dépendance d'une ville à l'industrie minière et une activité extractive au service de la population, et non l'inverse* ». Les subsides danois servent là de garde-fou à la souveraineté

“ L’un des combats des Samis, c’est de considérer que le mal a été fait et qu’il faut bénéficier des retombées des projets existants.”

observe le géographe, *mais d’y être associé ou non. En se concentrant sur certaines modalités d’exploitation, et non pas sur son bien-fondé, le projet de développement accepté par les leaders cris reproduit des mécanismes coloniaux.* »

Ce compromis donna néanmoins une influence plus forte à la nation autochtone sur le développement de la région. En témoigne le refus catégorique des Cris d’un projet de mine d’uranium dans les années 2010.

Des éleveurs face aux géants du fer

En Suède, la situation des Samis est toute autre. Les derniers autochtones européens se montrent « *beaucoup plus critiques du développement minier que les Cris... sans doute parce qu’ils n’ont pas les mêmes capacités politiques* », remarque Simon Maraud. Les Samis, traditionnels éleveurs de rennes, sont éparpillés sur quatre États : Finlande, Norvège, Russie et Suède. Aussi peinent-ils

à faire entendre leur voix auprès de leurs gouvernements respectifs. Avec pour conséquence une prolifération des mines (à l’exemple de la gigantesque exploitation de fer de Kiruna, dans le nord de la Suède) au détriment de la culture et de l’économie samie.

De fait, depuis la colonisation suédoise, au début du XVII^e siècle, les terres de pâturage des rennes n’ont cessé de reculer. Dernier exemple en date : le projet de mine de fer à ciel ouvert de Kallak (*Gállok*, en sami), à 30 km de Laponia, un site inscrit au patrimoine mondial de l’Unesco, en plein territoire de migration des rennes. En dépit des mobilisations locales et de l’opposition de l’Unesco, l’État suédois a donné son accord au projet en 2022. « *Les Samis n’ont pas eu leur mot à dire* », regrette le géographe français.

Désormais, ceux-ci espèrent maîtriser le développement minier de leur territoire au lieu d’en être exclus. « *L’un des combats des Samis, aujourd’hui, c’est de considérer que le mal a été fait et qu’il faut bénéficier des retombées des projets existants sur leur territoire, explique Simon Maraud, mais sans ouvrir de nouvelles mines.* »

Cris, Samis, Inuits du Groenland... Autant de peuples encore sous le joug d’un colonialisme économique, auquel ils souscrivent tout en s’efforçant de le maîtriser. C’est là tout un paradoxe : à l’extrême nord de la Terre figurent des territoires qu’on peut rattacher au Sud global. ●



PARTAGEZ
CET ARTICLE

1. Chercheuse postdoctorante à Sciences Po Paris au sein du Centre de recherches internationales (unité CNRS/Sciences Po Paris) et du Fonds Bruno Latour.
2. Voir : tinyurl.com/Groenland-ressources
3. Chargé de recherche au CNRS au sein du laboratoire Espaces et sociétés (unité CNRS/Institut Agro/Le Mans Univ./Nantes Univ./Univ. d'Angers/Univ. Caen-Normandie/ Univ. Rennes 2).

← L’exploitation minière perturbe l’élevage de rennes, qui reste l’activité économique traditionnelle du peuple sami.

Des chercheurs ont mis en évidence l'existence d'un rythme physiologique infra-lent pendant le sommeil des reptiles. Une découverte qui éclaire l'évolution du sommeil... et ses mystères.

🔗 JULIE COQUART

LES REPTILES dorment lentement. Plus exactement, pendant leur sommeil, de nombreux paramètres physiologiques varient ensemble sur un rythme infra-lent. Comment le chercheur Paul-Antoine Libourel et ses collaborateurs ont-ils découvert cela ? Commençons par ce qui est bien connu. Quand ils dorment, les humains alternent entre deux états de sommeil : le sommeil paradoxal et le sommeil lent.

Le premier tire son nom du fait qu'il associe une totale atonie musculaire, des mouvements rapides des yeux et une activité cérébrale proche de l'éveil, tandis que le second se caractérise par l'apparition d'ondes lentes sur l'électroencéphalogramme. Chacun d'entre nous enchaîne ainsi plusieurs cycles de 60 à 120 minutes, lors desquels se succèdent ces deux stades.

Les humains ne sont cependant pas les seuls à connaître deux états de sommeil. Ils partagent cette particularité avec l'ensemble des mammifères terrestres et avec les oiseaux. « *L'autre point commun de ces êtres vivants*, précise Anthony Herrel, biologiste au Muséum national d'histoire naturelle et coauteur de l'étude¹, *c'est d'être homéothermes – ils maintiennent leur corps à une température constante.* »

« *Ces deux composantes sont-elles le fruit du hasard ou sont-elles corrélées ?* », s'est demandé Paul-Antoine Libourel, chargé de recherche au Centre de recherche en neurosciences de Lyon puis au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive² de Montpellier. Ceci l'a poussé à étudier le sommeil des reptiles, des animaux ectothermes (dont la température corporelle varie avec celle de l'extérieur).

Un cortex différent

Paul-Antoine Libourel s'est donc intéressé au sommeil des caméléons, geckos et autres bestioles terrestres à écailles. Une étape bien plus facile à envisager qu'à mettre en œuvre. Car comment savoir si un lézard qui se chauffe au soleil, immobile sur sa pierre, est en train de dormir ou s'il est en embuscade ?

Par ailleurs, le cerveau des reptiles est organisé différemment de celui des mammifères. Le cortex reptilien possède trois couches, alors que



Dormir comme un lézard

celui des mammifères en compte six. « *On peut supposer qu'une structure anatomique différente entraîne un fonctionnement différent*, pointe le chercheur. *Cela complique donc la comparaison.* »

Avec ses collègues de l'Institut des nanotechnologies de Lyon³, il a donc mis au point un dispositif miniaturisé sans fil capable de capter et d'enregistrer les changements physiologiques, cérébraux et comportementaux de reptiles, d'oiseaux et de mammifères. Ce dispositif a permis d'assurer une surveillance multimodale des variations d'activité cérébrale, cardiaque, respiratoire, musculaire et oculaire tout au long des cycles de sommeil. « *Nous avons aussi eu recours à l'imagerie fonctionnelle par ultrasons, une technique qui permet de détecter de très subtiles variations de volume sanguin* », indique le chercheur.

Mécanisme fondamental

Dix espèces de vertébrés ont ainsi été étudiées pendant leur repos, dont des geckos, des dragons barbus, des caméléons, des pigeons, des rats et... des humains.



**PARTAGEZ
CET ARTICLE**



© SAGI ILLUS / ISTOCKPHOTO.COM

↑ Un iguane assoupi.

L'équipe a mis en évidence l'existence d'une oscillation physiologique très lente (dite « infra-lente »). Celle-ci semble synchroniser l'activité cérébrale, l'activité cardiaque, la respiration et les mouvements oculaires.

D'une période d'environ 100 secondes, ce rythme infra-lent a été observé chez tous les reptiles en sommeil. Chez les autres vertébrés, on retrouve un rythme lent (en réalité, un peu moins lent, car sa période descend à 50 secondes) qui apparaît pendant le sommeil lent, mais pas durant le sommeil paradoxal.

Le fait que les rythmes lents soient partagés par des espèces qui ont divergé il y a 300 millions d'années suggère qu'il s'agit probablement d'un mécanisme physiologique fondamental. « *Ce rythme infra-lent pourrait être la manifestation physiologique du fonctionnement d'une sorte de pompe qui permet de nettoyer le cerveau pendant le sommeil* », avance Paul-Antoine Libourel.

L'entretien du cerveau est assuré par la circulation d'un fluide cérébrospinal (appelé aussi « liquide céphalo-rachidien »), qu'on prélève lors des ponctions lombaires. Il baigne le tissu cérébral et permet d'évacuer les déchets métaboliques des neurones vers le système lymphatique périphérique. ●

1. Voir : doi.org/10.1038/s41593-025-02159-y

2. CEFE, unité CNRS/EPHE-PSL/IRD/Université de Montpellier.

3. INL, unité CNRS/CPE Lyon/École centrale de Lyon/Insa Lyon/Lyon 1 Université.

+ RÊVES ET MÉMOIRE

À la fin des années 1950, les travaux du neurobiologiste Michel Jouvet ont mis en évidence l'existence d'un état particulier du sommeil chez le chat : le sommeil paradoxal. « Paradoxal » car, alors que le cerveau présente une activité proche de celle de l'éveil, le corps, lui, témoigne d'un relâchement musculaire complet. Lors de cet état, les yeux sont animés de mouvements saccadés, qui lui ont donné son autre nom : *Rapid eye movement* (REM) *sleep*. Cet état existe aussi chez les humains.

En parallèle à ces propriétés, le sommeil REM est associé à une fréquence élevée de rêves. On suppose que c'est principalement lors de cet état que la mémoire se consolide et que la régulation des émotions entre en jeu. Or le rythme infra-lent orchestre des variations du volume sanguin. Ces dernières entraînent ainsi l'entrée et la sortie du liquide céphalo-rachidien.

Afin de mieux comprendre ce phénomène, Paul-Antoine Libourel s'intéresse désormais aux éléphants de mer, dont le sommeil peut être très différent selon qu'ils sont en mer ou sur la terre...

Rançongiciels, « des écosystèmes criminels organisés »

Vous êtes l'auteur d'un article¹ qui classe les rançongiciels (ou *ransomwares*) comme l'une des principales cybermenaces pour les individus, les entreprises, les organisations et les États. Comment fonctionnent-ils ?

JEAN-YVES MARION* Les rançongiciels sont des programmes malveillants (ou *malwares*) conçus pour extorquer de l'argent en bloquant l'accès à des systèmes ou à des données, généralement en échange d'un paiement en cryptomonnaie. Concrètement, une attaque commence par une intrusion, puis se propage à l'intérieur du système informatique à travers les ordinateurs, serveurs, téléphones, box et autres objets connectés.

Les attaquants cherchent à étendre leurs accès, à collecter et exfiltrer des données sensibles, et peuvent ensuite chiffrer tout ou partie des systèmes (bien que certaines attaques reposent uniquement sur la menace de divulgation). L'objectif n'est donc pas seulement de perturber un système, mais de créer une situation de pression sur la victime, en combinant indisponibilité des données et risque de fuite d'informations.



JEAN-YVES MARION
Professeur à l'université de Lorraine
et membre du Laboratoire lorrain
de recherche en informatique et ses
applications (Loria, unité CNRS/
Université de Lorraine).

Les rançongiciels sont des programmes informatiques malveillants évoluant dans un écosystème où s'entremêlent criminalité, cyberespionnage et désinformation. Décryptage.

PROPOS RECUEILLIS PAR MATTHIEU STRICOT

Le monde des rançongiciels a considérablement évolué au cours des dernières années. Pouvez-vous expliquer le modèle actuellement dominant du *Ransomware-as-a-Service (RaaS)* ?

J.-Y.M. Les rançongiciels fonctionnent aujourd'hui comme de véritables écosystèmes criminels structurés. Les acteurs communiquent et recrutent via différents canaux, notamment des forums spécialisés ou des messageries telles que Telegram. Pour étudier ces milieux, nous exploitons diverses sources, comme les fuites internes de certains groupes criminels, mais aussi des données collectées sur le *dark web*, représentant plusieurs dizaines de millions de messages.

Le modèle *Ransomware-as-a-Service* repose sur une forte spécialisation des tâches. Certains groupes développent les outils malveillants, d'autres vendent des accès compromis à des systèmes informatiques ou assurent la négociation des rançons.

Cette organisation modulaire rend ces structures particulièrement résilientes. Lorsqu'un service est

démantelé, le reste de l'écosystème peut continuer à fonctionner. Les groupes de rançongiciels ne réalisent d'ailleurs pas toujours eux-mêmes les attaques. Ils s'appuient souvent sur des affiliés, rémunérés en fonction du succès des opérations.

Cet écosystème s'appuie également sur des services techniques spécialisés, comme les *Crypters-as-a-Service*, dont l'objectif est de rendre les programmes malveillants difficiles à détecter par les antivirus et les systèmes de défense.

385 000

Nombre de cyberattaques subies
en 2022 par des organisations françaises
(plus de 1 050 par jour)





© ROSLAN RAHMAN / AFP

← Cellule de lutte contre la cybercriminalité dans les bureaux d'Interpol à Singapour (janvier 2026).

Quelles sont les tactiques utilisées par les opérateurs de rançongiciels ?

J.-Y.M. Le fonctionnement est assez similaire à celui d'un *malware*. Le processus commence par une étape de reconnaissance, pour connaître les victimes et, par exemple, le montant de leurs revenus. Les pirates ont la capacité d'obtenir des informations personnelles avant d'envoyer un e-mail de *phishing* (hameçonnage) personnalisé à la cible.

Ensuite, l'étape cruciale consiste à entrer dans le système. La première méthode utilisée pour cela est l'ingénierie sociale [Dans le contexte des rançongiciels, l'ingénierie sociale consiste à manipuler psychologiquement un utilisateur pour l'amener à exécuter lui-même l'action qui déclenche l'infection, Ndlr] ou à exploiter des fuites de mots de passe. La seconde est liée aux vulnérabilités. Les systèmes informatiques peuvent contenir des erreurs de conception qu'on peut exploiter afin de s'y introduire. Une méthode avancée peut consister à atteindre le composant d'un logiciel à travers ses fournisseurs, en amont². Une fois à l'intérieur d'un système, les pirates lancent la dernière étape en désactivant les sécurités, en restant discrets et en installant des portes dérobées pour s'évader si besoin. Ils peuvent ainsi avancer toujours plus loin dans l'attaque.

→

Ces services utilisent des techniques d'*obfuscation* avancées [l'*obfuscation* – terme qui peut se traduire par « dissimulation » – de code consiste à rendre un code informatique le plus difficilement compréhensible possible par un être humain, tout en le laissant fonctionner parfaitement, Ndlr] pour générer rapidement de nouvelles variantes de *malwares* capables d'échapper aux défenses. Pour suivre ces évolutions, nous développons Binomics, une plateforme qui « séquence » les *malwares* afin d'analyser leurs transformations.

Les modèles de rançongiciels, multiples, dépassent toutefois ce type d'organisations.

J.-Y.M. Oui, et c'est précisément ce qui rend ces phénomènes complexes à analyser. On observe aujourd'hui une diversification des acteurs et des objectifs. À côté des grands écosystèmes structurés, on voit réapparaître des acteurs plus isolés ou opportunistes, notamment dans certaines affaires récentes

de vols et de divulgations de données. Les frontières entre cybercriminalité, espionnage et déstabilisation deviennent également de plus en plus poreuses. Certains groupes peuvent agir avec le soutien direct ou indirect d'États. La Corée du Nord est souvent citée comme exemple d'un usage du cybercrime à des fins de financement ou de pression stratégique.

Enfin, il devient important de ne plus considérer séparément les rançongiciels, le cyberespionnage et la désinformation. Une fuite de données issue d'une attaque peut ensuite alimenter des campagnes de manipulation, de déstabilisation ou de perte de confiance.

“ Une fuite de données issue d'une attaque peut alimenter des campagnes de manipulation, de déstabilisation ou de perte de confiance.”

PARTAGEZ
CET ARTICLE

Une fois le méfait opéré, comment les organisations se répartissent-elles les gains ?

J.-Y.M. Pour des groupes bien structurés, soit le groupe récupère la rançon et reverse à ses affiliés, soit l'inverse. Ce partage est parfois défini par des contrats, plus ou moins respectés. Ces mécanismes sont toujours extrêmement difficiles à analyser, car tout se déroule généralement à distance, au sein d'écosystèmes clandestins où l'absence de cadre favorise les asymétries d'information et les risques de fraude³.

La phase de blanchiment vise à atténuer la traçabilité des transactions. Elle mobilise des intermédiaires qui fragmentent les flux et compliquent leur attribution.

Comment peut-on se protéger contre ces organisations ?

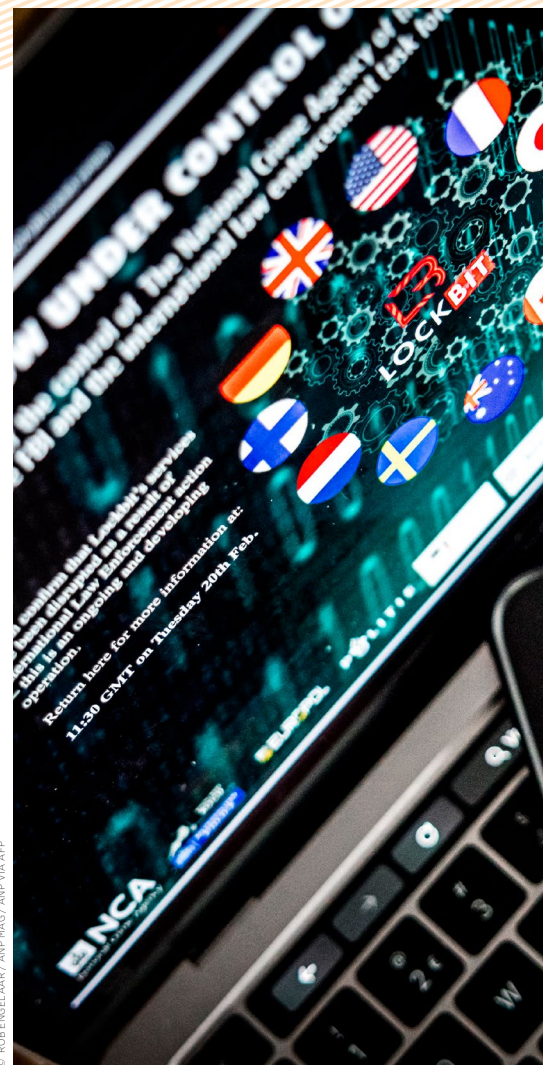
J.-Y.M. La première ligne de défense reste simple : maintenir ses logiciels à jour et adopter de bonnes pratiques, comme l'utilisation d'un gestionnaire de mots de passe. En parallèle, les forces de l'ordre et la justice mènent un travail essentiel de démantèlement, notamment à travers des opérations internationales ciblant à la fois les infrastructures criminelles, leurs affiliés et les acteurs solitaires.

Au Laboratoire lorrain de recherche en informatique et ses applications (Loria), nous contribuons à cet effort en collaboration avec les forces de l'ordre, le ministère de la Justice et Europol. Nos travaux reposent sur une approche systémique. Nous développons des méthodes d'analyse, de détection et d'investigation des programmes malveillants. Nous étudions également les capacités offensives, car il est indispensable de comprendre et d'anticiper les modes

58 600 €

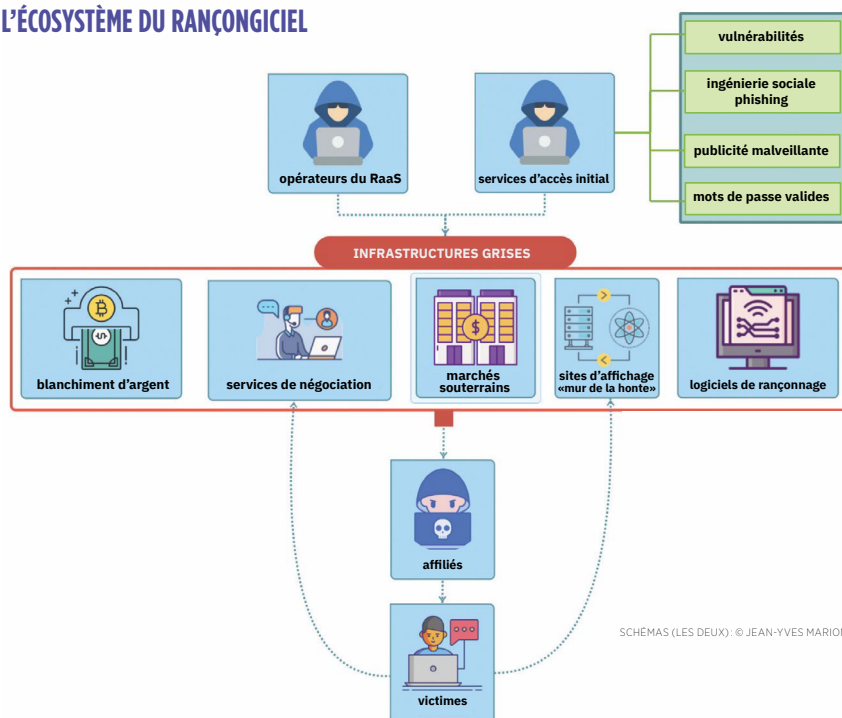
Coût moyen d'une cyberattaque réussie pour une entreprise ou organisation publique en France

opérateurs des attaquants pour mieux s'en défendre. Mais, surtout, ces phénomènes relèvent aussi de dynamiques économiques, sociales et juridiques. C'est pourquoi nous menons des travaux interdisciplinaires avec des sociologues, des juristes et des criminologues, afin de mieux comprendre la structuration et le fonctionnement de ces organisations. Nous organisons dans cet esprit une école internationale de cybercriminologie⁴. Nos observations s'appuient également sur des échanges avec les services de police, ce qui permet de confronter les analyses académiques aux réalités du terrain.



© ROB ENCEI A4B / ANP MAG / ANP VIA AFP

L'ÉCOSYSTÈME DU RANÇONGICIEL



SCHEMAS (LES DEUX) : © JEAN-YVES MARION, 2025



← En 2024, une coopération inter-États a démantelé LockBit, un groupe de hackers spécialisé dans les rançongiciels.

“ L’intelligence artificielle est déjà utilisée pour automatiser et personnaliser des attaques.”

L’intelligence artificielle pourrait-elle transformer le modèle des rançongiciels ?

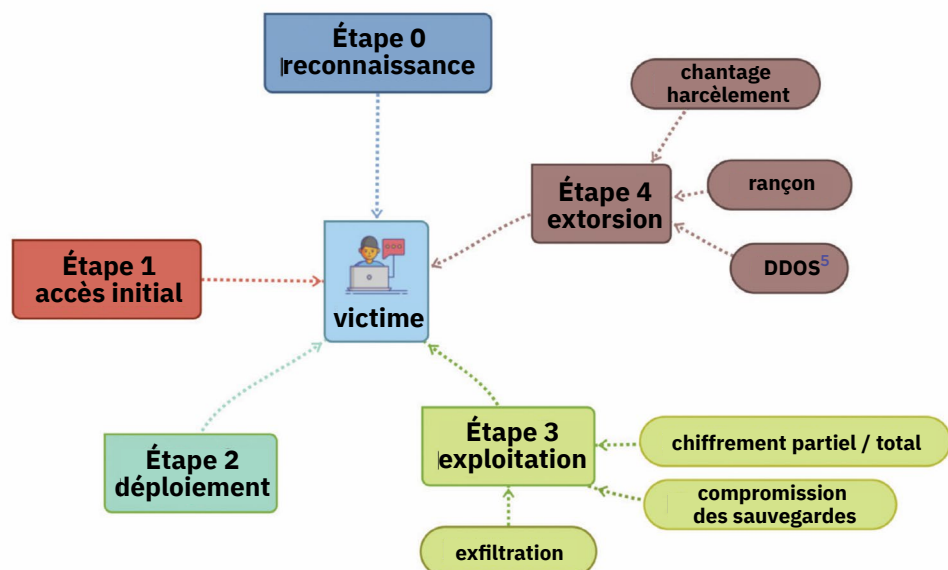
J.-Y.M. L’intelligence artificielle est déjà utilisée, notamment dans l’ingénierie sociale, pour automatiser et personnaliser des attaques comme le *phishing*. Elle contribue aussi à abaisser le niveau d’expertise technique requis, en facilitant certaines étapes de préparation des attaques. Mais la transformation la plus profonde pourrait venir de l’émergence d’agents autonomes, qui pourraient progressivement remplacer certains rôles aujourd’hui tenus par des affiliés humains.

Cette évolution soulève aussi un enjeu majeur de recherche. Nous travaillons sur un observatoire des usages malveillants de

l’intelligence artificielle, afin de mieux comprendre comment ces technologies transforment les chaînes d’attaque et, plus largement, les stratégies de déstabilisation. Aujourd’hui, une cyberattaque ne vise plus uniquement à perturber un système informatique. Les systèmes compromis et les données volées peuvent être exploités dans des opérations d’influence et de manipulation.

Comprendre ces phénomènes demande donc de croiser plusieurs approches – informatiques, sociales, informationnelles et géopolitiques – afin d’analyser l’ensemble de la chaîne, depuis l’intrusion informatique jusqu’à l’exploitation cognitive dans l’espace informationnel. ●

ATTAQUE DE RANÇONGICIEL : LES 5 ÉTAPES PRINCIPALES



1. Voir : doi.org/10.1145/3697829

2. Lorsqu’une attaque est menée sur la chaîne logistique logiciel, une application piratée qui tourne sur un ordinateur ou un téléphone peut embarquer de nombreux autres logiciels tiers (ou « librairies »). Dès que l’application est lancée sur un appareil, toutes les données sont exfiltrées. Ce sujet est d’actualité avec le Cyber Resilience Act, règlement européen qui demande que les entreprises soient en capacité de préciser tout ce qui tourne dans leur système, du point de vue logiciel comme matériel. L’objectif est de renforcer la cybersécurité des produits comportant des éléments numériques commercialisés dans l’Union européenne.

3. Les observations montrent qu’un fort risque de fraude marque les marchés de *Crypter-as-a-Service*, conduisant à la mise en place de mécanismes de régulation informels. En particulier, les vendeurs doivent fournir un dépôt de garantie pour accéder aux transactions, ce qui permet d’indemniser les acheteurs en cas de service non conforme.

4. Voir : cybercriminology-nancy.fr

5. DDOS : attaque par « déni de service », qui sature un site de requêtes pour le rendre indisponible aux usagers légitimes.

INCENDIES : LA SCIENCE EN RENFORT

D'ici à 2100, les incendies de végétation pourraient devenir un péril majeur. À travers une expertise scientifique collective, le CNRS livre des clés de compréhension de ce risque dans les zones où voisinent la ville et les espaces naturels. Le but est notamment d'apporter aux pouvoirs publics un éclairage sur la prévention et la gestion de crise.

🔗 MAXIME LEROLLE

Des incendies à travers une bonne partie de l'Hexagone, du Sud-Est et de la Gironde aux Vosges et même à la Bretagne... Ce tableau n'est pas l'apocalypse incendiaire dépeinte par René Barjavel dans son roman *Ravage* (1943), mais celui de la France à l'été 2022. Depuis, d'autres incendies de grande ampleur ont balayé le pays. Et la situation pourrait s'aggraver d'ici à 2100. Si les tendances actuelles d'émissions se poursuivent, la France est susceptible de connaître un réchauffement d'environ +4°C par rapport à l'ère préindustrielle – trajectoire désormais retenue comme référence pour l'adaptation au changement climatique¹. Dans ce contexte, les incendies de végétation pourraient concerner des territoires plus nombreux et pendant des saisons plus longues.



← En juillet 2017, un incendie a ravagé 16 000 hectares à Bormes-les-Mimosas (Var). Depuis, la ville a mis en place un plan communal de sauvegarde.

Le risque grandit d'autant que les facteurs de vulnérabilité aux incendies se sont multipliés tout au long du ^{xx}e siècle. L'urbanisation et la déprise agricole continues du pays ont nourri deux phénomènes concomitants : l'étalement urbain (par la périurbanisation) et l'enfrichement des surfaces arables et pastorales.

Justement, « l'analyse des publications scientifiques fait ressortir que les points de départ des feux se concentrent à l'interface entre les villes et les espaces naturels – soit là où se concentrent également les personnes, les bâtiments et les activités », observe Christine Bouisset, géographe à l'université de Pau et des Pays de l'Adour², et l'une des deux copilotes scientifiques de l'expertise.

Cocktail explosif

En parallèle, l'Hexagone a vu doubler sa surface forestière en 100 ans. « Cela ne signifie pas que le risque double mécaniquement mais, selon les territoires, que la quantité et la continuité de la

biomasse combustible peuvent fortement augmenter. À titre d'ordre de grandeur, 2 kg de bois sec contiennent une énergie comparable à celle de 1 l d'essence », relève Jean-Baptiste Filippi, l'autre copilote³.

Rapprochement des espaces habités d'où partent principalement les incendies, augmentation générale du volume et de la continuité de végétaux combustibles, et changement climatique : le cocktail est explosif. Et les conséquences, sévères. « Une proportion infime des incendies concentre l'essentiel des surfaces brûlées et des impacts », précise le spécialiste de la modélisation des incendies de végétation.

Dans ce contexte brûlant, le CNRS s'est autosaisi du sujet, à travers sa Mission pour l'expertise scientifique, et a mené une expertise scientifique collective. Les 17 scientifiques impliqués ont analysé plus de 1 000 publications internationales.

Consacrée à « la résilience des interfaces urbaines face aux incendies de végétation dans le contexte du changement climatique », cette expertise affiche un double objectif. *Primo*, mieux comprendre les causes et les conséquences de ces phénomènes dans ces zones d'interface – qui concentrent deux tiers des départs de feu en France. *Secundo*, fournir à l'action publique l'éclairage scientifique requis pour adapter en conséquence la prévention et la gestion de crise, ainsi que l'aménagement des villes et leur gouvernance.

“ L'analyse des publications scientifiques fait ressortir que les points de départ des feux se concentrent à l'interface entre les villes et les espaces naturels.”

→ Selon les années, moins de 10 événements, parfois un seul, peuvent représenter la majeure partie du bilan. »

Le changement climatique participe déjà aux conditions favorables à ces incendies considérés comme extrêmes à travers le globe. Et un nombre croissant de personnes devient vulnérable à ces événements extrêmes. « Les études scientifiques estiment aujourd'hui que 400 millions [de personnes] sont exposées dans le monde, notamment parce qu'elles habitent cette interface, pointe Christine Bouisset. Or, dans certaines régions du monde particulièrement sujettes aux incendies, comme l'Australie et les États-Unis, il devient de plus en plus difficile de s'assurer contre les feux. »

Une étude sur 2025 a estimé que les dégâts liés aux incendies couverts par les compagnies d'assurances se sont élevés à 107 milliards de dollars (91,4 milliards d'euros) cette année-là⁴, dont 40 milliards pour les seuls incendies de Los Angeles, en janvier.

En outre, même si elles sont plus complexes à chiffrer, ces conséquences affectent également la biodiversité. Les feux réguliers font partie de nombreux écosystèmes. Mais la virulence de certains événements extrêmes ou la répétition fréquente des incendies déséquilibrent les cycles naturels en uniformisant les paysages. Ce qui contribue, en retour, à renforcer l'aléa.

“ Il est essentiel de préparer la population en amont – via des plans individuels scénarisés – et, au plus fort de la crise, de lui fournir des informations précises et factuelles.”

Face à l'augmentation du risque d'incendie, la littérature scientifique s'accorde sur l'importance d'une adaptation de la prévention à cette nouvelle donne.

À court terme, pour réduire le risque, l'expertise identifie plusieurs leviers d'action à combiner : débroussaillage autour des constructions, plans de prévention, mais aussi association des populations concernées aux politiques publiques.

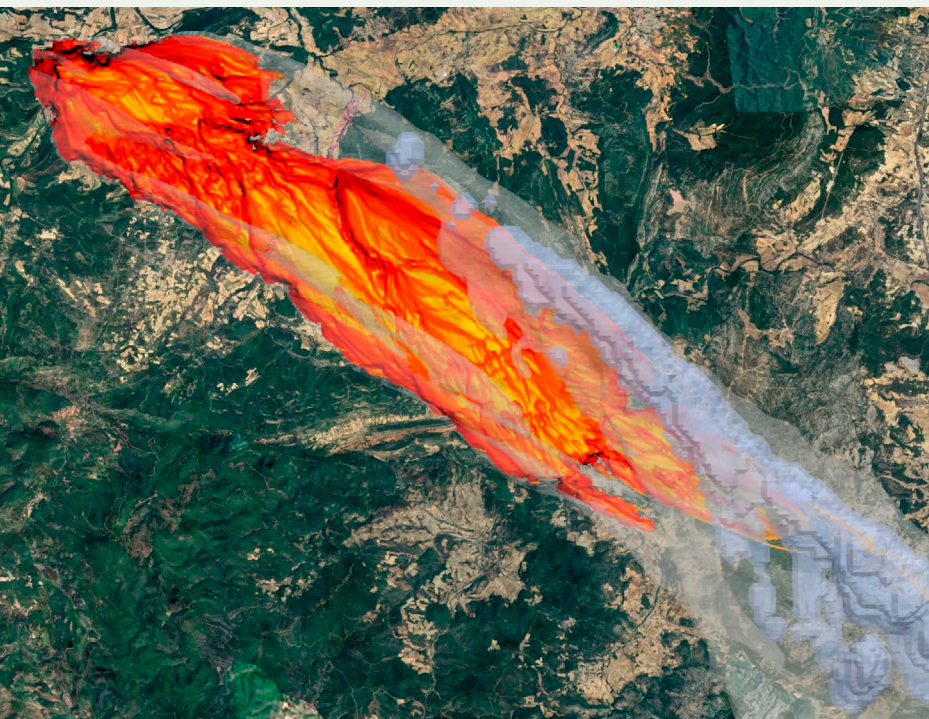
70 %
des zones à risque d'incendie de végétation en France se situent à l'interpénétration du bâti et de la végétation

La gestion de crise

L'expertise dégage également de l'analyse de la littérature scientifique quelques mesures pour mieux anticiper, arbitrer, et protéger biens et populations au plus fort d'une crise. En complément du positionnement des moyens de lutte lors des jours à risque, il est souligné l'importance des outils de détection, de suivi et d'aide à la décision (satellites, caméras, drones, modèles de prévision de propagation), ainsi que le besoin de renforcer les capacités d'anticipation.

« Les outils de simulation permettent déjà de raisonner en scénarios pour de nombreux incendies. Mais les feux extrêmes, notamment lorsqu'ils interagissent fortement avec l'atmosphère, restent difficiles à anticiper avec les outils standards », constate Jean-Baptiste Filippi.

En plus de la prévision météorologique, l'expertise met en avant la nécessité de sensibiliser la population aux gestes qui sauvent. « Face aux incendies extrêmes, il apparaît qu'attendre les pompiers chez soi n'est pas toujours la meilleure option, remarque par exemple Christine Bouisset. La littérature



← Simulation couplée feu-atmosphère au 5 août 2025 à 22 heures de l'incendie géant dans le massif des Corbières (Aude).



↑ Lutte contre un feu de broussailles dans le Finistère, en 2022.

converge pour considérer qu'il est essentiel de préparer la population en amont – via des plans individuels scénarisés – et, au plus fort de la crise, de lui fournir des informations précises et factuelles. »

Adapter les espaces et les espèces

Derrière les actions à court et moyen termes, il s'agit de repenser durablement la ville et ses périphéries, afin de réduire le risque d'incendie sur le long terme. Ainsi, pour limiter l'exposition aux incendies de végétation en lisière de l'espace urbain, l'urbanisme et l'aménagement peuvent contribuer à réduire la vulnérabilité et à optimiser les secours, souligne l'expertise. Ce qui amène à questionner l'articulation avec les politiques de végétalisation des villes dans les zones à risque, où il est nécessaire de penser les espèces et leurs agencements. Si celles-ci ont pour but de « *rafraîchir [ces zones] à l'heure du réchauffement climatique, elles fournissent dans le même temps autant de combustible aux incendies* », s'inquiète Jean-Baptiste Filippi.

L'expertise a analysé les retours d'expérience de pays habitués aux feux, comme les États-Unis et l'Australie, qui font apparaître l'intérêt de développer en France et en Europe une véritable culture du risque. Conclusion de Christine Bouisset : « *Il s'agit désormais d'apprendre à vivre avec le risque, de l'intégrer dès la genèse d'un projet d'aménagement et d'y former les décideurs comme les populations* ».

Pour faire face à ce qui pourrait ressembler à une hydre à mille têtes en raison de tous ces facteurs de risque, un organisme de recherche interdisciplinaire comme le CNRS se tient prêt. ●

1. Voir : tinyurl.com/climat-tracc

2. Professeure au sein du laboratoire Transitions énergétiques et environnementales (TREE, unité CNRS/Université de Pau et des Pays de l'Adour).

3. Chargé de recherche au CNRS au sein du Laboratoire des sciences pour l'environnement (SPE, unité CNRS/Université di Corsica Pasquale Paoli).

4. Voir : tinyurl.com/incendies2025

ÇA SE PASSE AU CNRS

ENVIRONNEMENT

LE CNRS VEUT RÉDUIRE SON IMPACT SUR LA BIODIVERSITÉ

Le CNRS a réalisé un premier bilan des impacts de ses activités sur la biodiversité, avec le Global Biodiversity Score¹. Une étape initiale avant d'engager une démarche ambitieuse pour les atténuer et, en parallèle, valoriser la biodiversité sur ses sites.

INDÉPENDANCE

POUR LA LIBERTÉ ACADÉMIQUE

Les six principaux organismes de recherche européens, regroupés au sein du réseau G6 – CNR (Italie), CNRS (France), CSIC (Espagne), Helmholtz Association, Leibniz Association et Max Planck Society (Allemagne) –, ont publié une déclaration commune² appelant à un renforcement du cadre européen de protection de la liberté académique.

HIGH-TECH

VIVATECH 2026 : AU CŒUR DES ENJEUX DE SOUVERAINETÉ TECHNOLOGIQUE

Du 17 au 20 juin 2026, à Paris, s'est tenue la dixième édition du salon VivaTech. Le CNRS y a révélé comment la recherche fondamentale, source d'innovations *deep tech* (technologie profonde), est devenue un levier clé pour la souveraineté française en matière de transition écologique, d'IA et de compétitivité industrielle.

OCÉANOGRAPHIE

UNE COALITION SCIENTIFIQUE SUR LES FONDS MARINS

Un an après la troisième conférence des Nations unies sur l'océan (Unoc-3), un nouveau programme scientifique sur la haute mer et les fonds marins est lancé. La Mission Neptune aura pour objectif d'explorer ces écosystèmes méconnus, éclairant ainsi les débats autour de la gouvernance internationale de l'océan.

1. Voir : tinyurl.com/CNRS-biodiv

2. Voir : tinyurl.com/CNRS-G6



Directive sur l'eau : LE CNRS EN ALERTE

Une directive-cadre sur l'eau (DCE), adoptée en 2000, constitue l'un des piliers de la politique européenne en la matière. « L'un de ses objectifs principaux est de mettre fin à la dégradation des eaux pour améliorer l'état écologique et chimique des masses d'eau comme les rivières, les lacs et les eaux souterraines », précise Agathe Euzen, directrice adjointe de CNRS Écologie et Environnement, et codirectrice du programme national de recherche OneWater-Eau bien commun¹. Le principe structurant de la directive, celui de la non-détérioration du milieu de l'eau en termes de quantité et de qualité, limite les risques de pollutions de l'eau et la dégradation de la qualité des milieux aquatiques liés aux activités humaines. »

Toutefois, en décembre dernier, la Commission européenne a annoncé la mise en place d'un réexamen et d'une révision de la DCE au deuxième trimestre de 2026. « Le but, détaille Agathe Euzen, est

La Commission européenne a annoncé une révision de la directive-cadre sur l'eau. Le CNRS met en garde contre les risques d'un affaiblissement du principe crucial de non-détérioration.

PAR THOMAS ALLARD

d'assouplir ou de limiter les restrictions imposées par la directive-cadre sur l'eau, afin de faciliter notamment les activités d'extraction minière sur le continent européen. »

Dans le cadre du plan RESourceEU, présenté en décembre, la Commission souhaite ainsi modifier la réglementation pour développer sur le Vieux Continent l'extraction, la transformation et le recyclage de métaux répertoriés comme matières premières critiques par l'UE, tels le nickel et le lithium.

← Prélèvements dans le cadre du projet PlastiGar, qui a évalué la pollution de la Garonne par le plastique.

“ **Toute révision de la directive devrait donner la priorité au renforcement de la mise en œuvre et de l'application, tout en préservant pleinement ses principes fondamentaux.** ”

Objectif final : renforcer l'autonomie stratégique européenne. La Commission a donc ouvert la première étape du processus de révision de la DCE en lançant un appel à contributions, clos le 14 avril dernier. Cet appel a récolté 3 113 réponses, dont plus de 2 600 issues de citoyens – attestant l'importance de cette thématique pour la société.

Les contributions émanent aussi d'ONG, d'associations de protection de l'environnement, d'associations industrielles et d'entreprises des secteurs de l'eau, de la mine ou de la chimie. Ces avis seront étudiés par la Commission. Plusieurs établissements scientifiques, dont le CNRS, ont aussi apporté leur contribution au débat.

Un équilibre sous tension

Dans le document de position² adressé à la Commission européenne, le CNRS « met en avant plusieurs points de vigilance vis-à-vis d'une éventuelle révision de la DCE, pointe Agathe Euzen, qui a participé à la rédaction du texte. En fonction des arbitrages qui seront réalisés, il pourrait y avoir une incidence directe sur la définition de l'application du principe de non-détérioration, qui est pourtant au cœur de la directive-cadre sur l'eau ».

Or, souligne la note du CNRS, « les conséquences socio-économiques de la dégradation de l'eau sont considérables et souvent sous-estimées. La pollution de l'eau génère des coûts importants, notamment des exigences accrues en matière de traitement de l'eau potable, des restrictions des utilisations économiques telles que le tourisme, et des incidences plus larges sur les services écosystémiques et la santé humaine. »

Les chiffres publiés en 2024 dans le dernier rapport consacré à l'état des eaux en Europe³ montrent qu'à peine 37 % des masses d'eau de surface y atteignent un bon état écologique et que seules 29 % présentent un bon état chimique.

« Les pollutions qui touchent l'eau sont de sérieuses menaces pour le développement des territoires et la bonne santé des écosystèmes

et des populations humaines. On assiste à une dégradation progressive de la qualité des milieux sur le long terme. Il est absolument nécessaire d'agir, non seulement pour préserver la qualité de l'eau (en réduisant notamment l'émission de polluants), mais aussi en partageant mieux ce patrimoine commun entre les usages, avec les écosystèmes au sein des bassins, afin d'assurer un développement socio-économique le mieux adapté dans un contexte global. Nous ne sommes pas à la hauteur des enjeux », remarque Agathe Euzen. Car, si la réglementation liée à la DCE est exigeante, « sa mise en œuvre ne s'accompagne pas toujours de moyens suffisants pour atteindre les objectifs fixés par la directive ».

S'appuyer sur des résultats scientifiques

La note du CNRS pose le même constat : « La principale limitation de la directive réside dans sa mise en œuvre persistante et inégale d'un État membre à l'autre, plutôt que dans sa conception ou ses objectifs. Toute révision de la directive devrait donc donner la priorité au renforcement de la mise en œuvre et de l'application, tout en préservant pleinement ses principes fondamentaux et son niveau d'ambition environnementale ».

Les auteurs et autrices du document sont issus de plusieurs domaines d'expertise – anthropologie, biogéochimie, écologie, hydroclimatologie, droit, affaires publiques. Et ils soulignent la nécessité de s'appuyer davantage sur les résultats scientifiques pour éclairer les politiques publiques.

« Au sein du CNRS, nous avons la capacité de mobiliser une grande diversité de disciplines, afin de proposer une approche et une compréhension globale des enjeux multiples liés à la ressource en eau », affirme Agathe Euzen. En effet, toutes ces problématiques dépassent la seule dimension écologique : « Il s'agit d'enjeux de gouvernance de l'eau, de santé, de développement économique, d'aménagement des territoires, de justice environnementale, d'équité et de démocratie ».

La Commission européenne devait présenter les détails de la révision de la directive-cadre sur l'eau pour l'été 2026. ●

37 %

Taux des masses d'eau de surface en bon état écologique en Europe

1. Copiloté par le CNRS, l'Inrae et le BRGM. Voir : tinyurl.com/eau-PEPR

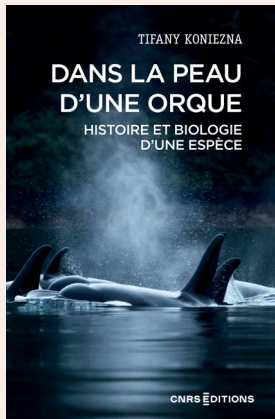
2. Voir : tinyurl.com/eau-cnrs (en anglais) et tinyurl.com/eau-cnrs-fr (en français, sur le site de la Commission européenne).

3. Voir : tinyurl.com/eau-UE

Notre vocation : transmettre l'avancée des connaissances à travers des ouvrages qui font référence et répondent aux grands questionnements contemporains.

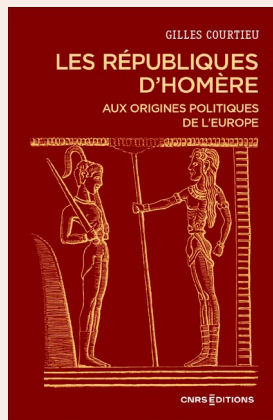
Avec près de 130 nouveautés par an signées de chercheurs et chercheuses du CNRS, des universités et d'autres organismes reconnus dans leur domaine, CNRS Éditions couvre de nombreux champs de recherche scientifiques pour tous les publics — depuis la vulgarisation jusqu'aux travaux les plus proches de l'état de la recherche.

À paraître le 13 août



Majestueuses, redoutables, insaisissables — les orques nous fascinent sans qu'on les connaisse vraiment. *Dans la peau d'une orque* plonge au cœur de leur monde : évolution, communication, cultures, stratégies de chasse, vie en communauté. Un récit scientifique rigoureux et accessible, porté par des illustrations et des recherches de terrain, pour découvrir ces grands mammifères bien au-delà des idées reçues. Un livre pour ceux que la mer et le vivant n'ont pas fini d'étonner.

À paraître le 13 août



On croyait connaître Homère. Derrière les combats de l'*Illiade* et les aventures de l'*Odyssée* se cache un traité politique d'une richesse insoupçonnée. Tyrannie, contrat social, anarchie, théocratie, légitimité du pouvoir : chaque cité, chaque peuple décrit par Homère incarne un régime, une façon de vivre ensemble. L'épopée se transforme en miroir des origines de notre pensée politique.

À paraître le 2 septembre



L'intelligence artificielle fascine, inquiète, déroute, mais comprend-on vraiment d'où elle vient ? Des mythes antiques aux modèles génératifs, cet ouvrage collectif dirigé par Alexandre Gefen retrace la longue histoire d'une idée : celle d'une intelligence séparable de l'humain. Philosophes, mathématiciens, artistes, ingénieurs, tous ont contribué, sur des siècles, à rendre ChatGPT possible. Un panorama richement illustré, rigoureux et accessible, pour penser l'IA autrement qu'entre panique et émerveillement.

Les ouvrages, composés et imprimés en France, sont disponibles dans toutes les librairies indépendantes, les grandes surfaces, les bibliothèques universitaires, sur les principales plateformes de vente en ligne et sur notre site :

www.cnrseditions.fr





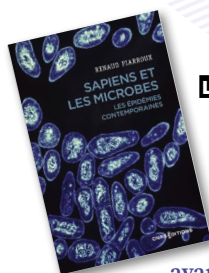
© PHOTOGRAPHIA GALERIE 1861 B. VIDE RENZI / A. ZEILLER - COMMONS WIKIMEDIA

LIVRE

GÉNIES DES EAUX

Saintes, aujourd'hui ville de Charente-Maritime, fut nommée voilà plus de 2 000 ans par les Romains, qui en firent la capitale de la région d'Aquitania. Ils y déployèrent leur génie technique, bâtissant notamment un aqueduc. Modeste par la taille, celui-ci n'en est pas moins remarquable par sa complexité. Le livre en explore toutes les dimensions, de sa conception à ses usages, sans oublier ses métamorphoses. Un passionnant voyage au cœur de l'eau, de la pierre et du génie romain.

* **Construire un aqueduc – Conduire l'eau à Saintes**, Jean-Pierre Adam et Rémi Desalbres, 152 pages, Actes Sud, avril 2026, 20,99 €.



LIVRE

Dernières nouvelles des épidémies

En dépit des avancées dans la compréhension des pathogènes infectieux et des pathologies qu'ils induisent, la menace qu'ils représentent demeure. Dans ce deuxième opus (après *Les Épidémies d'autrefois*, en 2025), Renaud Piarroux analyse les déterminants et la dynamique des épidémies contemporaines. De l'après Seconde Guerre mondiale au Covid-19 se dessine alors une autre histoire des épidémies, marquée par les controverses scientifiques, les conflits d'intérêts et les biais cognitifs qui brouillent l'analyse comme la prise de décision.

* **Sapiens et les microbes – Les Épidémies contemporaines**, Renaud Piarroux, 416 pages, CNRS Éditions, avril 2026, 26 €.

À LIRE À ÉCOUTER

PODCAST

Du labo à l'application

« Suivre des parcours d'innovation singuliers, de l'émergence d'une problématique scientifique et sociétale à sa traduction dans le monde socio-économique » : c'est l'ambition de *Sur le fil de l'innovation*, un nouveau podcast du CNRS. Dernier épisode en date, « Une autre façon de se soigner » : et s'il était possible de réparer des tissus et de soigner des inflammations chroniques comme la maladie de Crohn sans chirurgie ni pilules, mais avec... de la poussière de cellules ? Entretien avec Amanda Silva Brun, directrice de recherche au CNRS et à l'université Paris Cité, et cofondatrice des start-up EVerZom et Evora Biosciences.



LIVRE

Vade-mecum des vaccins

Voilà près d'un siècle que les vaccins existent. Grâce aux procédés développés par Edward Jenner puis Louis Pasteur, une poignée de maladies ont quasiment disparu et une, la variole, a été complètement éradiquée. En dépit de ces réussites, la vaccination suscite encore le débat, parfois l'inquiétude. Ce livre, sous l'apparente légèreté du graphisme, rend compte de l'essentiel des connaissances. Il permettra aux lecteurs et lectrices de s'informer et de prendre part aux débats de manière éclairée.

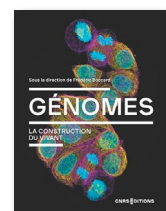


* **Tout comprendre (ou presque) sur les vaccins**, Sylvie Guerder, Monique Dontenwill et Claire Marc, 136 p., CNRS Éditions, mai 2026, 19 €.

LIVRE

De la génétique à la génomique

En quelques décennies, le séquençage d'ADN et l'analyse des génomes ont profondément transformé la biologie. Deux siècles après Gregor Mendel, la génomique s'impose comme l'héritière de la génétique, elle-même récompensée par deux prix Nobel, en 2020 et en 2022. Mais comment en est-on arrivé là ? C'est notamment à cette question que tente de répondre l'ouvrage, en proposant de retracer une aventure scientifique fascinante et de comprendre ce que révèle l'étude des génomes sur le vivant ainsi que sur nous-mêmes.



* **Génomes – La Construction du vivant**, sous la direction de Frédéric Boccard, 512 pages, CNRS Éditions, mai 2026, 26 €.



J'ai été prise dans une tempête aux Kerguelen



Catherine Ozouf-Costaz

Biologiste marine, spécialiste des poissons des mers froides

Début 1975, j'embarque pour ma première mission en Antarctique. À bord de l'emblématique *Marion Dufresne* (premier du nom), nous voguons vers les îles Kerguelen. Nous devons y réaliser une campagne d'inventaire des poissons et organismes marins benthiques présents dans les fjords. Mon travail consiste à trier les échantillons récoltés, spécialement les poissons. À seulement 23 ans, je suis la benjamine de l'équipe scientifique, et l'une des 6 femmes parmi la trentaine de chercheurs et de techniciens qui prennent part à cette expédition.

Sur le *Marion Dufresne*, je découvre comment s'organise une campagne de recherche scientifique. Je suis surprise de constater la rigueur presque militaire qui règne sur le navire. Les périodes de travail sont réparties par quarts et, pendant toute la campagne, je suis affectée aux quarts difficiles, de minuit à 4 heures du matin et de midi à 16 heures. Mais ce travail me plaît, et je découvre chaque jour des organismes marins aux formes très différentes, que je n'avais jamais vus de ma vie.

Vers la fin de la mission, nous faisons escale sur la côte. Une occasion unique pour se dégourdir un peu les jambes et explorer les terres. Mais, rapidement, le ciel s'assombrit; une tempête se lève. Nous décidons de faire demi-tour afin de rejoindre le *Marion Dufresne*. Le navire s'est éloigné de la côte pour ne pas risquer d'être drossé sur les rochers. Une vedette est affrétée afin de nous permettre de le regagner. Une fois parvenus à hauteur du *Marion Dufresne*, nous faisons face à une mer particulièrement houleuse, avec des vagues hautes de plus de 1 m et un vent très fort.

Au moment où arrive mon tour, la vedette heurte l'échelle et la fracasse en morceaux

lance un énorme crochet. Mais le vent le fait voler dans tous les sens. Après plusieurs tentatives infructueuses, l'un des matelots parvient à agripper le crochet, et la vedette est hissée sur le navire.

Cette mésaventure a duré près d'une heure, et j'ai eu pleinement conscience du danger auquel nous avons été exposés. Avec le recul, je pense qu'il aurait été plus sage de rester à terre un jour ou deux, en attendant que la tempête se calme – ce qui m'est arrivé plus tard, lors d'une escale sur l'île Amsterdam. Néanmoins, cet épisode ne m'a pas empêchée de revenir de nombreuses fois en Antarctique. J'y ai effectué une quinzaine de missions avant de prendre ma retraite, en 2016. ●





FONDATION

cnrs

Donnons à la recherche
les moyens de ses ambitions.

SOUTENEZ-NOUS

Site web : fondation-cnrs.org

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

CONTACTS

Téléphone : 01 44 96 44 49

E-mail : contact@fondation-cnrs.org

CARNETS DE SCIENCE

La revue du CNRS

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



Entrez dans
les coulisses
de la recherche



CNRS ÉDITIONS

www.carnetsdescience-larevue.fr