SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 929/930 - JUILLET/AOÛT - 20 QUESTIONS QUI OBSÈDENT LES SCIENTIFIQUES
JUILLET_AOÛT 2024 - N° 929/930 BEL 6,90€ - LUX 6,90€ SUISSE 11,70CHF - ALL 8,60€ - IT 6,90€ - ESP 6,90€ - GR 6,90€ - PORT CONT 6,90€ - DOM 7,10€ - TOM 980XPF - MAR 70MAD - TUN 12,80TND - CAN 10,50$CAD - SDDP 6,50€ - AFRIQUE 5100XAF - LIBAN 9,10€ - USA 10,50$US

SCIENCES ET AVENIR

+ Les trésors cachés de l'océan

avec LE FESTIVAL GRAND OCEAN 13, 14 ET 15 SEPT. 2024

Stanislas Dehaene
Neuropsychologue

Purificación López-García
Microbiologiste

Jean-Pierre Luminet
Astrophysicien

Julien Bobroff
Physicien

Françoise Gaill
Océanographe

Alexei Grinbaum
Physicien

David Elbaz
Astrophysicien

Laurence Devillers
Spécialiste de l'IA

Françoise Combes
Astrophysicienne

Dossier spécial

20 QUESTIONS

qui obsèdent les scientifiques

Chloé Ragazzoli
Égyptologue

Pierre Charollois
Mathématicien

Cédric Sueur
Primatologue

Anne Lehoërff
Archéologue

Fabienne Delfour
Éthologue

Robert Vautard
Climatologue

Aïcha Bachir Bacha
Archéologue

Jean-Louis Étienne
Explorateur

Évelyne Heyer
Anthropologue

Marylène Patou-Mathis
Préhistorienne

Marc-André Selosse
Biologiste

Conscience • Matière noire • Origine de la vie • Mathématiques • Langage animal • Virus • Intelligence artificielle...

L 13418 - 929 - F: 6,50 € - RD

Tout va bien

se passer

Avec le Pack Orange Cybersecure,
sécurisez jusqu'à 10 de vos appareils.
Les spécialistes cyber sont là 7j/7
pour vous accompagner.
Le tout pour 7€/mois.

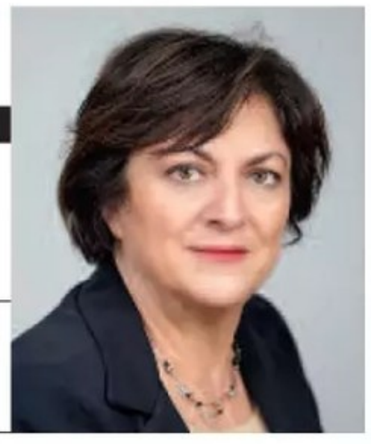
Orange Cybersecure

Offre soumise à conditions, réservée aux particuliers titulaires d'une offre Internet, Fixe sur IP ou Mobile (hors clients Mobile DROM). Sous réserve de compatibilité technique des logiciels, systèmes d'exploitation et équipements à protéger. Détails et conditions sur sites Internet Orange. Service d'assistance à la configuration de trois équipements maximum par les spécialistes cyber.

orange™ est là

ÉDITORIAL

Dominique Leglu
Directrice éditoriale



BERNARD MARTINEZ

JO, algorithme et plaisir du sport

On ne sait pas si Héraclès (Hercule) aurait pu, sans encourir une nouvelle fureur divine, adopter algorithmes et data afin d'effectuer encore plus rondement ses fameux 12 travaux. De fait, on imagine mal les Grecs, de Thalès et Pythagore à Ptolémée, adeptes d'astronomie, mathématiques ou physique, y trouver à redire. Quant aux athlètes français d'aujourd'hui, pour eux, le fait est là : en vue de médailles aux jeux Olympiques — peut-être nés d'une course organisée par l'antique héros nettoyeur des écuries d'Augias — jamais la science et le sport n'auront autant collaboré.

« Citius, altius, fortius — communiter. » *« Plus vite, plus haut, plus fort — ensemble. »* Face à une telle devise, il faut tenir le choc. Il est ainsi intéressant de découvrir que s'il y a accompagnement scientifique, il doit s'adapter à chaque sportif dont les caractéristiques sont singulières, comme l'explicite *Sciences et Avenir (p. 63)*. Loin de livrer une solution académique idéale supposément cachée dans les équations, le recueil et l'analyse de données fondées sur du très concret, par exemple en natation, permettent de corriger de façon personnalisée la trajectoire du nageur ou de la nageuse, en dehors du bassin puis sous l'eau.

Avatar et casque de réalité virtuelle (VR). Parmi les 12 projets du Programme prioritaire de recherche (20 millions d'euros) qui ont été mis en œuvre en France pour ces JO, un exemple est particulièrement frappant, sans jeu de mots : la boxe. C'est en effet avec des adversaires virtuels qu'a pu s'entraîner l'équipe de France, casque VR sur la tête, les avatars pouvant être dotés de la morphologie de l'adversaire ! Reste, une fois encore, à capter un maximum d'informations sur ce dernier, avec analyse de vidéos de matchs, pour rapprocher au maximum le virtuel du réel.

Épictète d'actualité. Attention, cependant, le facteur humain n'est pas mort ! Pour guider l'athlète, l'entraîneur demeure indispensable. Un « tsunami de données » aura beau caractériser championnes, champions et leurs performances, il reste au coach d'habilement orienter pour compenser telle ou telle faiblesse, renforcer tel ou tel geste réussi, aider à la concentration, inciter à toujours un peu plus d'effort. *« Tu dois t'être livré à ton entraîneur comme à un médecin »*, disait déjà Épictète au IIe siècle de notre ère. Même pour un sport apparaissant comme individuel, c'est un collectif qui pousse.

Garder un esprit positif. Si le sportif se retrouve à ce niveau, on peut imaginer qu'il a vécu assez d'heures d'entraînement pour acquérir les automatismes lui permettant de faire face à l'imprévu pendant la compétition. Reste que pour vraiment réussir, comme le rappelle le fan de sport Bertrand Pulman, professeur honoraire de sociologie et d'anthropologie à l'université Paris-Cité, auteur de l'ouvrage *Hyperformance* (Éd. du Palio), il faut que le champion continue de prendre du plaisir, à la fois physique et psychique à son sport. Et monter sur le podium (ou pas) avec un sourire authentique. ■

COURRIER

« Les somnifères gagnent en efficacité »
(*Sciences et Avenir* n° 926, avril 2024)

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

Votre dossier dans le numéro d'avril, « Comment vaincre l'insomnie », est bien intéressant. Dans l'article « Les somnifères gagnent en efficacité », les espoirs des chercheurs du CHU de Montpellier sont sûrement à prendre en compte, mais les lecteurs ne risquent-ils pas de réclamer le Quviviq à leur médecin espérant un avantage concret pour leur insomnie, avec un minimum de risques ?

Jean-Marc Gibert

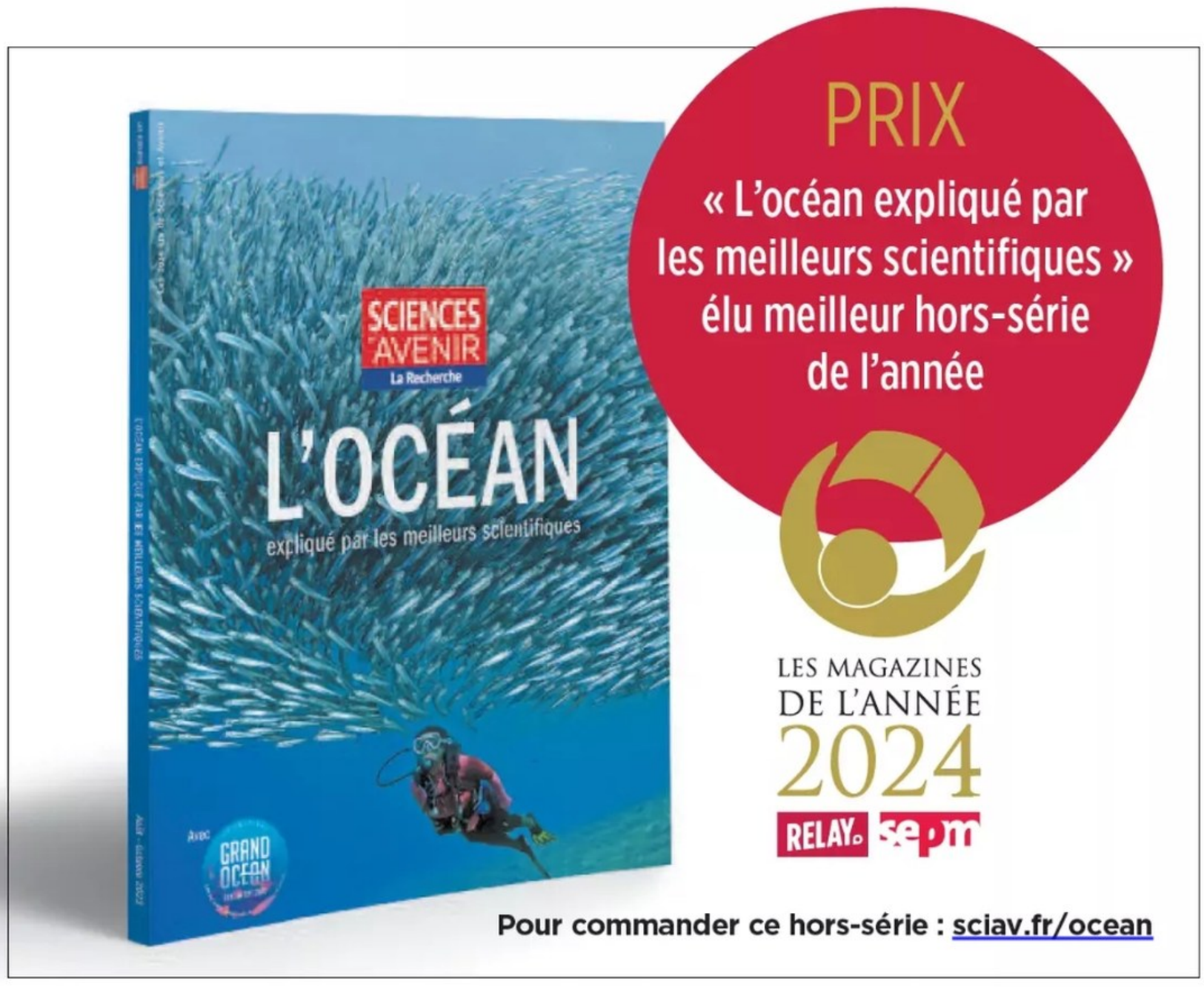
S. et A. : Nous sommes bien d'accord sur ce point : il ne s'agissait en aucun cas, dans l'article que nous avons consacré au Quviviq (daridorexant), de présenter ce nouveau médicament comme une « pilule miracle » qui devrait être prescrite au tout-venant et ferait dormir tous les patients à coup sûr. Les médecins, en effet, manquent encore de recul : *« Sa place reste à établir parmi les autres somnifères et dans la pratique clinique, en fonction des interactions médicamenteuses, d'éventuelles comorbidités et du type d'insomnie »*, avions-nous d'ailleurs souligné. Tout comme le fait que les thérapies cognitives et comportementales demeurent le traitement de première intention contre l'insomnie chronique. Le daridorexant est perçu toutefois comme un outil supplémentaire et une innovation pharmacologique importante, en raison de son mode d'action singulier et du maintien de l'architecture globale de sommeil. Avec aussi beaucoup moins de risques d'accoutumance et d'effets secondaires par rapport aux somnifères actuels.

Quel avenir pour l'IA ?

Fan absolu de votre journal et passionné par l'IA et donc de votre chronique « Éthique », j'ai testé les questions que vous suggérez (S. et A. *n° 926, p. 96*) avec la nouvelle IA de Google Gemini au sujet des nombres premiers. Celle-ci a répondu parfaitement, qui plus est en expliquant pourquoi il n'y avait pas de nombres premiers multiples de 3 entre 100 et 200, et ce de manière parfaitement claire ! J'ai l'impression que Google possède, malgré le buzz autour de ChatGPT, une longueur d'avance sur le traitement logique et mathématique des données.

Frédéric Besson

Jean-Gabriel Ganascia : Vous avez raison, il arrive qu'on obtienne une réponse correcte au problème posé. Il se peut aussi que Google ait une longueur d'avance, ce qui ne serait d'ailleurs pas étonnant, car c'est bien cette société qui a été pionnière dans la conception et la réalisation de grands modèles de langage, avant OpenAI. J'ai moi-même fait plusieurs essais, en faisant varier les formulations et les modèles de langage. Et, chaque fois j'ai obtenu des résultats différents, parfois justes, parfois erronés, voire cocasses. Le problème tient à l'imprévisibilité des réponses, et donc à leur caractère trompeur. Il s'ensuit qu'un scientifique ne peut s'y fier. La science est affaire de preuve, et ces réponses ne démontrent rien ! Peut-être, à l'avenir, les performances s'amélioreront-elles grandement ? Pour l'heure, il paraît urgent de conserver un regard critique et d'éviter de prophétiser trop vite.



Pour commander ce hors-série : sciav.fr/ocean

Précision

Dans l'article sur Ariane 6 (S. et A. *n° 928, p. 32*), il fallait lire que l'hydrogène se conserve à environ -250 °C et non -150 °C.

Photos de couverture
ARNAUD MEYER/OPALE PHOTO/LEEXTRA - C. FRESILLON/CNRS IMAGES - THIERRY BORREDON/SIGNATURES - DEVI PRIDE PHOTOGRAPHY - MATHIEU GENON/OPALE PHOTO - P. CHAROLLOIS - ASTRID DI CROLLALANZA - P. CHIGNARD/DIVERGENCE - AFP - J. FAURE/OPALE/LEEXTRA - A. FACELLY/DIVERGENCE - N. TUCAT/AFP - A. BACHIR BACHA - A. FRESPUECH - A. BONNEFOY - CHLOÉ RAGAZZOLI - M. BERTRAND/CHALLENGES-REA - SIPA - B. DECOUT/REA - FRÉDÉRIQUE PLAS

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Océan de savoir

« *Je me vois comme un petit garçon jouant sur le rivage, m'amusant à trouver de temps en temps un galet plus poli ou un coquillage plus joli qu'à l'ordinaire, tandis que le grand océan de la vérité reste tout entier à découvrir.* » Quelle plus belle évocation de l'humilité, de la patience, de la passion du chercheur que cette description attribuée à Isaac Newton ? Sujet d'été s'il en est, la contemplation de l'océan. Les plus chanceux ont le privilège de l'approcher. Les plus téméraires d'y naviguer. Tout le monde le connaît mais ses meilleurs spécialistes insistent sur leur ignorance. Il en est ainsi de l'océan terrestre comme de celui de la connaissance. Les deux grands dossiers que *Sciences et Avenir* vous propose cet été se répondent tout naturellement : l'obsession de ce qu'il reste à découvrir, qui anime les scientifiques chaque jour, et l'urgence de mieux connaître cette étendue d'eau, berceau de la vie, qui vaut à notre Terre son surnom de « planète bleue ». L'océan comme le savoir sont fragiles. Les préserver et les transmettre demeurent des combats quotidiens. Car il s'agit de patrimoines communs à toute l'humanité. L'accès à l'éducation, l'indépendance du chercheur, le respect du sachant sont des conditions nécessaires pour que des citoyens éclairés puissent débattre et que le politique puisse décider. Et quelle chance nous avons, chère lectrice, cher lecteur, de partager cette passion pour la science. Avec laquelle chaque réponse apporte un éclairage nouveau sur le monde comme un flot de nouvelles questions. Nourrir la curiosité, élargir les connaissances, éclairer les actions quotidiennes, voilà les ambitions de votre magazine. Toute la rédaction vous souhaite un bel été de savoir et de contemplation ! ■

> « L'océan comme le savoir sont fragiles. Les préserver et les transmettre demeurent des combats quotidiens »

SCIENCES ET AVENIR

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35 avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32 Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52 Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31 Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59 - Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28 Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78 Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33 Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23 Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27 Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI-GAVAGE, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, CLAIRE MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, F. COSTES, C. COUMAU, N. GUTIERREZ C., G. JACQUEMONT, C. JOURDAN, Y. HERRERA, A. INGRAND, P. KALDY, M. LAPLACE, A. VERNET
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32 Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Sarah BOULVARD (journaliste vidéaste en alternance) - 01.55.35.56.51, Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41 Jessica RIOS responsable projets digitaux - Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et événements – Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org

FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte une lettre de « bienvenue aux abonnés », un encart « Sophia Boutique - Parure Saphir » ainsi que les messages « L'Histoire » et « First Voyages » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0625 K 79712.
ISSN 00368636. Distribué par MLP.

Cap sur le bout du monde :

Cap Horn, Ushuaia, fjords chiliens...

L'itinéraire peut légèrement différer selon les dates de départ et n'est pas contractuel.Informations complémentaires dans les brochures détaillées et sur notre site internet. CGV disponibles sur notre site. Photos : ©AdobeStock ©Holland America

Scannez ce QR code pour télécharger la brochure

Découvrez les merveilles de la Patagonie en croisière

Voyages d'exception

Embarquez avec **Voyages d'exception** pour une croisière francophone exceptionnelle en compagnie de **conférenciers** de renom à bord d'un navire spacieux et élégant, le **Holland Oosterdam** (982 cabines).

PLUSIEURS DÉPARTS :

NOV. 2024 • FÉV. • MARS 2025

Dès **5 590 €**/pers.*

depuis Paris - pension complète

CROISIÈRES FRANCOPHONES

ACCOMPAGNEMENT DEPUIS PARIS

CONFÉRENCIERS DE PRESTIGE

RÉSERVATIONS ET INFORMATIONS :

Tel : **01 75 77 87 48** - mail : **contact@voyages-exception.fr**

voyages-exception.fr/brochures (code PATAA)

ou dans votre **agence de voyage**

VOYAGES-EXCEPTION.FR

*Prix incluant une remise de 400€/pers. pour toute réservation avant le 30 juin 2024.

Fleury Michon

UNE PURÉE DE HARICOTS !?

Nouvelles Tranches Végé

Un tout nouveau produit : de délicieuses tranches à base de légumineuses, pratiques comme le jambon, idéales pour toutes vos recettes chaudes et froides.

Elles sont cuisinées en Vendée à partir de légumineuses entières et avec des ingrédients simples comme le blanc d'œuf et des bouillons de légumes.

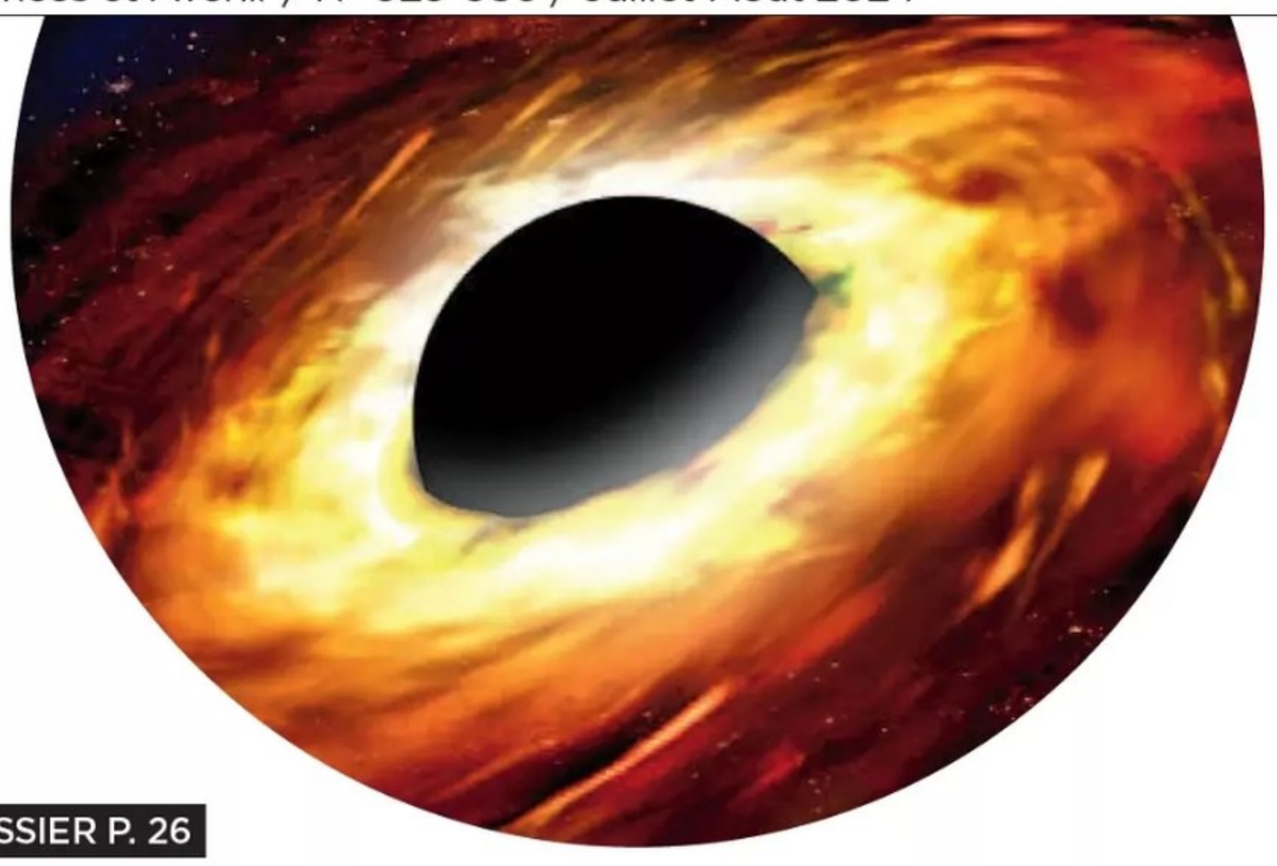
Riches en protéines et sources de fibres, elles permettent de profiter des bienfaits des légumineuses dans le format ultra pratique d'une tranche, et seront appréciées par les petits comme les grands gourmands !

Découvrez les Tranches Végé sur www.fleurymichon.fr

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE. WWW.MANGERBOUGER.FR

SOMMAIRE

Sciences et Avenir / N° 929-930 / Juillet-Août 2024



DOSSIER P. 26

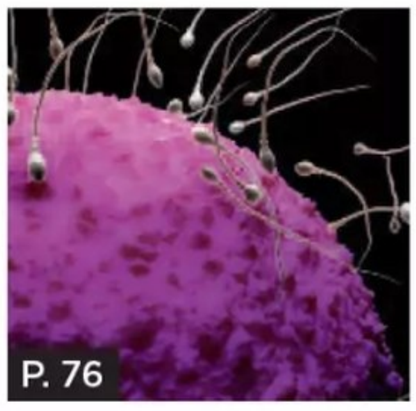
20 questions qui obsèdent les scientifiques

Que reste-t-il encore à découvrir ? « Sciences et Avenir » a rassemblé 20 éminents chercheurs pour qu'ils évoquent leur graal, tantôt la découverte qu'ils voudraient faire, tantôt le mystère qu'ils espèrent percer.

P. 68

Haies : le renouveau des paysages ruraux

Bien que protégées, les haies continuent de disparaître. Leur rôle agronomique et écologique peine à être reconnu par les agriculteurs. Un plan gouvernemental vise à inverser la tendance.



P. 76

Des thérapies innovantes contre l'infertilité

La naissance d'un enfant est le fruit de mécanismes complexes dont la moindre altération peut conduire à l'infertilité. L'espoir repose sur la thérapie génique, cellulaire, ou les organes artificiels.

P. 90

Olympie, la colline sacrée où naquirent les Jeux

« Sciences et Avenir » s'est rendu sur le site grec d'Olympie, sur les traces des premiers Jeux, à la croisée des mythes et d'une réalité parfois très surprenante. Reportage.

DOSSIER SPÉCIAL 21 PAGES

Les trésors cachés de l'océan P. 110

LE FESTIVAL GRAND OCEAN
13, 14 ET 15 SEPT. 2024
CITÉ DE LA MER, CHERBOURG-EN-COTENTIN & EN DIGITAL

3 **Éditorial** par Dominique Leglu
4 **Courrier**
5 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

10 **ACTUALITÉS** La mission Euclid dévoile un Univers inconnu / Un nouvel atlas lunaire de haute résolution
58 **Pollution lumineuse : la France championne du ciel étoilé**
63 **JO : la science au service des athlètes**
66 **Journal de l'IA : Identifier les textes artificiels, un impératif**

NATURE

14 **ACTUALITÉS** L'arbre généalogique des plantes à fleurs / Marcher sur des serpents pour la science
68 **Haies : le renouveau des paysages ruraux**
74 **Les superpouvoirs du bourdon**

SANTÉ

18 **ACTUALITÉS** Un virus cause un grave cancer du cerveau / Des paralysés retrouvent l'usage de leurs bras grâce à des électrodes
76 **Des thérapies innovantes contre l'infertilité**
82 **La grande confusion des cosmétiques quantiques**
86 **Dans le cerveau des danseurs**
88 **Nutrition : La pêche, savoureuse et rafraîchissante**

HISTOIRE

22 **ACTUALITÉS** Les mystérieux chevaux gaulois de Villedieu / Le bras oublié du Nil
90 **Olympie, la colline sacrée où naquirent les Jeux**
96 **Histoire des sciences : Blaise Pascal, orfèvre du calcul**

TRANSVERSALES

100 **Sélection livres**
102 **Expositions**
104 **Les ciels de juillet et d'août**
106 **Chroniques**
Climat par Céline Guivarch et Christophe Cassou / Mathématiques par Sylvie Benzoni-Gavage / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar
108 **Questions de lecteurs**
109 **Jeux**

NOIRLAB/AURA/NSF/P. MARENFELD - VINCENT M. / BIOSPHOTO - SPL/ SUCRÉ SALÉ - RMN-GRAND PALAIS (MUSÉE DU LOUVRE) CHRISTIAN LARRIEU

La pouponnière d'étoiles Messier 78, située à 1600 années-lumière dans la constellation d'Orion, photographiée par Euclid.

La mission Euclid dévoile un Univers inconnu

L'Agence spatiale européenne a présenté de spectaculaires clichés obtenus par le nouveau télescope spatial, en seulement 24 heures d'observation.

Moins d'un an après sa mise en orbite en juillet 2023, le télescope spatial Euclid a livré ses premiers résultats scientifiques, accompagnés d'images époustouflantes. « *Il n'est pas exagéré de dire que les résultats obtenus par Euclid sont sans précédent* », s'est réjouie Carole Mundell, directrice scientifique de l'Agence spatiale européenne (ESA). Seulement 24 heures d'observation ont été consacrées à six projets d'étude du cosmos plus ou moins lointain, dans le cadre du programme scientifique ERO. Une façon de tester le potentiel du télescope dont l'objectif est de « *s'attaquer aux plus grandes questions ouvertes de la cosmologie : comprendre l'accélération de l'expansion de l'Univers, ou encore le mystère de la matière noire… Ces premières observations montrent clairement qu'Euclid est plus qu'à la hauteur de la tâche* », s'enthousiasme Valeria Pettorino, scientifique du projet Euclid à l'ESA.

Parmi les six images livrées par Euclid figure celle de la magnifique pouponnière d'étoiles Messier 78, située à 1600 années-lumière, au cœur de la constellation d'Orion dans la Voie lactée. Derrière les zones colorées de l'immense nuage de gaz et de poussières interstellaires, les instruments infrarouges d'Euclid ont permis de cartographier ses filaments complexes et ont révélé plus de 300 000 objets, étoiles et planètes nouvellement formées. Un ensemble de données qui permettent aux astrophysiciens de comprendre la dynamique de la formation des systèmes stellaires.

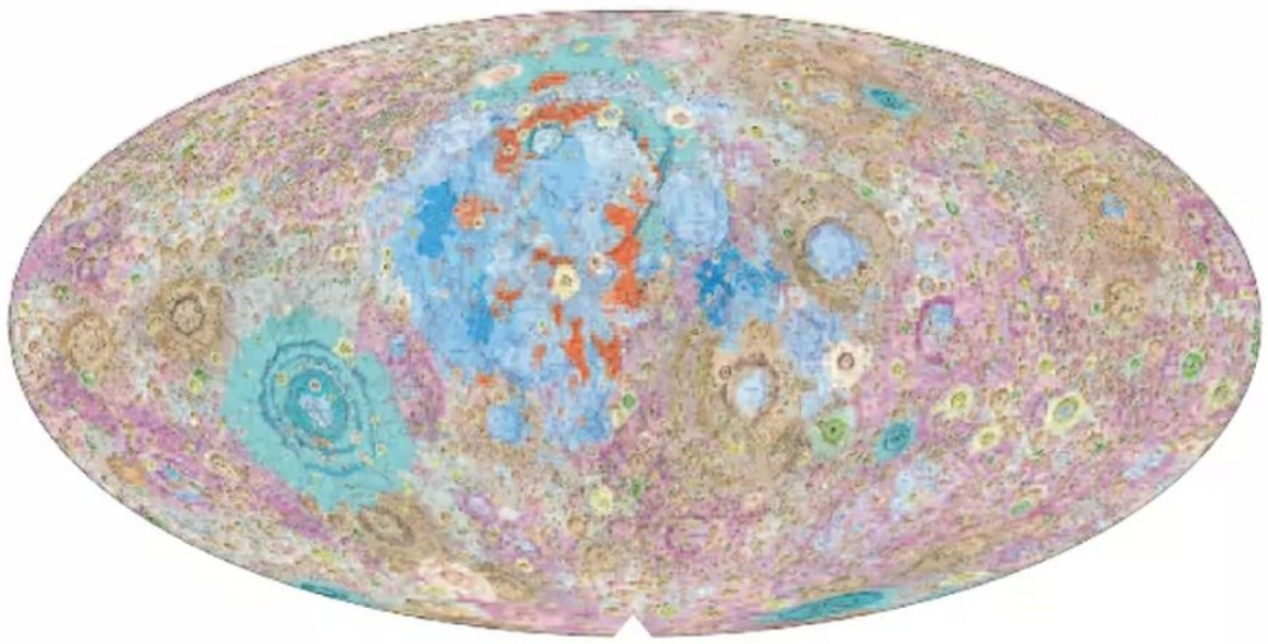
Un tiers du ciel couvert au terme de la mission

Autre résultat notable, celui fourni par l'examen détaillé de l'amas de galaxies de Persée, à 240 millions d'années-lumière. Euclid y a, par exemple, repéré 600 nouvelles galaxies naines, doublant ainsi le nombre de ces objets connu dans cet amas. « *Grâce au vaste champ de vue d'Euclid et à la grande couverture du sondage qu'il est en train d'effectuer — à l'issue des six ans de mission, il aura couvert un tiers du ciel —, on pourra étendre la détection de ces galaxies naines autour d'un plus grand environnement et obtenir des statistiques sur le nombre de galaxies naines en dehors des amas de galaxies,* explique Pierre-Alain Duc, astrophysicien à l'observatoire astronomique de Strasbourg. *Leur nombre nous renseignera sur leur mode de formation et fournira des contraintes sur les modèles de matière noire, cette mystérieuse matière qui interagit* via *la gravitation mais dont on ignore la nature.* » Pour cela, il faudra attendre d'avoir les premières publications de données sur de plus grandes parties du ciel. ■ **M. L.**

ESA/EUCLID/EUCLIDCONSORTIUM/NASA,IMAGE PROCESSING BY J.-C. CUILLANDRE (CEA PARIS-SACLAY), G. ANSELMI

Un nouvel atlas lunaire de haute résolution

Établie par la Chine, cette cartographie inédite va permettre notamment d'évaluer les ressources géologiques.



La nouvelle carte dévoile 12 341 cratères, 81 bassins d'impact, 17 types de roches, 14 catégories de structures.

LIU XIN/XINHUA/AFP

Après une dizaine d'années de travaux, l'Académie chinoise des sciences a dévoilé un atlas de la Lune à l'échelle inédite de 1/2 500 000 — 1 centimètre correspondant ainsi à 25 kilomètres. Soit une résolution deux fois plus importante que les cartes lunaires actuelles, fondées sur les observations réalisées dans les années 1960 et 1970 par le programme américain Apollo. Le nouvel atlas s'appuie sur des données beaucoup plus riches et récentes, glanées entre 2007 et 2019 par les orbiteurs chinois du programme Chang'e, mais aussi par deux satellites de la Nasa (LRO et Grail) ainsi que par la sonde indienne Chandrayaan-1. On y dénombre 12 341 cratères, 81 bassins, 17 types de roches, 14 types de structures, etc. Une mine d'informations pour conduire des études géologiques comparatives, préparer les futures missions d'exploration et évaluer les ressources de notre compagnon céleste. ■ **F. D.**

EN DEUX MOTS

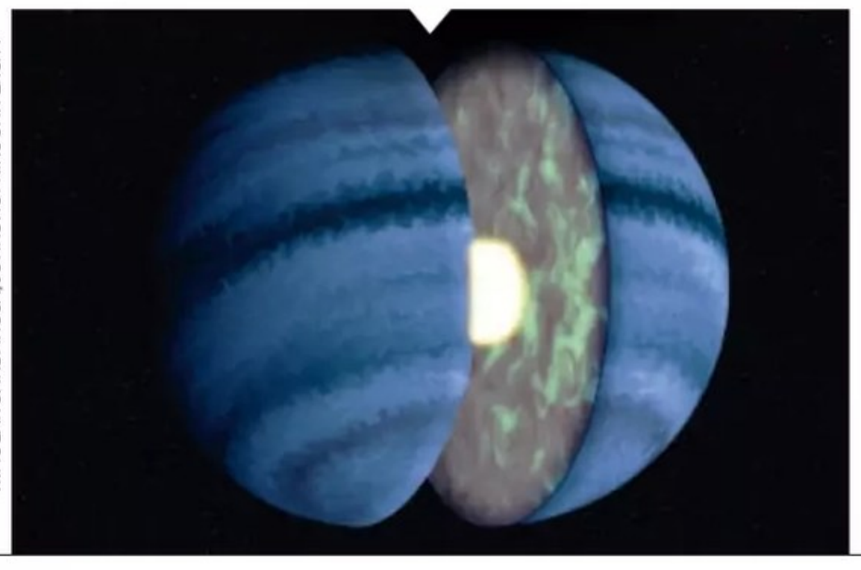
DÉCOLLAGE Le vol inaugural de la nouvelle fusée européenne Ariane 6 est programmé pour le 9 juillet depuis Kourou, en Guyane. **ESPACE** Avec plus de quatre ans de retard, Boeing a réussi le premier vol habité de sa capsule spatiale Starliner, destinée à la desserte de la Station spatiale internationale (ISS). **ASTRONAUTE** Un mois après la fin de son entraînement, la nouvelle astronaute française Sophie Adenot a été affectée à sa première mission vers l'ISS prévue pour 2026.

Une exoplanète à cœur ouvert

PLANÉTOLOGIE Le télescope spatial James-Webb a permis, pour la première fois, de sonder le noyau d'une exoplanète. Orbitant autour d'une étoile à 212 années-lumière de la Terre, la vaporeuse WASP-107 b est d'une taille comparable à celle de Jupiter pour une masse dix fois inférieure. Outre son noyau d'environ 12 masses terrestres, les scientifiques ont pu évaluer sa quantité de vapeur d'eau et de dioxyde de carbone. **J. I.**

SOURCE : DAVID SING, UNIVERSITÉ JOHNS-HOPKINS, ÉTATS-UNIS.

La taille du noyau de WASP-107 b a pu être évaluée grâce au télescope James-Webb (vue d'artiste).



R. MOLAR CANDANOSA/JOHNS HOPKINS UNIVERSITY

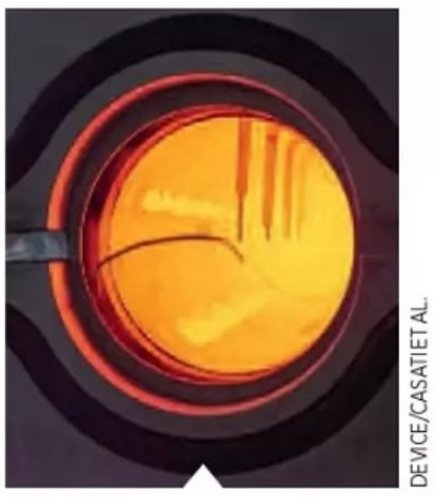
IL A DIT

« La seule raison de penser que ce n'est pas grave, c'est d'imaginer que la capacité de tromperie de l'IA restera au niveau actuel »

Peter Park, chercheur au MIT (États-Unis), coauteur d'une étude explorant les inquiétantes capacités d'intelligences artificielles à tromper et tricher.

Un piège à énergie solaire thermique

INGÉNIERIE Des chercheurs suisses ont développé un nouveau type de capteur solaire thermique capable d'atteindre des températures de plus de 1000 °C. De quoi pourvoir à la fabrication de l'acier ou du ciment sans recourir à des combustibles fossiles. Leur four solaire restitue la chaleur avec une efficacité de 70 %, contre 40 % pour les dispositifs actuels. Leur astuce : disposer sur des disques de silicium des tiges de quartz de synthèse, matériau semi-transparent qui piège les radiations solaires et réduit considérablement les pertes d'énergie. **F. D.**



DEVICE/CASATI ET AL.

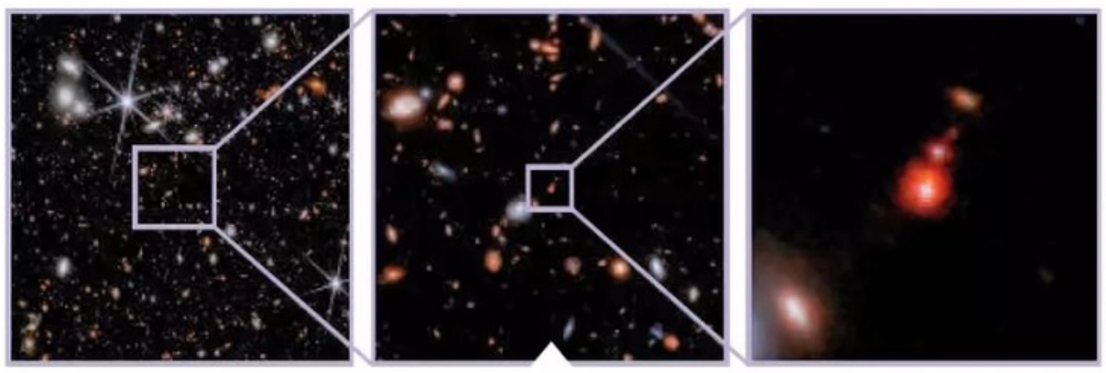
Le dispositif atteint des températures de plus de 1000 °C.

SOURCE : EMILIANO CASATI, ETH ZURICH, SUISSE

Des écouteurs intelligents à filtration de bruit

TECHNOLOGIE Dans la veine des casques et écouteurs à réduction active de bruit, un expert en intelligence artificielle pour le traitement audio en temps réel a mis au point un casque capable de filtrer 20 sons spécifiques (réveils, pleurs de bébé, sirènes, klaxons, chants d'oiseaux…). Un utilisateur peut ainsi sélectionner une catégorie de sons pour n'entendre, par exemple, que les chants d'oiseaux dans un parc. **H. J.**

SOURCE : SHYAM GOLLAKOTA, UNIVERSITÉ DE WASHINGTON, ÉTATS-UNIS.



ESA/WEBB, NASA, CSA

Zooms successifs des deux trous noirs géants en train de se rapprocher.

Une fusion de trous noirs dans l'Univers jeune

ASTROPHYSIQUE **Deux trous noirs supermassifs, d'environ 50 millions de masses solaires chacun, ont été repérés par le télescope spatial James-Webb en train de fusionner, seulement 740 millions d'années après le Big Bang. Jamais un tel événement n'avait été observé si tôt dans l'Univers. Cela pourrait expliquer la formation précoce de ces astres pouvant atteindre plusieurs milliards de masses solaires.** **F. N.**

Premiers échantillons de la face cachée de la Lune

SÉLÉNOLOGIE Un nouveau succès spatial est à mettre au crédit de la Chine. Le 2 juin, elle a fait atterrir la sonde Chang'e 6 sur la face cachée de la Lune, une première, au niveau de l'immense bassin Pole Sud-Aitken, pour prélever des morceaux de roche en surface et jusqu'à 2 mètres de profondeur. Ces échantillons devaient être récupérés sur Terre le 27 juin. Un « trésor » qui permettra de mieux comprendre l'histoire et la géologie de l'astre sélène. **F. D.**

JIN LIWANG/XINHUA/AFP

L'atterrisseur de Chang'e 6 photographié le 3 juin sur le sol lunaire par un des instruments de la mission.

Scanner l'océan pour retrouver le vol MH370

Un chercheur suggère d'utiliser le réseau de surveillance hydroacoustique des essais nucléaires pour localiser ce Boeing disparu en 2014.

Un mathématicien de l'université de Cardiff (Royaume-Uni) montre, dans la revue *Nature*, que le réseau de surveillance hydroacoustique des essais nucléaires pourrait permettre de savoir où un avion se serait écrasé en mer. Typiquement, le MH370 de la Malaysian Airlines, disparu en mars 2014 lors de son vol entre Kuala Lumpur (Malaisie) et Pékin (Chine), et dont l'épave n'a jamais été localisée. Créée en 1997, l'Organisation du traité d'interdiction complète des essais nucléaires dispose en effet de 11 stations hydroacoustiques servant à repérer les ondes subaquatiques pouvant correspondre à une explosion nucléaire illégale. Le chercheur a récupéré 100 heures de données susceptibles de contenir des indications sur dix accidents aériens dont le site est connu. Il est parvenu à calculer la position des avions par rapport aux sondes. Avec les données adéquates, il pense être en mesure de faire de même pour le MH370. ■ **A. D.**

HOANG DINH NAM / AFP

Des années d'enquêtes n'ont jusqu'ici pas permis de retrouver l'avion.

Decathlon planche sur une combinaison spatiale

ESPACE L'Agence spatiale française (Cnes) s'est associée à Decathlon, expert du textile sportif, pour la conception de nouvelles combinaisons spatiales. Objectif : améliorer l'expérience des astronautes à bord des stations orbitales et des vaisseaux, notamment lors des phases de lancement et d'atterrissage. L'Institut de médecine et physiologie spatiales est également associé au projet. Le développement a été confié à la start-up Spartan Space. **S. R.**

DONNER AUX JEUNES L'ÉNERGIE D'IMAGINER CELLE DE DEMAIN.

ENGIE, avec le concours « Science Factor », accompagne les collégiens et lycéens pour les aider à développer des projets scientifiques innovants et leur permettre de s'engager pour la transition énergétique.

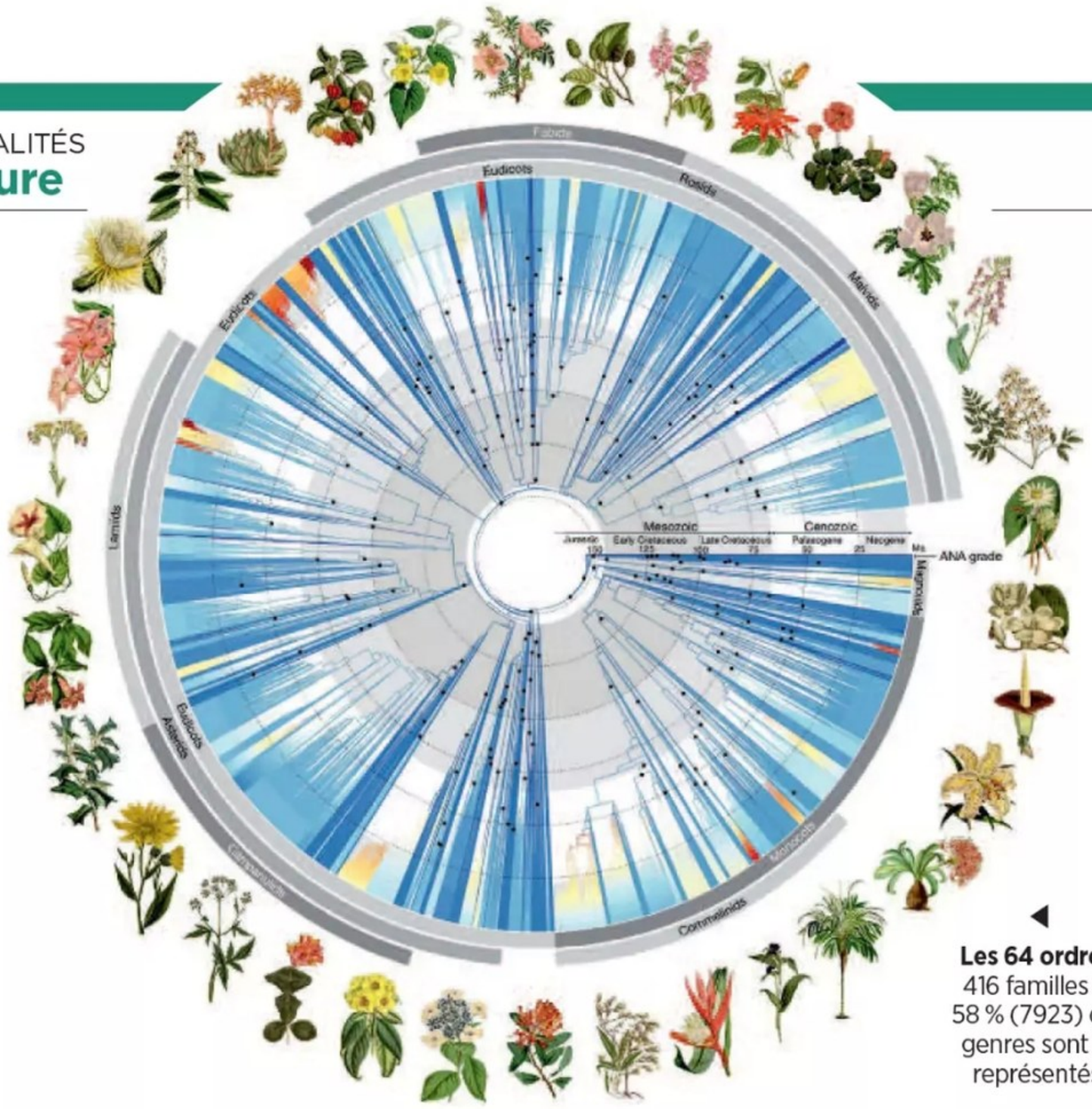
Pour favoriser l'impact positif de chacun sur la société, agissons ensemble.

Impact Together for society*

L'énergie est notre avenir, économisons-la !

*Développons ensemble un impact plus positif pour la société.
Plus d'informations sur sciencefactor.fr

ENGIE : SA AU CAPITAL DE 2435285011€ - RCS NANTERRE 542107651. © Getty Images.



Les 64 ordres, 416 familles et 58 % (7923) des genres sont ici représentés.

L'arbre généalogique des plantes à fleurs

Plus de 9500 espèces ont été classées par des chercheurs britanniques, qui confirment l'apparition des angiospermes il y a 140 millions d'années.

La classification génétique la plus complète à ce jour des plantes à fleurs, les angiospermes, soit 90 % des plantes terrestres, a été établie par un consortium international dirigé par des chercheurs des Jardins botaniques royaux de Kew (Royaume-Uni). Plus de 9500 espèces ont été classées en fonction de leurs proximités génétiques respectives, en utilisant les séquences de 353 gènes nucléaires. Les chercheurs issus de 27 pays ont également utilisé des échantillons de plantes conservés dans 163 herbiers de 48 pays. L'histoire évolutive des angiospermes a pu être retracée sur des millions d'années et, pour dater plus précisément l'apparition de certains types de plantes, les chercheurs se sont aussi servis de 200 fossiles.

Une biodiversité foisonnante à explorer

Le résultat de leur étude confirme l'apparition de 80 % des principales lignées de plantes à fleurs actuelles au tout début du crétacé, il y a 140 millions d'années. Un événement dont la rapidité, qualifiée *« d'abominable mystère »* par Darwin, reste encore inexpliquée. Une nouvelle étape de diversification a lieu à l'éocène, il y a 40 millions d'années, et coïnciderait avec un refroidissement planétaire, selon l'étude. *« Cet arbre génétique repose sur un échantillonnage très solide et sera très utile pour mieux explorer les relations de parenté entre les genres et les familles de plantes »*, souligne Thomas Couvreur, de l'Institut de recherche pour le développement (IRD) à Montpellier, qui a contribué à l'étude. L'outil permettra de mieux appréhender l'énorme biodiversité des plantes à fleurs présentes dans la nature et dans les herbiers. Il est aussi disponible gratuitement pour les chercheurs et les amateurs de botanique sur le site Internet Kew Tree of Life Explorer (sciav.fr/929kew), où des milliers d'espèces sont déjà recensées. ■ **P. K.**

A. R. ZUNTINI, ET AL.

RTE

Les plateformes seront implantées à 60 km des côtes.

Éolien en mer : trois stations pour convertir l'électricité

ÉNERGIE Le distributeur d'électricité RTE, les Chantiers de l'Atlantique à Saint-Nazaire et le japonais Hitachi ont signé un contrat de 4,5 milliards d'euros pour la construction de trois stations de conversion de l'électricité produite par les deux parcs éoliens *offshore* de Centre Manche et celui de l'île d'Oléron. Ces plateformes vont collecter l'électricité produite par ces fermes de 500 mégawatts de puissance et l'acheminer en courant continu jusqu'à la côte où il sera converti en courant alternatif. **L. C.**

5,8 %

La baisse des émissions de GES en France

POLLUTION En 2023, la France a émis 22,8 millions de tonnes de gaz à effet de serre en moins. Tous les grands secteurs ont agi : -7,7 millions de tonnes (Mt) pour l'industrie de l'énergie, -6,1 Mt pour l'industrie manufacturière, -4,4 Mt pour les transports, -3,4 Mt pour les bâtiments et -1,2 Mt pour l'agriculture. Cependant, le budget carbone 2019-2023 n'est pas respecté car la moyenne annuelle observée est de 380 millions de tonnes pour un objectif de 379 Mt. **L. C.**

RÊVER À NOUVEAU C'EST TOUT UN APPRENTISSAGE

Apprentis d'Auteuil aide chaque année plus de 40 000 jeunes[1] en difficulté à bâtir leur avenir.

Soutenez-nous sur www.apprentis-auteuil.org

APPRENTIS D'AUTEUIL

La confiance peut sauver l'avenir

(1) Selon le rapport d'activité Apprentis d'Auteuil 2023.

Agence Marcel - © Yann Le Pape

LE MOT DU MOIS

Hydrogénoduc

ÉNERGIE C'est le mot qu'il faut désormais utiliser pour désigner une conduite transportant de l'hydrogène. Le premier construit en Europe fera 100 kilomètres entre la Lorraine et la Sarre en Allemagne. En 2027, il reliera les centrales à hydrogène vert de Saint-Avold et de Carling, en Moselle, aux hauts-fourneaux allemands de Dillingen en cours de conversion énergétique. En 2040, l'Europe devrait compter 53 000 kilomètres d'hydrogénoducs alimentant les sites industriels actuellement les plus émetteurs de CO_2. **L. C.**

M. SCHAEF /NATUREPL / EBPHOTO

Les aigles évitent l'Ukraine

ÉTHOLOGIE Une étude montre que les aigles criards (*Clanga clanga*), grands rapaces migrateurs de l'est de l'Europe habitués à rejoindre chaque année les sites de reproduction au sud de la Biélorussie, ont modifié leur parcours depuis le début de la guerre en Ukraine. Les oiseaux évitent les villes et ne font plus d'escale dans le pays. **A. I.**

SOURCE : CHARLIE RUSSELL, UNIVERSITÉ D'EAST ANGLIA, ROYAUME-UNI.

Un trou bleu sans fond

GÉOLOGIE Dans la baie de Chetumal (Mexique), au sud-est de la péninsule du Yucatán, le Taam Ja' vient de décrocher le titre de trou bleu le plus profond du monde. Cette doline marine exceptionnelle s'étend à plus de 420 mètres de profondeur, mais l'expédition pour la cartographier n'a même pas pu atteindre le fond. Elle pourrait faire partie d'un système interconnecté de tunnels sous-marins la reliant à la mer des Caraïbes. **S. R.**

SOURCE : LAURA CARILLO, COLLÈGE DE LA FRONTIÈRE SUD, MEXIQUE.

JOAN A. SÁNCHEZ-SÁNCHEZ

La doline marine Taam Ja' dans la baie de Chetumal (Mexique) dépasse les 420 m de profondeur.

JEAN-PASCAL QUOD

Un échinoderme infecté par « Philaster apodigitiformis ».

Risque de pandémie chez les oursins

ZOOLOGIE Le parasite unicellulaire *Philaster apodigitiformis* ayant décimé en 2023 les oursins diadèmes (*Diadema*) des récifs coralliens d'Eilat, dans le sud d'Israël, s'est propagé à d'autres populations dans toute la mer Rouge. Une contagion qui fait craindre une hécatombe d'ampleur mondiale sur différentes espèces d'oursins. **H. J.**

SOURCE : LACHAN ROTH, UNIVERSITÉ DE TEL-AVIV, ISRAËL.

Marcher sur des serpents pour la science

Un chercheur brésilien a engrangé 40 480 observations de morsures pour comprendre les mécanismes d'attaque.

JOÃO MIGUEL ALVES-NUNES

« Bothrops jararaca » réagit plus fortement quand on lui marche sur la tête, a noté João Miguel Alves-Nunes lors de son expérience.

Muni de jambières épaisses et de chaussures solides, le chercheur brésilien João Miguel Alves-Nunes a marché sur le corps de 116 spécimens de *Bothrops jararaca*, le serpent le plus venimeux de la forêt atlantique du Brésil. À raison de 30 provocations par serpent, le chercheur a engrangé 40 480 observations de morsures dont il a tiré des enseignements que vient de publier la revue *Scientific Reports*.

Car si tous les efforts ont jusqu'ici porté sur la fabrication de sérum anti-venin, peu de recherches se sont intéressées aux circonstances qui amènent un reptile à attaquer. On apprend ainsi que les plus petits mordent davantage que les plus grands, les femelles plus que les mâles, et donc les petites femelles sont les plus redoutables, surtout quand elles sont jeunes. Les serpents réagissent davantage quand on leur marche sur la tête que sur toute autre partie du corps. Ils mordent plus le jour que la nuit et ils sont plus agressifs quand les températures sont élevées. ■ **L. C.**

SCIENCES ET AVENIR
LES DOSSIERS

LES DOSSIERS

SCIENCES ET AVENIR

LES GRANDES EXPÉDITIONS SCIENTIFIQUES

KHARBINE-TAPABOR/COLL. S. KAKOU – BERNARD MARTINEZ

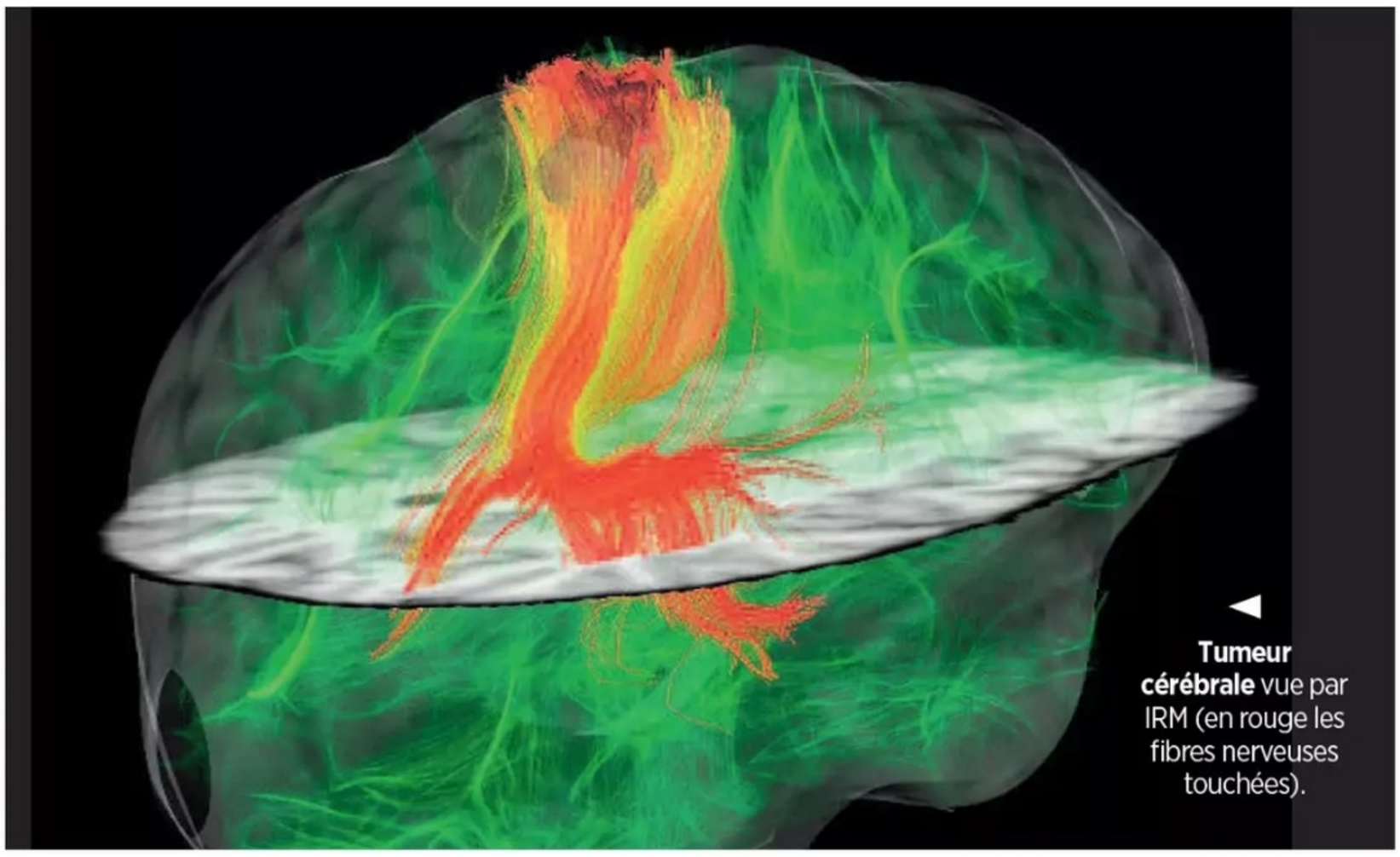
« Géographie, botanique, zoologie, ethnologie… Les savants qui accompagnent Bougainville, Cook ou La Pérouse s'intéressent à tout »
Christian Grataloup, géohistorien

+ EN 2024, L'AVENTURE CONTINUE…

en vente en kiosque

Un virus cause un grave cancer du cerveau

Le cytomégalovirus, un virus très courant, peut devenir cancérogène. Il provoquerait notamment le glioblastome.



SHERBROOKECONNECTIVITY IMAGING LAB/SCIENCESPHOTO LIBRARY/SUCRÉSALÉ

Tumeur cérébrale vue par IRM (en rouge les fibres nerveuses touchées).

Le glioblastome, cancer du cerveau le plus fréquent et de plus mauvais pronostic, est dû à un virus très courant, le cytomégalovirus (CMV). C'est la conclusion d'une enquête menée par le virologue Georges Herbein et son équipe au CHU de Besançon et à l'université de Franche-Comté. Elle confirme une hypothèse émise il y a une vingtaine d'années. Les chercheurs ont isolé le virus à partir de biopsies de la tumeur lors de son opération chez trois patients et montré, *in vitro*, qu'il était capable de transformer en quelques mois des cellules du cerveau humain en cellules cancéreuses typiques de la maladie. Une fois transférées dans le cerveau de souris, ces cellules ont bien donné un glioblastome mortel.

L'infection survient durant la prime enfance

Pourquoi le CMV, qui infecte près de la moitié de la population française, devient-il cancérogène chez certains ? *« Nous ne le savons pas encore mais des mutations pourraient intervenir »*, précise Georges Herbein. L'infection survient durant la prime enfance par des gouttelettes de salive et ne présente le plus souvent aucun symptôme. *« Comme les autres herpèsvirus, le CMV s'installe à vie dans l'organisme et se réactive par poussées occasionnelles »*, ajoute le chercheur. Cette découverte offre des pistes de traitement contre ce cancer actuellement incurable. *« Des essais cliniques sont en cours pour voir si l'utilisation d'un antiviral, le ganciclovir, pourrait ralentir la progression de la maladie »*, note François Ducray, neuro-oncologue aux Hospices civils de Lyon. Une solution à plus long terme serait un vaccin. *« Il n'existe pas encore mais nous y travaillons »*, ajoute Georges Herbein. Un tel vaccin chez le jeune enfant permettrait, comme dans le cas du papillomavirus et des cancers du col de l'utérus et oropharyngé, d'éviter un cancer redoutable des décennies plus tard. ■ **P. K.**

Un remède contre les effets de l'alcool

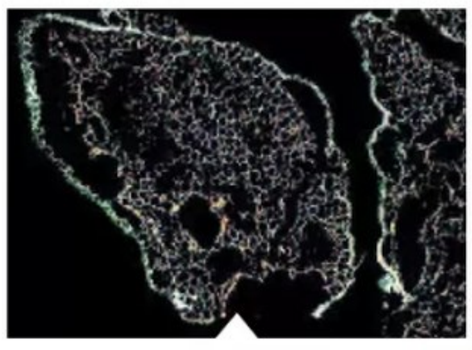
BIOCHIMIE Boire de l'alcool en limitant ses effets psychotropes et sa toxicité : c'est ce que promet un gel anti-alcool mis au point par une équipe suisse à partir de protéines présentes dans le lait. Testé sur des souris, il permet de décomposer l'éthanol dans le tube digestif avant que celui-ci ne pénètre la circulation sanguine et n'atteigne le foie. Confiant en son application chez l'humain, les chercheurs ont déjà déposé le brevet. **A. I.**

SOURCE : JIAQI SU, ETH ZURICH, SUISSE.

Une nouvelle cible pour traiter l'obésité

BIOLOGIE Des chercheurs ont identifié un type de cellules inconnu. Jusqu'ici présentes dans certains tissus adipeux humains, elles auraient la capacité d'inhiber la formation de nouvelles cellules graisseuses. L'analyse montre qu'elles pourraient constituer une cible pour influencer le comportement métabolique global du dépôt de graisse dans les viscères, et donc agir contre l'obésité. **H. J.**

SOURCE : RADIANA FERRERO, EPFL, SUISSE.



R. FERRERO ET J. RUSSEIL (EPFL)

Microscopie d'une coupe de tissu adipeux.

Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

institut Curie
ENSEMBLE, PRENONS LE CANCER DE VITESSE

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

curie.fr

Pour tout renseignement contacter Catherine Ricatte - Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.

Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....

Prénom : .....

Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_|

Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

S&A0724

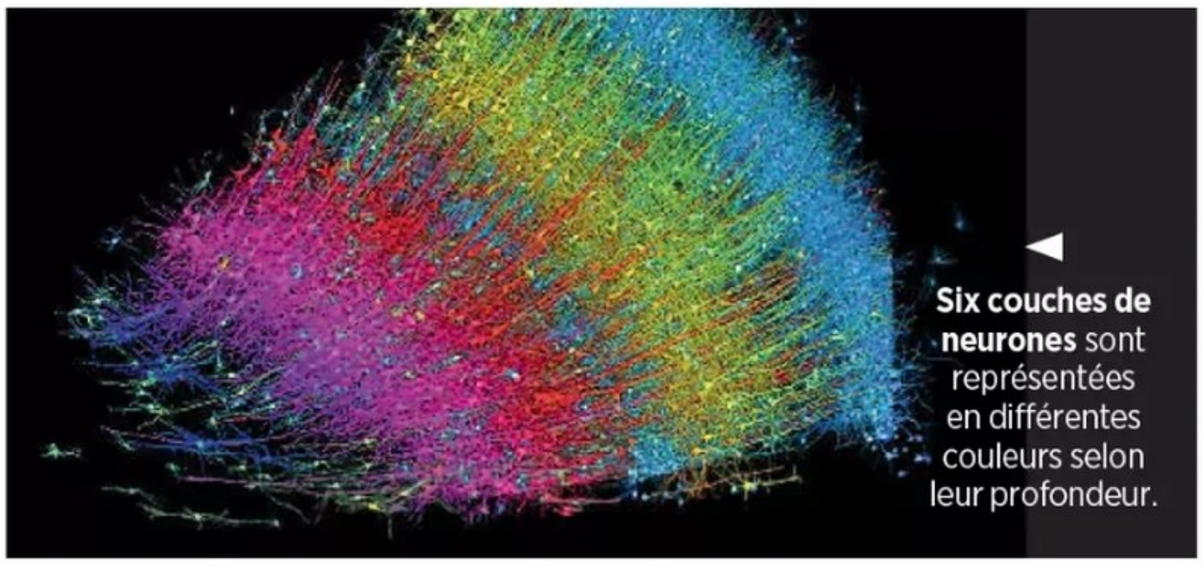
EN DEUX MOTS

CANCER Une étude de l'université d'Oxford (Royaume-Uni) a identifié 107 protéines sanguines annonçant la formation de 19 types de tumeurs jusqu'à sept ans avant le diagnostic. **CANNABIS** Les adolescents consommant du cannabis courent un risque 11 fois plus élevé de développer un trouble psychotique, selon une nouvelle évaluation canadienne. **COVID-19** Des expériences montrent qu'une teneur élevée en CO_2 dans une pièce allonge la durée de vie des particules du Sras-CoV-2 dans l'air ambiant.

Le VIH débusqué de son repaire nucléaire

VIROLOGIE Le virus du sida se niche dans un site bien précis du noyau des lymphocytes T4, d'où il peut se réveiller lorsque ces cellules immunitaires sont activées, révèle sa détection par fluorescence. Lors de l'infection, le virus s'intègre dans l'ADN du compartiment périnucléaire du noyau, première zone mobilisée lorsque la cellule est activée. Le virus est donc aux premières loges pour démarrer sa réplication dans le noyau, ce qui aboutit à la mort du lymphocyte. **P. K.**

SOURCE : F. KIZITO, UNIVERSITÉ CASE WESTERN RESERVE, ÉTATS-UNIS.



GOOGLERESEARCHANDLICHTMAN LAB

Six couches de neurones sont représentées en différentes couleurs selon leur profondeur.

Un fragment de cortex cérébral vu en 3D

Cette première reproduction à l'échelle du nanomètre montre un réseau de 50 000 cellules nerveuses.

Une étape majeure de visualisation du tissu cérébral à l'échelle du nanomètre a été franchie par des chercheurs de l'école de médecine de Harvard (États-Unis). Un millimètre cube du cortex temporal d'une patiente a été prélevé par biopsie puis découpé en 5000 sections qui ont ensuite été scannées par microscopie électronique. La reconstruction 3D de l'ensemble du tissu a été effectuée à l'aide d'une IA à partir des 1400 téraoctets de données obtenues. Résultat : un réseau de 50 000 cellules nerveuses, dont un tiers de neurones connectés entre eux par 150 millions de synapses et deux tiers de cellules gliales de soutien. L'imagerie a aussi permis de distinguer un réseau de vaisseaux sanguins long de 23 cm au total ! Cette prouesse est une avancée déterminante pour la connectomique cérébrale, qui vise à cartographier les cellules nerveuses avec leurs connexions. ■ **P. K.**

Un vaccin contre les infections urinaires

UROLOGIE Administré par un spray sublingual, le vaccin bactérien Uromune a montré des résultats prometteurs sur le long terme contre les cystites bactériennes récidivantes, selon des résultats présentés aux congrès des sociétés européenne et américaine d'urologie. Alors qu'il est déjà autorisé dans 26 pays d'Europe, les urologues plaident pour sa commercialisation et son remboursement en France. **C. G.**

CHASSENET/BSIP

Test urinaire sous forme de bandelette.

Le dispositif, non invasif, est posé à même la peau, autour de la lésion de la moelle épinière.

ONWARD MEDICAL

Des paralysés retrouvent l'usage de leurs bras grâce à des électrodes

NEUROTECHNOLOGIE Sur 60 patients tétraplégiques, 43 ont regagné en partie la maîtrise de leurs bras et de leurs mains grâce à un dispositif non invasif d'électrodes posées sur la peau, autour de l'endroit où leur moelle épinière est lésée. À la différence des autres essais de la start-up Onward, qui ont permis à des paralysés de retrouver en partie l'usage de leurs jambes, l'électrostimulation ne nécessite pas ici d'intervenir chirurgicalement pour poser les électrodes sur la moelle épinière. **H. J.**

SOURCE : CHET MORITZ, UNIVERSITÉ DE WASHINGTON, ÉTATS-UNIS.

25 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

HAMID AZMOUNN, INRAP

Les 28 squelettes d'équidés sans cavaliers ont été soigneusement alignés sur le flanc droit dans 11 fosses.

Les mystérieux chevaux gaulois de Villedieu

Inhumés près de Châteauroux, ils sèment le trouble chez les archéologues. Ont-ils fait l'objet de sacrifices rituels ou bien sont-ils tombés au combat ?

La découverte a pris de court les archéologues de l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap), mandatés dans le cadre de travaux de déviation d'une route à Villedieu-sur-Indre, près de Châteauroux (Indre). Ils ne s'attendaient pas à tomber sur ces squelettes de 28 chevaux et trois chiens — tous des mâles vigoureux et sans blessure apparente — soigneusement alignés sur le flanc droit dans 11 fosses, à quelques dizaines de centimètres sous le sol. Si les chercheurs ont pu établir que l'inhumation datait d'il y a plus de 2000 ans, ils peinent à comprendre son motif. Ont-ils été abattus par les Gaulois, occupants de l'époque dont on sait qu'ils pratiquaient des sacrifices rituels animaux et humains ? Ou sont-ils tombés au combat ? Les premières datations au carbone 14 indiquent qu'ils auraient vécu entre le Ier siècle avant J.-C. et le Ier siècle après J.-C., soit un intervalle de temps dans lequel s'inscrit la conquête de la Gaule par Jules César.

Une possible bataille inconnue

À ce jour, les indices récoltés n'aident pas à trancher. D'un côté, la découverte fait penser à celle de Gondole (Auvergne), en 2002, où furent mis au jour huit chevaux alignés mais accompagnés, eux, de leurs cavaliers. Les archéologues penchaient alors pour l'hypothèse du sacrifice. De l'autre côté, à Villedieu-sur-Indre, la présence à 500 m d'un oppidum (ville fortifiée gauloise apparue vers 80 avant notre ère) encore non fouillé, et surtout, non loin de là, celle de trois balles de fronde en plomb typiques des armées romaines, suggèrent qu'une bataille aurait pu avoir lieu à cet endroit. « *Ce n'est pas simple d'y voir clair,* reconnaît Séverine Braguier, archéozoologue. *D'autant que l'âge moyen — 4 ans — et le sexe des animaux peuvent être expliqués dans le cadre des deux théories. Les Gaulois sacrifiaient de jeunes mâles et les montaient tout autant. Et des chiens pouvaient être utilisés comme offrandes, ou au combat.* » Seul le résultat des analyses pourra, peut-être, résoudre le mystère. ■ **M. B.**

Un gène de résistance à la fumée chez « H. sapiens »

PALÉOGÉNÉTIQUE Une mutation spécifique à *Homo sapiens* a réduit notre sensibilité à la fumée de feu de bois, montre une étude. Le récepteur cellulaire AhR fixe des composés aromatiques présents dans la fumée et peut activer la production d'enzymes pour les neutraliser. Son gène porte une mutation universelle chez *H. sapiens*, absente chez les primates jusqu'aux néandertaliens, suggérant une adaptation à l'utilisation régulière du feu chez notre espèce. **P. K.**

SOURCE : NELLY HELMBRECHT, INSTITUT MAX-PLANCK, ALLEMAGNE.

JIM HOLDEN / ENGLISH HERITAGE

Neuf scènes de pendaison ont été gravées sur cette porte.

Des graffitis des guerres de la Révolution française

ARCHÉOLOGIE Un étonnant vestige des guerres de la Révolution française a été retrouvé en haut d'une tour du château de Douvres, dans le Kent (Royaume-Uni). Sous la peinture d'une porte en bois, figuraient plus de 50 graffitis gravés par des soldats stationnés là dans les années 1790. Neuf scènes de pendaison ont été dénombrées, dont une représente un personnage coiffé d'un bicorne qui pourrait évoquer Napoléon Bonaparte. **H. J.**

48H POUR DÉCOUVRIR ET PRÉSERVER LES TRÉSORS DE NOTRE PLANÈTE BLEUE

LE FESTIVAL

GRAND OCEAN

13-14 SEPTEMBRE 2024

À LA CITÉ DE LA MER, CHERBOURG-EN-COTENTIN

& EN DIGITAL

Conférences & débats portés par les plus grands spécialistes, animations ludiques & immersives... nous accueillons petits et grands pour une plongée unique au cœur des océans.

www.grandocean-event.com

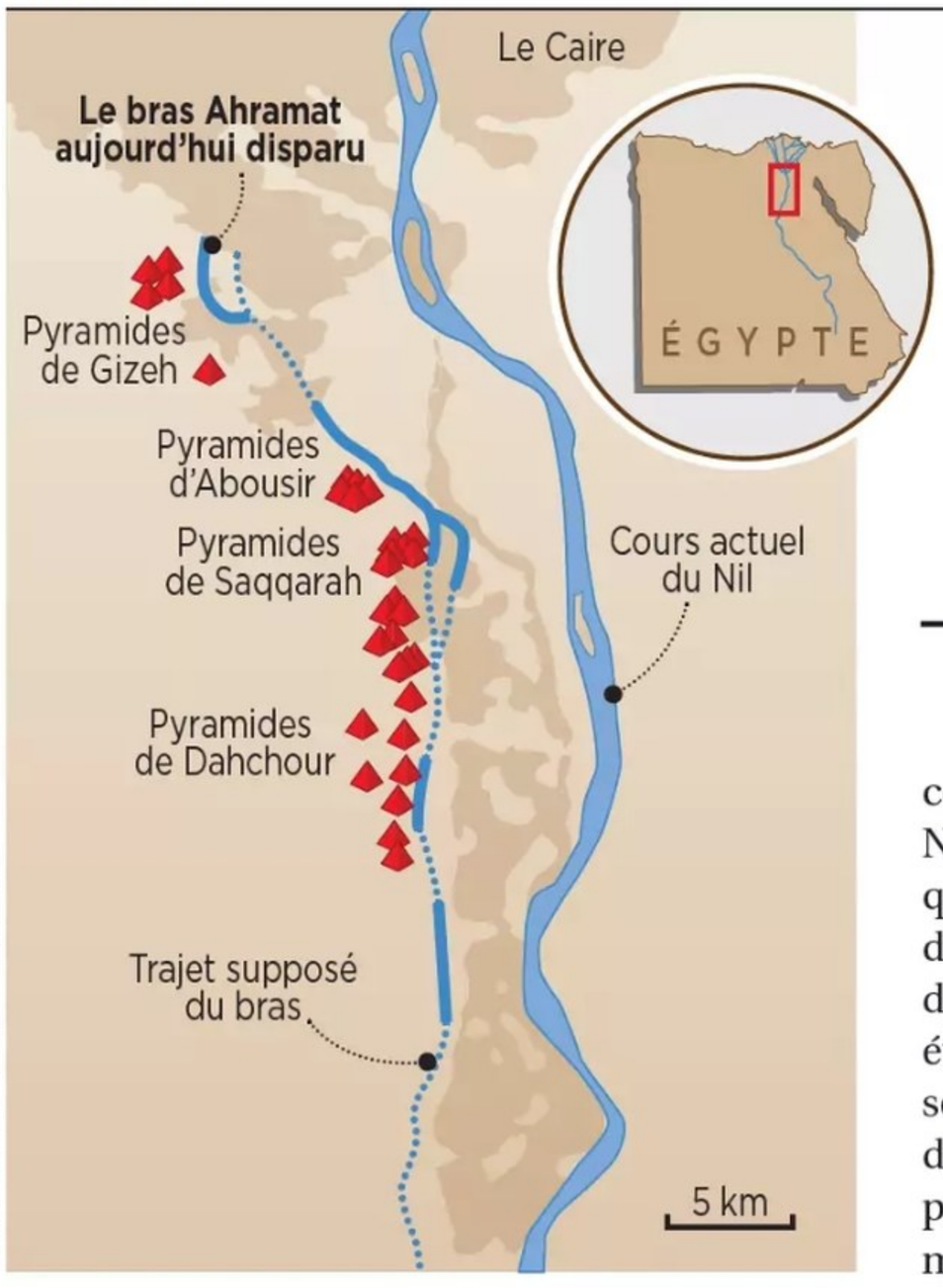
Partenaires Officiels

Partenaires Associés

Partenaires

Partenaire Média

Organisé par



BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : E. GHONEIM ET AL.

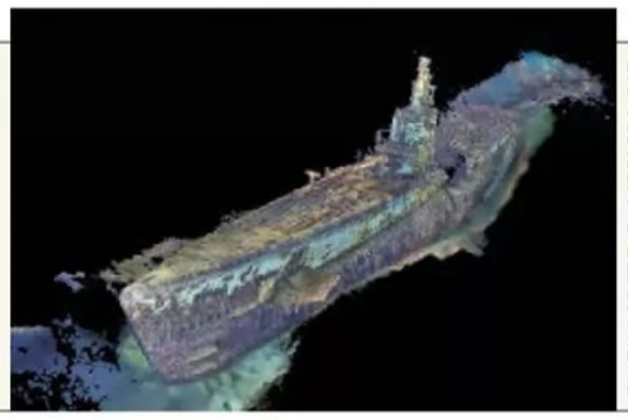
Le bras oublié du Nil

Des données d'imagerie satellite et des carottages révèlent l'existence d'une dérivation du fleuve utilisée pour le transport de matériaux de construction des pyramides.

Trente et une pyramides en Égypte, dont celles du plateau de Gizeh, ont été construites le long d'un bras du Nil aujourd'hui disparu. C'est ce que révèle une étude qui a compilé des données d'imagerie satellite et des carottages profonds du sol pour étudier la structure souterraine et la sédimentologie de la vallée le long de ces différents sites. Bâtis sur une période de près de 1000 ans commençant il y a environ 4700 ans, ils sont désormais situés en zone désertique. Les chercheurs égyptiens et américains ont pu reconstituer le tracé d'une branche fluviale longue de 64 kilomètres qu'ils ont baptisé « Ahramat » (pyramide en arabe). Ils indiquent que de nombreuses pyramides avaient des chaussées se terminant aux berges du bras d'Ahramat, ce qui, selon eux, est une preuve qu'il était utilisé pour le transport de matériaux de construction. **H. J.**

L'épave retrouvée du terrible « USS Harder »

PATRIMOINE Le projet Lost 52, qui vise à retrouver les 52 sous-marins américains perdus pendant la Seconde Guerre mondiale, a localisé l'un des plus redoutable d'entre eux. Coulé au combat avec ses 79 hommes le 29 août 1944, le *USS Harder,* qui naviguait sous la devise *« frappez-les plus fort »,* gisait quasiment intact par 1140 mètres de fond au large de l'île de Luçon, dans le nord des Philippines. C'est le 13e sous-marin retrouvé à ce jour par Lost 52. **H. J.**


TIM TAYLOR ET THE LOST 52 PROJECT

Les plus vieux virus humains

VIROLOGIE Des analyses ADN sur des restes de Neandertal datant d'il y a 50 000 ans retrouvés dans la grotte de Tchagyrka (Russie) ont permis d'identifier les plus vieux virus humains jamais retrouvés. Outre des adénovirus responsables de rhume, d'angine, de conjonctivite ou de gastro-entérite, les chercheurs ont identifié de l'herpèsvirus et du papillomavirus pouvant être à l'origine de verrues et de cancers. **C. L.**

SOURCE : RENATA FERREIRA, UNIVERSITÉ FÉDÉRALE DE SÃO PAULO, BRÉSIL.

FLOURIS ET AL., 2024, PLOSONE, CC-BY 4.0

Simulation de combat par un militaire grec équipé d'une réplique de l'armure mycénienne.

L'armure de Dendra, apte au combat prolongé

ARCHÉOLOGIE Constituée de 15 pièces de bronze, la célèbre armure mycénienne de Dendra, vieille de 3500 ans, n'était pas seulement cérémoniale mais bel et bien adaptée au combat prolongé. C'est ce que démontre une étude qui a consisté à équiper 13 volontaires des forces armées grecques pour tester des répliques lors de simulations de combats de l'âge du bronze pouvant durer jusqu'à onze heures, inspirés de l'*Illiade* d'Homère. L'expérience a révélé que l'armure ne limitait pas les mouvements et ne causait pas de tensions à son porteur. **H. J.**

SOURCE : A. FLOURIS, UNIV. DE THESSALIE, GRÈCE.

12 802

sites découverts par des amateurs en Angleterre

ARCHÉOLOGIE Sépultures de l'âge du bronze, voies romaines ou villages médiévaux… Près de 13 000 sites d'intérêt archéologique ont pu être identifiés ces derniers mois en Angleterre par le projet de science citoyenne Deep Time. Des amateurs surnommés « Pastronautes » avaient pour mission d'examiner des données satellite et lidar couvrant 512 km² dans trois paysages distincts du territoire. **H. J.**

« **Anomalopteryx didiformis** », espèce endémique de Nouvelle-Zélande, a disparu il y a environ 500 ans (vue d'artiste).

TE PAPA CC BY-NC-ND 4.0. TE PAPA (2006-0010-1/22)

Le génome reconstitué du petit moa

ÉVOLUTION Une équipe de biologistes de l'évolution a reconstruit intégralement le génome d'une espèce éteinte d'oiseau endémique de la Nouvelle-Zélande à partir d'ADN récupéré sur un os fossilisé trouvé sur l'île du Sud. Le petit moa de brousse (*Anomalopteryx didiformis*) possède les gènes nécessaires pour former des ailes, mais ils ont muté au fil de son évolution jusqu'à en bloquer totalement le développement. De fait, il était incapable de voler. Disparu après l'arrivée des Maoris sur l'île il y a environ 500 ans, il pourrait désormais faire l'objet d'une « désextinction ». **H. J.**

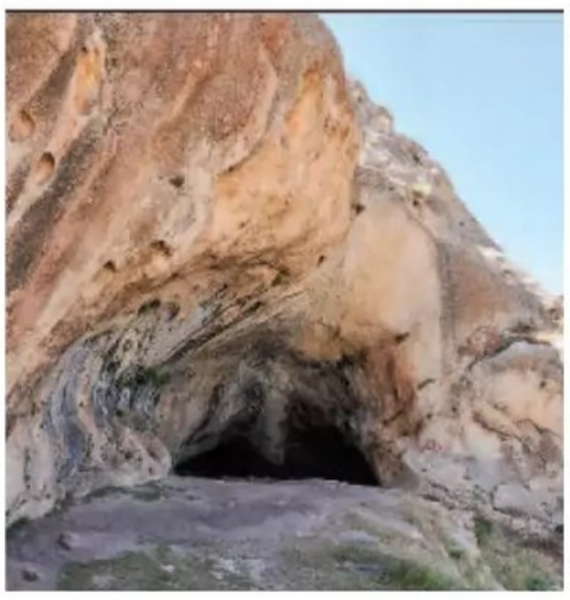
SOURCE : SCOTT EDWARDS, UNIVERSITÉ HARVARD, ÉTATS-UNIS.

Une tumeur opérée il y a 4000 ans

ÉGYPTOLOGIE Il y a plus de 4000 ans, les anciens Égyptiens semblent s'être intéressés de près au cancer, avancent des chercheurs après l'observation au niveau microscopique de deux crânes comportant des lésions clairement dues à des tumeurs. L'examen aux rayons X de l'un d'eux, daté de 2687 à 2345 ans avant notre ère, a montré des marques relevant d'une tentative d'intervention chirurgicale oncologique peu avant le décès. **C. G.**

SOURCE : TATIANA TONDINI, UNIVERSITÉ DE TÜBINGEN, ALLEMAGNE.

Les plus anciennes traces d'occupation en Iran



FIPP

Entrée de la grotte de Qaleh Kurd à Qavzin, au Kurdistan iranien.

PALÉOANTHROPOLOGIE Située à 2137 mètres d'altitude, la grotte de Qaleh Kurd, en Iran, a livré un riche assemblage de pierres taillées, d'ossements de grands mammifères et une dent de lait humaine couvrant une chronologie située entre -452 000 et -165 000 ans. L'étude repousse d'environ 300 000 ans les premières preuves d'occupation humaine datées de cette région du Kurdistan iranien dans le nord du pays. **H. J.**

SOURCE : HAMED VAHDATI NASAB, UNIVERSITÉ TARBIAT MODARES, IRAN.

MARIA J. GARCIA-LEON - UWA/INKFISH - NASA - BRYAN WILLIAM JONES AND ROBERT E. MARC, UNIVERSITY OF UTAH

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

MÉDECINE

Une nouvelle cible contre le cancer

Les plaquettes sanguines contribuent à la progression tumorale, jusqu'au stade métastatique. En inhibant certaines de leurs fonctions, une équipe française de médecins et de biologistes est parvenue à ralentir la progression des métastases. À lire sur le site de *La Recherche*.
https://bit.ly/929cancer

PODCAST

Sixième science

Découvrez les grandes enquêtes de la rédaction avec le podcast Sixième Science, le programme de vulgarisation scientifique réalisé tous les mois par *20 Minutes* et *Sciences et Avenir*.
sciav.fr/929podcast

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

2 minutes

L'attaque du calamar géant

Filmée à 1000 mètres de profondeur dans le Pacifique Sud, une attaque de calamar révèle des lumières qui s'allument au bout de deux de ses bras.
sciav.fr/929calmar

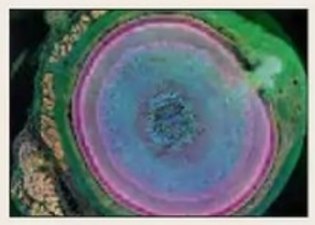
5 minutes

Plongée au cœur d'un trou noir

La Nasa a publié des simulations immersives dévoilant ce que verrait un astronaute s'il plongeait dans un trou noir supermassif. Impressionnant.
sciav.fr/929trounoir

10 minutes

Micro ou macro, testez votre vision



De la microscopie aux plus vastes structures de l'Univers, ces sublimes images affichent d'étranges similitudes. Une galerie photo à découvrir !
sciav.fr/929diapo

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

20 questions qui obsèdent les scientifiques

DOSSIER RÉALISÉ PAR
la rédaction

28 ▸ Les trous noirs sont-ils des tueurs de galaxies ?

30 ▸ Comment la vie peut-elle prospérer dans les abysses ?

31 ▸ Comprendrons-nous les langages animaux ?

32 ▸ Comment faire des virus nos alliés ?

34 ▸ L'océan Austral sauvera-t-il le climat ?

36 ▸ Pourquoi les Égyptiens ont-ils tant écrit ?

37 ▸ Comment la vie est-elle née sur Terre ?

38 ▸ Neandertal était-il vraiment une espèce différente de « sapiens » ?

40 ▸ Pourquoi certains problèmes résistent-ils encore ?

42 ▸ Quand « sapiens » a-t-il émergé en Afrique ?

43 ▸ Pourquoi l'IA générative devient-elle efficace d'un coup ?

44 ▸ Comment les premières épées ont-elles été forgées ?

46 ▸ La révolution des supraconducteurs est-elle pour bientôt ?

48 ▸ Pourrons-nous réconcilier relativité et physique quantique ?

49 ▸ Que révèlent les géoglyphes péruviens ?

50 ▸ La matière noire existe-t-elle ?

52 ▸ D'où la conscience surgit-elle ?

54 ▸ Que signifient les dessins des grands singes ?

55 ▸ L'intelligence artificielle peut-elle être éthique ?

56 ▸ Pourquoi la vitesse des vents ne cesse-t-elle de varier ?

ARNAUD MEYER/ OPALE PHOTO/ LEEXTRA - C. FRESILLON/ CNRS IMAGES - THIERRY BORREDON/SIGNATURES - DEVI PRIDE PHOTOGRAPHY - MATHIEU GENON/ OPALE/ LEEXTRA - A. FACELLY / DIVERGENCE - N. TUCAT / AFP - A. BACHIR BACHA - A. FRESPUECH - A. BONNEFOY - CHLOÉ RAGAZZOLI - M. BERTRAND/ CHALLENGES - REA - SIPA - B. DECOUT/REA - FRÉDÉRIQUE PLAS - G. CARLE

Jean-Pierre Luminet
Astrophysicien

Purificación López-García
Microbiologiste

Julien Bobroff
Physicien

Stanislas Dehaene
Neuropsychologue

Françoise Gaill
Océanographe

Alexei Grinbaum
Physicien

David Elbaz
Astrophysicien

Laurence Devillers
Spécialiste de l'IA

Françoise Combes
Astrophysicienne

Que reste-t-il à découvrir ? « Sciences et Avenir » a rassemblé 20 éminents chercheurs pour qu'ils évoquent leur graal, tantôt cette découverte qu'ils voudraient faire, tantôt ce mystère qu'ils espèrent percer.

Chloé Ragazzoli
Égyptologue

Pierre Charollois
Mathématicien

Cédric Sueur
Primatologue

Anne Lehoërff
Archéologue

Fabienne Delfour
Éthologue

Robert Vautard
Climatologue

Aïcha Bachir Bacha
Archéologue

Marc-André Selosse
Biologiste

Jean-Louis Étienne
Explorateur

Évelyne Heyer
Anthropologue

Marylène Patou-Mathis
Préhistorienne

COSMOLOGIE

Les trous noirs sont-ils des tueurs de galaxies ?

Quel est le rôle de ces mastodontes, dont l'attraction est telle que rien ne peut s'échapper d'eux ? Selon une théorie, leur action expliquerait que certaines galaxies n'engendrent plus d'étoiles. Mais de récentes observations tendent à nuancer cette vision.

La plupart des galaxies possèdent en leur centre un trou noir gigantesque, dont la masse peut atteindre plusieurs millions voire plusieurs milliards de fois celle du Soleil. La Voie lactée abrite ainsi Sgr A*, de 4,3 millions de masses solaires. M87*, niché dans la galaxie du même nom, atteint 6,5 milliards. De tels mastodontes, dont l'attraction est telle que rien ne peut s'échapper d'eux, même pas la lumière, exercent forcément une influence sur leur environnement. Mais laquelle ? Cette question s'est imposée au fil du temps dans les recherches de David Elbaz, astrophysicien au CEA, à Saclay (Essonne), dont l'ambition est de reconstituer l'histoire des galaxies, depuis leur naissance jusqu'à leur mort. Eh oui ! les galaxies meurent aussi…

« Les trous noirs pourraient être des géniteurs de galaxies, à l'opposé de ce que l'on pensait »

David Elbaz, astrophysicien au CEA, à Saclay (Essonne)

Tout commence au début des années 1990. Le jeune chercheur étudie les amas de galaxies dans le cadre de sa thèse. « *En observant toutes ces galaxies constituant les amas, nous nous sommes aperçus qu'il existait une population de galaxies stériles,* se souvient-il. *Elles semblaient s'être comme "vidées de leurs entrailles", et ne formaient plus d'étoiles.* » Voilà donc à quoi ressemble une galaxie « morte ». À l'époque, les coupables sont tout trouvés : si les galaxies n'engendrent plus d'étoiles, c'est qu'elles subissent l'action de trous noirs. Ils videraient leurs réservoirs de gaz en projetant au-dehors la matière, avec leurs puissants champs magnétiques, avant qu'elle n'ait franchi l'horizon des événements, qui délimite la zone de non-retour d'un trou noir. Mais cela reste une accusation sans preuve.

Au même moment se développe l'imagerie infrarouge, avec l'envoi dans l'espace d'instruments (notamment les télescopes spatiaux Iras puis ISO et Spitzer) sensibles à cette gamme de longueurs d'onde émise par la poussière et le gaz interstellaire. « *Cela nous a donné accès au "métabolisme" des galaxies. Nous avons été capables de voir où les étoiles se formaient, et à quel rythme. C'est alors que je me suis spécialisé dans la naissance*

DEVI PRIDE PHOTOGRAPHY

Trou noir supermassif entouré de son disque d'accrétion constitué de poussières et de gaz (illustration).

NOIRLAB/AURA/NSF/P. MARENFELD

et la "fertilité" des galaxies. Nous avons découvert qu'elles formaient des étoiles à un rythme universel. Elles semblaient s'autoréguler. Or, certaines possédaient des trous noirs actifs, d'autres non. C'est étrange : si les trous noirs devaient être le virus qui "tue" les galaxies, pourquoi certaines sont épargnées et d'autres pas ? »

Les supercalculateurs au secours des astrophysiciens

L'enquête de David Elbaz connaît un rebondissement avec l'interféromètre Alma, un radiotélescope géant inauguré en 2011 dans le désert de l'Atacama, au Chili. Alma scrute l'Univers dans le domaine des ondes radio, permettant pour la première fois l'observation des nuages de gaz moléculaire. Après la mesure du rythme de naissance des étoiles avec les satellites infrarouges, les ondes millimétriques permettaient de déterminer l'espérance de vie des galaxies en quantifiant leurs réservoirs de gaz. *« C'est l'instrument dont on rêvait pour aller explorer encore plus loin le réservoir de gaz des galaxies, et quantifier combien d'astres celles-ci pouvaient former. Et là, nous avons fait une découverte extraordinaire. Ces réservoirs leur permettaient de fabriquer des étoiles durant 600 millions d'années, pas davantage. Alors que l'Univers a 13,8 milliards d'années ! Le problème n'était plus de savoir pourquoi les galaxies meurent, mais plutôt de comprendre comment elles peuvent survivre durant plusieurs milliards d'années. »*

Le mystère de l'évolution des galaxies s'épaissit donc… jusqu'à ce que les supercalculateurs viennent au secours des astrophysiciens. *« Alma nous révélait le gaz invisible, mais les simulations numériques allaient nous permettre de le mettre en mouvement. C'est ainsi que l'on s'est aperçu que l'essentiel du gaz — environ 90 % — destiné à fabriquer des étoiles se trouve en réalité hors des galaxies, dans des filaments de matière qui les relient. Ils constituent ce que l'on appelle les baryons noirs. Il s'agit de matière classique, donc d'atomes, invisible car froide et diluée. Rien à voir avec la matière noire. Ces filaments sont la clé pour comprendre comment les galaxies sont nourries, et pourquoi elles meurent. »*

Et les trous noirs dans tout cela ? Pour David Elbaz, ils sont en quelque sorte l'arbre qui cache la forêt. *« On leur avait attribué un peu vite le pouvoir de tuer les galaxies, mais la découverte des filaments complexifie beaucoup l'affaire. S'ils ne sont pas responsables, alors cela signifie que nous sommes passés à côté d'un élément essentiel de notre compréhension de l'évolution des galaxies. »*

Mais à nouveau, un instrument va changer la donne…

Lancé en décembre 2021, et actif depuis juillet 2022, le télescope spatial James-Webb (JWST) apporte d'ores et déjà de nouvelles pièces à l'histoire des galaxies… et des trous noirs. Parce qu'il observe dans l'infrarouge, il nous révèle les toutes premières galaxies de l'Univers. En effet, leur lumière, en raison de l'expansion, est décalée dans ce domaine du spectre électromagnétique car la dilatation de l'espace dilate les longueurs d'onde. *« Le JWST nous apprend que les premières galaxies se sont formées plus tôt qu'on ne l'imaginait, environ 200 millions d'années seulement après le Big Bang. On découvre qu'elles sont plus fertiles, et qu'elles possèdent des trous noirs supermassifs alors qu'elles viennent de naître. À tel point que l'on se demande si les trous noirs ne seraient pas arrivés avant les galaxies. Autrement dit, ils pourraient en être les géniteurs, ce qui constitue un renversement complet de ce que l'on imaginait lorsque j'ai entamé mes études »*, développe David Elbaz. En guise d'exemple, il cite une publication récente, signée notamment du cosmologiste anglais Joseph Silk, qui montre que lorsque l'Univers était très jeune et les galaxies très denses, l'activité des trous noirs aurait pu provoquer des naissances d'étoiles par les jets d'énergie qui s'en échappent et collisionnent les nuages de gaz.

L'espoir de saisir un trou noir en action

« En conclusion, l'évolution des galaxies, leur fertilité initiale, le fait qu'elles meurent, n'est pas qu'une histoire de trous noirs, même s'ils jouent un rôle, résume David Elbaz. *Mais ce rôle, nous ne le comprendrons que dans un contexte plus global, lorsque nous aurons un bilan plus complet du contenu de l'Univers. Parvenir à cartographier les filaments serait l'une des découvertes les plus excitantes à venir. »*

Un nouvel espoir est né avec l'instrument BlueMuse, qui sera installé aux environs de 2030 sur le Very Large Telescope, au Chili. *« Il devrait être capable de détecter une partie de ces filaments de gaz froid. Néanmoins, nous n'avons pas la certitude que l'on parviendra un jour à cartographier toute cette matière cachée,* nuance l'astrophysicien. *De même, pour être certain de l'action des trous noirs, il faudrait pouvoir la saisir en direct : les "voir" vider une galaxie lointaine de son gaz, ou engendrer des étoiles… Cela paraît encore hors de portée. »* L'histoire des galaxies, et le rôle de chacun de ses acteurs — les gaz, les étoiles, les trous noirs — reste encore bien incomplète… *« Il faudra peut-être quelques décennies pour l'écrire complètement. Ou bien quelques mois, qui sait, si une observation change la donne… Les découvertes préviennent rarement de leur arrivée! »* ■ **Fabrice Nicot**

OCÉANOGRAPHIE

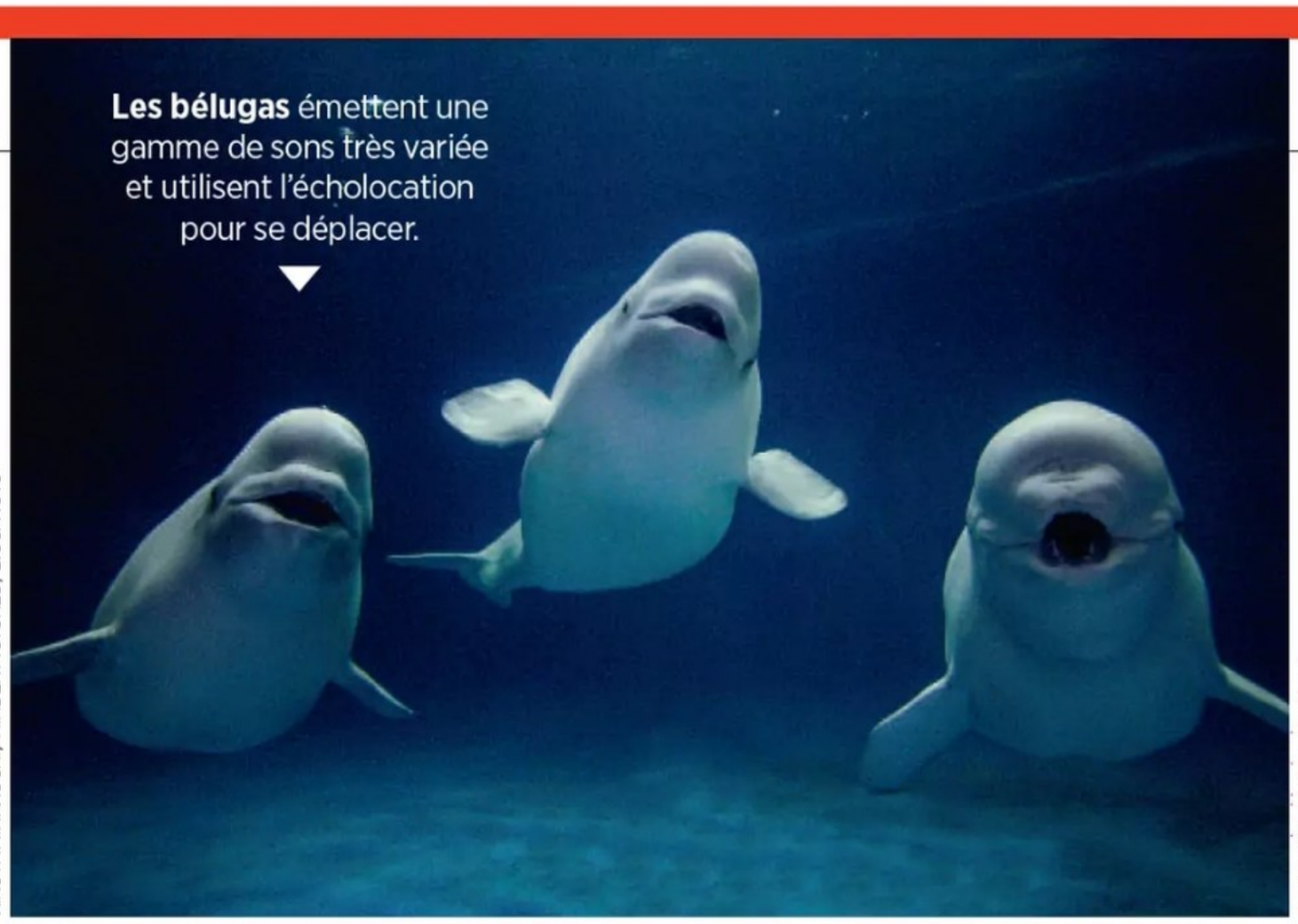
Comment la vie peut-elle prospérer dans les abysses ?

En 1977, la découverte dans l'océan Pacifique d'oasis de vie associées à des sources hydrothermales jusque-là inconnues fait l'effet d'une bombe. Contre toute attente, la vie peut prospérer dans les profondeurs océaniques, non pas grâce à la lumière du soleil mais du fait de la chimiosynthèse, dans des eaux pouvant atteindre 400 °C ! La jeune océanographe Françoise Gaill, aujourd'hui directrice de recherche émérite au CNRS, participe aux premières expéditions américaines qui explorent ces nouveaux environnements dans le Pacifique. *« Très vite, une question s'est posée : comment ces organismes survivent-ils dans un environnement hostile à la plupart des êtres vivants ?* s'interroge-t-elle encore. *Je pense qu'il y a là des mécanismes moléculaires de résistance et d'adaptation d'une importance capitale à identifier, des processus qui pourraient être utiles dans les domaines de la biologie, de l'écologie et de la santé. Il faut aussi explorer leurs interactions fortes avec des micro-organismes. Il y a probablement toute une gamme de processus d'utilisation ou de production d'énergie que nous sous-estimons. »* Notamment liés au fer, un élément abondant dans l'océan. L'étude des milieux et régions océaniques jusqu'aux échelles les plus fines est aujourd'hui une priorité pour mieux comprendre et modéliser leur évolution dans les prochaines décennies, alors que l'impact du changement climatique va s'intensifier. ■ **Sylvie Rouat**

« Il existe des mécanismes moléculaires de résistance et d'adaptation d'une importance capitale »

Françoise Gaill, océanographe, directrice de recherche émérite au CNRS

THIERRY BORREDON/SIGNATURES



Les bélugas émettent une gamme de sons très variée et utilisent l'écholocation pour se déplacer.

HIROYA MINAKUCHI / MINDEN PICTURES / BIOSPHOTO

« La proximité avec un animal facilite notre capacité empathique »

Fabienne Delfour, éthologue, enseignante-chercheuse à l'École nationale vétérinaire de Toulouse

A. FRESPUECH

ÉTHOLOGIE

Comprendrons-nous les langages animaux ?

Cette quête importante nécessite l'acquisition de connaissances sur le monde animal et de longues immersions avec les sujets étudiés.

« *Pour espérer comprendre les langages animaux, il faut se départir de notre vision anthropocentrique de la communication animale pour faire l'effort d'aller vers l'animal* », explique Fabienne Delfour, enseignante-chercheuse à l'École nationale vétérinaire de Toulouse. Mais comment se mettre dans la peau d'un animal dont les sens peuvent être extrêmement différents des nôtres ? C'est en 1909 que le biologiste estonien Jakob von Uexküll décrit le concept d'*Umwelt* (environnement), selon lequel chaque organisme perçoit son environnement d'une manière unique en fonction de son expérience sensorielle et de ses capacités cognitives. « *Le monde d'une abeille ou d'une mouche, qui voient dans l'ultraviolet, est fondamentalement différent de celui d'un humain* », note Fabienne Delfour. Pour l'abeille, une fleur peut être perçue comme une source de nectar quand l'humain y voit un objet décoratif. Les chauves-souris, qui se déplacent et chassent dans l'obscurité grâce à l'écholocation, vivent dans un monde acoustique complexe composé d'une grande diversité de signaux ultrasonores utilisés tant pour l'écholocation que pour la communication sociale.

Certains *Umwelts* nous sont cependant plus perméables que d'autres. Le phénomène de domestication et de familiarisation permet une certaine compréhension entre humains et chiens, chats ou chevaux. « *L'un des prérequis pour pouvoir se mettre à la place de l'autre,* remarque Fabienne Delfour, *c'est d'engranger le plus de connaissances sur cette altérité, que ce soit sur le plan biologique, physiologique, écologique ou psychologique. La proximité avec un animal facilite notre capacité empathique.* » Pour les humains, il est plus facile d'imaginer le monde sensoriel des grands singes et des mammifères terrestres que celui des poissons ou des bactéries marines.

Identifier des schémas de langage grâce à l'IA

Mais même si nous partageons un *Umwelt* proche de celui des singes, comment communiquer ? Dans les années 1960 à 1980, les primatologues immergeaient des chimpanzés dans un milieu humain pour leur apprendre notre propre langage, notamment la langue des signes, avec un succès finalement limité. « *Aujourd'hui, des chercheurs font l'expérience inverse,* note Fabienne Delfour. *Après une longue immersion avec des animaux, ils analysent leurs échanges, y prélèvent des informations pour essayer d'engager la communication. C'est cette démarche que nous mettons en place au laboratoire de l'Institut langage, communication et cerveau de Marseille. Nous voulons créer une collection d'enregistrements d'interactions sonores entre cétacés et, à l'aide de l'intelligence artificielle, essayer d'identifier des schémas de langage et s'en inspirer pour tenter d'établir un dialogue.* » ■

Sylvie Rouat

BIOLOGIE

Comment faire des virus nos alliés ?

De récentes découvertes montrent que les virus ont façonné les humains, voire leur ont permis de vivre sur cette planète. Ceux qui sont perçus comme nos ennemis pourraient devenir des organismes utiles à notre santé.

C'est entendu, les virus peuvent être nos pires ennemis. La pandémie de Covid-19 en est une récente illustration. L'angoisse d'une transmission d'un agent mortel à l'ensemble de l'humanité est bien réelle. Mais si les virus pouvaient aussi être nos alliés ? De récentes découvertes ont montré qu'ils ont façonné les humains, voire leur ont permis de vivre sur la planète Terre. Ces avancées scientifiques révèlent que l'éventail des rôles réels tenus par les virus est extrêmement large et commence seulement à être exploré. *« Il nous faut mieux comprendre leur rôle au sein du vivant pour — qui sait ? — en faire des organismes utiles à notre santé »*, se projette Marc-André Selosse, professeur au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

Il faudra d'abord, pour cela, clore un débat : les virus sont-ils vivants ? Leur génome est en effet principalement composé de gènes empruntés aux organismes qu'ils infectent. Pour les uns, cette caractéristique fait que les virus n'ont pas leur place dans l'arbre du vivant. *« Outre que l'arbre du vivant n'est qu'une représentation partielle du vivant, les virus savent acquérir des gènes, en forment de nouveaux, possèdent une sorte de sexualité, et la pandémie de Covid-19 a également montré qu'ils savent évoluer, ce qui est une capacité qui selon moi les range dans le vivant »*, réfute Marc-André Selosse. Le débat devrait agiter les biologistes encore quelques années avant une possible conclusion. Reste que cette forme de « parasitisme » de cellules hôtes interroge. Leur action est-elle uniquement délétère ?

Il convient préalablement de faire une distinction. *« Les virus provoquant des maladies ont des transmissions horizontales entre deux organismes, qu'ils opèrent par eux-mêmes* [comme pour la grippe] *ou grâce à des vecteurs comme le moustique du paludisme par exemple,* détaille le biologiste. *Mais ils peuvent aussi pénétrer au sein du noyau et s'insérer dans l'ADN, ce qui leur permet de se diffuser lors de la division cellulaire dans les générations de cellules ultérieures.* » Ces virus intégrés correspondent notamment à des rétrovirus. Ils sont présents dans les génomes des plantes, des insectes, des mammifères depuis des millions d'années. Ces rétrovirus représentent par exemple 8 % du génome humain. Ils témoignent d'infections anciennes que l'espèce a gardées, vraisemblablement parce qu'un service est rendu.

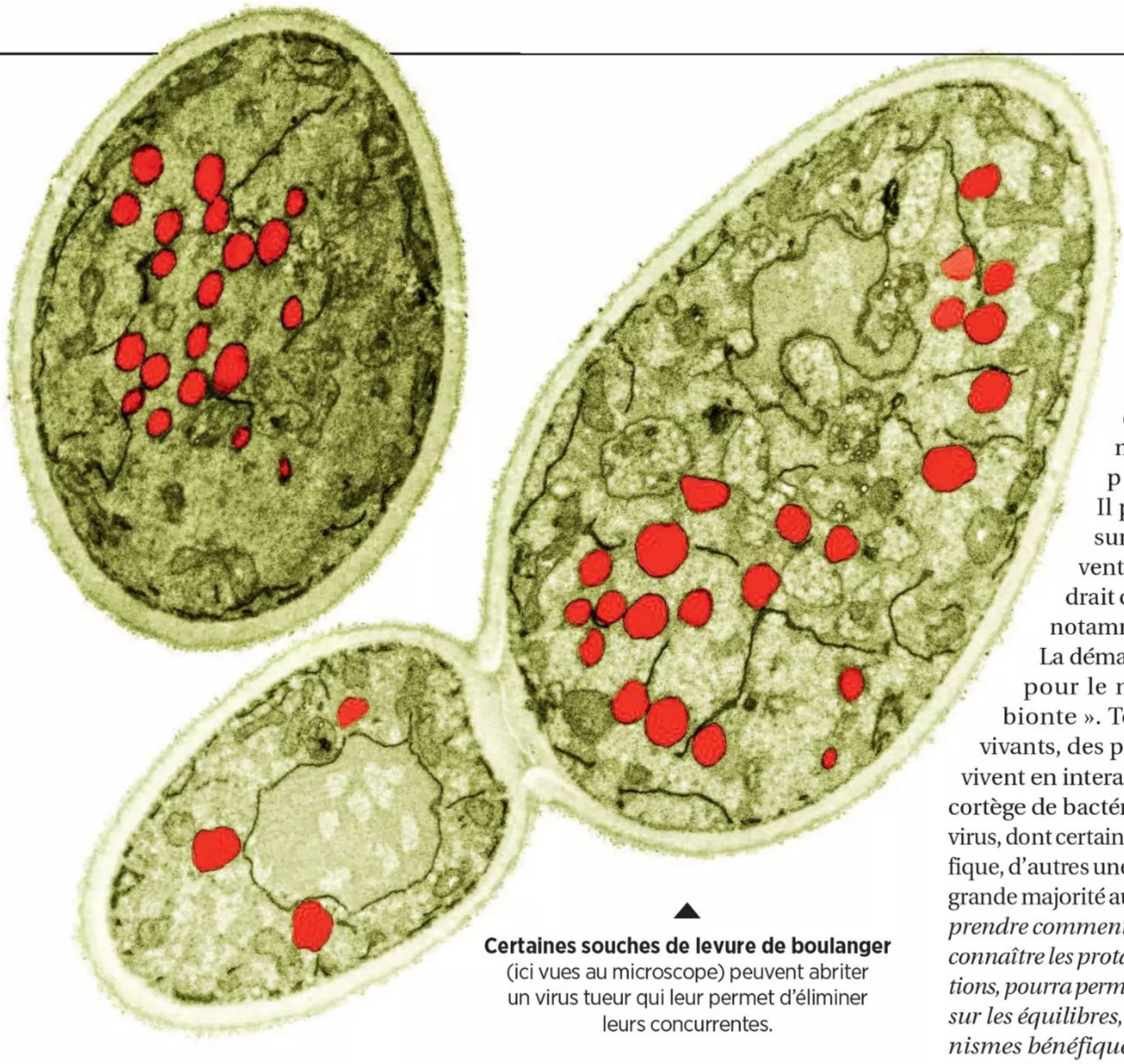
AFP

« La pandémie de Covid-19 a montré qu'ils savent évoluer, ce qui est une capacité qui les range dans le vivant »

Marc-André Selosse, professeur au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

Des virus bénéfiques pour leur hôte

On s'est ainsi beaucoup intéressé — pour des raisons industrielles — à un virus infectant la levure de boulanger *Saccharomyces cerevisiae*. *« Ce virus donne à son hôte la capacité de produire une toxine qui tue ses concurrents. Ce facteur tueur est donc un avantage pour la levure qui le porte, pas pour les autres. S'il a été étudié c'est parce qu'il perturbait les fermentations de la bière ou du vin »*, raconte Marc-André Selosse. Certains virus sont de fait bénéfiques pour leur hôte. Ainsi, un virus persistant chez le poivron limite la production de signaux volatils attirant les pucerons porteurs d'un autre virus, pathogène celui-là. Une étude portant sur la résistance au manque d'eau de la plante



Certaines souches de levure de boulanger (ici vues au microscope) peuvent abriter un virus tueur qui leur permet d'éliminer leurs concurrentes.

SCIENCE SOURCE/BSIP

modèle arabette des dames *(Arabidopsis thaliana)* montre que les plantes possédant des virus ayant évolué en leur sein supportent mieux le manque d'eau que celles qui en sont privées.

Des virus qu'*Homo sapiens* porte dans son génome ont aussi une utilité démontrée. Ainsi, le gène ARC (activity-regulated cytoskeleton-associated protein) est associé aux processus de mémorisation et d'apprentissage dans la plupart des espèces vivantes puisqu'il est hérité des premiers arthropodes, il y a 350 millions d'années. Les équipes de Vivian Budnik, de l'université du Massachusetts, et de Jason Shepherd, de l'université de l'Utah, aux États-Unis, ont démontré que cette aptitude à la mémoire de long terme ne pourrait s'exprimer sans la présence d'un rétrovirus, qui facilite les interactions chimiques entre neurones. Autre exemple : « *En 2010, l'équipe de Thierry Heidmann, de l'institut Gustave-Roussy à Villejuif, a montré que des copies d'un gène rétroviral, le gène ENV, intégrées dans le génome de mammifères placentaires, participaient à mettre en place le placenta, essentiel pour les échanges régulés entre la mère et le fœtus,* poursuit Marc-André Selosse. *Ce qui signifie que sans ce virus, notre mode de reproduction n'aurait pas été le même.* »

Pouvoir réduire le recours aux médicaments chimiques

Le défi des années à venir est de recenser l'ensemble de ces virus avec lesquels nous vivons. Il faudra déterminer si ceux présents dans notre génome remplissent un rôle ou sont simplement dormants. L'inventaire du microbiote — ces 2 à 3 kg de micro-organismes qui tapissent notre intestin et notre peau — ouvre également la porte à des régimes alimentaires individuels favorisant les microbes bénéfiques pour notre santé. Il pourrait déboucher sur une médecine préventive efficace qui tiendrait compte de nos hôtes, notamment les virus.

La démarche est plus récente pour le monde de « l'holobionte ». Tous les organismes vivants, des plantes aux animaux, vivent en interaction étroite avec un cortège de bactéries, champignons et virus, dont certains ont une action bénéfique, d'autres une action nocive, et une grande majorité aucun effet réel. « *Comprendre comment tout cela fonctionne, connaître les protagonistes et leurs fonctions, pourra permettre à l'avenir de jouer sur les équilibres, de favoriser les organismes bénéfiques et limiter ceux qui sont néfastes pour viser une meilleure santé* », espère Marc-André Selosse. On est en mesure, par exemple, d'utiliser des virus pour tuer des bactéries qui nous rendent malades. Cette méthode, la phagothérapie, serait un bon complément aux antibiotiques.

C'est une voie qui pourrait permettre de diminuer le recours aux médicaments chimiques, pour les humains et leurs animaux domestiques, mais aussi pour les plantes. Au contraire de la lutte chimique qui ne fait aucune distinction entre la maladie ciblée et l'écosystème complexe dans lequel elle se développe, cette stratégie est basée sur une connaissance fine des niches écologiques, notamment celles des espèces microbiennes qui luttent pour leur espace vital et modulent le fonctionnement des autres organismes vivants. ■

Loïc Chauveau

EXPLORATION

L'océan Austral sauvera-t-il le climat ?

Selon la communauté scientifique, l'océan qui entoure l'Antarctique serait le plus grand puits de carbone océanique de la planète, et donc un contributeur majeur à la régulation du climat. La mission Polar Pod va s'employer à le démontrer.

On le sait : le climat se réchauffe plus vite que jamais dans l'histoire terrestre. Nous connaissons les causes, une en particulier : l'accumulation du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère, qui génère environ 75 % de l'augmentation de l'effet de serre induite par les activités humaines. Heureusement pour nous, la Terre abrite en son sein de fabuleux puits de carbone. Elle fait aussi l'objet de courants aériens et océaniques qui, de concert, concourent à réguler la température à la surface.

Et parmi ces mécanismes d'équilibre, l'océan joue un rôle déterminant dans la répartition de la chaleur et la capture du gaz carbonique que nous envoyons en excès dans l'atmosphère. *« C'est un régulateur thermique central. Il absorbe entre 90 et 93 % de l'excès de chaleur dû au réchauffement climatique puis diffuse cette chaleur par les courants qui permettent des échanges avec les eaux froides,* rappelle l'explorateur français Jean-Louis Étienne. *On parle en effet d'une surface colossale, beaucoup plus importante que la surface terrestre. »* De plus, l'océan capte le CO_2 de l'air. Comme les forêts à terre, il agit telle une pompe biologique. Plus exactement, le phytoplancton qu'il abrite se nourrit — par photosynthèse — de gaz carbonique de l'air et libère de l'oxygène. *« Mais dans l'océan se produit aussi une dissolution du CO_2 dans l'eau de mer. Ce qui, bien que bénéfique pour le climat, n'est pas sans conséquence pour la faune et la flore sous-marines, puisque ce phénomène contribue à acidifier l'océan »*, ajoute Jean-Louis Étienne.

À ces contributions largement vérifiées par la communauté scientifique, une autre donne ne laisse aucun doute : la capacité de l'océan à absorber du CO_2 se réduit à mesure que le climat se réchauffe. Car ce faisant, les eaux aussi se réchauffent. Or, le CO_2 se dissout principalement dans l'eau froide. C'est l'une des raisons qui laisse croire aux experts que l'océan Austral, le plus froid que compte notre planète, est le principal puits de carbone océanique. Mais ce n'est pas la seule raison. *« C'est aussi un océan très agité où se forment beaucoup plus de vagues qu'ailleurs. Or, les vagues emprisonnent l'air lorsqu'elles se replient. L'océan Austral capterait ainsi beaucoup plus d'air et donc de CO_2 qu'il contient,* explique encore l'explorateur, passionné par les Pôles. *Enfin, il doit certainement sa performance climatique supposée à sa surface, géante. »* Rappelons que cet océan, qui entoure l'Antarctique et agit comme une courroie de transmission entre les eaux de l'Atlantique Sud, l'océan Indien et le Pacifique, a une circonférence de 22 000 kilomètres. *« Néanmoins, si on a de fortes raisons de penser qu'il est le principal puits de carbone océanique — il capterait à lui seul 50 % du carbone absorbé par l'océan mondial —, nous n'avons jamais mesuré ces échanges atmosphère-océan, sauf partiel-*

N. TUCAT / AFP

« L'océan absorbe entre 90 et 93 % de l'excès de chaleur dû au réchauffement climatique »

Jean-Louis Étienne,
explorateur, responsable de la mission Polar Pod

Polar Pod, navire vertical doté d'un flotteur de 100 m de haut, devrait entamer son premier tour de l'Antarctique fin 2026-début 2027.

lement en été », note Jean-Louis Étienne. Pour le vérifier, il faudrait des mesures *in situ* réalisées sur une longue durée. Cela n'a jamais été fait car cet océan est très éloigné et, surtout, extrêmement difficile d'accès. Les expéditions y sont donc rares. Les Français font bien des missions dans l'océan Indien à bord du navire océanographique le *Marion-Dufresne*, lequel alimente les stations de Kerguelen et de Crozet, archipels situés aux abords de l'océan Austral, mais il n'y a personne l'hiver. « *Pratiquement personne non plus ne s'y rend au printemps ou à l'automne. Surtout, c'est un océan de tempête et il est impossible d'y séjourner dans les bonnes conditions de sécurité et de confort avec un navire classique* », souligne l'explorateur.

Pour enfin y collecter des données précises, conforter la conviction des scientifiques, contribuer à renforcer les modèles d'évolution du climat et tout simplement en apprendre davantage sur cet océan, Jean-Louis Étienne a donc entrepris d'innover. Au début des années 2010, il se rapproche de Laurent Mermier, directeur général du cabinet d'architecture navale Ship-ST. Ensemble, ils se lancent dans l'idée folle de construire un navire vertical. C'est le projet Polar Pod. « *Il fallait un bateau capable d'échapper à la surface, pour ne pas être complètement tributaires des mouvements de la mer qui y sont très violents,* raconte Jean-Louis Étienne. *Pour ce faire, nous avons donc conçu un navire vertical, un flotteur de 100 mètres de hauteur dont 75 mètres sous l'eau, ce qui lui donne sa stabilité. De plus c'est un treillis, si bien que le Polar Pod sera traversé par les vagues et ne sera pas soumis aux mouvements de la houle. De quoi permettre à une équipe de huit personnes (dont trois marins professionnels et quatre ingénieurs océa-*

7C- POLAR POD

nographes) de séjourner longtemps sur l'océan Austral. »

Polar Pod a pris une envergure internationale. L'État français finance sa construction, l'Ifremer en est le maître d'ouvrage et l'association Océan Polaire de Jean-Louis Étienne en assurera l'exploitation tout au long de la mission. S'il a fallu attendre longtemps pour faire les maquettes, effectuer les simulations, trouver les partenaires et les financements, et finalement donner naissance au Polar Pod, ses résultats sont très attendus par la communauté internationale. 43 institutions et 12 pays sont ainsi engagés dans le projet. Le CNRS, le Cnes, l'Ifremer et l'IRD assureront le pilotage scientifique, mais toutes les données collectées seront en *open source*. Et sa mission fait partie des projets de la décennie des Nations unies pour les sciences de l'océan (2020-2030). Après douze ans de recherche et de développement, le Polar Pod prendra enfin l'eau fin 2026-début 2027 pour une mission de trois ans. Il réalisera deux fois le tour de l'Antarctique avec des relèves d'équipage effectuées tous les deux mois par le *Persévérance*, voilier conçu par Jean-Louis Étienne.

Un inventaire de l'océan aux quatre saisons

Véhicule zéro émission, il avancera grâce au seul courant à la vitesse de 1 à 1,5 nœud et sera alimenté en électricité par les six éoliennes qui le surplombent. Il sera doté d'outils de mesure en continu pour vérifier les échanges océan-atmosphère, mais aussi mieux comprendre les interactions de l'océan Austral avec les océans voisins, ce qu'on appelle également le courant circumpolaire antarctique, qui est très important pour comprendre l'évolution du climat. Au-delà de son fort intérêt pour comprendre le climat, la mission devrait permettre d'apporter des données très fournies pour confirmer la nécessité de créer des zones marines protégées autour de l'Antarctique. « *Un inventaire de la biodiversité de cet océan va ainsi être réalisé pour la première fois aux quatre saisons. Le Polar Pod sera équipé d'hydrophones pour effectuer une écoute passive et lister toutes les espèces reconnues par les logiciels* », précise Jean-Louis Étienne. Les chercheurs pourraient également y découvrir d'autres formes de plancton, et peut-être confirmer l'existence du calmar colossal, une espèce de la même famille que le calmar géant mais plus grande encore. Elle serait, selon les récits de pêcheurs, inféodée aux eaux profondes antarctiques. ■

Fanny Costes

ARCHÉOLOGIE

Pourquoi les Égyptiens ont-ils tant écrit ?

Malgré l'abondance de textes produits dans l'Égypte antique dont une partie conséquente est parvenue jusqu'à nous, nous ignorons encore l'essentiel à leur sujet : qui les a écrits, et pour quelle raison ? « *Nous ne savons pas qui étaient réellement les scribes ni comment ils consultaient, apprenaient, ou encore transmettaient ces textes* », regrette Chloé Ragazzoli, égyptologue spécialiste d'histoire culturelle à l'École des hautes études en sciences sociales (EHESS) et présidente de la Société française d'égyptologie. Les *Textes des pyramides* — le premier grand corpus qui apparaît à la fin de la Ve dynastie, vers 2350 avant notre ère — ont notamment surgi de façon soudaine et aboutie sur les murs, indiquant qu'ils avaient forcément circulé avant sous une autre forme. Hélas, celle-ci reste une énigme. Plus largement, nous ne savons pas quelle était la place de l'écriture et de la culture savante dans la société égyptienne. La littérature ne concernait-elle qu'une infime partie de la société ? Ou circulait-elle au contraire dans toutes ses couches ? Pour répondre à ces interrogations, Chloé Ragazzoli ne désespère pas de trouver un jour en l'état le secteur administratif d'un lieu de pouvoir dans lequel auraient été produits et stockés des documents, à l'instar de ceux découverts dans les palais mésopotamiens. « *Ce serait mon graal,* confie-t-elle. *Je rêverais aussi de déterrer ce qui pourrait s'apparenter au "journal de bord" d'un scribe dans lequel il aurait raconté la façon dont il a appris à écrire. Mais j'y crois moins, car je ne pense pas qu'un tel concept faisait partie de la construction mentale des scribes égyptiens.* » ■

« Je rêverais de déterrer ce qui pourrait s'apparenter au "journal de bord" d'un scribe »

Chloé Ragazzoli, égyptologue, maîtresse de conférences à Sorbonne Université

CHLOÉ RAGAZZOLI

Marine Benoit

BIOLOGIE

Comment la vie est-elle née sur Terre ?

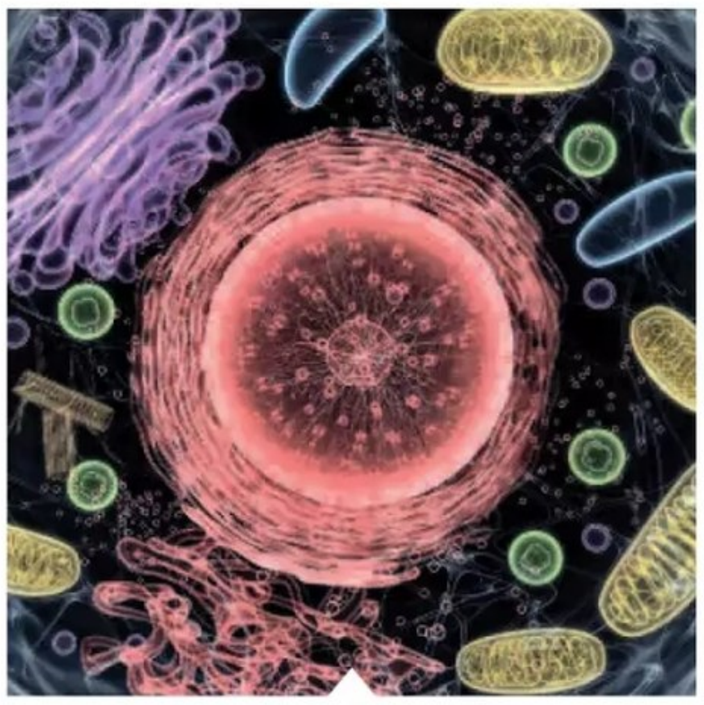
Les étapes précises qui ont conduit à la naissance des premiers systèmes biochimiques simples de cellules restent à découvrir.

« La vie se place dans le cadre d'une évolution physique et chimique plus large, celle de l'évolution de la matière dans l'Univers »

Purificación López-García, directrice de recherche CNRS au laboratoire Écologie, systématique et évolution

S'il y a bien une question qui anime depuis toujours les scientifiques, c'est celle des origines de la vie. Leurs recherches ont permis de donner une date approximative à son apparition sur Terre : il y a entre 3,5 et 4,2 milliards d'années. Elles ont aussi permis d'établir que la présence d'eau à l'état liquide et de matière organique était indispensable. « *Mais ces deux composantes ne suffisent pas. Pour parler de vie, deux grandes propriétés sont nécessaires : le métabolisme, à savoir la capacité à transformer de la matière et de l'énergie, et la capacité à perdurer et à évoluer* », explique Purificación López-García, directrice de recherche CNRS au sein du laboratoire Écologie, systématique et évolution (université Paris-Saclay, AgroParis Tech). Pour que ces deux propriétés coexistent, il faut qu'elles soient physiquement associées dans des compartiments individualisés par des membranes capables de devenir, à terme, des cellules. Car la cellule est l'unité fondamentale de la vie en ce sens qu'elle permet, tel un réacteur, d'associer métabolisme et système de reproduction.

Néanmoins, les étapes précises qui ont conduit à la naissance des premiers systèmes biochimiques simples de cellules restent à découvrir. « *Certains ont dit que les fonctions métaboliques étaient venues d'abord, tandis que d'autres pensaient que c'était le matériel génétique,* raconte la biologiste. *Mais la communauté scientifique converge de plus en plus vers l'idée que les deux systèmes sont si imbriqués dans les cellules qu'ils ont dû coévoluer dans des compartiments pour devenir des protocellules et donner naissance à la vie. À cet égard, il ne faut pas oublier que la vie, bien qu'ayant des propriétés particulières, se place dans le cadre d'une évolution physique et chimique beaucoup plus large, celle de l'évolution de la matière dans l'Univers.* »



GETTY IMAGES

La cellule, unité fondamentale de la vie, permet de faire coexister un métabolisme et un système de reproduction.

Les biologistes ont certes réussi à remonter jusqu'à un ancêtre universel commun théorique en étudiant les séquences d'acides aminés ou de nucléotides. Néanmoins, cet ancêtre est déjà une cellule relativement complexe, constituée de plusieurs centaines, voire d'un millier de gènes. « *Ce serait l'équivalent d'une petite bactérie ou d'une petite archée. Mais les premiers éléments vivants devaient être beaucoup plus simples et c'est ce chemin jusqu'aux protocellules les plus simples qu'il nous reste à combler* », souligne la chercheuse.

D'autres formes de vie dans l'Univers ?

Et d'autres questions continuent à se poser : ce phénomène ne s'est-il produit qu'une seule fois sur Terre ou dans l'Univers ? Autrement dit, personne ne sait aujourd'hui si la vie est un processus improbable ou déterministe. « *La seule façon de le savoir serait de découvrir une autre forme de vie sur une exoplanète, ou de reproduire la vie dans un tube à essai à partir de composantes minérales et organiques abiotiques telles qu'elles étaient il y a près de 4 milliards d'années, et non avec l'inventaire génétique d'espèces que nous connaissons. Or, nous n'avons pas de réponse pour le premier cas, et nous ne savons pas faire, ou pas encore, dans le second.* » ■

Fanny Costes

FRÉDÉRIQUE PLAS

PALÉOANTHROPOLOGIE

Neandertal était-il vraiment une espèce différente de « sapiens » ?

Forts de leurs singularités propres, les deux groupes dévoilent cependant des similitudes troublantes. Et les plus récentes études archéologiques montrent Neandertal comme un être social, maîtrisant le feu, habile à la taille des pierres et capable de fabriquer des bijoux.

Un biais affecte-t-il notre lecture de l'ancienne et très longue histoire des humanités ? Comme une empreinte des obsessions racialistes du XIXe et du début du XXe siècle, qui tentaient d'établir la prédominance d'un groupe ethnique sur les autres. Ces théories ont fait grimper *Homo sapiens* sur un piédestal et il a longtemps été inconcevable qu'il puisse être égalé par d'autres espèces d'homininés. « *Ainsi,* Homo neanderthalensis *a d'abord été jugé comme un être bourru, pas très développé cognitivement et incapable d'élaborer des outils complexes ou d'accéder à des représentations symboliques, ce qui est bien évidemment complètement faux* », s'insurge Marylène Patou-Mathis, préhistorienne, directrice de recherche émérite au CNRS, rattachée au Muséum national d'histoire naturelle.

Cette perception a déjà beaucoup évolué en une vingtaine d'années, grâce aux études archéologiques étoffant le portrait de Neandertal et le décrivant comme un être social, maîtrisant le feu, habile à la taille des pierres et capable de fabriquer des bijoux. Il convient de conforter cet élan et, plutôt que de chercher à savoir lequel domine l'autre, l'auteure de *Neandertal de A à Z* préfère se consacrer aux singularités et aux pratiques qui différencient ces deux populations. Sans jugement de valeur, mais, plutôt, en interprétant ces différences comme autant de sources renseignant sur leurs rapports au monde et à leur environnement. Par exemple, les néandertaliens ne vont pas utiliser le bois des rennes (ou les autres armes animales) pour fabriquer des armes et les retourner contre ces mêmes animaux, ce que pratique *H. sapiens*. Il ne s'agit pas, dans ce cas, d'un déficit de compétence ; cela révèle quelque chose de leur vision de la nature.

De même, ils semblent cultiver un attrait particulier pour les oiseaux tels que les rapaces diurnes ou les corbeaux. Ils vont prélever leurs plumes et leurs serres, peut-être pour en faire des parures ou dans un cadre rituel, la question n'est pas tranchée. « *Ici, encore, on entrevoit une perception particulière pour ces animaux qui ne sont pas anodins : les premiers sont parmi les plus grands prédateurs du ciel, tandis que les corbeaux sont associés à la mort, en tant que charognards* », précise la préhistorienne. Appréhender ce qui sous-tend les actes non liés à la subsistance dans les sociétés néandertaliennes permettra de mieux saisir « *ce qui fait l'essence même de cet humain* ».

Étudier ce qui distingue *Homo sapiens* et *Homo neanderthalensis*, c'est aussi mieux comprendre ce qui les rapproche. Et tout a changé en mai 2010, quand l'équipe de Svante Pääbo (prix Nobel de médecine en 2022) publie dans la revue *Science* une partie du génome de Neandertal.

J.FAURE/OPALE/LEEXTRA

« Cet écart majeur que l'on imagine, eux ne le voyaient pas. Ils se sont trouvés attirants, ils se sont mélangés, et ce à une échelle populationnelle »

Marylène Patou-Mathis, préhistorienne, directrice de recherche émérite au CNRS

JOE MCNALLY/GETTY IMAGES

Le visage d'une femme néandertalienne (reconstitution de Adrie et Alfons Kennis d'après des restes fossiles) comparé à celui d'une femme moderne.

Ce travail, un des plus beaux résultats de la paléogénomique, prouve que les deux groupes se sont croisés et que, rappel de ces unions, il reste quelques pourcentages de gènes néandertaliens dans le patrimoine génétique de l'humain moderne. Une découverte qui *de facto* rehausse l'image de ce dernier : imaginerait-on un humain moderne copuler avec un singe ou un être inférieur ? L'ADN révèle aussi que ces croisements se sont produits au Proche-Orient, il y a 80 000 à 100 000 ans, là où *sapiens* et Neandertal se fréquentaient effectivement. Ils avaient d'ailleurs une culture assez proche, celle du moustérien du Levant. Les deux possédaient une même industrie lithique, ils y chassaient l'aurochs, le daim ou la gazelle et enterraient leurs morts.

Ce premier épisode interfécond a-t-il été suivi de secondes noces, cette fois sur le théâtre européen ? *Sapiens* y a débarqué il y a 43 000 à 45 000 ans environ, avec certains individus équipés de nombreux gènes néandertaliens. Et ils vont croiser des néandertaliens avec des caractères propres très marqués également. Jusqu'à récemment, les experts estimaient que de nouveaux croisements étaient peu probables, mais les dernières études sont moins catégoriques. Une chose est sûre : ces populations ont fréquenté les mêmes territoires et ont probablement échangé des savoirs et des savoir-faire. Notamment des techniques cynégétiques : le nouvel arrivant en Europe est confronté à des animaux de grande taille et inconnus de lui, comme des bisons ou des mammouths que les Néandertaliens ont l'habitude de chasser.

Pour se glisser dans l'intimité des rapports entre les deux, l'idéal serait de découvrir un site abritant des traces communes prouvant qu'ils n'ont pas partagé que des gènes, mais aussi leur vie quotidienne. « *Cela changerait tout et se poserait alors, avec encore plus d'acuité, une question que je me pose déjà : est-ce que ce sont réellement deux espèces différentes ? Ne sommes-nous pas plutôt face à deux sous-espèces, comme l'atteste la descendance fertile de ces couples mixtes* », s'interroge Marylène Patou-Mathis. Le terme sous-espèce qualifiant des populations interfécondes présentant de légères variations génétiques. Longtemps, les préhistoriens ont exagéré les différences entre *H. neanderthalensis* et *H. sapiens*, attribuant aux premiers certaines qualités et aux seconds d'autres traits. « *Mais cet écart majeur que l'on imagine, eux ne le voyaient pas. Ils se sont trouvés attirants, ils se sont mélangés, et ce à une échelle populationnelle.* »

Le buisson évolutif de la lignée humaine chamboulé

S'il était avéré que *H. neanderthalensis* et *H. sapiens* sont bien à classer dans ce rang taxonomique, cela chamboulerait pas mal de choses dans l'interprétation du buisson évolutif de la lignée humaine. À commencer par la position de l'homme de Denisova, cette autre branche de l'humanité qui a laissé des traces dans le génome de certaines peuplades d'Asie et d'Océanie. D'eux, pratiquement rien n'est connu : ils ont été identifiés par la génétique à partir de quelques ossements, notamment une petite phalange de la main gauche d'une fillette, trouvée dans la grotte du même nom située dans les montagnes de l'Altaï, en Sibérie. Mais si Neandertal est qualifié de sous-espèce, leur statut devra lui aussi être questionné. De même, avec les récentes découvertes de *H. luzonensis*, en 2019 aux Philippines ou de *H. Naledi*, en 2013 en Afrique du Sud, le nombre d'espèces attribuées au genre *Homo* atteint la quinzaine. Faudra-t-il revoir l'ensemble de leur phylogénie ? ■

Joël Ignasse

MATHÉMATIQUES

Pourquoi certains problèmes résistent-ils encore ?

Dans les champs des mathématiques, il apparaît que le nombre de questions augmente plus vite que le nombre de réponses. C'est le cas avec l'un des problèmes irrésolus posés par l'Allemand David Hilbert au début du XX^e siècle.

La résolution de problèmes constitue, à bien des égards, l'essence des mathématiques. « *Il y a des problèmes élégants, des sommets majestueux qui nous défient depuis longtemps. Pour celui-ci en particulier, le chemin à gravir a longtemps semblé sans issue, mais les petits cailloux semés par plusieurs générations de mathématiciens nous ont permis d'émerger du brouillard* », confie avec poésie Pierre Charollois, maître de conférences à Sorbonne Université. Certains problèmes jouent ainsi avec la patience et le sens logique des experts en la matière. C'est notamment le cas de ceux exposés par l'Allemand David Hilbert lors du deuxième congrès international des mathématiciens organisé à Paris en 1900. Cet érudit, contemporain de Henri Poincaré, avait alors présenté la liste de 23 problèmes encore irrésolus qui méritaient l'attention de ses pairs. Cent vingt-quatre ans plus tard, 12 ont été entièrement résolus. Les autres constituent, pour nombre de mathématiciens, des rêves de jeunesse. Le 12^e notamment. Il peut être ainsi posé : étant donné un polynôme à coefficients entiers (x^5+x+1 par exemple), comment énumérer les solutions de l'équation $x^5 + x + 1 = 0$ de façon élégante ? Autrement dit : trouver la ou les formules qui permettront de donner toutes les solutions d'une famille de polynômes à coefficients entiers.

P. CHAROLLOIS

« La réponse partielle au 12^e problème de Hilbert nous conduit à de nouvelles questions »

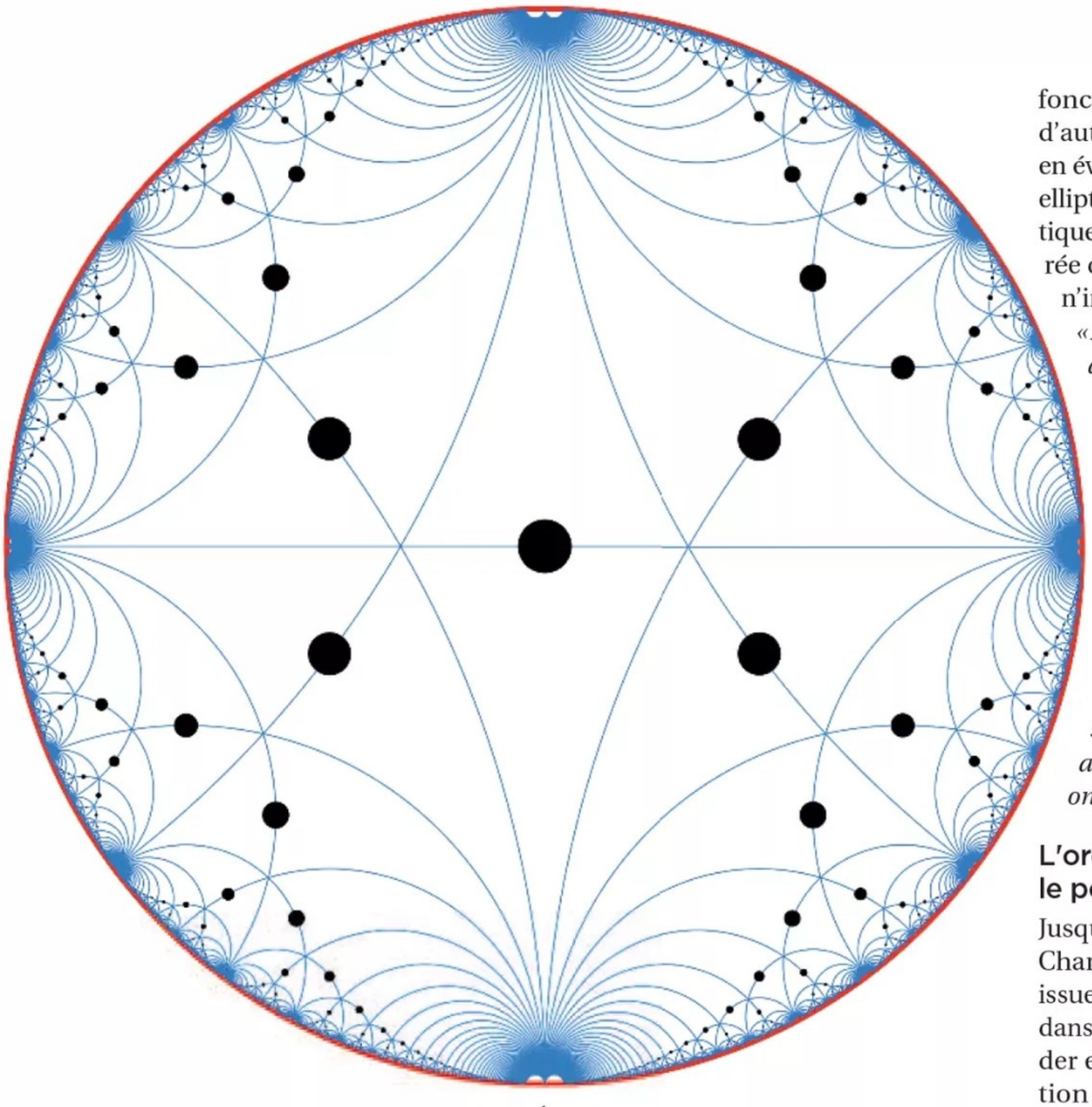
Pierre Charollois, maître de conférences à Sorbonne Université

Pour comprendre cet énoncé et les difficultés qui se sont posées et se posent aux mathématiciens, il est nécessaire de faire un peu de pédagogie sur un des champs des mathématiques : la théorie des nombres. Ses praticiens parlent de corps de nombres ou de polynômes. Ce sont des ensembles de nombres positifs ou négatifs (1, 2, 3 ou –5, par exemple) et de variables (x, y, z…) au sein desquels on peut additionner, soustraire, multiplier ou diviser. Et ces corps peuvent être simples ou très compliqués.

Une formule pour la liste complète des solutions

« *Le premier corps de nombres, qui constitue la base de tous les autres, c'est le corps des nombres rationnels. Il est constitué par les fractions p/q, où p et q sont des nombres entiers positifs ou négatifs. Ensuite, cela se généralise. Par exemple, si on considère l'ensemble des nombres de la forme* $a + b\sqrt{2}$*, avec a et b nombres rationnels, on obtient alors le corps de nombres engendré par la racine carrée de 2. J'aurais pu prendre un exemple analogue avec la racine cubique de 3 ou bien d'autres variantes. On construit ainsi une infinité de corps de nombres* », explique Loïc Merel, professeur à l'université Paris Cité.

Autre point important à connaître, précise Pierre Charollois, « *on distingue les polynômes en fonction de leur degré. Prenons par exemple* $x^2 - 100$ *ou* $x^3 - 2$*, le degré d'un polynôme c'est la puissance de x. Le premier polynôme est donc de degré 2, le deuxième de degré 3. Les poly-*



Les fonctions thêta elliptiques, utiles pour trouver les solutions de certains polynômes, présentent de nombreuses symétries.

MERCATP-CC BY 3.0

nômes ont toujours autant de valeurs pour lesquelles ils s'annulent — les mathématiciens parlent de racines — que leur degré ».

L'équation $x^2 - 100 = 0$ possède deux racines, 10 et –10. En effet, ces deux nombres mis au carré donneront chacun 100 et le polynôme s'annule. En choisissant cet exemple simple, il est possible d'écrire les solutions facilement. En revanche, pour d'autres polynômes plus compliqués, il devient très difficile d'écrire la liste complète des solutions, sauf à les calculer avec plein de décimales, à l'aide d'une calculette ou d'un ordinateur par exemple. « *Trouver la formule qui permette d'établir chaque liste de racines est une question générale dans notre domaine et c'est celle que posait David Hilbert il y a plus d'un siècle,* explique Pierre Charollois. *Certaines formules permettant d'énumérer les racines de polynômes à coefficients entiers ont d'ailleurs été trouvées avant lui.* »

Il y a deux cents ans, le mathématicien allemand Carl Friedrich Gauss a démontré que la fonction exp (2iπt) permettait d'énumérer de façon élégante toutes les racines de la famille des polynômes rationnels $x^q - 1$ en posant les valeurs de t en $t = p/q$. Par exemple, $t = 1/5$, 2/5, 3/5, 4/5 et 5/5 pour $q = 5$.

Peu après, son compatriote Leopold Kronecker, qui voulait obtenir d'autres fonctions pour énumérer les racines d'autres familles de polynômes, a mis en évidence le rôle des fonctions thêta elliptiques pour les corps dits quadratiques imaginaires, comme racine carrée de 3, de –5, ou de $-d$, en prenant n'importe quelle valeur entière de d. « *Au temps de David Hilbert, il existe donc déjà deux exemples pour énumérer les racines de familles de polynômes (ou corps de nombres),* indique Pierre Charollois. *Plus précisément, son problème est : par exemple, si je pars d'un corps de nombres dit quadratique réel (engendré par √2) ou d'un corps cubique engendré par la racine cubique de 2, existe-t-il des fonctions qui, à l'instar de celles utilisées par Gauss et Kronecker, sont adaptées ? Pendant plus de cent ans, on n'a pas eu de fonction candidate.* »

L'ordinateur pour vérifier le potentiel de la fonction

Jusqu'en 2023. À cette époque, Pierre Charollois est attiré par une fonction issue de la physique, mise en évidence dans les années 2000 par Giovanni Felder et Alexander Varchenko : la fonction gamma elliptique. Elle semble permettre de prendre en compte plus de variables. Rappelons en effet que la fonction exponentielle permet la prise en compte d'une seule variable, t. La fonction thêta elliptique a deux variables, t et ω. Et la troisième fonction issue de la physique en a trois : t, τ et σ. Ces familles de fonctions possèdent de nombreuses symétries. Par exemple, exp (2iπ (t+1)) = exp (2iπt), et des phénomènes plus riches encore sont à l'œuvre pour les fonctions thêta ou la fonction gamma.

« *Quand j'ai perçu le potentiel de cette fonction, j'ai appelé deux confrères, Nicolas Bergeron* [décédé en 2024] *et Luis García, pour tenter de spécialiser la fonction de* t, *τ et σ des physiciens en des valeurs* t, *τ et σ complexes cubiques. Et pour la vérifier, nous avons demandé à un ordinateur d'évaluer les solutions*

avec énormément de décimales pour savoir s'il s'agissait bien des racines de notre polynôme. Ce que David Hilbert ou Leopold Kronecker avant lui n'auraient pas pu faire. Et la réponse a été positive », raconte Pierre Charollois. Néanmoins, cette avancée considérée comme majeure ne permet pas de résoudre le 12e problème de Hilbert. Les mathématiciens ont certes pu expliciter des racines dans le cas d'une extension du corps de nombres engendré par la racine cubique de 7. Mais même si la précision de décimales donnée par l'ordinateur les convainc que c'est la bonne fonction, ils n'ont pu, pour l'heure, le démontrer. Cela reste une conjecture, mais pas encore un théorème.

« *De plus, le polynôme sur lequel nous avons testé la fonction était de degré 12 et nous n'avons pu attraper que huit racines. Je dirai que nous avons précisé la question de David Hilbert : avec la fonction gamma qui est candidate, nous arrivons à énumérer deux tiers des racines du polynôme, alors que dans les cas de la fonction exponentielle et de la fonction thêta de Leopold Kronecker, on parvient à énumérer toutes les racines. Aujourd'hui, on se demande donc si une autre fonction permettrait d'attraper le tiers restant. La réponse partielle trouvée au 12e problème de Hilbert conduit ainsi à de nouvelles questions, et c'est souvent le cas en mathématiques.* »

De cette recherche émanent des solutions à certains problèmes plus concrets. Les fonctions développées en théorie des nombres ont un grand intérêt en cryptographie, pour encoder des informations de manière hautement sécurisée. ■ **Fanny Costes**

Comment caractériser les polynômes

Polynôme	Degré	Racines
$x^2 - 100$	2	-10, 10
$x^4 - 5x^2 + 6$	4	$-\sqrt{3}, -\sqrt{2}, \sqrt{2}, \sqrt{3}$
$x^5 - 1$	5	$e^{2i\pi t}$ avec $t = \frac{1}{5}, \frac{2}{5}, \frac{3}{5}, \frac{4}{5}, \frac{5}{5}$

Le degré d'un polynôme est la puissance de *x*. Les valeurs pour lesquelles le polynôme s'annule s'appellent les racines. Ce sont elles que l'on cherche.

PALÉOGÉNÉTIQUE

Quand « sapiens » a-t-il émergé en Afrique ?

« *Dans mon domaine subsiste un mystère : comment a émergé l'espèce* Homo sapiens *et comment a évolué sa diversité génétique en Afrique* », pose la généticienne Évelyne Heyer. Les spécialistes commencent à comprendre qu'il y aurait eu différentes populations d'*H. sapiens* sur le continent, qui se seraient plus ou moins croisées à différents moments. « *Mais il faut raffiner, avec le séquençage ADN, ce qui prendra encore cinq à dix ans* », avertit la chercheuse. Si son équipe s'est intéressée aux chasseurs-cueilleurs dits pygmées, l'Afrique reste très peu couverte, et beaucoup d'autres populations actuelles sont encore à étudier. Notamment pour comparer leur patrimoine génétique à de l'ADN ancien.

« *L'Afrique centrale est un trou noir de la connaissance,* admet Évelyne Heyer, *car la zone est humide et l'ADN ancien dégradé. Heureusement, nous avons aujourd'hui les moyens de recueillir, dans des lacs, des sédiments ce que l'on appelle de l'ADN environnemental.* » La chercheuse ambitionne désormais d'étudier comment la culture influe sur la diversité génétique avec les « mariages ». Qui quittait son clan ? Les hommes ou les femmes ? Or, il est possible de trouver cette information en comparant les ADN modernes et anciens.

« L'Afrique centrale est un trou noir de la connaissance car la zone est humide et l'ADN ancien dégradé »

Évelyne Heyer, professeure d'anthropologie génétique au Muséum national d'histoire naturelle, Paris

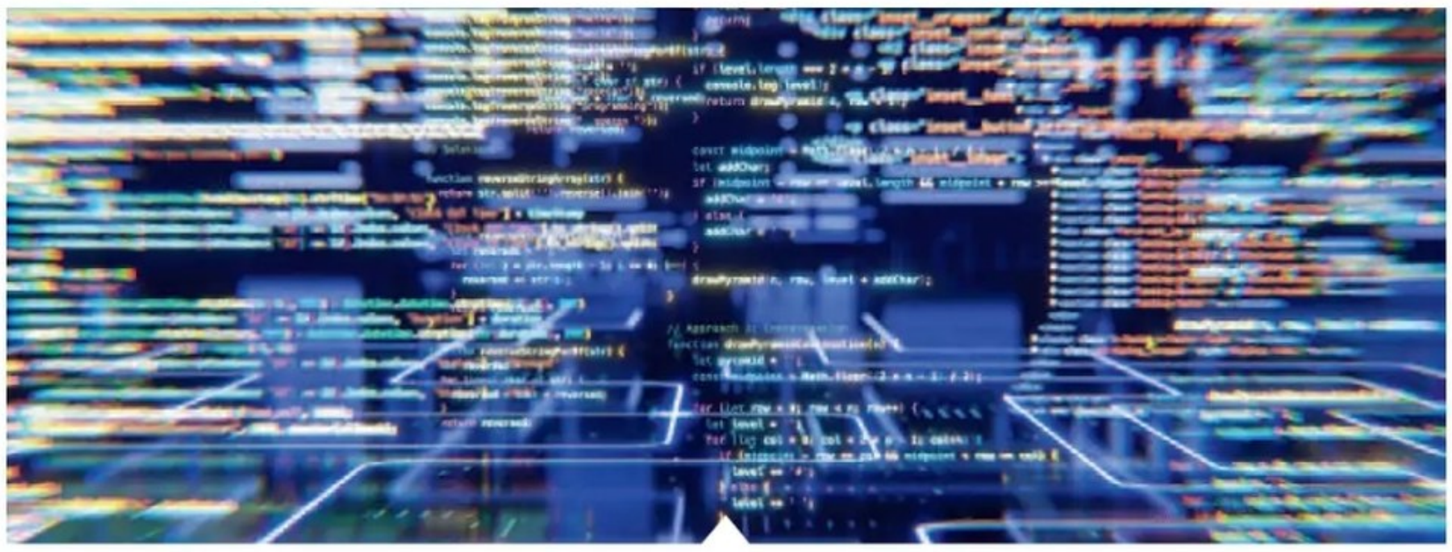
« *On commence à connaître ces anciennes familles, mais uniquement en Europe. Avec de nouveaux échantillons dans le monde, on saura comment nos ancêtres ont "fait famille" sur l'ensemble de la planète* », conclut-elle. ■ **Rachel Mulot**

A. FACELLY / DIVERGENCE

NUMÉRIQUE

Pourquoi l'IA générative devient-elle efficace d'un coup ?

Les chercheurs ont identifié un phénomène étrange : après une longue période d'apprentissage infructueux, l'intelligence artificielle donne soudain des résultats.



GETTY IMAGES

La façon dont s'opèrent les calculs de l'algorithme échappe encore aux chercheurs.

Les ingénieurs d'OpenAI ont appelé ce phénomène le *grokking* dans un article publié début 2022. Lorsque l'on entraîne sur des données un transformeur, le type d'algorithme qui sert de base aux grands modèles d'intelligence artificielle générative tel GPT d'OpenAI, la première période d'entraînement (ou *epoch*) ne donne pas de résultats formidables. Si on prolonge l'entraînement sur une même durée, avec les mêmes données, sans rien changer à l'algorithme, même chose. Et ainsi de suite pendant des dizaines de milliers de séances de durées strictement identiques… quand soudain, la qualité des résultats monte en flèche, d'un coup ! Or, ni les chercheurs d'OpenAI, qui ont découvert ce *grokking* par hasard, ni personne d'autre ne savent pourquoi il se produit. Le terme vient du célèbre roman de science-fiction *En terre étrangère* (1961), de Robert Heinlein, et renvoie au fait de comprendre intuitivement. Manière de suggérer que la machine serait douée de compréhension… faute d'explication plus scientifique !

Explorer différentes méthodes pour en savoir plus

Directeur de recherche et président du comité d'éthique du numérique du CEA, à Saclay, Alexei Grinbaum n'hésite en tout cas pas à parler d'un *« phénomène mystérieux »*. *« C'est un domaine fascinant sur lequel il y a encore assez peu de recherches. La science commence tout juste à aborder cette question, et la première approche serait d'utiliser ce que l'on appelle les phénomènes critiques en physique statistique, quand il y a des transitions de phase. »* C'est-à-dire quand, par exemple, l'état de la matière change physiquement en fonction d'une variable. *« Pour les systèmes physiques, comme les gaz, les liquides, nous avons des variables comme la pression, la température, le volume. Mais pour les grands modèles de langage, nous ne savons pas quelles sont les variables pertinentes permettant de décrire cette transition. C'est compliqué de construire un modèle dans ces conditions. »*

Parmi les différentes méthodes pour essayer d'en savoir plus, le développement de « modèle-jouet » est le plus prometteur, selon le chercheur. Il s'agit tout simplement de petits algorithmes de type transformeur, avec peu de couches, permettant d'observer plus facilement comment s'opèrent les calculs. *« Sans doute qu'il se passe des choses dans les très grands transformeurs qu'on ne voit pas du tout dans les petits,* prévient Alexei Grinbaum. *Mais cela peut nous donner quelques idées. »* ■

Arnaud Devillard

GLEB KALININ

> « C'est un domaine fascinant sur lequel il y a encore assez peu de recherches. La science commence tout juste à aborder cette question »
>
> **Alexei Grinbaum,** directeur de recherche et président du comité d'éthique du numérique du CEA

PROTOHISTOIRE

Comment les premières épées ont-elles été forgées ?

L'apparition de l'épée à l'âge du bronze conduit à une forme inédite de guerre dont les sociétés modernes ont hérité. Retrouver les ateliers dans lesquels elles ont été façonnées est une façon de mieux saisir ce tournant social et politique.

Quel serait le rêve commun à tous les archéologues, si tant est qu'il en existe un ? Indéniablement, remonter le temps afin d'assister aux scènes qui se sont déroulées des siècles, voire des millénaires auparavant, à l'endroit exact où leur truelle gratte la terre. Bien entendu, pour l'heure, une telle aspiration relève de la science-fiction. Aussi, Anne Lehoërff, archéologue et historienne spécialiste de l'âge du bronze en Europe (2200-800 avant notre ère), qui voudrait croire parfois à « *l'existence d'un dispositif extraordinaire qui ouvrirait, à partir des vestiges archéologiques, sur des photographies de vies du passé* », préfère-t-elle entretenir un espoir plus réaliste : celui de retrouver, un jour, un atelier de bronzier intact, abandonné précipitamment.

Les « bronzes » sont des objets faits d'un alliage contrôlé de cuivre et d'étain (et parfois d'autres métaux), dans des pourcentages variables selon le type de fabrication et l'usage. Ils apparaissent en Europe vers –2000, et concernent des mobiliers très variés : des poignards, des lames de hallebardes, des haches, des épées, des cuirasses ou des casques, mais aussi des bijoux, des éléments de parure destinés aux vêtements, des outils ou encore de la vaisselle. Si nous en avons aujourd'hui collecté des milliers et connaissons de mieux en mieux leurs procédés de fabrication, les questions demeurent nombreuses, en particulier sur les motivations de ces inventions.

Comment et pourquoi est née par exemple l'épée, que l'on retrouve à partir de 1700 avant notre ère dans des tombes et des dépôts ? « *Dans l'histoire de l'humanité, les épées sont les premiers objets conçus uniquement pour blesser ou tuer dont on ait un témoignage clair,* assure Anne Lehoërff, à qui l'on doit l'ouvrage *Par les armes. Le jour où l'humain inventa la guerre* (Belin, 2018). *C'est une histoire complexe de rencontres d'individus et de sociétés. L'artisan n'a pas inventé une épée sans qu'il y ait eu une demande, et le guerrier n'a pas demandé une épée à l'artisan sans que celui-ci l'ait d'abord imaginée et rendue possible techniquement.* »

Pour l'archéométallurgiste, l'apparition de l'épée conduit à une forme inédite de guerre dont nous avons hérité. Entrer dans l'atelier d'un bronzier précurseur de l'une de ces premières épées serait une façon d'entrevoir la manière dont s'est opéré ce tournant social et politique, presque philosophique.

« Je cherche le geste de l'artisan et, au-delà, la société dans laquelle il vivait »

Anne Lehoërff, archéométallurgiste et présidente du Conseil national de recherches archéologiques

ASTRID DI CROLLALANZA

La quête d'un insaisissable artisanat

La métallurgie du cuivre naît en Europe occidentale il y a quelque 6000 ans. Plusieurs foyers ont existé et les chercheurs combattent aujourd'hui l'idée d'une origine unique au Proche-Orient. Cet artisanat du feu se développe dans des sociétés qui travaillent les matériaux, fabriquent des céramiques, font de l'extraction minière pour le lithique.

ARCHÄOLOGIE-BÜRO DR. WOIDICH/SERGIU TIFUI

Datée de l'âge du bronze moyen (1600-1400 avant notre ère), cette épée a été mise au jour dans une sépulture à Nördlingen (Allemagne).

Et il semble logique que les minerais métalliques aient été extraits et travaillés dans un tel cadre, même si on n'en voit pas immédiatement la trace et si les métaux sont d'abord natifs (sans réduction minière). *« L'artisanat est mon sujet de prédilection, il ouvre à une connaissance intime de ces populations. Découvrir les restes complets du lieu de travail d'un maître bronzier — une sorte de "Pompéi de l'âge du bronze" — serait une sorte de graal »*, confie la chercheuse. Car si quelques ateliers ont été localisés en France ces dernières années — à Aubervilliers (Seine-Saint-Denis), à Montélimar (Drôme) ou plus anciennement au Fort Harrouard (Eure-et-Loir) —, les traces sont rares. *« Tout simplement parce que les artisans ne sont pas partis dans l'urgence en laissant sur place un instantané avec des outils — dont on sait que certains étaient en bois —, un moule au four de recuit ou encore un objet en cours de martelage à froid. Ces lieux ont été soigneusement nettoyés avant leur abandon. Les métaux qui n'ont pas été utilisés sont retournés dans le creuset* [le récipient servant à la fonte] *et la plupart des moules ont été jetés. »*

À l'heure actuelle, nous disposons de fragments de moules pas toujours faciles à identifier pour un non-spécialiste, de quelques creusets, de traces de foyers et de fours, et de très peu d'outils. Bien des données nous échappent donc encore. Comment était organisé l'atelier ? Dans quel ordre se succédaient les étapes de production ? Combien de temps les bronziers mettaient-ils pour fabriquer ces différents objets ? Qui étaient-ils ? Quels réseaux existaient ? *« Je cherche le geste de l'artisan, qui s'est évanoui dans l'action elle-même, et, au-delà, la société dans laquelle il vivait. »*

Ce geste, Anne Lehoërff tente donc de le visualiser en entrant au cœur de la matière des produits finis, grâce au microscope optique ou à balayage électronique, et toujours au sein de problématiques historiques. En observant des indices, elle tente d'écrire une histoire thermomécanique, de retrouver des chaînes opératoires de fabrication en lien avec des choix d'atelier et des usages. *« Mais passer de l'artefact à la société n'est pas simple. Il faut aller d'une matérialité immobile et muette à une réalité en mouvement et bavarde. Sans compter que nous enquêtons en combinant lacunes et excès documentaires. »*

Reproduire les objets pour les comprendre

Une autre voie s'offre à l'archéologue pour assembler le puzzle : la reproduction d'objets dans des conditions similaires — d'après les résultats des études menées — à celles des artisans de l'époque. C'est un autre volet d'une démarche pleinement interdisciplinaire et associant des expertises complémentaires. On vérifie ainsi des hypothèses, on les teste, on les fait évoluer. Actuellement, Anne Lehoërff s'est lancée, avec un bronzier compagnon du devoir très expérimenté, dans la folle aventure de reproduire une des cuirasses de l'âge du bronze final (1400-800 avant notre ère) qu'elle a étudiées, sur le modèle de celles de Marmesse (Haute-Marne). *« Respecter les matériaux et les gestes d'antan n'est pas une mince affaire ! Les bronziers d'aujourd'hui ont encore largement à apprendre de leurs lointains ancêtres. »* Anne Lehoërff aime comparer cet artisanat à celui de la cuisine d'un grand chef attentif aux mélanges qu'il choisit, particulièrement sensible à des indices de couleur, de texture ou d'odeur. Seule différence : il ne peut pas goûter son œuvre à la fin ! ■ **Marine Benoit**

MATÉRIAUX

La révolution des supraconducteurs est-elle pour bientôt ?

Des chercheurs du monde entier tentent de développer un matériau qui propage le courant électrique sans résistance ni perte d'énergie, et ce, à température ambiante. Mais la découverte d'un tel supraconducteur reste encore hors d'atteinte.

L'annonce avait fait grand bruit à l'été 2023, suscitant un emballement médiatique pendant plusieurs semaines. Des chercheurs sud-coréens prétendaient avoir identifié un cristal « supraconducteur » aux propriétés extraordinaires. Baptisé LK-99 et constitué de cuivre, de plomb, de phosphore et d'oxygène, il expulsait, supposément, les champs magnétiques qui le traversent et propageait le courant électrique sans aucune résistance ni perte d'énergie — phénomènes qu'on observe dans tous les matériaux supraconducteurs. Mais contrairement à ceux connus jusqu'alors, celui-ci ne nécessitait pas de températures ultrafroides ni de pressions gigantesques pour fonctionner. Selon l'équipe sud-coréenne, les propriétés supraconductrices se manifestaient sous pression atmosphérique et jusqu'à une centaine de degrés…

« Soit une sorte de matériau miracle que nous cherchons à atteindre depuis de nombreuses décennies! », s'exclame Julien Bobroff, du Laboratoire de physique des solides à l'université Paris-Saclay. Il permettrait d'envisager une foule d'applications révolutionnaires, comme des circuits électriques augmentant prodigieusement l'autonomie des smartphones et ordinateurs, des dispositifs stockant l'énergie photovoltaïque de façon perpétuelle ou de petits électroaimants faisant léviter comme par magie trains, caissons de marchandises ou lits d'hôpitaux. L'excitation est cependant vite retombée : les mesures étaient faussées par des impuretés chimiques, LK-99 étant en réalité… un isolant! *« Ce n'est certes pas la première fois que de telles annonces — trop hâtives et parfois même frauduleuses — provoquent l'euphorie avant d'être réfutées »*, se désole Julien Bobroff. Malgré d'intenses activités de recherche, la découverte d'un supraconducteur en conditions ambiantes reste ainsi hors d'atteinte, *« même si des avancées spectaculaires ont été réalisées ces dernières années »*, observe l'expert.

« Aucune limite théorique n'interdit qu'ils puissent fonctionner à température ambiante »

Julien Bobroff, du Laboratoire de physique des solides à l'université Paris-Saclay

Cette quête a débuté en 1911. Le Néerlandais et futur prix Nobel de physique Heike Kamerlingh Onnes constate alors que le mercure perd toute résistance électrique lorsqu'il est refroidi à une température proche du zéro absolu (-269 °C). Tout se passe comme si les électrons ne subissaient plus aucun frottement ou collision en se déplaçant dans le solide cristallin, empêchant toute dissipation d'énergie par ce que les physiciens appellent l'effet Joule. Ce processus sera observé par la suite dans une variété de métaux comme le plomb, l'étain ou l'aluminium.

Il faudra attendre les années 1950 pour que trois théoriciens américains — John Bardeen, Leon Cooper et John Schrieffer — fournissent une explication détaillée, récompensée elle aussi par un prix Nobel. Ils montrent que les vibrations des atomes du cristal forcent les électrons (qui normalement se repoussent)

C. FRESILLON/ CNRS IMAGES

Lévitation d'un aimant placé au-dessus d'une pastille d'un supraconducteur refroidi à -196 °C. La recherche d'un matériau pouvant être utilisé à température ambiante captive de nombreux scientifiques mais avance à tâtons.

à s'associer, d'abord par deux puis tous ensemble, « *jusqu'à se retrouver dans le même état quantique et former une vague supraconductrice géante* », pose Julien Bobroff. Celle-ci est néanmoins fragile : elle se brise au-delà d'une certaine température qualifiée de critique, les vibrations devenant trop importantes et irrégulières. « *Les métaux supraconducteurs doivent être maintenus par conséquent dans un froid extrême, avec des dispositifs cryogéniques aussi encombrants que coûteux nécessitant de l'hélium ou de l'azote liquide* », précise le chercheur. C'est pour cette raison qu'ils sont cantonnés aujourd'hui encore à quelques applications certes remarquables mais de niche. En particulier : les puissants électro-aimants nécessaires aux IRM (imagerie par résonance magnétique), aux accélérateurs de particules ou aux réacteurs expérimentaux à fusion nucléaire comme Iter, en construction dans le sud-est de la France.

Un des grands mystères de la physique contemporaine

Un immense espoir s'était pourtant levé au milieu des années 1980. L'Allemand Georg Bednorz et le Suisse Alexander Müller, des laboratoires d'IBM à Zurich (Suisse), mettent alors en évidence une nouvelle famille de supraconducteurs, les cuprates, avec là encore un Nobel à la clé. Composés de nombreux éléments chimiques dont du cuivre et de l'oxygène, leurs températures critiques sont bien plus élevées que les supraconducteurs conventionnels : -180 °C obtenus en 1986 et jusqu'à -138 °C en 1993. Pourraient-elles atteindre un jour les températures ambiantes ? C'est l'objectif recherché par des milliers de scientifiques dans le monde, qui s'efforcent d'identifier des combinaisons particulières d'éléments chimiques. Sans résultats encourageants faut-il bien reconnaître, le record demeurant inchangé depuis trois décennies — sous pression atmosphérique tout du moins. Ils butent aussi sur un problème majeur : « *On ne comprend toujours pas comment, à de telles températures, les électrons s'associent pour former une onde collective géante. C'est l'un des grands mystères de la physique contemporaine… Et l'un des sujets les plus étudiés de l'histoire des sciences !* », s'exclame Julien Bobroff. Ce qui constitue « *à la fois une bonne et une mauvaise nouvelle* », poursuit ce dernier. Mauvaise, car les chercheurs ne sont pas aiguillés par un cadre conceptuel pour améliorer les per-

JULIEN BOBROFF/CNRS IMAGES

formances de ces matériaux. Mais tout de même très stimulante, « *puisqu'aucune limite théorique n'interdit pour le moment qu'ils puissent fonctionner à température ambiante* », souligne-t-il. Ce graal pourrait être atteint d'une deuxième façon. Il s'agirait, en substance, de réitérer l'exploit de Georg Bednorz et d'Alexander Müller en découvrant une nouvelle classe de supraconducteurs fondée sur un mécanisme radicalement différent. C'est, du reste, ce que l'équipe sud-coréenne pensait avoir accompli avec LK-99 ! Cette approche peut s'appuyer sur les intuitions des physiciens et chimistes. Mais elle avance surtout à tâtons, faute d'une théorie globale de la supraconductivité et parce que celle-ci « *n'a jamais été une science très prédictive* », insiste Julien Bobroff. Sauf dans un cas particulier, qui a ouvert une troisième piste très prometteuse. Elle repose sur les travaux du théoricien britannique Neil Ashcroft. Au début des années 2000, il prédit que des solides exceptionnellement enrichis en hydrogène pourraient devenir supraconducteurs à très hautes températures si on les comprime suffisamment.

Des températures ambiantes mais une pression titanesque

Les confirmations expérimentales commencent à tomber en 2015. Grâce à une cellule à enclumes de diamant exerçant une pression de 130 gigapascals — plus d'un million de fois supérieure à celle de notre atmosphère ! —, des physiciens du CEA (Saclay, Essonne) synthétisent un « super-hydrure » comportant un atome de lithium pour six d'hydrogène, une première. Quelques mois plus tard, une équipe allemande montre qu'un composé de ce type reste supraconducteur jusqu'à -70 °C sous 90 gigapascals. Et même -13 °C dans un super-hydrure associant un atome de lanthane pour dix d'hydrogène, clament en 2019 des chercheurs de l'université américaine George-Washington. Soit quasiment la température ambiante ! La pression exercée (180 gigapascals) est certes titanesque, excluant de fait toute application. L'enjeu des recherches actuelles consiste donc à réduire celle-ci significativement. « *Soit en identifiant des super-hydrures qui fonctionneraient dans des conditions moins extrêmes ; soit en trouvant un chemin thermodynamique qui préserverait leurs structures cristallines lorsque la pression diminue* », détaille Julien Bobroff. De tels matériaux existent dans la nature, à l'instar du diamant : formé à très haute pression dans le manteau terrestre, il reste stable en surface quand les conditions se relâchent. ■ **Franck Daninos**

THÉORIE

Pourrons-nous réconcilier relativité et physique quantique ?

L'existence des trous noirs, ou la théorie du Big Bang, oblige à concilier les deux grandes théories de la physique : la relativité générale, qui décrit l'espace-temps, et la théorie quantique, qui régit le monde des particules élémentaires. Durant sa carrière, l'astrophysicien Jean-Pierre Luminet a étudié les trous noirs et la forme de l'Univers. Assez naturellement, il s'intéresse désormais aux tentatives pour réunir les deux. « *Dans mon dernier ouvrage* [*L'Écume de l'espace-temps*, Odile Jacob], *je recense une dizaine d'approches. Elles se répartissent en deux écoles. La première, portée par les physiciens des particules, envisage un espace-temps continu. La théorie des cordes en est la forme la plus avancée. L'autre école, issue des physiciens relativistes, considère au contraire que l'espace-temps est quantifié. C'est par exemple la gravitation quantique à boucles.* »
Hélas, aucune de ces approches n'a encore abouti. La préférence de Jean-Pierre Luminet se porte vers une troisième voie, la géométrie non commutative développée par le mathématicien Alain Connes. « *J'ai forcément un biais car de formation je suis mathématicien et géomètre. En procédant à une généralisation la plus grande possible de la géométrie, elle aboutit à un univers décrit comme le produit de deux espaces. L'un, commutatif, dont vous tirez la relativité générale. Et l'autre, cette fois non commutatif, donne le modèle standard des particules.* » Mais, constatant qu'aucune théorie n'est pour l'heure complète, il conclut, philosophe : « *On ne peut exclure que la relativité générale et la physique quantique restent inconciliables.* » ■ **Fabrice Nicot**

« La géométrie non commutative aboutit à un univers décrit comme le produit de deux espaces »

Jean-Pierre Luminet, astrophysicien

ARNAUD MEYER/OPALE PHOTO/LEEXTRA

ARCHÉOLOGIE

Que révèlent les géoglyphes péruviens ?

Ces structures monumentales classées au patrimoine mondial de l'Unesco permettent de mieux comprendre la vision du monde des sociétés andines anciennes.

« Visibles uniquement depuis une longue distance, les géoglyphes étaient des sortes de panneaux publicitaires à destination des marcheurs de la plaine »

Aïcha Bachir Bacha, enseignante-chercheuse à l'EHESS

A. BACHIR BACHA

Les géoglyphes, figures millénaires de plusieurs centaines de mètres de long, fascinent autant qu'ils interrogent. On en compte plus de 300, classées au patrimoine mondial de l'Unesco depuis une trentaine d'années. « *Afin de comprendre leur fonction, il est essentiel de situer chacun dans son contexte chrono-culturel* », avertit l'archéologue Aïcha Bachir Bacha, enseignante-chercheuse à l'École des hautes études en sciences sociales (EHESS) et spécialiste des cultures andines. Si les géoglyphes de Nazca (datés entre 0 et 600 après J.-C.) sont les plus connus, elle rappelle que « *la culture Paracas — qui a précédé (800-100 avant notre ère) la culture Nazca — a aussi laissé des traces au sud du Pérou* ». Brillants architectes et grands bâtisseurs, les Paracas ont conçu des structures monumentales à l'aide de matériaux simples, tels l'argile et l'adobe (brique d'argile et de paille), et ont aussi dessiné sur les sols. « *Le lieu, la période, l'orientation, l'iconographie, ainsi que le matériel archéologique qui les accompagne donnent des indices permettant de comprendre la vision du monde des sociétés anciennes* », poursuit Aïcha Bachir Bacha.

Tous sont dotés d'une identité, d'une âme

Toutes ces lignes sont des marqueurs territoriaux, mais elles n'ont pas forcément les mêmes fonctions. « *Elles peuvent servir à connecter deux pôles de pouvoir, mais peuvent également être des chemins de pèlerinage, des lieux de réunion ou encore des zones de combats rituels,* expose Aïcha Bachir Bacha. *Les géoglyphes nichés dans les flancs des montagnes, visibles uniquement depuis une longue distance, étaient quant à eux des sortes de panneaux publicitaires à destination des marcheurs de la plaine.* » Mais ce n'est pas tout. Singe, araignée ou colibri, tous les géoglyphes sont dotés d'une identité, d'une âme. Dans les civilisations andines, les animaux, les montagnes et les plantes sont personnifiés. « *C'est le côté animiste de ces sociétés. Cela a une dimension symbolique, mais aussi économique car ils représentent des ressources naturelles* », développe l'archéologue. En somme, toutes les sphères — politique, économique et symbolique — sont intimement liées et ne peuvent être dissociées.

Pour aller plus loin dans la compréhension des géoglyphes, il reste à dresser une cartographie détaillée et à observer leur évolution. « *Il est important de comprendre leur rôle dans la cohésion sociale et l'organisation politique, et de s'intéresser aussi aux géoglyphes d'autres cultures* », préconise la scientifique. Ainsi, les archéologues obtiendront une vision plus globale de l'occupation et du contrôle des territoires pendant les différentes époques précolombiennes. ■

Yoanna Herrera

LEONID ANDRONOV/GETTY IMAGES

Ces motifs ont été réalisés par la civilisation Paracas (800-100 avant notre ère).

ASTROPHYSIQUE

La matière noire existe-t-elle ?

Pour traquer cette mystérieuse matière qui constitue un quart de l'Univers, les théories se sont multipliées depuis quarante ans. Comme aucune particule du modèle standard ne convenait, on s'est mis à en chercher de nouvelles. La solution est peut-être ailleurs.

L'énigme de la matière noire perdure depuis près de quatre décennies. Elle constitue environ 27 % de l'Univers (68 % pour l'énergie noire et 5 % pour la matière classique), mais sa nature reste inconnue. Elle se dérobe sans cesse aux tentatives des astronomes pour la saisir. La matière noire ne rayonne pas, ce qui la rend invisible quel que soit le domaine du spectre électromagnétique (UV, visible, X…) où on la guette. Et elle n'interagit pas, ou presque pas, avec la matière : elle traverse donc sans encombre les détecteurs de toutes sortes. Seuls ses effets gravitationnels — elle « pèse » sur la matière classique — trahissent sa présence. C'est ainsi qu'elle a surgi dans les travaux de Françoise Combes, astrophysicienne à l'observatoire de Paris et membre de l'Académie des sciences.

« Le satellite Euclid devrait nous aider à expliquer la matière noire, mais aussi l'énergie noire responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers »

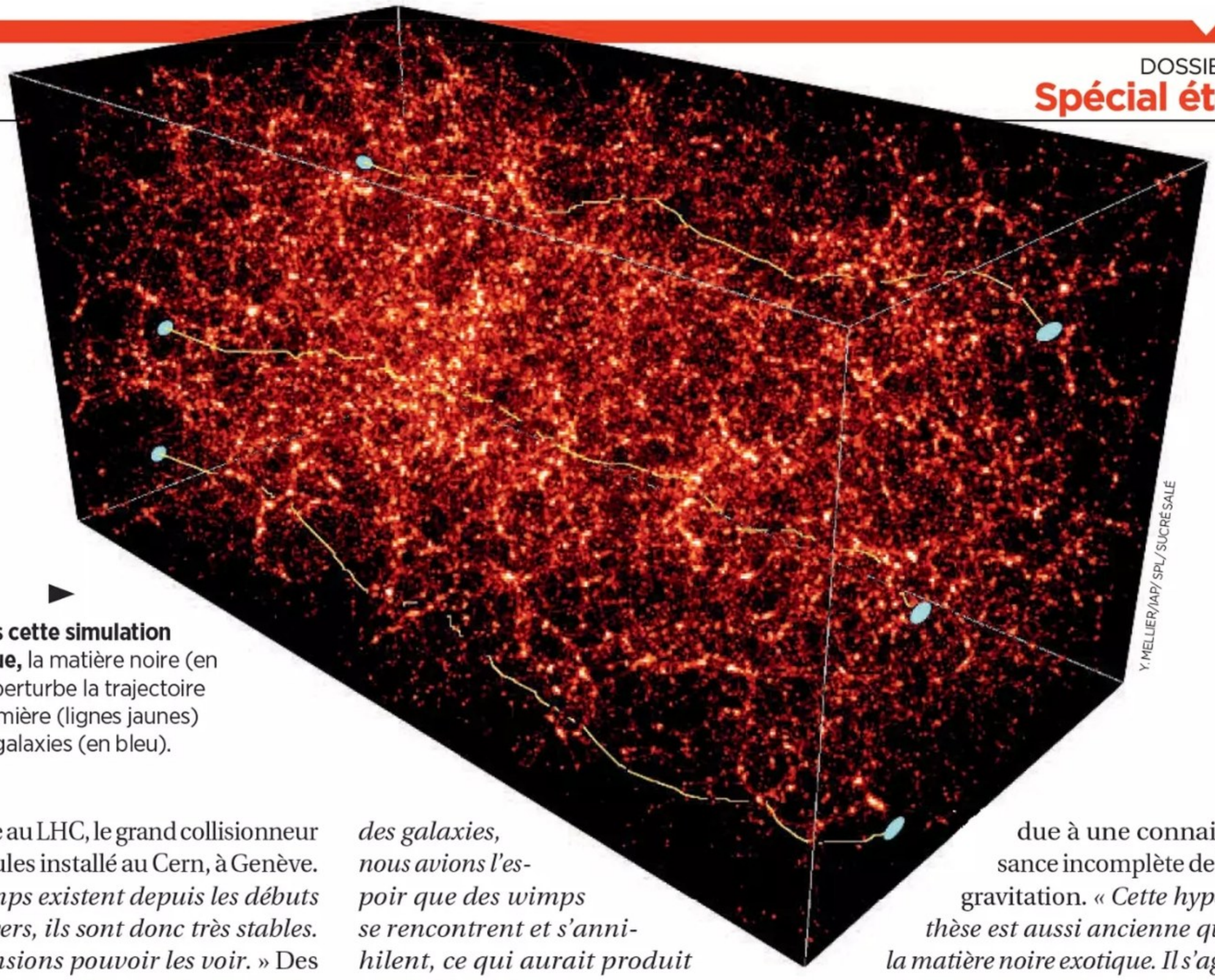
Françoise Combes, astrophysicienne à l'observatoire de Paris et membre de l'Académie des sciences.

« Au début des années 1980, j'étudiais la dynamique des galaxies. Nous passions alors du calcul analytique aux premières simulations numériques pour décrire leurs formes. Ces simulations à deux dimensions d'espace débouchaient sur des galaxies barrées [les bras spiraux de la galaxie émergent aux extrémités d'une barre d'étoiles]. *Cela nous surprenait parce que les calculs décrivaient plutôt des galaxies tout en spirale, sans barre. Lorsque cela a été possible, nous sommes passés à des modélisations à trois dimensions pour voir si les barres subsistaient. Non seulement elles étaient encore là, mais nous avons montré l'existence d'un halo, un bulbe d'étoiles, s'étendant au-dessus et en dessous du disque galactique. Pour le stabiliser dans nos simulations, nous devions "ajouter" de la matière noire, sinon le disque de la galaxie chauffait trop, ce qui détruisait toute structure. »* Ainsi, la matière noire apparaît indispensable pour rendre compte des observations, comme la forme des galaxies donc, mais aussi la vitesse de rotation des étoiles situées en périphérie, bien plus grande que celle prévue s'il n'y avait que de la matière classique. Initialement, cette matière n'est pas considérée comme exotique, elle est juste invisible. *« C'est seulement à partir de 1985 que l'on s'est rendu compte qu'aucune particule du modèle standard ne convenait. Alors on s'est mis à en chercher de nouvelles. »*

La chasse aux wimps n'a pour l'instant rien donné

Le principal candidat à l'époque est le wimp (weakly interacting massive particle, particule massive interagissant faiblement), dont on dresse le portrait-robot afin de le découvrir dans les collisionneurs de particules. *« Le wimp est une particule neutre, qui est sa propre antiparticule. Donc deux wimps se désintègrent lorsqu'ils se rencontrent. Au début de l'Univers, particule et antiparticule se forment et s'annihilent sans cesse. Mais l'expansion finit par espacer les rencontres. Il y a donc un reliquat de wimps aujourd'hui. Nous avons calculé que pour qu'ils constituent toute la matière noire, il fallait un wimp de 100 fois la masse du proton. »* Au début des années 2000, la chasse aux wimps

MATHIEU GENON/OPALEPHOTO



Y. MELLIER/IAP/ SPL/ SUCRÉ SALÉ

Dans cette simulation numérique, la matière noire (en rouge) perturbe la trajectoire de la lumière (lignes jaunes) des galaxies (en bleu).

s'organise au LHC, le grand collisionneur de particules installé au Cern, à Genève. « *Les wimps existent depuis les débuts de l'Univers, ils sont donc très stables. Nous pensions pouvoir les voir.* » Des énergies de 100 fois la masse du proton ont été atteintes. Et rien. En 2012, le boson de Higgs a été détecté avec une masse de 125 fois celle du proton. Mais pas de wimp. « *Et ainsi de suite : nous sommes allés jusqu'à 1000 fois la masse du proton en vain… Aujourd'hui, les physiciens des particules ont renoncé à le trouver.* »

Dans leur quête des wimps, d'autres scientifiques avaient d'autres stratégies… Par exemple, les expériences Xenon qui ont débuté en 2005 visaient à détecter le recul de noyaux de xénon lorsqu'ils étaient percutés par des wimps. Elles se déroulaient au Laboratoire national de Gran Sasso en Italie. La première expérience utilisait environ 15 kg de xénon liquide. Cela n'a rien donné. La version la plus récente de l'expérience, XENONnT, comprend désormais presque 6 tonnes de xénon, ce qui augmente considérablement le nombre de cibles, et donc la probabilité d'observer un wimp. Les mesures ont débuté en 2021, en vain jusqu'à présent. La dernière chance de prouver leur existence aurait pu venir des étoiles. « *Dans les régions denses de l'Univers, au centre des galaxies, nous avions l'espoir que des wimps se rencontrent et s'annihilent, ce qui aurait produit des flashs de rayons gamma. La masse des wimps nous permettait de calculer l'énergie de ces rayons. Nous les avons cherchés au cœur des galaxies, des galaxies naines, et même dans le Soleil qui après tout aurait pu en contenir. Nous n'avons rien détecté du tout…* »

Élaborer une nouvelle théorie de la gravité

Absence de preuve directe, absence de preuve indirecte… L'hypothèse des wimps semble avoir fait long feu, ce qui provoque chez les astronomes un certain désarroi. « *C'était notre principal candidat. Toutes les autres hypothèses semblent un peu tirées par les cheveux. Il y a l'hypothèse de neutrinos stériles, de masse intermédiaire, dont l'existence est très contrainte. Et aussi les axions, encore une particule hypothétique mais infiniment plus légère que les neutrinos, dont on ne parvient déjà pas à mesurer la masse. Alors, mesurer celles des axions ! Et à part ça, il n'y a rien d'autre.* »

Rien d'autre à part « renverser la table », et considérer que la matière noire n'est peut-être qu'une illusion due à une connaissance incomplète de la gravitation. « *Cette hypothèse est aussi ancienne que la matière noire exotique. Il s'agit d'élaborer une nouvelle théorie de la gravité, en modifiant les équations de la relativité générale. Albert Einstein s'était placé dans le cas d'un champ gravitationnel fort, comme celui qui règne sur Terre ou dans le Système solaire. Cela permettait de simplifier les équations et de faire des calculs. Mais si l'on se place dans des champs faibles, 11 ordres de grandeur plus faibles que la pesanteur terrestre, cela marche moins bien. Or, on trouve ces champs faibles au bord des galaxies, justement là où l'on a besoin de matière noire pour décrire le comportement des étoiles.* »

Aujourd'hui, beaucoup d'astronomes travaillent à élaborer cette gravité modifiée, dans l'espoir de pouvoir se passer enfin de matière noire. « *Un satellite comme Euclid* [lire *S. et A.* n° 925], *en cartographiant des dizaines de millions de galaxies, devrait nous aider à élaborer cette gravité modifiée qui pourrait expliquer non seulement la matière noire, mais aussi l'énergie noire responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Dans cinq ans, nous devrions avoir enfin quelques réponses à nos questions…* » ■ **Fabrice Nicot**

NEUROSCIENCES

D'où la conscience surgit-elle ?

De plus en plus perfectionnées, les techniques d'imagerie permettent d'observer le fonctionnement du cerveau lorsqu'une information perçue devient consciente. Et ainsi passer à l'expérimentation des différentes théories de la conscience élaborées depuis des décennies.

Qu'est-ce que la conscience ? D'où surgit-elle et comment fonctionne-t-elle ? Ces questions basiques ont nourri près de trois mille ans de philosophie occidentale. Et taraudent peut-être l'humanité depuis plus longtemps encore. Mais il aura fallu attendre la fin du XXe siècle pour pouvoir regarder de plus près ce qui se passe concrètement dans le cerveau lorsqu'une information perçue devient consciente. *« J'ai l'impression que les philosophes sont utiles à un stade initial où les scientifiques peuvent être désorientés par des questions de vocabulaire ou de pensée floue. Mais nous sommes maintenant au-delà de ce stade dans la recherche sur la conscience »*, assure Stanislas Dehaene, professeur au Collège de France et directeur du centre Neurospin, spécialisé dans la neuroimagerie. Les techniques d'imagerie cérébrale de plus en plus perfectionnées permettent en effet d'établir des correspondances entre l'architecture neuronale du cerveau et nos représentations mentales, et de passer ainsi à l'expérimentation des différentes théories de la conscience élaborées. *« Outre l'exploration des bases cérébrales de la conscience que je poursuis depuis plus de trente ans, mes recherches actuelles portent sur la singularité du cerveau humain : pourquoi sommes-nous la seule espèce capable d'arithmétique, de géométrie, de langage, de lecture, de musique ? »*

« Pourquoi sommes-nous la seule espèce capable d'arithmétique, de géométrie, de langage, de lecture, de musique ? »

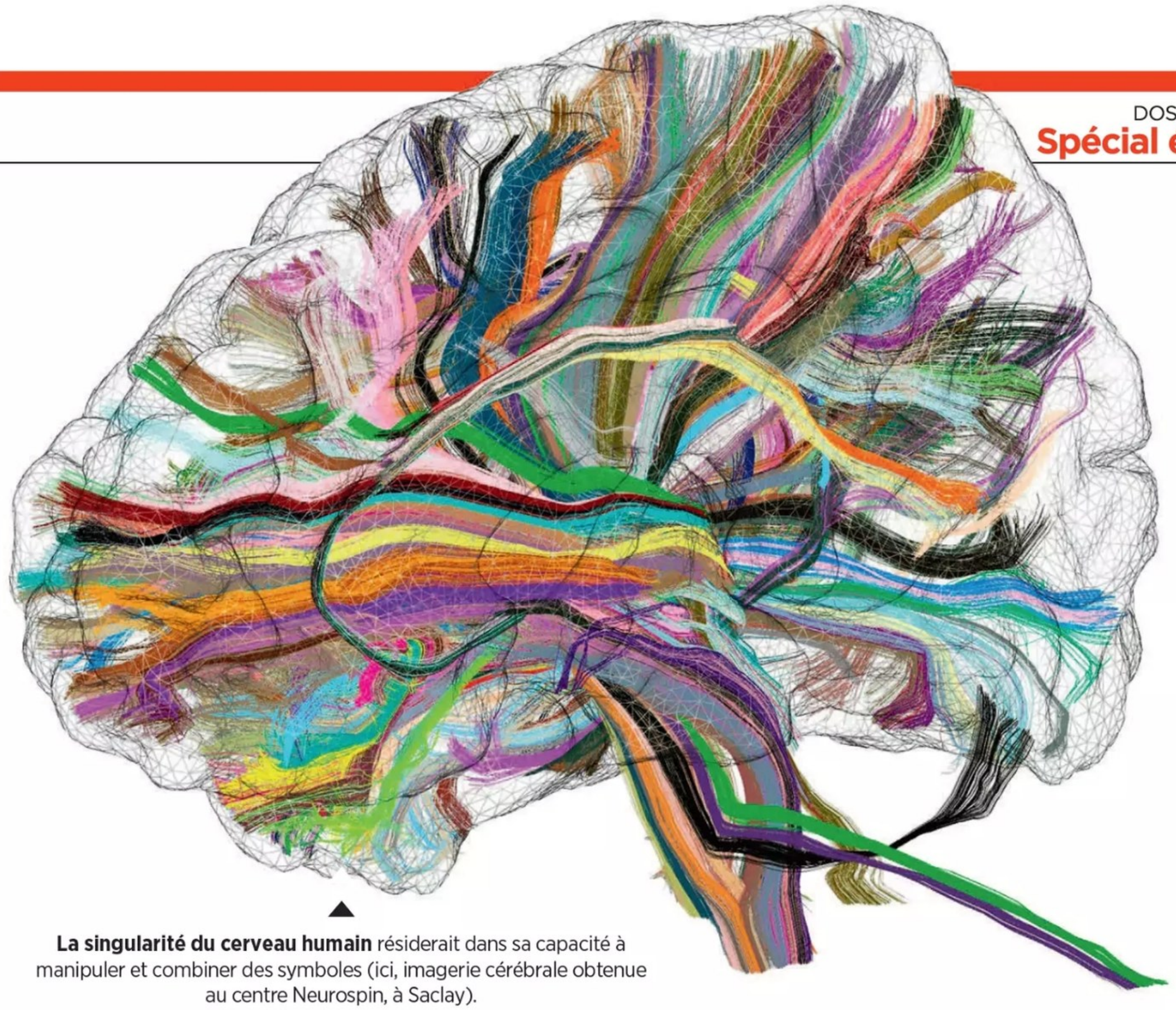
Stanislas Dehaene, professeur au Collège de France, directeur du centre Neurospin

Pour résoudre ce grand mystère, le chercheur s'appuie notamment sur un cadre théorique et expérimental élaboré à partir des années 1990 avec le neurobiologiste Jean-Pierre Changeux puis le neurologue Lionel Naccache : celui de l'espace de travail neuronal global. En d'autres termes, le cerveau est un espace global de travail qui permet la conscience. Il postule que la prise de conscience subjective d'une information (visuelle, sonore, etc.) correspondrait à l'entrée de cette information dans un réseau neuronal de partage, de sorte qu'elle puisse être communiquée simultanément à plusieurs systèmes cérébraux (moteur, attentionnel, de la mémoire, etc.). Pour comprendre, il faut voir que le cerveau fonctionne toujours d'abord sur un mode non conscient. Une machine biologique qui, un peu comme n'importe quel autre organe, réagit à un environnement et à des stimulations extérieures. *« La conscience subjective est le résultat de calculs non conscients, opérés par le cerveau de la façon la plus objective possible »*, explique Stanislas Dehaene.

Un mot « conscient » entraîne l'embrasement neuronal

C'est ce que montrent les expériences faisant apparaître à des sujets des mots ou des images de façon subliminale : une perception non consciente qui est pourtant traitée par le cerveau. Mais que se passe-t-il lorsqu'une information franchit le seuil de

B.DECOUT/REA



La singularité du cerveau humain résiderait dans sa capacité à manipuler et combiner des symboles (ici, imagerie cérébrale obtenue au centre Neurospin, à Saclay).

CEA

conscience ? *« Nous avons montré qu'il y a une énorme différence. Un mot non conscient reste confiné dans des circuits très spécialisés. Il est en quelque sorte traité de façon automatique par ces circuits. Alors que le mot conscient entraîne un surcroît d'activité : ce qu'on a appelé l'embrasement neuronal (ignition) dans un espace cérébral beaucoup plus grand. L'information qui est consciente devient comme diffusée à l'échelle de tout le cerveau. Or, de façon générale, lorsque nous devenons conscients d'une information, nous pouvons l'utiliser de manière extraordinairement flexible. »*

En comparant l'activation du cerveau face à un mot présenté de façon subliminale ou non, il est possible de suivre cet embrasement neuronal à l'imagerie : durant environ 300 millisecondes, le cerveau réagit de façon rigoureusement identique. C'est dans le lobe occipital, à l'arrière du crâne, que s'active le cortex visuel. Passées ces 300 millisecondes, l'activité neuronale s'amplifie dans de nombreuses régions, notamment dans le cortex frontal, à l'avant du cerveau. *« Une région qui s'est particulièrement développée dans notre espèce »*, pointe le chercheur.

Lire des pensées en analysant une activité cérébrale

La lecture du cerveau est telle désormais qu'elle permet même d'analyser la conscience à l'échelle de quelques neurones sur les près de 100 milliards que compte un humain. *« Nous avons même montré qu'il existe des neurones qui ne codent que pour un concept particulier. Ils ne "déchargent" électriquement que lorsqu'on prend conscience de ce concept, par exemple l'image du World Trade Center avant l'attentat. Nous avons ainsi des populations de neurones qui codent chacune de nos pensées conscientes. »*

Reste que le cerveau n'a pas à attendre une stimulation externe pour générer un état conscient. Même sans stimulation particulière, l'imagerie montre qu'un cerveau conscient déroule tout une série d'états d'activité qui ne cessent de changer et qui correspondent au contenu de nos pensées conscientes. Celles-ci se dévoilent si bien aujourd'hui qu'il est littéralement possible, grâce à des outils d'intelligence artificielle, de lire les pensées d'une personne en analysant son activité cérébrale : images, textes, sons, mouvements imaginés par un sujet peuvent ainsi être décryptés *(lire* S. et A. *n° 910)*.

Mais pour percer à jour les bases cérébrales de la conscience humaine, il faut saisir toutes les subtilités algorithmiques opérées par notre cerveau pour reconnaître les mots, les chiffres, les images, mais aussi pour les associer, les combiner à d'autres symboles, en faire des propositions mathématiques, etc. *« Pour cela, nous avons besoin de plus d'"observatoires du cerveau" — pour reprendre le terme de Christof Koch, neuroscientifique amé-*

ricain spécialiste de la conscience — qui soient prêts à mener des expériences clés pour tester les différents cadres théoriques. C'est notamment pour cela que le centre Neurospin que je dirige à Paris-Saclay a mis en service cette année le plus grand aimant d'imagerie par résonance magnétique (IRM) à 11,7 teslas. Nous espérons le rendre bientôt disponible pour des expériences d'IRM fonctionnelle (méthode permettant de suivre en direct l'activité neuronale) », détaille Stanislas Dehaene. Car demeure cette question entêtante : à quoi est due la singularité du cerveau humain ?

L'hypothèse du chercheur est que de nombreuses espèces animales possèdent ce fameux espace de travail neuronal global permettant l'accès à la conscience d'informations perçues et traitées de façon non consciente par le cerveau. Présent notamment chez tous les primates, *« ce système aurait évolué chez l'humain pour soutenir les symboles et la syntaxe, permettant à notre espèce de diversifier des pensées beaucoup plus précises et de les composer récursivement pour former des expressions mentales complexes : par exemple, "$3^2 = 3 \times 3$" ou "Je pense qu'elle pense ça". La singularité du cerveau humain résiderait dans la capacité d'assigner aux concepts des symboles discrets et de les composer pour former des expressions imbriquées, de véritables "programmes mentaux" avec une organisation récursive. Cette faculté de composition récursive ne serait pas propre au réseau du langage, mais serait présente dans de multiples réseaux parallèles pour le langage, les mathématiques, la musique ou la théorie de l'esprit.* » En sciences cognitives, cette dernière expression désigne l'aptitude d'un individu à attribuer des états affectifs ou cognitifs à un autre.

Des algorithmes neuronaux à décoder

Quoi qu'il en soit, cette « singularité » reposerait sur des algorithmes neuronaux à décoder. Une hypothèse qui, si elle se confirmait, amènerait une question plus vertigineuse encore : pourra-t-on développer des modèles mathématiques reproduisant ces opérations pour les simuler dans des logiciels d'intelligence artificielle ? C'est aujourd'hui une hypothèse crédible. ■

Hugo Jalinière

PRIMATOLOGIE

Que signifient les dessins des grands singes ?

Molly, Ai, Pan, Congo, Zamba, des artistes singes? En tout cas, des chimpanzés ou des orangs-outans qui aiment dessiner, avec leur style propre. Certains comme Pan aiment dessiner de petits traits semblables à des touffes d'herbe. Tandis qu'Ai aime tracer sur sa feuille de grandes lignes tournant en tous sens, des cercles à l'infini et que Zamba dessine en faisant des points. *« Les dessins des chimpanzés ne sont pas aléatoires. Certains produisent même des dessins plus complexes que d'autres, avec leur propre style. Cette personnalité artistique simiesque serait-elle comparable aux grands courants humains: le pointillisme, l'impressionnisme, le cubisme, etc. ? »*, se demande Cédric Sueur, de l'université de Strasbourg, auteur des *Péripéties d'un primatologue* (Odile Jacob, 2024).

« Des tableaux peints cinquante ans plus tôt par Congo le chimpanzé se sont arrachés comme des petits pains lors d'une vente aux enchères. Un autre chimpanzé, Ai, peint des tableaux qui sont imprimés sur des écharpes. »

Nénette, la célèbre orang-outan du Jardin des Plantes à Paris, peut rester concentrée plusieurs dizaines de minutes sur un dessin. Tout comme Molly, une femelle du zoo de Tama, près de Tokyo (Japon), qui a déjà produit plus de 1400 dessins. *« Ceux-ci sont parfois très complexes avec des changements de couleurs,* note Cédric Sueur. *Jaune et bleu après la visite d'écoliers dont les vêtements sont de ces couleurs. Rouge après la naissance d'un bébé singe, ce qui rappelle le versant biologique de l'acte. »*

Pourquoi certains grands singes peignent-ils? Quel est le sens de ce qu'ils couchent sur le papier? *« C'est l'un des sujets de recherche qui me passionnent le plus actuellement,* dit le primatologue. *Cela nécessitera encore des années de travail. Mais peut-être un jour parviendrons-nous à comprendre ce qu'il y a derrière un dessin de grand singe. »* ■ **Hervé Ratel**

« Les dessins des chimpanzés ne sont pas aléatoires. Certains sont plus complexes, avec leur propre style »

Cédric Sueur, primatologue à l'université de Strasbourg

A. BONNEFOY

DAVID MCNEW / AFP

La reconnaissance faciale par une IA peut s'avérer inexacte ou comporter des biais.

NUMÉRIQUE

L'intelligence artificielle peut-elle être éthique ?

Une meilleure compréhension des algorithmes va nécessiter plus d'interdisciplinarité pour allier sciences humaines et sciences du numérique.

Une intelligence artificielle (IA) éthique. La formule revient comme un leitmotiv depuis l'essor de l'apprentissage profond d'abord, et celui, actuel, de l'IA dite générative. C'est dû au fonctionnement de ces algorithmes, qui apprennent des règles statistiques à partir de données pour donner ensuite des réponses… Sauf que l'on ne connaît pas ces règles, qui dépendent justement des données ! D'où une quantité de risques de biais et de résultats difficiles à expliquer, voire obtenus par une mauvaise approche : en 2016, des chercheurs montraient qu'un algorithme conçu pour distinguer des huskies et des loups donnait ses réponses en fonction de la présence ou non de neige dans l'image, non de la reconnaissance des animaux.

M. BERTRAND/CHALLENGES-REA

« Quand on parle d'éthique en IA, on s'en tient généralement à une approche technique »

Laurence Devillers, chercheuse au Laboratoire interdisciplinaire des sciences du numérique (CNRS, Sorbonne Université)

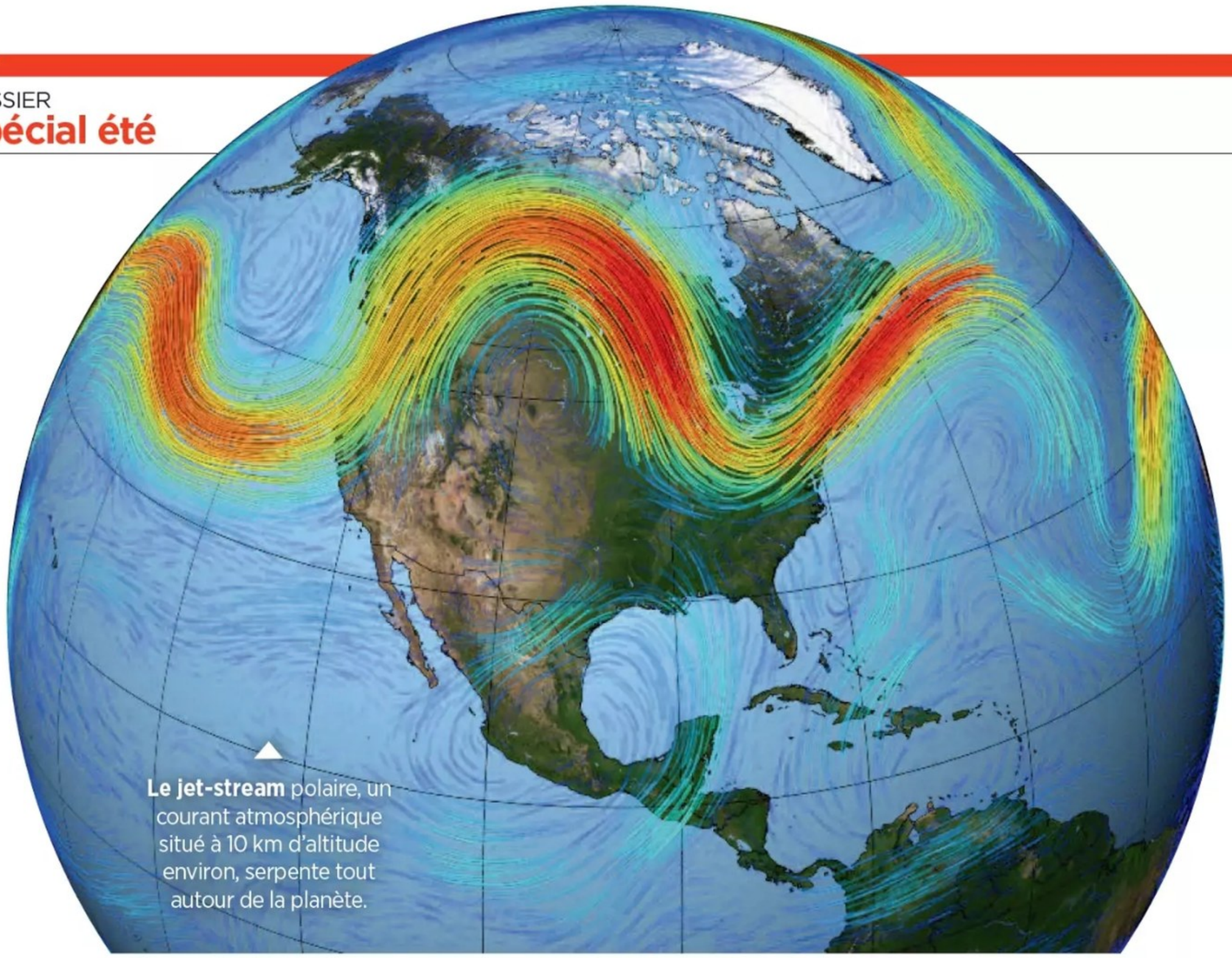
Ainsi, de nombreuses prises de position et d'initiatives scientifiques ont concerné l'éthique et la compréhension des algorithmes. Laurence Devillers, du Laboratoire interdisciplinaire des sciences du numérique (CNRS, Sorbonne Université), s'implique beaucoup sur ces sujets. D'autant que les interactions sociales et la modélisation des émotions font partie de ses champs de recherche privilégiés. « *Mais quand on parle d'éthique en IA, on s'en tient généralement à une approche technique : traquer les biais, les discriminations, nettoyer les données. Alors qu'il faut chercher à comprendre pourquoi il y a des biais, utiliser des travaux menés en sociologie, des notions comme l'"irrationalité rationnelle".* »

La production de mots influence le comportement de l'autre

La chercheuse, qui a pour ambition d'allier intimement sciences humaines et sociales et informatique, plaide pour beaucoup plus d'interdisciplinarité qu'il n'en existe en matière d'IA. Pour une sorte d'« hybridation » des disciplines. Même si les experts en IA collaborent à des travaux en « humanités numériques », leur rôle se cantonne trop souvent à celui de fournisseur de technologies (traitement du langage, analyse statistique de texte…). « *Du côté des sciences humaines, on se cantonne à un rôle d'utilisateur sans chercher à comprendre, par exemple, les paramètres d'un modèle de langage, son architecture. On navigue à vue et c'est dommage.* »

Les spécialistes du numérique, eux, ne penseraient pas assez aux implications de leurs technologies. « *J'ai travaillé par exemple sur le* nudge *linguistique : comment, à partir de la production de mots, on influence le comportement de l'autre. C'est utile pour savoir si un modèle de langage amplifie ce phénomène.* » ■

Arnaud Devillard



Le jet-stream polaire, un courant atmosphérique situé à 10 km d'altitude environ, serpente tout autour de la planète.

MÉTÉOROLOGIE

Pourquoi la vitesse des vents ne cesse-t-elle de varier ?

Au contraire de l'évolution de la température de la planète, désormais bien comprise, le fonctionnement de la circulation de l'atmosphère reste mystérieux. Le changement climatique est-il en cause ?

Ce n'est pas parce que la question de la responsabilité humaine dans le réchauffement climatique est désormais close que les climatologues se croisent les bras avec le sentiment du devoir accompli. De nombreux défis des sciences physiques du climat pour comprendre le changement climatique sont devant eux : comment les puits naturels de carbone vont-ils réagir à un réchauffement de plus en plus marqué ? Y a-t-il des points de non-retour dans la fonte des calottes polaires et dans le ralentissement de la circulation mondiale des océans ? À quoi est dû l'accroissement du déséquilibre énergétique de la Terre ? Mais il en est un qui les intrigue plus particulièrement : « *La vitesse moyenne des vents sur le globe augmente et diminue, et ils changent de direction dans le temps sans qu'on sache pourquoi* », pose Robert Vautard, directeur de recherche au CNRS, directeur de l'Institut Pierre-Simon-Laplace (IPSL).

Au contraire de l'évolution de la température globale de la planète, désormais bien comprise, le fonctionnement de

la circulation générale de l'atmosphère garde une grande part de mystère. On sait que les jet-streams et les « rails des tempêtes », ces courants rectilignes à 10 km d'altitude, ont remonté un peu vers les Pôles. Mais la météo quotidienne dépend davantage d'ondes et de tourbillons atmosphériques de plus basse altitude, alternant grandes dépressions et anticyclones. Ces tourbillons apportent parfois des conditions extrêmes de température, de pluie ou de sécheresse. « *Mais nous ne savons pas comment ils vont évoluer, en fréquence, en intensité, en position géographique* », poursuit Robert Vautard.

En France par exemple, le nombre de dépressions qui se positionnent en été sur le proche Atlantique a doublé depuis 1950, ainsi que le montrent des travaux de l'IPSL publiés en février dans *Geophysical Research Letters*. « *Or, comme le vent généré par ces dépressions tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, elles apportent de plus en plus souvent des vents brûlants venant du Sahara, occasionnant des températures extrêmes, à l'image du record national de 46 °C battu fin juin 2019 vers Nîmes* », constate le climatologue.

Les simulations ne permettent pas de comprendre

Ce phénomène explique pourquoi, en Europe de l'Ouest, les extrêmes de températures augmentent très vite. « *Ces évolutions, on ne les comprend pas encore, et les simulations climatiques ne les représentent pas* », avoue Robert Vautard. Des inconnues comme celle-ci, il y en a tout autour du monde, avec des conséquences importantes pour les sociétés. En effet, tant que ces verrous sur l'évolution des structures atmosphériques et des vents ne sont pas levés, de grandes incertitudes persisteront pour décider des mesures d'adaptation au changement climatique. Anticiper des températures à 40 °C ou 50 °C ne demande pas les mêmes efforts, ni les mêmes investissements. Les raisons de cette incertitude sont connues : les statistiques des vents ont des fluctuations importantes

« La vitesse des vents augmente et diminue, et ils changent de direction sans qu'on sache pourquoi »

Robert Vautard, directeur de de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)

et agissent à une échelle de plusieurs décennies. Les climatologues ne savent donc pas si une évolution des vents sur ces temps longs peut être attribuée au changement climatique ou à ces variations lentes. « *Si la tendance observée sur l'augmentation des dépressions en été sur l'Atlantique est due au changement climatique, on peut s'attendre à ce que cela s'accentue, mais si c'est une évolution naturelle, on peut espérer qu'elle s'inverse* », résume Robert Vautard.

Mais les vents recèlent un autre grand mystère : celui de l'évolution de leur vitesse sur les régions terrestres. En 2010, Robert Vautard et son collègue Philippe Ciais, du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (LSCE), ont eu l'idée d'exploiter les données de 822 stations de surface situées principalement dans les aéroports en Eurasie et en Amérique du Nord, les données dans les pays du Sud étant lacunaires. L'étude parue le 17 octobre 2010 dans *Nature Geoscience* révèle que 73 % des stations ont enregistré une baisse de la vitesse des vents de 3,4 mètres par seconde (m/s) en 1978 à 3,15 m/s en 2010. Seuls les anémomètres situés le plus au nord constatent un maintien de la force des vents. Et cette baisse ne concerne que la surface terrestre, les courants atmosphériques au-dessus de 10 km d'altitude comme le jet-stream ayant au contraire soufflé plus fort. Sur cette période, les vents de mousson en Chine ont décliné selon une pente régulière. La baisse a également été constatée aux Pays-Bas, en République tchèque, en Australie et sur tout le continent nord-américain. Le phénomène est baptisé « *accalmie éolienne globale* ». « *On avançait alors plusieurs raisons à ce déclin des vents en surface : une augmentation de la rugosité du sol, avec l'urbanisation, la croissance des forêts dans de nombreuses régions, le changement climatique qui fait remonter les rails des tempêtes vers les Pôles où la surface émergée est moins grande* », énumère Robert Vautard.

L'urbanisation est mise hors de cause

Sauf qu'en 2019, une équipe internationale composée de chercheurs des universités chinoises de Shenzhen et Nanjing, des universités américaines de Princeton et du Colorado, ainsi que l'École de géographie de Singapour rejoignent le LSCE pour compléter les travaux. Et là, surprise ! Selon l'étude publiée par *Nature Climate Change*, les vents mesurés par les 822 mêmes stations n'ont cessé de monter en puissance depuis 2010 pour revenir aux 3,4 m/s constatés il y a quarante ans. L'hypothèse de la rugosité de la surface terrestre est donc mise en question. Car cette rugosité n'a pas diminué, au contraire. L'explication des phénomènes décennaux de « *l'oscillation décennale du Pacifique* », de « *l'oscillation de l'Atlantique Nord* » et de « *l'indice de l'Atlantique Nord tropical* » au-dessus des océans revient donc en force. C'est désormais la première explication avancée, même si elle reste incertaine.

Depuis l'été 2023, une équipe menée par Davide Faranda au LSCE s'intéresse de près à l'évolution de tous ces phénomènes, et analyse les tendances des circulations atmosphériques qui conduisent aux phénomènes extrêmes. Cette collecte systématique, en temps quasi réel, sur des évènements qui se produisent autour du globe, pourra permettre, à terme, d'en savoir beaucoup sur les tendances des vents et des tourbillons atmosphériques. ■ **Loïc Chauveau**

NASA/GODDARD SPACE FLIGHT CENTER SCIENTIFIC VISUALIZATION STUDIO - P. CHIGNARD / DIVERGENCE

YVON LETRANGE

Des myriades d'étoiles peuvent être observées la nuit, par temps dégagé, dans le Morvan (ici la zone des lacs artificiels). D'ici à la fin de l'année, ce parc naturel régional pourrait obtenir le rare label de « Réserve internationale de ciel étoilé ».

Pollution lumineuse

La France championne du ciel étoilé

Plus de 80 % de la population mondiale vit sous des cieux constamment éclairés par une lumière artificielle. Pour retrouver une connexion avec la Voie lactée, une vingtaine de réserves de ciel étoilé se sont constituées dans le monde, dont cinq en France et bientôt trois supplémentaires. Reportage dans le Morvan.

Par Franck Daninos

L'endroit est surnommé la « terrasse aux étoiles ». On y accède depuis le musée archéologique de Bibracte, sur le flanc est du mont Beuvray (Saône-et-Loire), qui abritait l'une des plus importantes cités gauloises au Ier siècle de notre ère. La route conduisant jusqu'au sommet traverse un lacis de sapins, de merisiers et de chênes ainsi que des hêtres aux formes torturées typiques de la forêt du Morvan. Elle débouche finalement sur une vaste clairière à 820 mètres d'altitude, très prisée des astronomes amateurs. « *Chaque été, nous y organisons des soirées d'observation pour contempler les étoiles, constellations et planètes,* signale Éric Chariot, de la Société astronomique de Bourgogne. *Des milliers d'astres peuvent être distingués à l'œil nu ! Et la Voie lactée, qui barre la voûte céleste d'un horizon à l'autre, brille de manière explosive, offrant un spectacle d'une beauté saisissante et majestueuse.* » Dans le Morvan, territoire de moyenne montagne où la densité de population dépasse à peine 20 habitants/km², la pureté du ciel nocturne est effectivement exceptionnelle. « *C'est l'une des régions de France où les nuits sont les plus noires,* assure Emmanuel Clerc, responsable du pôle économie-transitions au parc naturel régional du Morvan. *Une particularité que nous considérons comme un bien commun, une ressource. Et que* ▶

22 Réserves internationales de ciel étoilé (Rice) sont reconnues à ce jour dans le monde.

60 % des Européens n'ont plus accès à la Voie lactée.

2500 étoiles environ devraient être visibles en l'absence de pollution lumineuse.

nous comptons bien préserver, valoriser et faire davantage connaître. » D'ici à la fin de l'année, ce parc pourrait devenir ainsi une Réserve internationale de ciel étoilé (Rice), prestigieux label décerné par l'ONG américaine Dark Sky International. Il n'en existe actuellement que 22 dans le monde mais déjà cinq en France, qui fait figure de modèle.

Les télescopes sont aveuglés par les lumières artificielles

Selon une étude parue en 2016, plus de 80 % de la population mondiale vit sous des cieux constamment éclairés par une lumière artificielle. En cause, l'urbanisation galopante… et la multitude de lumières générées la nuit par les éclairages publics et privatifs, les bureaux restés allumés, les phares des voitures, les enseignes publicitaires… En se diffusant dans l'atmosphère, elles forment des halos jaunâtres au-dessus des grandes villes, visibles à des dizaines de kilomètres. Et le phénomène croît rapidement. Chaque année, à l'échelle mondiale, le ciel absorberait 9,6 % de lumière supplémentaire — estimation étayée par plus de 50 000 observations entre 2011 et 2022, communiquée l'année dernière dans la revue *Science*. En 2023, deux astronomes américains ont même forgé un terme pour exprimer la peine ressentie face à ce déclin de la nuit : la « noctalgie »!

Mais « *les conséquences sont surtout catastrophiques pour la biodiversité* », alerte Emmanuel Clerc. Car ces surplus de lumière, qu'ils proviennent des halos diffus ou de sources ponctuelles, perturbent les comportements (reproduction, recherche de nourriture, migrations…) et fragmentent les continuités écologiques (appelées aussi « trames noires ») d'une multitude d'espèces. « *30 % des vertébrés et 65 % des invertébrés sont, tout ou partie, nocturnes* », rappelle Emmanuel Clerc, à l'instar de 95 % des espèces de papillons présentes en France. Mais les espèces diurnes — parmi lesquelles les humains! — sont aussi affectées puisqu'elles adaptent leur physiologie à l'alternance du jour et de la nuit et tirent profit d'une obscurité totale pour leurs phases de repos. On parle ainsi de « pollution lumineuse » au même titre que des polluants chimiques dégradent l'environnement. Une notion popularisée dès le début des années 1970 par les astronomes professionnels, les premiers à se sentir directement concernés par l'éclaircissement du ciel nocturne. « *Les lumières artificielles aveuglent les télescopes* », précise Sébastien Vauclair, astrophysicien et président de DarkSkyLab, bureau d'études toulousain spécialisé dans les mesures de pollution lumineuse. Les observatoires doivent donc migrer dans des endroits de plus en plus reculés, à l'instar des télescopes internationaux construits sur les sommets du Mauna Kea, à Hawaii, ou de la cordillère des Andes.

Quant aux habitants des métropoles, ils ne distinguent guère plus d'une vingtaine d'astres en levant les yeux vers le firmament — « *alors qu'environ 2500 étoiles sont visibles à l'œil nu en l'absence de lumière artificielle* », pose Sébastien Vauclair. Peu à peu, l'humanité se coupe ainsi des paysages nocturnes qui ont inspiré tant de mythes et légendes pendant des millénaires et servi de tremplin à son imagination. Pour « rallumer » les étoiles, il suffit pourtant d'éteindre les éclairages extérieurs… ou de les utiliser, tout du moins, de façon beaucoup plus sobre et raisonnée. Fondée en 1988 par deux scientifiques américains, Dark Sky International milite pour cet objectif afin de « *préserver l'environnement nocturne et notre héritage de ciel noir* ». Constituée aujourd'hui de plusieurs milliers de membres, l'ONG établit aussi des sanctuaires : des Rice en particulier, qui récompensent les ciels nocturnes d'une qualité exceptionnelle et les actions mises en œuvre pour les protéger.

Des critères très exigeants pour décrocher le label

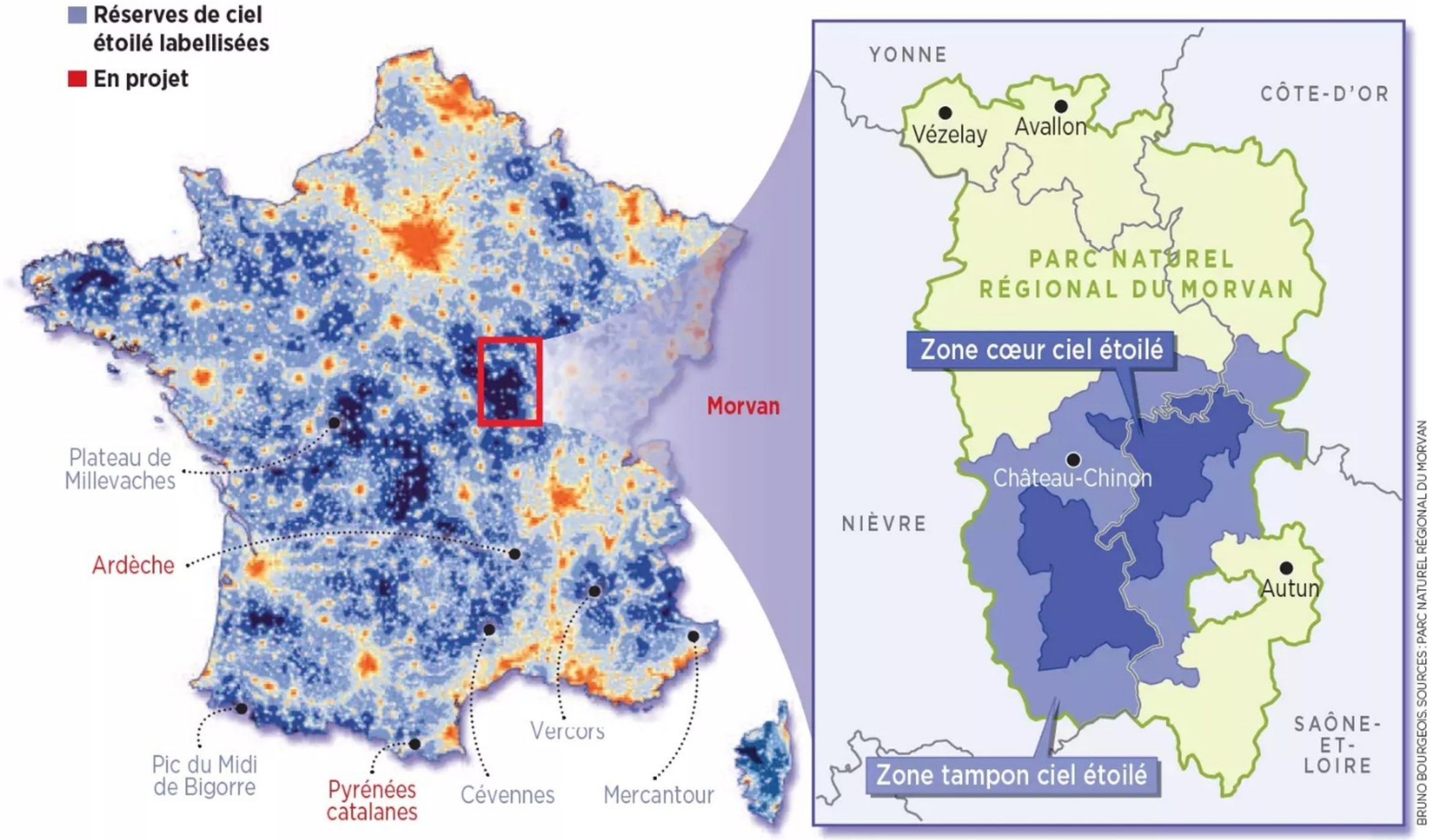
La première réserve a été inaugurée en 2007 à l'Observatoire du Mont-Mégantic, au Canada. Il faudra attendre 2013 pour qu'un territoire français — le pic du Midi de Bigorre (Hautes-Pyrénées) — obtienne ce sésame. Quatre autres seront toutefois labellisés par la suite : le parc national des Cévennes (2018), Alpes Azur Mercantour (2019), le plateau de Millevaches dans le Limousin (2021) et le parc naturel régional du Vercors (2023). Actuellement, la France occupe le deuxième rang mondial en nombre

ELODIE SEGUIN

« Les conséquences de la pollution lumineuse sont surtout catastrophiques pour la biodiversité »

Emmanuel Clerc, responsable du pôle économie-transitions au parc naturel régional du Morvan et chef de projet « Ciel étoilé »

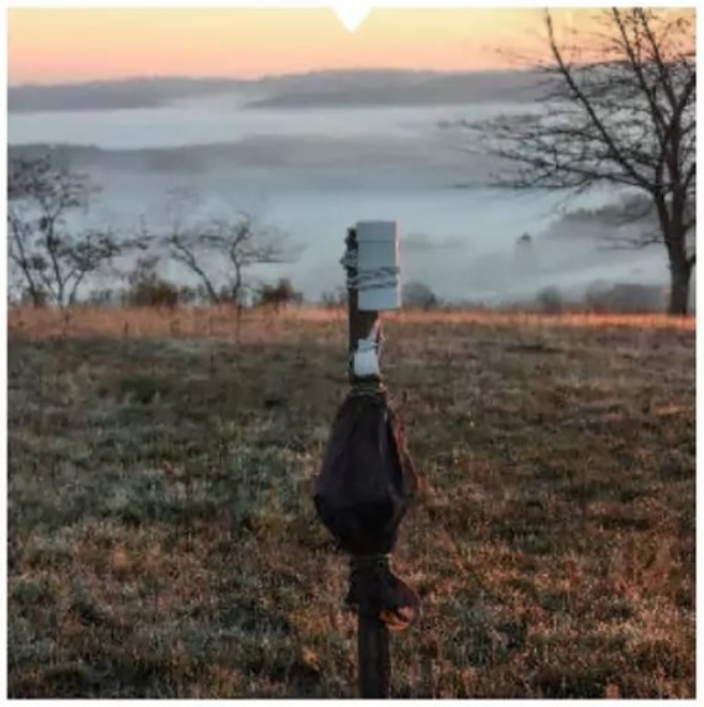
Les 5 réserves de ciel étoilé en France



de réserves, derrière le Royaume-Uni (sept) mais loin devant les États-Unis et l'Allemagne (deux chacune), alors que plus de 120 candidatures internationales ont été jusqu'à présent déposées. « *Et notre pays, particulièrement bien sensibilisé aux enjeux de l'éclairage nocturne, pourrait se hisser d'ici deux à trois ans en tête du podium* », estime Sébastien Vauclair, qui accompagne toutes les candidatures françaises depuis une dizaine d'années.

D'autres parcs régionaux sont en effet dans la course : celui des Monts d'Ardèche, des Pyrénées catalanes et donc aussi du Morvan, très proche d'aboutir depuis les premières démarches en 2018. « *L'idée est venue de la Société astronomique de Bourgogne,* raconte Éric Chariot. *Convaincus que cet espace offrait un accès assez miraculeux au ciel étoilé,*

Des capteurs (ci-dessous) mesurent la pollution lumineuse nocturne pour établir une carte des régions les plus protégées (en bleu, en haut à gauche). Dans le parc du Morvan (à droite), ils ont permis d'établir une zone cœur, protégée par une zone tampon où la luminosité est limitée.



PARC NATUREL RÉGIONAL DU MORVAN

nous avons informé ses responsables de l'existence du label Rice en précisant qu'ils auraient toutes les chances de l'obtenir. »

À cheval sur quatre départements (Côte-d'Or, Nièvre, Saône-et-Loire, Yonne) mais peuplé principalement de bourgs et hameaux sur une superficie de 3 220 km², le parc présentait déjà de très faibles niveaux de pollution lumineuse. « *Les visiteurs viennent parfois d'assez loin pour admirer les étoiles : depuis la région parisienne et toute la moitié nord de la France, mais aussi de la Belgique, la Hollande, etc. Bon nombre y ont observé la Voie lactée pour la première fois de leur vie !* », relève Pascal Pommé, maire de la commune de Chissey-en-Morvan et astronome amateur, élu référent Ciel étoilé au parc du Morvan.

Les critères de Dark Sky International sont toutefois très exigeants. Pour les

satisfaire, les 133 communes du parc ont dû adopter tout une série de mesures. À commencer par la suppression, parmi quelque 6000 points d'éclairage public, des sources totalement inutiles, tels des lampadaires illuminant un champ ou une cour de ferme. L'extinction en cœur de nuit — de 23 heures à 6 heures typiquement — a eu des répercussions beaucoup plus significatives. Alors que 54 % des municipalités la pratiquaient déjà en 2018, elles étaient 94 % ce printemps. « *Dans nos villages, les rues sont quasiment désertes à partir de 21 heures,* justifie Pascal Pommé. *Et ces coupures, au-delà d'une chute drastique des nuisances lumineuses, réduisent d'environ un tiers les factures d'électricité !* » Peu à peu, les communes remplacent aussi les lampes à vapeur métallique, très énergivores, par des diodes électroluminescentes (LED) dont la « température de couleur » n'excède pas 2400 kelvins et qui émettent très peu de lumière bleue, particulièrement nocive pour les animaux. Tout en veillant à ce que les faisceaux soient dirigés vers le sol: « *Tout ce qui éclaire au-dessus de l'horizontale, telles les lampes boules, ne fait rien d'autre qu'engendrer de la pollution lumineuse* », s'insurge l'édile.

CYRIL ENTZMANN/DIVERGENCE

Science et tourisme cohabitent à l'observatoire du pic du Midi (Hautes-Pyrénées).

Ces efforts ont permis d'établir une « zone cœur » de 453 km² où les nuits sont les plus noires. Dans ce havre comprenant 16 communes et où se situe notamment le mont Beuvray, les capteurs de DarkSkyLab attestent que la noirceur du ciel « *ne descend pas au-dessous d'une valeur très proche de celles mesurées dans le désert chilien de l'Atacama* », s'émerveille Emmanuel Clerc. Il est entouré d'une « zone tampon » constituée de 34 municipalités, sur 842 km², où les exigences sont moindres mais qui protègent ce cœur. À des degrés divers, les autres communes du parc sont également impliquées, précise Pascal Pommé: « *Il s'agit en effet d'un véritable projet de territoire : un geste politique visant à préserver le ciel étoilé, la biodiversité, et à favoriser la sobriété énergétique, mais aussi à promouvoir un tourisme durable autour de la nuit.* » Comme le préconise Dark Sky International, diverses structures et animations ont ainsi été mises en place ou sont en développement. Parmi elles : un observatoire à Château-Chinon *(lire l'encadré ci-contre)*, dans la zone tampon, dédié aux sciences participatives ; une quinzaine de spots d'observation équipés de transats et tables d'orientation disséminés dans le parc ; des balades en forêt visant à découvrir les traces, sons ou odeurs de la faune nocturne ; des lectures de contes et légendes locales, etc. Avec toujours la même aspiration, relève Emmanuel Clerc, de « *se reconnecter à la nuit* ». ■

INSTRUMENTS

Un observatoire à Château-Chinon

Capitale du Morvan, Château-Chinon hébergera en 2026 l'un des meilleurs observatoires astronomiques de France. « *La première pierre sera posée d'ici à quelques mois* », se réjouit Éric Chariot, responsable du développement de la Société astronomique de Bourgogne, à l'initiative du projet. Situé dans les hauteurs de la ville, l'observatoire tirera profit d'un ciel nocturne d'une qualité exceptionnelle et des actions menées par le parc du Morvan pour devenir une Réserve internationale de ciel étoilé (Rice). Deux instruments seront mis à disposition du public : un télescope d'un mètre de diamètre (il n'en existe que quelques-uns en France) pour des observations visuelles ; et un appareil automatisé de 500 millimètres de diamètre permettant de suivre, analyser ou photographier des comètes, astéroïdes, étoiles variables, etc. Voué à l'astrotourisme et aux sciences participatives, l'observatoire vise aussi à démontrer qu'une ville comme Château-Chinon (2000 habitants) « *peut abriter des instruments de pointe en luttant efficacement contre la pollution lumineuse* », souligne Éric Chariot.

Dans la soufflerie de l'Institut aérotechnique, à Saint-Cyr-l'École (Yvelines), des mannequins servent aux ingénieurs à tester des solutions pour améliorer l'aérodynamisme des coureurs cyclistes avant leur participation aux JO.

THOMAS SAMSON / AFP

JO : la science au service des athlètes

Les sportifs français de haut niveau qui se préparent pour les jeux Olympiques ont bénéficié d'un investissement inédit pour améliorer leurs performances. Exemples avec la natation, le cyclisme et la boxe.

Doubler le nombre de médailles de la France aux jeux Olympiques 2024 grâce à la science ? C'est l'objectif ambitieux du Programme prioritaire de recherche (PPR) « sport de très haute performance », lancé en 2019 par le Secrétariat général pour l'investissement. Dans ce cadre, 12 projets portés par des consortiums de laboratoires de recherche et des fédérations sportives ont bénéficié d'un total de 20 millions d'euros. Ces moyens inédits s'ajoutent à d'autres financements privés débloqués en vue des Jeux, mais aussi au développement de réseaux de chercheurs. Résultat : des dizaines d'études ont été menées au cours des cinq dernières années pour accompagner les athlètes dans l'amélioration de leurs performances.

À l'Insep (Institut national du sport, de l'expertise et de la performance), centre d'entraînement de nombreux athlètes, ces financements sont notamment visibles autour et dans la piscine, qui a été équipée de capteurs et de caméras. *« Nous récoltons des données très précises des courses des nageurs sur toute la longueur du bassin, ce qui nous donne accès à des connaissances dont nous ne disposions pas jusqu'à présent »*, commente Jean-François Robin, chargé de l'animation du Réseau national pour l'accompagnement scientifique de la performance.

Une équipe de chercheurs s'est ainsi penchée sur la phase de départ des nageurs, de leur saut du plot jusqu'à leur remontée à la surface. *« Nous, on étudie la physique »*, explique l'un d'entre eux, Charlie Prétot, dans une vidéo de la Fédération nationale de natation. Avec ses collègues, il décortique les *« forces qui s'appliquent sur le nageur au cours de la coulée »*. Ils mesurent par exemple l'angle du corps lors de la poussée sur ▸

DISPOSITIF

La réalité virtuelle pour entraîner les boxeurs

Un casque de réalité virtuelle (VR) sur la tête, deux manettes à la place des gants, et le boxeur est plongé sur un ring, face à un adversaire virtuel. « *L'avantage de l'avatar, c'est qu'il a une vraie volonté de toucher, mais le joueur en face ne prend pas de coups* », explique Richard Kulpa, chercheur à l'université Rennes 2, à l'initiative du projet Revea, l'un des 12 projets du Programme prioritaire de recherche (PPR). « *Ce dispositif permet de préserver l'intégrité physique des boxeurs, en continuant à les entraîner à la défense et à la contre-attaque, sans risque de blessure, ou même lorsqu'ils sont blessés* », complète Chloé Desenne, secrétaire du pôle France Insep pour la Fédération française de boxe. L'entraîneur peut choisir la morphologie de l'avatar. « *Si demain on a un combat contre quelqu'un de plutôt petit et gaucher, je peux sélectionner un avatar qui a les mêmes caractéristiques, et mieux préparer mon boxeur* », détaille Bakary Diabira, entraîneur de l'équipe de France. Sur un écran, il a accès à différentes données : nombre de coups encaissés, nombre de contre-attaques réussies, endroit et direction de l'impact… Il peut ainsi adapter les séances en fonction des lacunes de son boxeur. « *On extrait des statistiques afin de voir à quel point ces entraînements ont un effet sur le ring* », décrit Richard Kulpa, dont les équipes cherchent également à créer des avatars à partir de vidéos captées en compétition, pour que les boxeurs puissent, à l'avenir, s'entraîner réellement — mais en VR — face à leur futur adversaire.

M2S LABORATORY

Le projet Revea permet aux boxeurs de perfectionner la défense et la contre-attaque sans risque de blessure.

▶ le plot, modélisent les forces de traînée qui s'appliquent sur lui lorsqu'il est dans l'eau… « *Cela nous permet de déterminer ce qui le freine ou le propulse, et à quel moment* », décrit Charlie Prétot. Ces données aident à représenter précisément la technique du nageur et à déterminer comment l'optimiser : doit-il effectuer une coulée ? combien de temps doit-il rester sous l'eau ? Les conclusions laissent à penser qu'« *il n'y a pas de trajectoire idéale, mais une trajectoire qui correspond à un nageur donné* », affirme le chercheur. Si un athlète va plus vite en ondulant sous l'eau qu'en nageant à la surface, il sera préférable pour lui d'utiliser les 15 mètres de coulée autorisés. « *Mais s'il est peu performant en ondulation, sa trajectoire optimale sera de remonter à la surface le plus rapidement possible* », détaille Charlie Prétot.

Une aide à la décision pour les entraîneurs

Ce projet, baptisé Neptune, n'est qu'une des nombreuses illustrations de la manière dont la science contribue à l'optimisation de l'entraînement. « *Est-ce qu'on pourrait faire sans la science ? Oui. Mais est-ce qu'on ferait aussi bien ? Clairement, non* », avance Emmanuel Brunet, manager en charge de la performance à la Fédération française de cyclisme. *Même si un entraîneur a une forte culture scientifique, il serait limité sans l'aide des chercheurs, car l'accompagnement scientifique des athlètes implique un tsunami de données, qu'il faut analyser, et que les entraîneurs peuvent ensuite utiliser. Les scientifiques apportent donc une aide à la décision, mais l'entraîneur reste le maître à bord.* »

Comme la trajectoire de départ des nageurs, d'autres chercheurs ont ainsi étudié l'« effet drafting », qui permet à un cycliste de dépenser moins d'énergie lorsqu'il est dans le sillage d'un autre. « *Les questions des athlètes et des entraîneurs tournaient autour du placement idéal entre les cyclistes* », rapporte Emmanuel Brunet. Quelle est la distance idéale entre eux ? Doivent-ils être décalés latéralement ? Là encore, la solution, apportée par un capteur placé sur le pédalier et des calculs croisant physique, mathématiques, ou encore aérodynamisme, est propre aux caractéristiques de chaque cycliste, donc de chaque équipe.

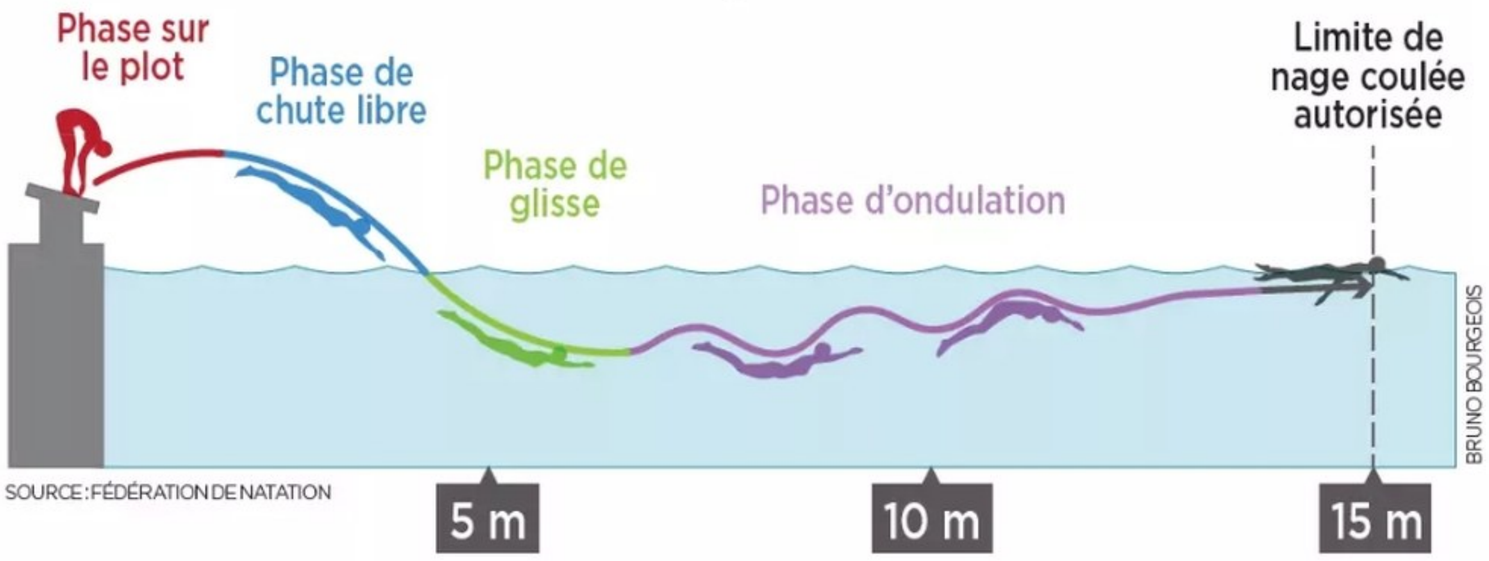
P. PICHON : FFC

« Est-ce qu'on pourrait faire sans la science ? Oui. Mais est-ce qu'on ferait aussi bien ? Clairement, non »

Emmanuel Brunet, manager en charge de la performance à la Fédération française de cyclisme

SÉBASTIEN BOUE/PRESSSESPORTS

Les capteurs installés dans la piscine de l'Insep, à Paris, enregistrent les trajectoires de départ des nageurs de l'équipe de France. Des données qui permettent de personnaliser les phases de nage sous-marine jusqu'à la limite des 15 mètres.



SOURCE : FÉDÉRATION DE NATATION

BRUNO BOURGEOIS

Les projets menés font ainsi interagir de très nombreuses disciplines — bien que les sciences humaines restent sous-représentées. Toutes sont mises au service de sports eux aussi variés. Mieux programmer des entraînements en hypoxie pour les cyclistes ou les judokas, combattre contre un avatar virtuel en boxe *(lire l'encadré p. 64)*, concevoir les meilleures lames pour les athlètes paralympiques… La liste est longue. Jamais la science et le sport n'avaient autant collaboré en France jusqu'à présent.

La recherche implique des contraintes qui ne sont pas toujours compatibles avec le haut niveau. *« Le temps du chercheur, qui est d'environ trois ans, voire plus, est différent de celui de l'entraîneur, qui veut des résultats pour la compétition du week-end prochain »*, expose Jean-François Robin. *Le scientifique doit également se greffer au planning extrêmement chargé de l'athlète, sans gêner son entraînement.* » Or, équiper un sportif pour effectuer des mesures peut parfois être contraignant. *« Il faut trouver les capteurs les moins invasifs possibles,* estime Jean-François Robin. *En ce sens, les recherches autour des Jeux ont créé une dynamique visant à favoriser les capteurs externes.* » Concrètement, un cycliste ou un coureur n'effectuera pas la même performance s'il doit transporter un sac à dos pour que soient enregistrées sa vitesse, sa fréquence cardiaque ou sa puissance, ou si ces données sont captées grâce à des caméras le long de la piste.

Bien qu'il soit impossible de dire si tous les projets lancés en vue des Jeux apporteront les résultats escomptés, un nouvel horizon s'ouvre aux entraîneurs. Guy Ontanon, manager performance en athlétisme à la Fédération française de handisport, prend l'exemple de la « 1080 ». Cette machine déjà ancienne permet de faire travailler l'athlète en résistance, en le faisant courir alors qu'il est retenu par un fil le reliant à des poids. *« Avant, on utilisait cet équipement de manière empirique.* » Concrètement, en augmentant ou diminuant la pression selon des observations à l'œil nu des lacunes des athlètes. *« En recueillant des données, les chercheurs ont pu construire un modèle d'exploitation de cet outil »*, poursuit l'entraîneur. En fonction des faiblesses de son coureur, objectivement évaluées, le coach peut désormais ajuster ses séances d'entraînement pour améliorer la vitesse de tel athlète ; il réglera par exemple la machine sur tel degré de résistance.

Des recherches qui mériteraient d'être poursuivies après les JO

En voyant l'investissement fait sur les athlètes, Vincent Nougier, ancien directeur du groupement de recherche (GDR) sport lancé par le CNRS, structure pilote du PPR Sport, regrette néanmoins que *« 20 millions d'euros aient été mis sur la table pour quelques centaines d'athlètes, mais pas un centime pour les quelque 65 millions de Français, alors que les indicateurs de santé en matière d'activité physique sont dramatiques »*. En outre, chercheurs et référents scientifiques des fédérations craignent que l'« effet JO » retombe, et que les financements s'arrêtent après les Jeux. Or, la plupart des recherches mériteraient de se poursuivre, car au-delà d'améliorer la performance des athlètes, elles contribuent à enrichir l'état de la science fondamentale, ce qui pourrait permettre des transferts dans la vie civile (santé, nutrition, activité physique adaptée…) Mais la priorité semble rester très pragmatique : rapporter des médailles cet été. ■

Camille Jourdan

ANTOINE MOREAU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR

Identifier les textes artificiels, un impératif

Les intelligences artificielles sont devenues si performantes dans l'écriture qu'il devient compliqué d'identifier les textes qui ne sont pas écrits par des humains. La loi européenne exige la transparence, mais les solutions techniques manquent.

« *Veuillez noter qu'en tant que modèle d'intelligence artificielle de langage, je suis incapable de générer des tableaux spécifiques ou de mener des tests.* » Étrange phrase relevée dans un article de trois chercheurs portant sur le commerce électronique appliqué aux énergies fossiles et paru dans la revue *Resources Policy* en 2023. Son véritable auteur est ChatGPT. Depuis l'arrivée de l'agent conversationnel à l'automne 2022, ce genre de scorie pullule dans les publications scientifiques. L'enseignant-chercheur en informatique Guillaume Cabanac, de l'université Toulouse-III Paul-Sabatier, est un spécialiste de leur détection. Avec plusieurs collègues, il utilise un logiciel, Problematic Paper Screener, conçu pour passer au crible les articles de recherche et relever automatiquement des formules douteuses. Comme *« Nos connaissances s'arrêtant en septembre 2021… »*, qui est la manière dont un modèle de langage signale la date de ses données d'entraînement la plus récente. *« "En tant que modèle de langue, je n'ai pas le droit de faire ceci, de faire cela" est un autre marqueur chez différents*

5%
du roman de science-fiction japonais *Tokyo-to Dojo-to* a été écrit par ChatGPT. Son auteur l'a admis quelques jours après avoir reçu un prix, début 2024.

GLEB KALININ

> « La recherche sur les watermarks dans les vidéos ou les images existe depuis plus d'une dizaine d'années, mais c'est très récent pour le texte »
> **Alexei Grinbaum,** directeur de recherche au CEA, à Saclay

éditeurs et auteurs », ajoute Guillaume Cabanac. Des formules telles « *Bien sûr ! Voici un exemple simplifié…* » ou « *Je vous propose une version reformulée du texte* » sont typiques d'IA génératives que les auteurs ont recopiées sans se relire. La mention « *regenerate response* », elle, correspond à une fonction de ChatGPT. Toutes ces expressions sont ensuite publiées sur la plateforme PubPeer où les auteurs peuvent s'expliquer. Il ne s'agit pas de dénigrer l'usage des modèles de langage mais d'inciter à la transparence. « *Dans un article sur le potentiel des télécommunications sans fil 6G et 7G paru en 2023, les auteurs ont fait un copier-coller de ce qu'a fourni ChatGPT sur le sujet. Et on ignore s'ils ont vérifié cette réponse* », pointe Guillaume Cabanac. Cet enjeu d'éthique dépasse bien sûr le seul cadre des publications scientifiques. La loi sur l'IA (AI Act), votée mi-mars par le Parlement européen, exige que les contenus artificiels soient marqués numériquement, afin qu'ils puissent être distingués d'un contenu authentique. C'est la technique dite du watermarking, soit l'insertion d'un filigrane.

POUR EN SAVOIR PLUS

État des lieux de la détection de contenus artificiels sur le site de la Cnil : **sciav.fr/929cnil**

« *Cela ne concerne pas seulement le texte, mais toutes sortes de contenus,* note Alexei Grinbaum, directeur de recherche au CEA, à Saclay (Essonne). *Or, si la recherche sur les watermarks dans les vidéos ou dans les images existe depuis plus d'une dizaine d'années, c'est très récent pour le texte et il existe nombre de limites.* » Des acteurs majeurs de l'IA générative (Google, Microsoft, Adobe…) se sont fédérés autour d'un standard de marquage, qui n'est pas tout à fait du watermarking. « *Leur solution consiste plutôt à associer une métadonnée à l'image ou au texte généré,* explique Alexis Léautier, ingénieur IA à la Commission nationale de l'informatique et des libertés (Cnil). *Elle pourrait donc être retirée après coup par un utilisateur malveillant ou peu rigoureux.* »

Un watermark, lui, est généré automatiquement en même temps que le contenu, en utilisant les données de ce dernier. Pour une image, la couleur et la répartition des pixels seront légèrement manipulées. Ce sera invisible à l'œil nu, mais un outil de détection *ad hoc* pourra le repérer et déterminer que l'image vient d'une IA.

On ne peut jouer que sur les caractères ou les mots

Or, un texte offre peu de marges de manœuvre : on ne peut jouer que sur les caractères et les mots. « *On peut imaginer qu'un texte généré artificiellement sélectionne certains mots dans une liste prédéfinie. Mais pour que ce soit vraiment robuste, ces mots doivent être très spécifiques et le marquage devient évident ; le texte risque même de perdre son sens initial* », note Alexis Léautier. Une solution avancée par une équipe de l'université du Maryland (États-Unis) en janvier 2023 priorise la sélection de certains mots ou suites de caractères (« tokens ») qui sont générés. Mais la manière de produire ce watermark n'est pas interopérable : elle doit être paramétrée différemment pour chaque modèle, chacun ayant ses propres règles de génération de mots. Et des recherches récentes ont montré que la robustesse de cette technique pouvait être contournée en paraphrasant un document généré. ■

Arnaud Devillard

LE MOT DU MOIS

Loi sur l'IA (AI Act)

Le 13 mars, le Parlement européen a voté la première loi européenne entièrement dédiée à l'intelligence artificielle. Il s'agit de placer des garde-fous, dans un contexte marqué par l'essor de l'IA générative et ses potentielles dérives, même si le texte concerne l'IA en général. Cette loi sur l'IA introduit la notion d'usage « à haut risque », c'est-à-dire potentiellement néfaste pour les droits fondamentaux (en matière d'emploi, de maintien de l'ordre, d'infrastructures critiques, de dispositifs médicaux…). Les outils concernés devront être évalués avant d'être déployés. L'article 52 impose de la transparence en matière d'IA générative, pour éviter toute confusion entre un contenu artificiel et authentique. Les types de marquage possibles sont détaillés : filigranes, métadonnées, cryptographie.

VINCENT M. / BIOSPHOTO

Haies

Le renouveau des paysages ruraux

Bien que protégées depuis 2015, les haies continuent de disparaître. Leur rôle agronomique et écologique semble désormais reconnu, mais pour nombre d'agriculteurs, elles sont des nids d'infections pour les cultures, des obstacles pour les tracteurs et entraînent un surcroît de travail. Un ambitieux plan d'action gouvernemental vise à inverser la tendance.

Par Loïc Chauveau

Mobilisation générale ! Avec son plan d'action publié en février, le gouvernement français ambitionne un véritable retournement d'une tendance ancrée depuis plus de soixante-dix ans : la destruction des haies. D'ici à la fin de la décennie, les pouvoirs publics visent un gain net de 50 000 kilomètres de linéaires d'arbres, d'arbustes et de buissons, alors qu'actuellement, plus de 23 000 kilomètres disparaissent tous les ans. La mesure fait consensus, sauf chez les agriculteurs. Parce qu'ils sont les premiers concernés. Pour une grande partie d'entre eux, les haies sont des nids d'infections pour leurs cultures, un surcroît de travail et des obstacles pour leurs tracteurs. Ce qui explique que, bien que protégées depuis 2015, les haies ont continué à disparaître.

Qu'est-ce qu'une haie ? Pour la Base de données topographique (BD Topo) de l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), c'est une formation linéaire comportant des arbres, arbustes ou arbrisseaux sur au moins 25 mètres de long, sans interruption de plus de 20 m, sur une largeur inférieure à 20 m, pour une hauteur d'au moins 1,30 m. Le *Larousse* précise qu'elle marque la limite entre deux parcelles ou deux propriétés. Là réside le nœud du problème : les parcelles sont de plus en plus grandes et les exploitations agricoles de moins en moins nombreuses. « *Depuis la révolution agricole des années 1950, les fermes se sont spécialisées, ce qui a permis de compenser la baisse des prix par des rendements accrus,* explique Sylvain Doublet, ingénieur dans le cabinet spécialisé Solagro. *Il a donc fallu mécaniser, et pour cela, ôter les obstacles devant les machines, en premier lieu les haies.* »

▲ **Plus de 23 000 km de haies** sont arrachées chaque année en France. 70 % des haies ont ainsi disparu depuis 1945, pour regrouper des parcelles ou favoriser la mécanisation.

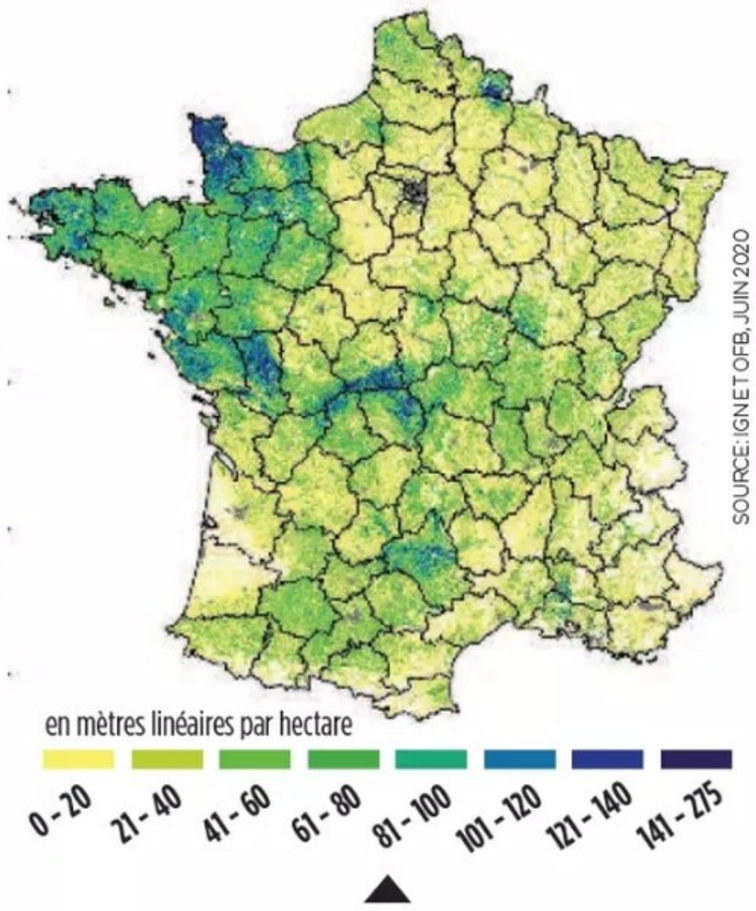
Le déclin de l'élevage à l'herbe en grande partie responsable de l'arrachage

Par ailleurs, l'arrivée du gaz et du fioul dans les fermes a diminué l'intérêt pour les arbres, puisque les agriculteurs et éleveurs n'ont plus eu besoin de produire leur bois de chauffe. Les troupeaux de plus en plus importants restent, eux, davantage à l'étable, en particulier avec l'installation de robots de traite. La régression de l'élevage à l'herbe est ainsi en grande partie responsable de l'arrachage des haies. Cette évolution a toutes les raisons de s'accentuer. ▶

Agroforesterie

« *Aujourd'hui, les arbres souffrent souvent d'une image désuète, tandis qu'une agriculture plus technologique se développe, là encore complexifiée par la présence d'arbres : pilotage automatique des engins agricoles, surveillance des cultures par drones et satellites, etc.* », notent ainsi les auteurs du rapport « La haie, levier de la planification écologique », produit par le Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux (CGAAER) en avril 2023.

Depuis les épisodes de remembrements apparus à partir de 1945, 70 % des haies présentes au début du XXe siècle auraient disparu, soit 1,4 million de kilomètres, selon le CGAAER. Pour l'Association française de l'agroforesterie (Afac) et Solagro, la perte annuelle moyenne de 10 400 km par an entre 2006 et 2014 est donc passée à 23 571 km par an entre 2017 à 2021, malgré une politique de plantation d'environ 3000 km par an. Ces chiffres sont néanmoins à prendre avec des pincettes, les enquêtes de terrain et les exploitations des images prises par survol aérien ne suivant pas les mêmes protocoles d'interprétation et n'ayant pas les mêmes dates de référence. Selon



SOURCE : IGN ET OFB, JUIN 2020

La densité des haies par hectare met en évidence une plus forte concentration de bocages dans l'ouest de l'Hexagone.

le rapport du CGAAER, la France « *ne dispose toujours pas d'un outil consolidé de suivi quantitatif et qualitatif des haies. Toutefois, on dispose de suffisamment d'informations pour affirmer que les linéaires régressent, que l'état est très hétérogène et globalement médiocre* ». Et ce, alors qu'elles sont officiellement protégées par la politique agricole commune (PAC) depuis 2015.

YOAN JÄGER-STHUL / DIVERGENCE

Des collectifs citoyens se sont créés dans différentes régions afin de réimplanter des haies sur des terres agricoles (ici à Dolus-le-Sec, en Indre-et-Loire).

Si les haies sont désormais protégées, c'est parce que leur rôle agronomique et écologique est à présent reconnu. « *Cependant, il faut reconnaître que nous avons encore beaucoup de choses à étudier concernant leur impact sur l'eau, le captage et le piégeage des nitrates et des pesticides, la lutte contre l'érosion des sols, le stockage de carbone, le maintien de la biodiversité et leur rôle contre les ravageurs des cultures, tous ces avantages que l'on attribue désormais aux haies* », pondère Valérie Viaud, chercheuse à l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae).

Un fort potentiel de stockage de carbone dans les sols

Il faut dire que l'objet d'étude est complexe. Une haie, ce sont des essences diverses poussant sur des sols très différents et ayant un impact difficile à quantifier sur le microclimat qu'elle crée. Ainsi, l'Inrae de Rennes a mené un suivi des précipitations au niveau de haies composées de chênes émondés qui a permis de découvrir que 28 % des 720 millimètres d'eau annuels étaient bien détournés du sol par ces arbres en feuilles. De plus, les arbres isolés prélèvent beaucoup plus d'eau dans le sol que ceux de forêt, soit de 5 à 6 mm par jour en été, ce qui pourrait pénaliser les cultures. Mais leurs racines vont chercher la ressource bien plus profondément et ont même un rôle rafraîchissant pour les sols superficiels lors des fortes chaleurs. L'unité de recherche Sol, agro et hydrosystème, spatialisation (Inrae, Institut Agro de Rennes) a pu déterminer que les haies avaient un fort potentiel de stockage de carbone dans les sols et un effet important de dénitrification des engrais chimiques, empêchant ainsi que le nitrate ne parte dans les rivières.

Au domaine expérimental de Restinclières, dans l'Hérault, où l'influence de l'arbre sur les cultures est étudiée depuis des décennies, les chercheurs de l'Inrae ont démontré le rôle de l'ombre

des arbres sur des cultures de pois ainsi moins touchées par la chaleur. Et s'il y a un rôle positif qui n'est pas discuté tant les impacts sont évidents, c'est celui de l'érosion des sols. Toutes les communes victimes d'inondations savent bien que les boues devant être expulsées des maisons proviennent de champs trop vastes où les sols ne sont plus protégés contre des pluies de plus en plus violentes.

Adapter les plantations à l'échelle de la parcelle

Ce manque de données s'est avéré pénalisant quand la politique agricole commune couvrant la période 2013-2020 a décidé d'instaurer une incitation financière à la préservation des haies *(lire l'encadré p. 72)*. Pour convaincre les agriculteurs de préserver leurs linéaires et d'en créer d'autres, il faut en effet des arguments. « *Quand un agriculteur nous appelle, c'est qu'il a un problème avec une terre dont les rendements baissent,* raconte Yves Gabory, expert en système agroforestier au sein de l'association Mission bocages, qui travaille dans le Maine-et-Loire. *Il faut alors qu'il nous raconte précisément ses rotations de culture, la qualité de sa terre, drainante ou pas, les orientations des champs, afin de pouvoir dire précisément ce que va apporter la haie, car l'agriculteur la perçoit souvent comme une charge nette directe liée à la plantation et à l'entretien, sans en voir les bénéfices.* » C'est pour cela qu'un plan global avec un objectif à 2030 laisse sceptiques les professionnels. « *L'emplacement, le choix des essences, l'orientation, tout cela se fait à l'échelle de la parcelle,* poursuit Yves Gabory. *Si les plantations ne sont pas adaptées à l'exploitation, il y aura des pertes et donc de l'argent public gaspillé.* »

L'installation comprend en effet la conception par des forestiers spécialistes, les travaux préparatoires du sol, l'achat des plants, la plantation, le paillage, la protection, l'entretien des premières années et les replantations quand des arbres et arbustes n'ont pas réussi à pousser. Les fourchettes de coûts sont très variables. Le barème utilisé pour la mesure « Plantons des haies » du plan de relance 2030, instauré par le gouvernement après la pandémie de Covid-19, indique, pour une haie à un rang, un montant d'environ 8 euros hors taxes par mètre linéaire sans conception ni suivi. Le dispositif régional mis en place en Occitanie atteint 14 euros par mètre linéaire mais avec conception et suivi. L'entretien comprend en général le temps de travail, le coût des matériels et de l'énergie. L'entretien régulier d'un kilomètre de haies arbustives représenterait environ 450 euros par an.

Mais il y a des bénéfices directs possibles. Les haies peuvent être productives. Noisetiers et noyers ainsi que quelques arbres fruitiers peuvent s'insérer dans les alignements. Et le retour de la biomasse comme source de cha- ▸

YVES GABORY

« L'agriculteur perçoit souvent la haie comme une charge liée à la plantation et à l'entretien, sans en voir les bénéfices »

Yves Gabory, expert en système agroforestier au sein de l'association Mission bocages

ÉCOLOGIE

La lutte contre les adventices

Les haies propagent-elles les « mauvaises herbes », ces adventices qui s'installent au milieu des cultures et leur font concurrence? Nombre d'agriculteurs l'affirment et justifient ainsi le recours aux herbicides. Pour le vérifier, les chercheurs de l'Inrae de Rennes ont comparé les plantes sauvages dans 74 champs cultivés situés dans des paysages ouverts sans arbres et des bocages comportant un réseau dense et complexe de haies, dans le sud du département de l'Ille-et-Vilaine. Ils ont pris soin de distinguer, parmi les cultures, le bio du conventionnel. En caractérisant les préférences écologiques des plantes et leur association aux habitats cultivés et semi-naturels, ils ont pu tester les hypothèses de dispersion depuis les haies. « *Nous avons ainsi démontré que les champs situés dans les paysages bocagers abritent une flore adventice plus diversifiée mais pas plus abondante, et ce indépendamment du mode de production, conventionnel ou bio* », expose Sébastien Boinot, l'un des auteurs de l'étude publiée dans *Journal of Applied Ecology* en décembre 2022. Les chercheurs expliquent que les adventices sont en réalité adaptées aux perturbations agricoles, et prolifèrent donc dans les champs cultivés. En revanche, elles sont moins aptes à se développer dans les haies, où s'établit une végétation plus pérenne.

JL KLEIN & ML. HUBERT / NATURAGENCY

L'ombre apportée par les haies permet au bétail de mieux de supporter les températures de plus en plus élevées au cours de l'été, qui ont pour conséquence une moindre production de lait.

leur et acteur de la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre implique une augmentation de la demande en bois. Selon le rapport du CGAAER, une haie peut produire 10 tonnes de bois vert aux 100 mètres partout en France, mais dans des laps de temps variables (de dix à trente ans) selon les conditions pédoclimatiques. La haie peut également fournir des plaquettes pour la litière des animaux, venant en substitution de la paille avec des avantages financiers et techniques notables, comme l'a montré le programme « L'arbre dans les exploitations d'élevage herbivore » (Arbele). Ce programme a également confirmé l'intérêt de procurer de l'ombre à des animaux qui souffrent de températures estivales de plus en plus élevées, avec pour conséquence une diminution de la production de lait.

Les céréaliers des grandes plaines n'en veulent pas

La haie est donc un sujet de recherche devenu central pour la mutation d'une agriculture voulant se réconcilier avec son environnement. Malgré de nombreux manques, les travaux scientifiques commencent à cerner son rôle écologique. Mais avec 1500 rencontres avec des agriculteurs et trente ans d'expérience dans l'agroforesterie, Yves Gabory a pleinement conscience de l'ampleur et de la difficulté de la tâche. Si le paysage bocager de l'après-Seconde Guerre mondiale n'est plus qu'un souvenir, il sera difficile, sur l'ensemble du territoire, de redonner aux linéaires arborés toute leur importante agronomique. Ainsi, selon les témoignages recueillis par le CGAAER, les céréaliers des grandes plaines comme la Beauce estiment que la haie n'y a pas sa place. « *Un grand nombre des avantages des haies sont avérés scientifiquement, mais ces oppositions montrent qu'il reste à les adapter et les ajuster aux situations réelles des exploitations,* prévient Yves Gabory. *Cela passe par des tests, des essais* in situ, *un suivi et une évaluation pour répondre à toutes les exigences des agriculteurs en matière d'adaptation de la mécanisation, de temps passé, de charge de travail, d'avantages économiques.* » Pour ce faire, l'expert en agroforesterie vient de fonder Arbor et science, une association dont le but est de mettre en réseau toutes les réalisations disséminées sur les territoires et qui peuvent servir d'exemples. En milieu rural, toutes les techniques nouvelles se sont imposées ainsi, par le coup d'œil jeté sur les initiatives du voisin. Par-dessus la haie. ■

RÉGLEMENTATION

Une obligation de protection des haies non respectée

En 2013, la PAC a instauré la Bonne condition agricole et environnementale n° 7 (BCAE 7), qui stipule que tous les exploitants agricoles demandeurs d'une aide de la PAC ne doivent plus arracher de haies. Cette réforme a également permis aux haies d'être incluses dans les surfaces admissibles aux aides calculées sur la surface cultivée et d'être classées comme d'intérêt écologique ouvrant à des aides environnementales. Mais, bizarrement, elles ont aussi été classées comme « surfaces non agricoles ». Nombre d'agriculteurs n'ont pas compris ces distinctions et, pour éviter les calculs byzantins, ont décidé de les arracher avant l'entrée en vigueur de la PAC en 2015. En France, l'interdiction n'a par ailleurs pas été contrôlée. En moyenne, sur la période 2015-2019, 3437 exploitations ont été visitées chaque année au titre de la BCAE 7, et 70 ont été sanctionnées.

CA FAIT
DU BIEN DE
TOURNER
LA PAGE
INFORMER. DIVERTIR. APPROFONDIR.
PRIX RELAY-SEPM DES MAGAZINES DE L'ANNÉE 2024
RELAY
sepm
SYNDICAT DES ÉDITEURS DE LA PRESSE MAGAZINE
LES MAGAZINES DE L'ANNÉE 2024
Découvrez chez RELAY les magazines de l'année.
Madame Bovary

Les superpouvoirs du bourdon

Le plus bonhomme des apidés cache bien son jeu. Sous des airs débonnaires, les bourdons recèlent des compétences impressionnantes que la recherche commence à découvrir. Démonstration.

Il tient tête au frelon asiatique

Sur 125 attaques de frelons asiatiques contre des bourdons enregistrées en vingt-sept jours, des entomologistes britanniques ont compté 125 échecs ! Aussitôt agrippés par les frelons, les bourdons se jettent en direction du sol, entraînant leur prédateur avec eux. Si celui-ci lâche, le bourdon reprend son vol et s'enfuit vers son nid. Si le frelon tient bon, le bourdon tombe le dos au sol, le dard pointé vers son agresseur. Celui-ci est contraint à l'abandon. La stratégie victorieuse du bourdon *Bombus terrestris* a été découverte en 2023 à l'université d'Exeter (Royaume-Uni). Néanmoins, la présence du frelon réduit le poids des colonies de bourdon, qui, déjà, ne rassemblent pas plus de 40 à 400 insectes (contre 40 000 chez les abeilles à miel). « *Leur harcèlement constant peut entraver la recherche de nourriture, diminuer la collecte de nectar et de pollen et donc ralentir la croissance de la colonie* », suggère Thomas O'Shea-Wheller, qui a mené cette étude.

Sa reine respire sous l'eau

C'est lors d'un accident de laboratoire qu'une chercheuse canadienne, Sabrina Rondeau, a découvert que chez les bourdons *Bombus impatiens*, l'espèce commune d'Amérique du Nord, la reine est capable de respirer sous l'eau. Un jour de 2021, de la condensation s'était formée dans le réfrigérateur où elle entreposait ses reines hibernantes. « *Je suis venue voir mes abeilles et j'ai découvert que certains tubes étaient complètement remplis d'eau,* raconte Sabrina Rondeau, désormais à l'université d'Ottawa. *J'ai cru qu'elles étaient toutes mortes.* » Mais après avoir délicatement sorti ses reines de la terre détrempée, celles-ci se sont mises à bouger. Elle a reproduit l'expérience, volontairement cette fois, et a découvert que les reines en dormance survivent sept jours sous l'eau. « *Le mécanisme n'est pas connu. Mais les besoins en oxygène sont grandement réduits lors de l'hibernation ; elles survivent donc peut-être grâce à l'air présent dans leur système respiratoire* », imagine Sabrina Rondeau. Cette capacité est exceptionnelle : les entomologistes connaissent des sauterelles ou

MICHEL GUNTHER/BIOSPHOTO

des cicadelles dont les œufs résistent à l'inondation, des scarabées dont les jeunes pupes peuvent passer plusieurs mois sous l'eau, mais pour des adultes, c'est inédit.

Il est capable d'apprentissage complexe

Selon une équipe de l'université londonienne Queen-Mary (Royaume-Uni), les bourdons feraient de l'apprentissage cumulatif : ils innovent en partant des connaissances d'un autre individu. Jusqu'à présent, en dehors des humains, cette capacité n'avait été démontrée que chez les chimpanzés — et très récemment… Les chercheurs ont confronté les bourdons à un puzzle compliqué dans lequel les insectes devaient déplacer une languette bleue pour libérer une deuxième languette, rouge cette fois, laquelle obstruait l'accès à de l'eau sucrée, la récompense. Laissés seuls avec le puzzle, les bourdons n'arrivaient pas à réaliser la séquence d'actions qui permettait de boire l'eau sucrée. Mais après que les chercheurs ont dressé un groupe de neuf bourdons à déplacer la languette bleue, cinq ont résolu le puzzle entier. Il leur suffisait d'apprendre, par observation, à déplacer la première languette, pour comprendre comment bouger la seconde et enfin accéder à la récompense. Cette démonstration reste néanmoins à confirmer car l'étude n'a été conduite que sur cinq bourdons.

On sait d'ailleurs que les bourdons sont des apprenants très efficaces, comme l'illustre la propagation rapide de la technique des « voleurs de nectar ». Au lieu de récupérer le liquide sucré par l'entrée de la fleur, assurant ainsi la pollinisation, les bourdons sucent parfois le nectar en effectuant un trou à la base des fleurs. *« Quand dans un jardin on voit une fleur trouée, rapidement toutes les fleurs le sont aussi. Car quand un bourdon découvre cette stratégie, tous les autres l'apprennent par observation »*, raconte Mathieu Lihoreau, spécialiste de l'intelligence des insectes au CNRS. Et comme seules les reines survivent à l'hiver, cette technique semble redécouverte chaque année…

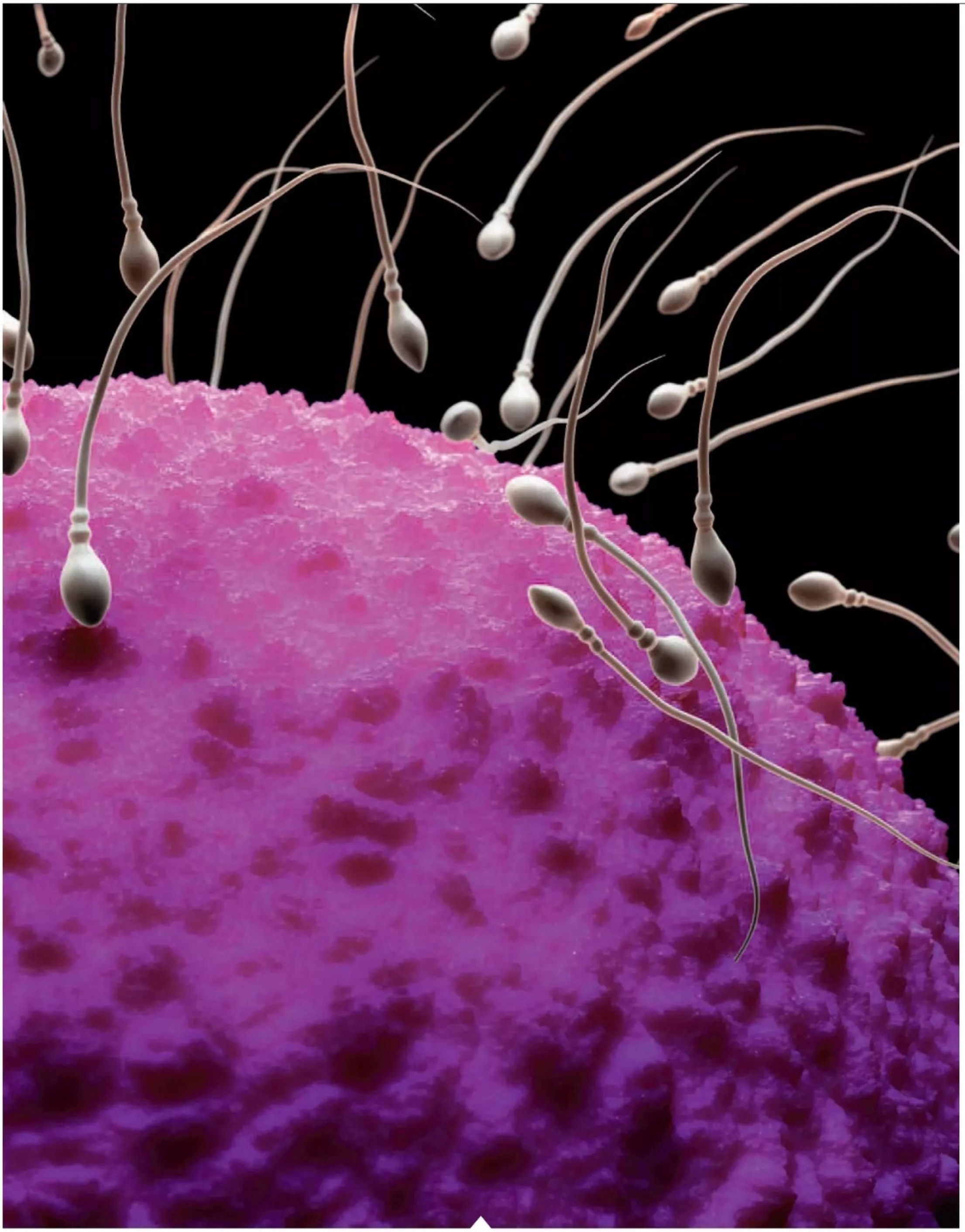
Il se dépense sans compter pour le groupe

Entre plusieurs fleurs, les bourdons choisissent la plus facile à atteindre, sauf si une autre contient beaucoup plus de sucre. C'est ce que des entomologistes de l'université de Cambridge (Royaume-Uni) ont découvert l'année dernière. *« Les bourdons ont un mode de vie différent de celui des abeilles domestiques : ils ne stockent qu'une petite quantité de nectar dans le nid et doivent profiter de toutes les occasions de butiner,* explique Jonathan Pattrick, actuellement à l'université d'Oxford, qui a conduit cette étude. *Ils adoptent donc une stratégie qui profite immédiatement à la colonie, quand bien même ils doivent travailler plus dur. Les abeilles mellifères œuvrent moins, ce qui prolonge leur durée de vie.* » Une découverte qui pourrait aider les agriculteurs à optimiser leurs cultures selon la localisation des colonies d'insectes.

Il vole malgré ses petites ailes

« Tout d'abord poussé par ce qui se fait en aviation, j'ai appliqué aux insectes les lois de la résistance de l'air, et je suis arrivé avec [mon assistant] André Sainte-Laguë à cette conclusion que leur vol est impossible. » Voici ce qu'écrivait l'entomologiste français Antoine Magnan en 1934 dans son essai *Le Vol des insectes*. De quoi attiser la curiosité des scientifiques, dont le pionnier de l'aéronautique Igor Sikorsky… Depuis, nombreux furent ceux qui cherchèrent à élucider ce mystère. La réponse définitive a été apportée au début des années 2000 par les travaux de l'Américain Michael Dickinson. En capturant le vol des bourdons avec une caméra ultrarapide, il a montré que ce mystère aérodynamique repose sur un mouvement rotatif complexe. Ces abeilles ne battent pas leurs ailes de haut en bas mais d'avant en arrière, en inclinant légèrement leur voilure. Cet angle leur assure une grande portance en produisant un tourbillon derrière elles. ■

Agnès Vernet



SPL/ SUCRÉ SALÉ

Un rapport rendu en 2023 au ministère de la Santé a établi que 3,3 millions de personnes sont touchées par l'infertilité en France. Parmi les causes, la concentration de spermatozoïdes dans la semence masculine a été divisée par deux en 45 ans.

Des thérapies innovantes contre l'infertilité

La naissance d'un enfant est le fruit d'un enchaînement de mécanismes complexes : production de gamètes, fécondation, implantation de l'embryon… Il suffit que l'un d'entre eux soit altéré pour conduire à une infertilité. L'espoir repose sur la thérapie génique, cellulaire, ou encore les organes artificiels.

Par Cécile Coumau

« *Le renouvellement de l'espèce humaine n'est pas assuré. Je l'avais bien dit…* », souffle le Pr Samir Hamamah. Une large étude, parue en mars dans *The Lancet*, donne raison au chef du service de biologie de la reproduction du CHU de Montpellier. En 2050, trois quarts des pays auront un taux de fécondité insuffisant pour maintenir le renouvellement des générations. « *On m'a reproché d'être alarmiste, mais il y a bien le feu à la maison* », s'emporte le spécialiste. L'une des raisons de ce déclin de la natalité n'est autre que l'infertilité. Une personne sur six dans le monde est concernée. En avril 2023, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) avait déclaré qu'il s'agissait « *d'un problème sanitaire majeur dans tous les pays du monde* ». Message reçu en France puisqu'Emmanuel Macron a annoncé le 16 janvier un « *grand plan* » pour lutter contre « *le fléau de l'infertilité* ». Au-delà des mesures sociétales, tels les jours de congé pour les couples qui ont recours à la procréation médicalement assistée (PMA), de la probable mise en place d'un examen gynécologique à 25 ans, ou encore de la lutte contre les perturbateurs endocriniens, le gouvernement entend également impulser la recherche. Notamment avec les 30 millions d'euros de dotation du Plan d'équipement prioritaire de la recherche ▸

DÉFINITION

L'infertilité, qui ne doit pas être confondue avec la stérilité, se caractérise par une absence de grossesse malgré des rapports sexuels non protégés pendant au moins 12 mois.

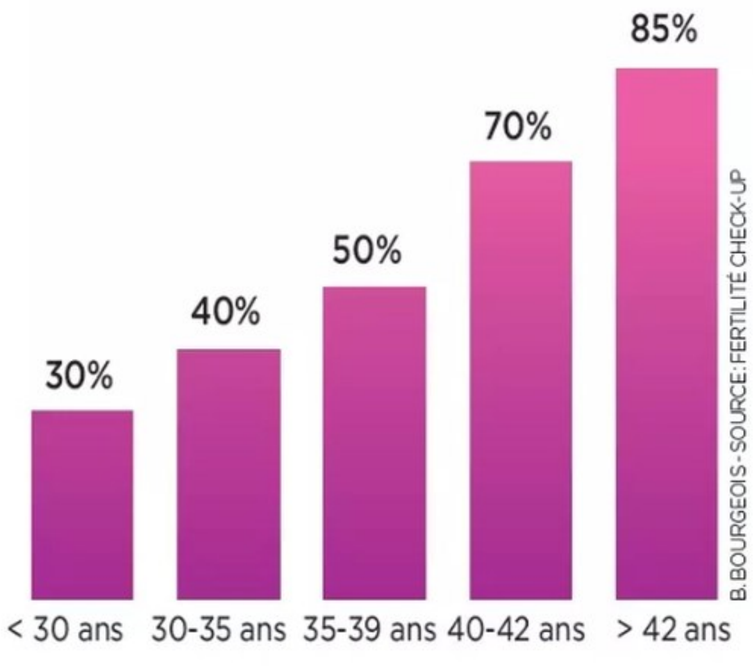
consacré à l'infertilité et l'endométriose. La communauté scientifique n'a pas attendu le *« réarmement démographique »* annoncé pour chercher des solutions. Face à la première cause d'infertilité, le recul de l'âge de la première grossesse, nous sommes certes démunis. Alors que le pic de fertilité se situe autour de 20 ans, l'âge moyen du premier enfant dépasse aujourd'hui les 30 ans… Pour repousser cette limite physiologique, *« l'adaptation darwinienne prendra du temps,* prévient Michaël Grynberg, gynécologue au service de médecine de la reproduction à l'hôpital Antoine-Béclère, à Clamart. *Mais il est possible de congeler ses ovocytes jusqu'à 37 ans depuis le vote de la loi de bioéthique en 2021. »*

BURGER/PHANIE

L'injection « in vitro » d'un spermatozoïde directement dans l'ovocyte permet d'obtenir des taux de fécondation plus élevés.

Une protéine bénéfique dans le traitement de divers troubles

Pour les femmes plus âgées, une étude sur la greffe de tissu ovarien cryoconservé, publiée en avril dans l'*American Journal of Obstetrics & Gynecology*, ouvre des horizons. *« Pour la première fois dans l'histoire de la médecine, nous avons la capacité de retarder ou de supprimer potentiellement la ménopause »*, affirme le Dr Kutluk Oktay, directeur du laboratoire de reproduction moléculaire et de préservation de la fertilité de la faculté de médecine de Yale (États-Unis). Une femme ayant une réserve ovarienne médiane, qui cryoconserve 25 % de son cortex ovarien à l'âge de 25 ans et dont 40 % des follicules survivent après la transplantation, pourrait repousser la ménopause de 11,8 ans. Est-ce souhaitable ? La question éthique reste entière. Cependant, d'autres facteurs peuvent altérer la qualité des gamètes, des contraintes génétiques à l'endométriose en passant par des problèmes immunitaires ou des traitements contre le cancer. Pour doper la production de gamètes, plusieurs pistes prometteuses se dessinent. Des études ont montré que l'administration de kisspeptine, une protéine qui joue un rôle clé dans la régulation de la reproduction en influençant la libération d'hormones sexuelles, peut être bénéfique dans le traitement de divers troubles, tels que le syndrome des ovaires polykystiques. En stimulant la libération d'hormones gonadotrophines, la kisspeptine peut aider à réguler le cycle menstruel et favoriser l'ovulation. Des techniques permettant de restaurer le fonctionnement des gamètes pointent également leur nez. Parmi elles, la gamétogénèse *in vitro*, consistant à créer des ovules (ou des spermatozoïdes, *lire l'encadré p. 80*) à partir de cellules souches pluripotentes induites. En 2016, des Japonais publiaient des résultats encourageants dans *Nature* : des cellules de peau de souriceaux, reprogrammées en cellules souches puis transformées en ovules, ont donné naissance à dix souriceaux. Une prouesse qui serait réalisable chez l'humain d'ici à cinq ans.



Le taux d'ovocytes anormaux augmente avec l'âge, faisant chuter la fertilité féminine.

La thérapie génique pourrait quant à elle corriger des mutations responsables de l'infertilité. Ces cinq dernières années, des essais portant sur l'introduction de matériel génétique sain dans les cellules défectueuses ont donné des résultats chez des femmes souffrant d'insuffisance ovarienne prématurée.

Autre technique révolutionnaire pour réparer les défauts des gamètes : la thérapie de remplacement mitochondrial, qui consiste à cibler les mitochondries, sorte de centrales énergétiques des cellules. Une étude pilote, parue en 2023 dans *Fertility and Sterility*, a montré que remplacer les mitochondries défectueuses des ovocytes permettait de produire des embryons capables de

s'implanter, de se développer jusqu'au terme et de donner naissance à des nouveau-nés apparemment en bonne santé. Parmi les 25 couples inclus dans l'étude, six naissances ont eu lieu. Autorisée au Royaume-Uni, en Grèce, en Ukraine et en Australie, la technique suscite toutefois des débats éthiques, car l'enfant est porteur du patrimoine génétique de trois personnes, ce qui lui vaut le nom de « FIV — fécondation *in vitro* — à trois ». Surtout, l'innocuité de la technique ne serait pas garantie.

Améliorer les chances de succès de la PMA

Quoi qu'il en soit, être capable de produire des gamètes est certes indispensable, mais pas suffisant. Encore faut-il que la rencontre des gamètes aboutisse à une fécondation… et que l'embryon s'implante dans l'utérus ! Dans cette perspective, les différentes techniques de PMA ont évidemment représenté une révolution en la matière, mais « *ce n'est pas une baguette magique,* insiste Samir Hamamah. *Et en France, les résultats de la PMA sont loin d'être optimaux.* » Le taux de naissance pour les FIV par injection du spermatozoïde dans l'ovocyte atteint au mieux 22 %, contre 28 % au Royaume-Uni. De fait, sélectionner l'embryon avec les meilleures qualités morphocinétiques pour s'implanter reste une tâche complexe. Le système *time-lapse* (laps de temps), reposant sur la prise d'images à intervalles réguliers des embryons en culture, paraissait séduisant. Mais le plus grand essai randomisé réalisé sur le sujet, paru dans *The Lancet* en 2023, a un peu douché les espoirs. « *Ni les conditions de culture stables dans un incubateur à* time-lapse *ni la méthode de sélection des embryons informatisée n'améliorent les chances de succès* », constatent les auteurs.

Reste une possibilité à l'étude : l'analyse du profil des ARN extra-cellulaires libérés dans le milieu de culture embryonnaire pourrait constituer un bon marqueur de la physiologie de ▶

J.-M. LEVAILLANT

ENTRETIEN

DR JEAN-MARC LEVAILLANT

GYNÉCOLOGUE OBSTÉTRICIEN AU DÉPARTEMENT PMA DU CHI DE CRÉTEIL

« Les femmes doivent avoir tous les éléments en main pour leur projet »

Qu'est-ce qui vous a conduit en 2018 à créer un dispositif unique, le « check-up fertilité » ?

Régulièrement, des patientes âgées de 40-42 ans venaient en consultation avec l'envie d'avoir un enfant. Mais à la première échographie, la réserve ovarienne se révélait très pauvre. Et quand une jeune femme souhaite savoir si elle est fertile, son médecin a tendance à lui dire : « *Essayez, vous verrez bien !* » Des phrases que je ne supporte pas. Nous voulions qu'existe en France un lieu où toutes les femmes puissent venir pour avoir une réponse sérieuse.

Comment se déroule ce bilan ?

D'abord, les femmes remplissent un questionnaire pour faire le point : consommation de drogues, sommeil, sport, antécédents gynécologiques… Ensuite, elles vont faire une échographie pelvienne. Pendant une trentaine de minutes, tout est scruté : la quantité d'ovocytes, d'éventuelles malformations utérines et des signes d'infection des trompes. Lors du bilan, nous expliquons les résultats de l'échographie et sensibilisons à d'éventuels facteurs de risque d'infertilité.

Quels types de conseils donnez-vous à l'issue de l'examen ?

Nous sommes factuels. Par exemple, une femme de 30 ans avec deux follicules sur chaque ovaire, nous la prévenons que le temps presse. Et si besoin, nous l'orientons vers le don d'ovocytes. Quand il n'y a pas urgence, nous évoquons la possibilité de l'autoconservation ovocytaire. Beaucoup de femmes ne connaissent pas bien les périodes fertiles de leur cycle ou n'ont pas conscience qu'à 40 ans, 36 % de celles qui désirent être enceintes resteront sans enfant. Le but, c'est qu'elles aient tous les éléments en main pour planifier leur projet.

Découvrez-vous beaucoup de cas d'infertilité ?

Sur les 1000 femmes qui sont venues, 60 % avaient un examen normal. Donc, pour 40 %, nous avons repéré une anomalie. On se dit que nous avons tiré quelques patientes de l'infertilité définitive. Le problème majeur reste la réserve ovarienne qui, dans 30 % des cas, était basse pour leur âge. Mais nous prévenons aussi celles chez qui rien n'est détecté que c'est un examen à un instant T, et que la réussite d'une grossesse dépend aussi du conjoint.

Êtes-vous seul à proposer ce dépistage précoce ?

Non, sept autres établissements (dont un en Belgique) sont prêts à se lancer. Nous avons créé une association pour nous fédérer et espérons ainsi pouvoir obtenir que les 350 euros du check-up soient remboursés. Et nous sommes en train de mettre en place un dépistage précoce pour les hommes. ■ **Propos recueillis par C. C.**

l'embryon. Mais il est beaucoup trop tôt pour dire si la technique améliore les taux de grossesse.

C'est la raison pour laquelle de nombreux patients et soignants réclament l'autorisation du diagnostic préimplantatoire des aneuploïdies, qui permet de repérer les embryons avec un nombre anormal de chromosomes dans le cadre de la PMA. Réservé aux couples ayant un risque avéré de transmettre une maladie génétique grave, cet examen de recherche des anomalies chromosomiques « *devrait être proposé aux femmes de plus de 38 ans,* estime Samir Hamamah. *Cela rendrait la PMA moins hasardeuse.* »

D'autres innovations peuvent améliorer les résultats de la PMA. C'est le cas des tests qui permettent de trouver la bonne fenêtre d'implantation en évaluant la réceptivité de l'endomètre, la muqueuse tapissant l'intérieur de l'utérus et dans laquelle s'implante l'embryon. « *30 % des cas d'échec de FIV sont dus à une mauvaise fenêtre* », affirme Samir Hamamah. Une étude parue en 2021 a montré que les femmes ayant bénéficié d'un transfert d'embryon personnalisé grâce à un test sur la fenêtre d'implantation avaient un taux de naissance vivante de 31,8 %, contre 8,3 % dans le groupe de contrôle. Les FIV ont aussi plus de chances d'aboutir à une grossesse si l'embryon se développe dans une boîte de culture avec d'autres cellules spéciales — nourricières ou de soutien. Mais ce système de coculture « *qui mime ce qui se passe* in vivo *a été interdit en France par la loi de bioéthique de 2011* », s'insurge le gynécologue. Quand c'est l'utérus tout entier qui dysfonctionne, voire qui est inexistant, la greffe d'utérus est envisageable mais c'est une opération lourde. En France, trois seulement ont été réalisées et moins d'une centaine dans le monde. Quant au recours à des utérus artificiels, ce n'est certes pas un scénario de science-fiction, mais les prototypes actuels permettent « seulement » d'incuber des prématurés.

SANDRA CALLIGARO/SAIF IMAGES

Une greffe d'utérus a permis à une femme de donner naissance à une petite fille en 2021 à l'hôpital Foch de Suresnes.

Une découverte cruciale sur les cellules embryonnaires

Toujours est-il que, dans 25 % des cas, l'origine de l'infertilité reste mystérieuse. Maintenir les efforts de recherche sur ses causes est donc indispensable. Ils peuvent s'avérer très fructueux, comme en témoigne la découverte cruciale rapportée le 1er mai dans *Nature* par une équipe française. Jusqu'à présent, on pensait que le défaut de compaction des cellules embryonnaires, étape au cours de laquelle les cellules se rapprochent pour donner à l'embryon sa première forme, était dû à un manque d'adhérence entre les cellules. Faux! Il s'agit d'un défaut de contractilité des cellules. Un résultat décisif qui pourrait contribuer au perfectionnement des techniques d'identification des embryons fécondés *in vitro*.

Satisfaire le désir d'enfant ne se résume cependant pas à donner des moyens à la recherche. Pour Samir Hamamah, l'information est un levier majeur. « *Et il faut libérer les énergies. Avec les lois françaises, il est plus facile de faire des expérimentations sur des bébés que sur des embryons…* », regrette-t-il. ■

THÉRAPIES

De l'espoir aussi chez l'homme

Nous manquons cruellement de connaissances sur l'infertilité masculine. C'est le constat dressé par 26 spécialistes fin 2023 dans *Nature Reviews Urology*. Des lacunes d'autant plus préjudiciables que la concentration de gamètes dans le sperme a été divisée par deux en 45 ans! Mais des essais de thérapies cellulaires sont porteurs d'espoir. En 2022, des chercheurs américains sont par exemple parvenus à faire naître trois souriceaux en transférant le noyau d'une cellule de peau dans un ovocyte dont le noyau avait été retiré puis fécondé avec un spermatozoïde. Autre situation qui pourrait trouver une issue favorable: l'azoospermie non obstructive, soit l'absence totale de spermatozoïde, qui représente 15 % des cas d'infertilité masculine. En 2022, une équipe grenobloise a montré chez des modèles murins que l'introduction de cellules productrices de spermatozoïdes dans les cellules germinales permettait de rétablir la synthèse d'une protéine indispensable à la spermatogenèse. Enfin, la greffe de tissu testiculaire préalablement cryoconservé progresse chez les hommes ayant souffert d'un cancer. Après des résultats positifs chez le singe, des essais chez l'homme sont en cours.

PRIX JEAN DANIEL

LAURÉAT 2024

en partenariat avec

LA POSTE SFA GROUP Marcello

www.prixjeandaniel.com

La grande confusion des cosmétiques quantiques

C'est une nouvelle tendance dans l'univers du bien-être et des médecines alternatives : invoquer les propriétés quantiques de la matière pour expliquer les bienfaits supposés de cosmétiques ou de soins. Deux éminents physiciens démêlent le vrai du faux.

C'était au début de l'année. Le parfumeur français Guerlain, du groupe LVMH (actionnaire de *Sciences et Avenir*), lançait en fanfare la commercialisation d'une crème anti-âge aux propriétés… quantiques. Une « crème quantique », donc, vendue pour la modique somme de 650 euros le pot de 50 millilitres. La campagne publicitaire a eu un fort écho médiatique, mais pas celui escompté. Face au scepticisme, voire aux moqueries qu'elle a suscitées, la crème a été sobrement rebaptisée « Orchidée impériale gold nobile ». Mais la tempête médiatique dans le pot de crème quantique a mis en lumière une tendance croissante dans l'univers du bien-être et des « médecines alternatives » à invoquer les propriétés quantiques de la matière décrites par les physiciens comme nouvel argumentaire pour des approches qui peinent à démontrer leur pertinence. Cosmétiques quantiques, médecine quantique, conscience quantique… *« À chaque fois, les industriels s'emparent du truc le plus mystérieux du moment. Mais la physique quantique n'est pas du tout mystérieuse, c'est l'une des disciplines les mieux comprises et les plus prédictives de la science actuellement. Sauf que ça échappe un peu à notre intuition. Et donc, ils jouent là-dessus »*, se désole Julien Bobroff, physicien à l'université Paris-Saclay.

Les commerciaux de chez Guerlain n'ont fait que suivre une tendance. Comme l'entreprise Energecia, qui propose en France des « soins quantiques » depuis quelques années déjà. *« C'est un processus novateur, développé en interne, transcendant les actifs par le biais de l'information pour sublimer les bienfaits des ingrédients, offrant ainsi une action multidimensionnelle »*, assure Isabelle Bon, fondatrice d'Energecia. Formée en aromathérapie, naturopathie, médecine ayurvédique ou encore au magnétisme, l'ex-experte en

DÉCRYPTAGE

Qu'est-ce que la physique quantique ?

Sous ce terme, se trouve un ensemble de théories physiques permettant de décrire le comportement de la matière à l'échelle de l'atome et des particules, d'élucider en partie la nature des rayonnements électromagnétiques. Les caractéristiques utilisées pour décrire des objets à l'échelle macroscopique à un instant t (masse, position, taille) ne permettent pas d'appréhender le comportement d'un atome isolé, dans le vide et sans lumière. C'est ce qui rend la physique quantique peu intuitive. À l'échelle microscopique, un objet physique peut par exemple se comporter à la fois comme une onde et une particule. H. J.

SHUTTERSTOCK

Les fabricants de crèmes et autres soins cosmétiques prêtent à leurs produits des propriétés physiques sans aucun fondement scientifique.

marketing chez L'Oréal explique avoir fondé Energecia avec l'idée *« d'associer les produits cosmétiques à un soin audio intégrant des fréquences neurosensorielles.* » Objectif affiché : booster le métabolisme.

La température et la taille, deux conditions essentielles

Las ! Les experts en physique quantique s'accordent à dire que ces crèmes et autres soins ne peuvent pas être quantiques : *« Il y a une règle assez simple pour faire le tri : un objet ne peut présenter des propriétés quantiques qu'à certaines conditions. Il y a deux choses qui font qu'un objet ne peut pas l'être : s'il est chaud ou gros. Si vous avez un objet qui est à 20 °C ou 37 °C, et s'il fait un millimètre ou un centimètre, il ne peut pas présenter de propriétés quantiques comme la superposition d'états ou comme l'intrication. Parce qu'il y a un phénomène qui s'appelle la décohérence et qui fait que l'objet arrête d'être quantique* », explique Julien Bobroff. *« Les effets quantiques ne survivent pas sur les grosses tailles,* confirme Aymeric Delteil, chercheur en nanophotonique quantique à l'université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines. *Ils ne survivent pas dans les objets chauds, ni dans les objets éclairés, ni en contact avec un gaz ou avec de la lumière. Parce qu'un effet quantique est extrêmement fragile. On arrive à l'étudier en laboratoire, isolé de tout contact avec l'extérieur, dans le noir et le froid absolu. Et même dans ces conditions-là, les effets sont très, très fragiles.* » Avant d'être utilisé dans le milieu des cosmétiques, le terme « quantique » était déjà exploité par la « médecine quantique » depuis les années 1980 environ. Sorte de prolongation rationalisante de pratiques visant à « rééquilibrer les énergies » du corps (acupuncture, lithothérapie, reiki, magnétothérapie, etc.). Certes, *« quand on regarde à l'échelle microscopique, tous les phénomènes deviennent quantiques. Absolument tous,* explique Aymeric Delteil. *La biologie étant basée sur la chimie, elle a ses sources dans la mécanique quantique, c'est sûr. Seulement, il faut séparer l'origine microscopique des phénomènes qui, à plus grande échelle, ne sont pas spécialement quantiques* ».

La « conscience quantique », une hypothèse trompeuse

Ainsi, concernant l'hypothèse d'une conscience aux origines quantiques émise par le prix Nobel de physique 2020 Roger Penrose, Julien Bobroff abonde : *« Si par hasard il y avait un processus au niveau des neurones et des synapses qui relève un peu du quantique, ce n'est pas pour cela que le fonctionnement du cerveau dans son ensemble pourrait être qualifié de quantique. Ça, c'est impossible. Sur plusieurs centimètres cubes et à 37 °C, ça ne peut pas tenir le coup.* »

Trop gros, trop chaud. Pour autant, cela ne signifie pas que la dimension quantique de notre physique soit absente du biologique. En témoignent certains phénomènes comme la photosynthèse ou la façon de s'orienter des oiseaux migrateurs *(lire l'encadré p. 84). « La biologie quantique est un domaine très sérieux, avec de très bons scientifiques qui respectent toutes les règles du jeu de la recherche,* rassure Julien Bobroff. *L'enjeu est d'essayer de voir si, dans certains mécanismes qui sont au cœur de la vie, il pourrait y avoir une influence mesurable de la physique quantique. Mais c'est toujours à très petite échelle, de l'ordre de la réaction chimique en général.* »

PHYSIQUE

Les effets avérés du quantique sur le vivant

Si l'implication de la physique quantique dans des processus biologiques reste largement inexplorée, certains de ces effets sont déjà avérés. Par exemple, le rouge-gorge *(photo)*, comme d'autres oiseaux migrateurs, utilise la physique quantique pour s'orienter grâce au champ magnétique de la planète. Il le détecte grâce à une protéine dans la rétine, nommée cryptochrome. Au centre de cette protéine, une structure absorbe les photons de lumière bleue, ce qui entraîne une réaction où un électron de l'acide aminé voisin (un tryptophane) saute sur cette structure. Ainsi, une molécule se retrouve avec un électron en trop, l'autre avec un électron en moins, créant une paire de radicaux (molécules avec un nombre impair d'électrons). Ces électrons surnuméraires peuvent tourner (spin) dans le même sens ou dans le sens opposé, et le champ magnétique de la Terre peut influencer le passage d'un état à l'autre. Puis la rétine va informer le cerveau de l'état de ces électrons, permettant à l'oiseau de s'orienter. La photosynthèse, aussi, doit son efficacité à la mécanique quantique. Les photons de la lumière du soleil sont absorbés par la chlorophylle, qui transfère ensuite cette énergie vers le site où aura lieu la réaction de photosynthèse. Or, ce transfert se fait avec une efficacité proche de 100 %, c'est-à-dire que rien de cette énergie ne se perd dans ce cheminement, grâce à la superposition quantique : l'énergie prend en même temps tous les chemins possibles pour y arriver de la façon la plus efficace. **N. G. C.**

MARIO CEA SANCHEZ / BIOSPHOTO

▶ Clarice Aiello est l'une de ces scientifiques. La physicienne, passée par l'université de Californie à Los Angeles (États-Unis) avant de créer sa start-up Quantum Biology Tech (QuBiT) Lab, explique : « *Plusieurs phénomènes biologiques pourraient en effet être dus à la mécanique quantique, comme le fonctionnement des enzymes, qui en laboratoire utilisent un effet quantique nommé "effet tunnel", où les électrons et les protons peuvent traverser une barrière d'énergie grâce à ce phénomène quantique. Et plusieurs événements biologiques répondent à des champs magnétiques d'une manière qui pourrait être quantique, y compris la division cellulaire ou les canaux ioniques. La vie pourrait dépendre de la mécanique quantiq de plusieurs façons. Mais jusqu'ici, personne dans le monde n'a prouvé ni réfuté sans aucune ambiguïté qu'un phénomène quantique peut survivre à l'intérieur d'une cellule suffisamment de temps pour avoir un réel effet. Il serait ainsi surprenant que la biologie ait trouvé des façons de se servir du quantique. Mais ce n'est pas impossible, et je suis en train de jouer ma carrière dans le but de le prouver.* »

Le rêve d'une future médecine quantique

Sa start-up tente en effet d'étudier des phénomènes quantiques à l'intérieur des cellules. Un travail de longue haleine qui ne donnera pas de résultats avant plusieurs années. Mais s'il aboutissait, c'est une perspective toute neuve qui s'ouvrirait. Cela voudrait dire qu'on pourrait utiliser les outils de la physique quantique pour influer sur la biologie… voire sur la santé. Il reste donc permis de rêver un futur quantique à la médecine — sans qu'on sache à quoi il ressemblerait d'ailleurs. Mais ce n'est pas encore le cas. « *Nous n'avons pas les outils pour prouver que le quantique peut influencer la fonction ou le comportement des cellules, et encore moins la technologie pour appliquer ces principes s'ils se révélaient vrais. Je crois qu'on en est encore loin* », reconnaît l'anesthésiste Srinivas Pentyala de l'université Stony Brook, dans l'État de New York (États-Unis), qui a lancé un appel à s'intéresser de plus près à ce domaine.

Quoi qu'il en soit, « *ceux qui prétendent aujourd'hui pouvoir utiliser la physique quantique pour soigner sont des charlatans,* résume Aymeric Delteil. *Ils s'engouffrent dans un malentendu entre le monde scientifique et le grand public qui a l'impression que tout ce qu'on ne comprend pas bien peut être dû au quantique, notamment les choses un peu métaphysiques : la conscience, les questions existentielles, les maladies ou les guérisons…* » Un malentendu dont certains n'hésitent pas à profiter. ■

Nicolas Gutierrez. C.

AYMERIC DELTEIL

« Ceux qui prétendent pouvoir utiliser la physique quantique pour soigner sont des charlatans »

Aymeric Delteil, chercheur en nanophotonique quantique à l'université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines

www.lesproduitsdumois.com

PROBLÈME DE CUIR CHEVELU : UNE RÉPONSE UNIQUE

Grâce à sa formule complète, **Liperol soulage efficacement**. Pellicules, squames, démangeaisons, cuir chevelu sensible et sec : **Liperol** rétablit le pH, réduit la prolifération fongique, restaure la barrière cutanée, respecte le microbiote, apaise et hydrate. Haute tolérance, sa mousse légère et son nettoyage micellaire permettent une utilisation **adaptée à tous les besoins et pour toute la famille.**

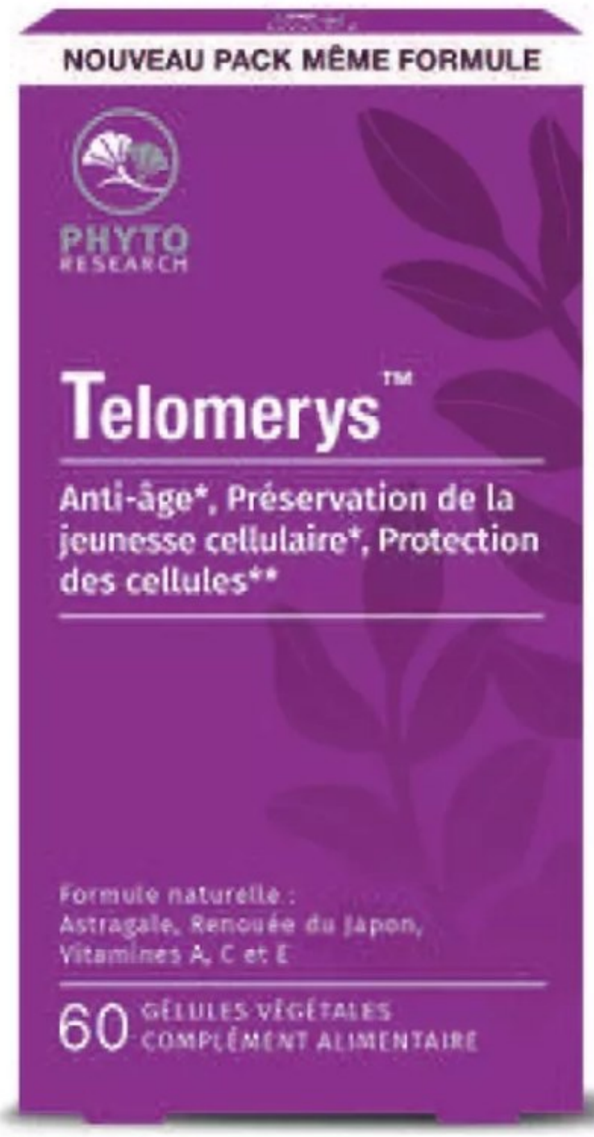
● Laboratoire DERMEAL - PPI 14,50€ le flacon de 200 ml.
En pharmacie et sur liperol.fr

NOCICEPTOL GEL ANTI-DOULEUR : N°1 DES PRESCRIPTIONS MÉDICALES EN FRANCE(1)

Soulagez vos douleurs avec ce Gel aux huiles essentielles, efficace : scientifiquement prouvé !
(Étude in-vivo, 12POGAD02, nov. 2013).

● Dispositif Médical CE - lire les instructions avant utilisation.
(1) GERSDATA-SOG EARLY - NOCICEPTOL GEL A-OUL TB120ML1 - 340102035445
Distribution pharmacie - sous prescription - En France CMA fév. 2023
Laboratoire POLIDIS - www.nociceptol.fr
Disponible en Pharmacie : 40ml 120ml 200ml 500ml.

INNOVATION ANTI-ÂGE



Le laboratoire français **PhytoResearch** a mis au point une **formule naturelle** basée sur les résultats des dernières avancées scientifiques sur l'astragaloside IV, une substance issue de l'Astragale capable de **ralentir le vieillissement cellulaire.**

Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragale à du resvératrol, un **puissant antioxydant**, ainsi que des **vitamines A, C et E**. **Formule anti-âge inédite**, deux gélules végétales par jour suffisent pour constater **une diminution significative des rides**, une **amélioration des fonctions cognitives** (mémoire, concentration) et un **regain d'énergie**.

● En pharmacie - Boîte de 60 gélules végétales - ACL 6024256 - Convient aux végétaliens - Plus d'infos au 01 83 96 83 01 (tarif local) - telomerys.com

STOP AU CHOLESTÉROL

Et si vous pouviez enfin faire baisser votre taux de mauvais cholestérol ?

ControlStérol aide à **réguler naturellement les taux de « bon » et « mauvais » cholestérol** (HDL et LDL) grâce à une combinaison **unique** d'extraits concentrés d'Ail noir et de Cannelle de Ceylan, associés à une souche brevetée de ferments lactiques, des vitamines et des nutriments essentiels.

Une gélule « jour » et une gélule « nuit » aident à **diminuer le « mauvais » cholestérol** LDL (qui favorise la formation de plaques lorsqu'il est en excès), limitant le risque cardiovasculaire associé, tout en **augmentant le « bon » cholestérol** HDL. **Une solution naturelle, simple, efficace !**

■ ControlStérol boîte 60 gélules végétales (30 gélules « jour » & 30 gélules « nuit ») ACL 6260490. En pharmacie et sur www.controlsterol.com - Plus d'infos au 01 83 96 83 01 (tarif local)

ACOUPHÈNES, VERTIGES, REFLUX, BOUFFÉES DE CHALEUR, MORAL EN BERNE, RONFLEMENTS ???

Découvrez la gamme AUDISTIMPHARMA !
(Acouphènes : Audistim / Vertiges : Audistim équilibre / Reflux : Mucodistim / Moral, Bouffées de chaleur : Safrastim+ Triple Action/ Ronflements : Ronchostim).
A l'efficacité scientifiquement prouvée, **AUDISTIMPHARMA vous soulage !**

● En pharmacie, sur audistimpharma.com et au téléphone : 05 56 69 13 84

BOUCHE SÈCHE, SENSIBLE, DOULOUREUSE ? L'INNOVATION OZALYS !

Un bain de bouche unique à l'acide hyaluronique qui **fortifie la muqueuse buccale, cicatrise, hydrate et apaise**. Sans alcool, sans menthol, le Soin Confort ne pique pas, **respecte la flore buccale**, ne tâche pas les dents.
Formulé sous contrôle odontologique, le **Soin Confort** est un soin de Haute Conception de la marque Ozalys, récompensée par **8 prix d'excellence**.

● Pharmacies & partenaires agréés.
Découvrez notre gamme, boutique en ligne sur ozalys.com

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE
Pour paraître dans cette rubrique, R'Médias 01 46 48 85 41 - photos D.R.

PATRICK HAGGARD
PROFESSEUR DE NEUROSCIENCES COGNITIVES

Dans le cerveau des danseurs

L'étude du cerveau des danseurs révèle à quel point les interactions avec le corps façonnent la perception de soi et du monde. Entretien avec un spécialiste de neurosciences cognitives.

Dans votre conférence au festival d'Avignon, vous apporterez votre regard de neuroscientifique sur le spectacle du chorégraphe Boris Charmatz. Les danseurs ont-ils un cerveau particulier pour être capables de mouvements aussi virtuoses ?

Le cerveau des danseurs est probablement expert dans le pilotage des muscles, mais il y a un autre aspect, qu'on sous-estime souvent : leur virtuosité sensorielle. La précision de leurs mouvements repose en effet en grande partie sur leur capacité à se représenter très finement la position de leur corps dans l'espace : comment sont localisés leurs bras, leurs jambes, leur tête… De multiples travaux montrent ainsi que les danseurs ont des facultés proprioceptives bien supérieures à la moyenne. Pour vous en faire une idée, tentez une expérience toute simple : fermez les yeux et tendez votre index droit au-dessus de votre tête. Puis essayez de le toucher avec votre index gauche — sans regarder, et sans déplacer la main droite. La plupart des gens manquent leur cible, souvent de plusieurs centimètres. Les danseurs, eux, y parviennent presque toujours du premier coup.

UCL

Professeur en neurosciences cognitives à l'University College de Londres (Royaume-Uni), Patrick Haggard est titulaire d'un doctorat en psychologie expérimentale de l'université de Cambridge.

PARTENARIAT SCIENCES AVENIR

« Histoire(s) en mouvement » au festival d'Avignon

Le festival d'Avignon et l'Agence nationale de la recherche (ANR) organisent la 11e édition des Rencontres recherche et création sur le thème « Histoire(s) en mouvement », en partenariat avec *Sciences et Avenir*, les 8 et 9 juillet. Inscription et programme : www.recherche-creation-avignon.fr

D'où leur vient cette virtuosité sensorielle ?

Peut-être ont-ils un terrain génétique favorable ou peut-être est-ce un effet de l'entraînement. Il est difficile de trancher entre ces deux hypothèses. Mais une chose est sûre : leur secret réside dans leur cerveau, car les capteurs sensoriels qui bardent leur corps sont identiques à ceux de tout un chacun. Ces capteurs, qualifiés de fuseaux neuromusculaires, émettent un signal nerveux quand les muscles changent de longueur. Partant de ce signal, le cerveau calcule la position des membres dans l'espace, et il le fait donc avec une finesse hors norme chez les danseurs. Même si ces derniers aiment à parler de « mémoire des muscles », la clé de leur virtuosité est donc plutôt à chercher dans leurs neurones !

Sait-on comment leur cerveau parvient à interpréter aussi finement les informations qui remontent des muscles ?

Pour le comprendre, il faudrait que nous décodions totalement le « langage » des fuseaux neuromusculaires, ce dont nous sommes encore loin — même si nous avons quelques connaissances sur le sujet, ayant par exemple découvert il y a

MARC COUDRAIS/SAIF IMAGES

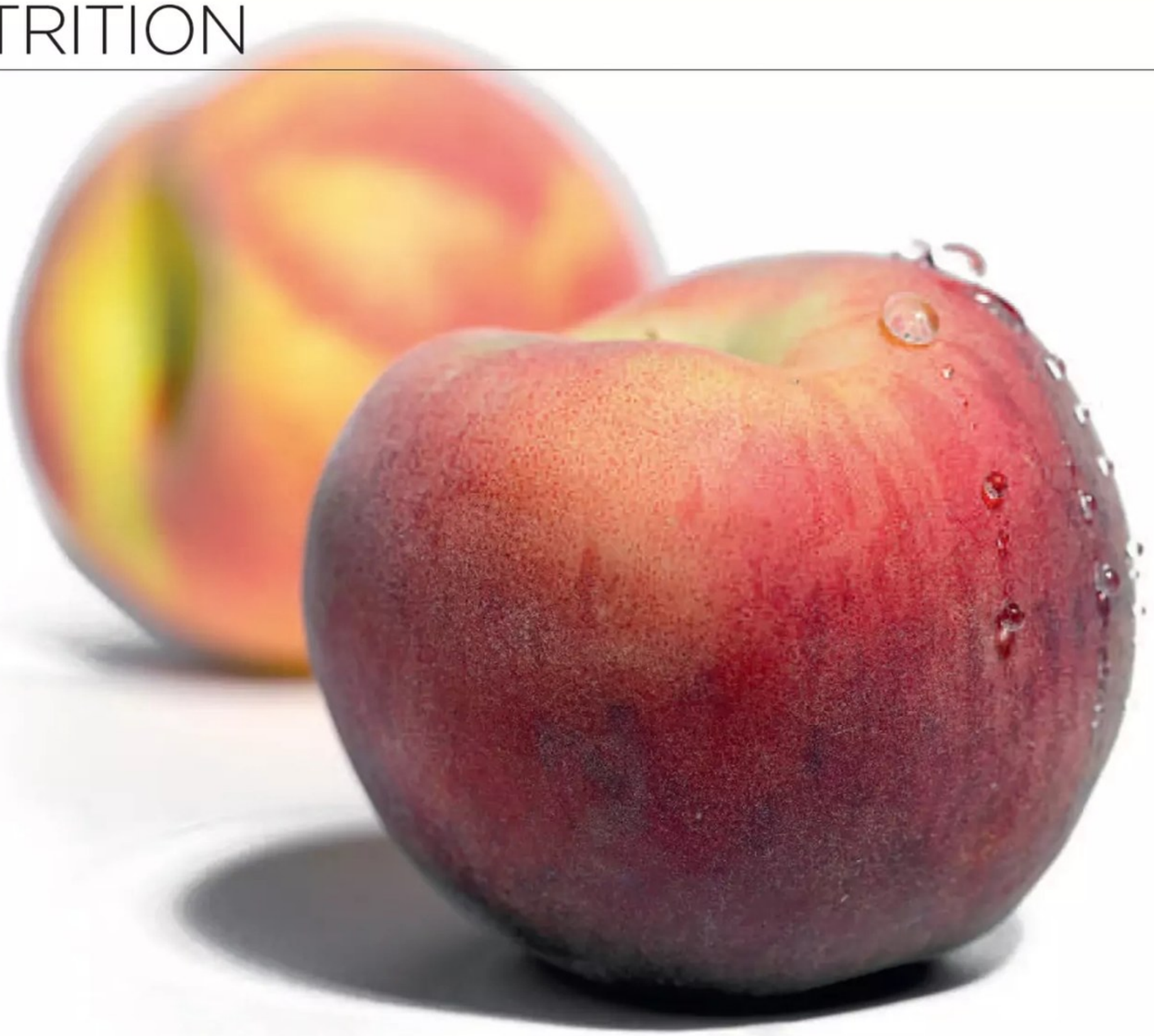
La précision des mouvements repose sur la capacité des danseurs (ici, Boris Charmatz et Dimitri Chamblas en juin 2023) à se représenter la position de leur corps dans l'espace.

plusieurs décennies que plus le muscle est étiré, plus les potentiels d'action (les impulsions électriques transmises par les neurones) dans les neurones sensoriels sont nombreux. Mais « craquer » ce code aurait aussi des applications thérapeutiques, notamment chez les patients victimes d'accident vasculaire cérébral (AVC). Même quand leur motricité s'améliore, et qu'ils redeviennent par exemple capables d'ouvrir et de fermer la main, beaucoup restent très handicapés car leur cerveau ne traite plus correctement les signaux arrivant de la main : impossible, dès lors, de saisir un verre, de le porter à sa bouche, etc. Si nous comprenions le langage des fuseaux neuromusculaires, nous pourrions concevoir des neuroprothèses sensorielles qui prendraient le relais des zones cérébrales endommagées.
Au-delà, des programmes de danse pour des patients souffrant de troubles neurologiques ont montré des résultats prometteurs, préservant ou améliorant leurs capacités sensorimotrices. On le sait aujourd'hui, le cerveau garde une certaine plasticité toute la vie. Et la danse modifie non seulement sa perception du corps, mais également sa façon de voir les mouvements des autres…

C'est-à-dire ? En quoi les danseurs voient-ils les mouvements des autres différemment ?
Plus précisément, ils voient différemment les mouvements qu'ils savent exécuter eux-mêmes. C'est ce que nous avons montré dans une expérience où nous avons placé des danseurs de capoeira ou de ballet classique dans un appareil d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). Nous leur diffusions de courtes vidéos présentant des mouvements simples, calibrés pour se ressembler (en matière de déplacements des bras ou des jambes, de rotations du corps, de verticalité ou d'horizontalité…), mais qui tantôt appartenaient au répertoire de la danse qu'ils pratiquaient, tantôt non. Or, quand les danseurs regardaient des mouvements qu'ils avaient l'habitude d'effectuer eux-mêmes, un réseau cérébral spécifique s'activait de manière particulièrement intense. Il incluait l'aire prémotrice et le cortex pariétal, respectivement impliqués dans le pilotage des gestes et dans la perception du corps dans l'espace. La perception des mouvements corporels n'est donc pas passive : nous simulons dans notre propre réseau sensorimoteur les gestes que nous maîtrisons, ce qui nous en donne probablement une compréhension plus poussée.

Cela rappelle le principe des neurones miroirs, qui s'activent de la même façon quand on fait une action et quand on la regarde faire ?
En effet, mais cette notion de neurone miroir est aujourd'hui très contestée parmi les neuroscientifiques. Davantage que le fait de quelques neurones particuliers, la tendance à simuler ce qu'on voit serait un mode de fonctionnement plus général du cerveau, qui se sert des entrées sensorielles pour alimenter des « modèles du monde » chargés de prévoir la suite — par exemple, un contact sur le bras si quelqu'un approche sa main de nous. Et comme le révèle l'exemple des danseurs, ces simulations dépendent du vécu de chacun et s'ancrent dans les interactions du corps avec son environnement.
Contrairement à ce que croyait Descartes, l'esprit n'est donc pas indépendant du corps. Les philosophes évoquent souvent une expérience de pensée dite du cerveau dans une cuve. Imaginez un cerveau isolé, flottant dans un récipient, qui ne reçoit que des impulsions électriques. À quoi ressembleraient ses perceptions, son mode de réflexion, sa conscience ? Difficile à dire, mais sans la possibilité d'interagir avec un corps, la vie mentale du cerveau dans sa cuve serait très différente de la nôtre… ■

Propos recueillis par Guillaume Jacquemont



La pêche, savoureuse et rafraîchissante

Bien que très sucré, ce fruit charnu et juteux est particulièrement désaltérant. Il est aussi riche en antioxydants et en potassium.

Royal Pride, Primerose, Oriane… Qu'elle soit jaune, blanche ou plate, la pêche rafraîchit les papilles de juin à septembre. La production à grande échelle en France de ce fruit originaire de Chine débute à partir du XVe siècle. Elle fut très appréciée de Louis XIV, qui demanda à ses jardiniers de créer une trentaine de variétés, dont la Belle de Vitry. C'est aussi en l'honneur d'une cantatrice australienne que le pâtissier Auguste Escoffier créa la recette de la pêche Melba. Vitaminé, riche en antioxydants, ce fruit charnu et juteux à la peau veloutée est, à n'en pas douter, le péché mignon de l'été.

La nectarine, une cousine de la pêche

On dénombre plus de 300 variétés de pêches dont la Pavie, qui doit son nom au village du Gers où elle a vu le jour ou la pêche de vigne, l'une des variétés les plus tardives (récoltée en septembre), reconnaissable à sa robe pourpre. Le brugnonier (à l'origine des brugnons) et le nectarinier appartiennent tous deux à la même espèce d'arbre fruitier que le pêcher (*Prunus persica*, de la famille des rosacées) et résultent de mutations naturelles. Leurs fruits se distinguent par des caractéristiques spécifiques : nectarines et brugnons ont la peau lisse tandis que celle de la pêche est duveteuse. Noter

221 856 tonnes

de pêches et de nectarines ont été récoltées en 2023 en France, quatrième producteur européen, derrière la Grèce, l'Italie et l'Espagne.

SOURCES : AGRESTE ET FRANCE AGRIMER.

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

ACIDE MALIQUE Acide principal de nombreux fruits (abricot, pomme, raisin, cerise, rhubarbe, etc.), également utilisé comme additif alimentaire (E296) en tant que régulateur d'acidité et exhausteur de goût.

CYANIDINE Pigment responsable de la coloration rouge de la peau de la pêche jaune et blanche. La cyanidine est aussi présente dans les fruits rouges comme la myrtille, le cassis ou les airelles.

ALLERGIE CROISÉE Réaction survenant au contact de protéines de structures voisines mais présentes dans des substances différentes. Il existe des allergies croisées entre aliments, entre pollens, aliments et pollens, latex et fruits...

aussi que le noyau de la nectarine est libre tandis que celui du brugnon adhère à la chair.

Un fruit sucré mais désaltérant

Peu calorique (46 kcal/100 g), la pêche est composée à plus de 87 % d'eau, ce qui en fait un fruit désaltérant très apprécié durant les fortes chaleurs. Elle affiche près de 10 g/100 g de glucides dont environ 8 g de sucres, principalement du saccharose, suivi du fructose, du glucose et du sorbitol. La pêche contient aussi de l'**acide malique** (1,32 % dans la pêche Bénédicte) (1), ainsi que plus d'une centaine de substances volatiles dont les plus abondantes sont les composés en C6, les esters, le benzaldéhyde, le linalol et les lactones. L'arôme et la saveur de la pêche dépendent ainsi d'un équilibre délicat entre sa teneur en sucres, en acides et en composés aromatiques volatils (2).

Riche en potassium

À l'instar de la nectarine et du brugnon, la pêche fournit en petites quantités des minéraux (calcium, phosphore, magnésium, etc.), mais sa richesse minérale porte essentiellement sur le potassium (190 mg/100 g de pêche jaune) (3). Ces fruits comptent aussi 6 à 9 mg de vitamine C pour une pêche blanche (environ 100 g de pulpe) ou une nectarine à chair jaune, 5 à 14 mg pour une nectarine à chair blanche ou une pêche jaune (4). C'est moins que d'autres fruits de saison comme la fraise (54 mg/100 g) ou le cassis (181 mg/100 g), mais cela représente néanmoins 5 à 13 % des apports journaliers recommandés. Sont également présentes de la vitamine E (1 mg/100 g de nectarine blanche) et des vitamines du groupe B dont la B3 (0,56 mg/100 g de brugnon jaune), qui joue un rôle essentiel dans le métabolisme énergétique de l'organisme, et la vitamine B9 (11,9 microgrammes/100 g de nectarine blanche).

C'est un réservoir d'antioxydants

On y trouve principalement des caroténoïdes (lutéine, bêtacarotène, etc.) responsables de la couleur jaune orangé de la chair de la pêche, et des polyphénols (catéchine, **cyanidine**, etc.), les fruits à chair jaune apportant le double de caroténoïdes par rapport à ceux ayant une chair blanche. Les polyphénols sont quant à eux plus nombreux dans la peau que dans la chair des pêches (5). Leur teneur varie également selon les variétés : les nectarines à chair jaune Red Jim contiennent dix fois plus de composés phénoliques que les variétés de nectarines blanches Fire Pearl (6). Outre une activité antioxydante, les composés phénoliques de la pêche auraient des propriétés antiallergiques, anti-inflammatoires et antibactériennes (4).

Des allergies croisées sont possibles

En France, la pêche est essentiellement cultivée dans la moitié sud de la France, notamment en Provence-Alpes-Côte-d'Azur et en Occitanie. Le label « Pêche d'ici » garantit la qualité des pêches, nectarines et brugnons produits dans le Sud-Est. On trouve aussi des pêches AOP et Label rouge. Attention, la chair délicate du fruit ne supporte pas le froid. Mieux vaut donc la conserver à température ambiante. Prudence aussi si vous êtes déjà allergique aux pollens de bouleau ou d'ambroisie, car l'ingestion de pêche peut engendrer des symptômes allergiques, signes d'une **allergie croisée**. ■

Sylvie Boistard

(1) Determination of selected beneficial substances in peach fruits, Mrazova M. et al, *Sustainability*, 2021.

(2) HS-SPME-GC–MS Volatile Profile Characterization of Peach (Prunus persica L. Batsch) Varieties Grown in the Eastern Balkan Peninsula, Mihaylova D. et al, *Plants*, 2022.

(3) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(4) Antioxidant capacities, phenolic compounds, carotenoids, and vitamin C contents of nectarine, peach ansd plum cultivars from California, Gil M. I. et al, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002.

(5) Evaluation of the fruit quality and phytochemical compounds in peach and nectarine cultivars, Petruccelli R. et al, *Plants*, 2023.

(6) HPLC-DAD-ESIMS Analysis of phenolic compounds in nectarines, peaches and plums, Tomas-Barberan F.A. et al, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001.

MAXIME MÉSSÉGUÉ Diététicien-nutritionniste à Paris

Un fruit bien toléré par l'intestin

« Une pêche (120 g) apporte environ 2 g de fibres. C'est un peu moins que les autres fruits frais (en moyenne 2,7 g pour 100 g). Mais consommée mûre à point, la pêche est un fruit particulièrement bien toléré par le système digestif grâce à sa teneur en fibres solubles (pectine, cellulose, etc.) qui favorisent le transit intestinal. Au contact des liquides, les fibres solubles forment un gel gélatineux, qui crée du volume dans l'estomac et apporte plus facilement une sensation de satiété. »

PHOTO12/ALAMY/PAVEL DUDEK

Le site antique d'Olympie (Grèce), vaste sanctuaire devenu berceau des premiers Jeux au VIIIe siècle avant notre ère, mêle les vestiges religieux (au centre, avec une colonne relevée, le temple de Zeus) et sportifs (en haut à droite, le stade, longue étendue plane à ciel ouvert).

Olympie

La colline sacrée où naquirent les Jeux

Avant les JO de Paris, « Sciences et Avenir » s'est rendu sur le site grec d'Olympie, sur les traces des premiers Jeux, à la croisée des mythes et d'une réalité parfois très surprenante. Les découvertes archéologiques permettent d'en savoir plus sur le quotidien des athlètes antiques.

Par Mathieu Nowak

Pour arriver sur le site d'Olympie dans le Péloponnèse (Grèce), il faut traverser un petit pont. En cette fin de printemps, c'est un maigre filet d'eau qui coule en dessous. Seul l'assourdissant coassement des grenouilles vient troubler le calme de cette rivière, le Cladée, qui alimente l'Alphée. Difficile d'imaginer que dans la mythologie grecque, c'est ce dernier cours d'eau que détourna Héraclès (Hercule chez les Romains) pour nettoyer les écuries d'Augias, l'un de ses 12 travaux. À la suite de ce succès, il aurait organisé une course pour célébrer sa victoire. Le vainqueur aurait été couronné d'une branche d'olivier. Et ainsi seraient nés les jeux Olympiques. Si le lieu est bien identifié, l'histoire repose sur des mythes. Selon une autre tradition, on doit les Jeux à Pélops, petit-fils de Zeus et d'Atlas. Plus précisément, ils auraient été institués en 776 avant notre ère, en commémoration de sa victoire lors d'une course de chars sur le roi de la cité antique de Pise (dans le Péloponnèse), Œnomaos, dont il voulait épouser la fille.

Quoi qu'il en soit, Olympie était un lieu de culte au moins depuis l'époque mycénienne (1600 à 1100 avant notre ère). C'était donc un centre religieux bien avant de devenir également un centre sportif, plus probablement vers -700. Il était situé dans une forêt sacrée, l'Altis, au pied d'une colline, le mont Cronion — et non le mont Olympe, le plus haut sommet grec qui se situe, lui, au nord du pays. Aujourd'hui, de cette histoire sacrée, il reste en particulier les ruines du temple de Zeus, bâti au v^e^ siècle ▶

avant notre ère. Il abritait en son temps l'une des sept merveilles du monde : une statue de Zeus assis sur un trône, faite d'or et d'ivoire et haute d'une douzaine de mètres. Hélas, l'ensemble du site fut abîmé après l'interdiction des Jeux par l'empereur Théodose Ier, en 394, quand l'Empire romain christianisé fit la chasse aux cultes païens. En 426, le temple fut volontairement incendié, des séismes achevant sa destruction un siècle plus tard. Les fouilles, conduites pour l'essentiel au XIXe siècle, ont permis de dégager la base du temple, construite avec un étonnant « calcaire coquillier », une roche dans laquelle on peut encore distinguer les coquilles d'organismes marins. De part et d'autre, des colonnes doriques effondrées.

Les épreuves sont restées les mêmes durant un millénaire

L'organisation des concours olympiques n'a jamais éclipsé la vocation religieuse du site. Sur les cinq jours que durait la compétition à partir du Ve siècle avant notre ère, l'un était entièrement dédié aux rituels à la louange de Zeus et à des rites nocturnes en l'honneur de Pélops. Les Jeux ne pouvaient s'entendre sans prières, processions, sacrifices. Sans parler de « l'hécatombe », sacrifice de 100 bœufs précédant les épreuves des adolescents de 12 à 18 ans.

Les jeux organisés à Olympie faisaient partie des concours dits stéphanites (du grec *stephanos*, couronne), ou sacrés, par opposition aux concours thématites ou chrématiques (du grec *thêma* et *chrêma*, argent), dont les épreuves étaient dotées d'une prime. Avec les jeux néméens (à Némée), les jeux pythiques (Delphes) et les jeux isthmiques (Corinthe), les jeux Olympiques étaient les concours sacrés les plus célèbres de la Grèce antique. Même lors de la domination romaine, les épreuves sont restées étonnamment constantes pendant un millénaire. La première organisée — et la seule au tout début — était la course à pied. La dernière à avoir été introduite, au début du Ve siècle, fut la course en armes (pour laquelle les athlètes revêtaient une armure en bronze). Cette stabilité se voit notamment sur les représentations des athlètes sur les céramiques : leurs positions sont presque identiques au cours des siècles. Laissant entendre que les règles n'avaient pas évolué.

La plupart des épreuves se déroulaient dans le stade, longue étendue plane à ciel ouvert, bordée de deux talus. Contrairement à aujourd'hui, la course ne s'y

Les 4 sites des Jeux sacrés en Grèce antique

CHRONOLOGIE

Une renaissance des JO en deux temps

La première renaissance des Jeux eut lieu en 1796 sur le Champ-de-Mars, à Paris, pour célébrer les quatre premières années de la Première République. Au cours du XIXe siècle, quelques compétitions furent organisées en Grèce ou en Angleterre en référence aux jeux Olympiques. Mais c'est en 1892 que le Français Pierre de Coubertin lança à la Sorbonne à Paris un appel qui débouchera deux ans plus tard sur la naissance du Comité international olympique et, en 1896, sur l'organisation des premiers Jeux modernes, à Athènes. *« En France, la motivation était d'introduire le sport dans les études à des fins hygiéniques ; en Grèce, il s'agissait aussi d'affirmer le jeune État alors en faillite, notamment face à l'Empire ottoman »*, détaille Violaine Jeammet, conservatrice au musée du Louvre et cocommissaire d'une exposition sur l'olympisme*. Si le nom de Pierre de Coubertin est passé à la postérité, d'autres acteurs de cette renaissance de la compétition sont tombés dans l'oubli. En particulier Émile Gilliéron (1851-1924), dessinateur d'origine suisse qui a travaillé sur les fouilles de l'Acropole d'Athènes, de Marathon ou de Béotie. *« C'était l'époque des premières fouilles scientifiques et l'archéologie était alors synonyme de modernité »*, insiste Violaine Jeammet. Nommé artiste officiel des jeux Olympiques d'Athènes en 1896, il s'inspira de représentations antiques — essentiellement des sculptures et des vases — pour proposer l'iconographie des Jeux modernes. Celle-ci servit en particulier à fabriquer des timbres pour financer leur organisation.

* L'Olympisme. Une invention moderne, un héritage antique, musée du Louvre, galerie Richelieu, à Paris, jusqu'au 16 septembre.

De nombreux vases grecs de l'époque classique reproduisent les disciplines athlétiques : à gauche, une amphore figurant l'épreuve du pugilat ; au centre, un vase à col étroit illustrant l'entraînement au javelot ; à droite, une coupe représentant le lancer de disque.

RMN-GRAND PALAIS (MUSÉE DU LOUVRE) CHRISTIAN LARRIEU

pratiquait pas sur une piste en anneau. Selon la discipline, les athlètes faisaient un nombre défini d'allers-retours (la longueur du stade à Olympie étant de 192,27 mètres, soit 600 fois la dimension du pied d'Héraclès, selon la légende). On y pratiquait aussi des sports de combat et le pentathlon (course, lancer du disque, du javelot, saut en longueur avec haltères, lutte).

Si le site est désormais devenu la principale attraction touristique de la région et accueille chaque jour des dizaines de cars de visiteurs, l'affluence est loin d'égaler celle qui devait prévaloir durant les jours de la compétition : le stade avait une capacité de 40 000 personnes ! Adultes et enfants, et même esclaves, venus voir les épreuves après s'être acquittés d'une « cotisation religieuse ». Les femmes ? Il ne fait presque aucun doute qu'elles n'étaient pas admises. Tout comme il est établi que les athlètes se présentaient entièrement nus. Ils venaient à Olympie en hommes libres, de leur propre initiative, pour concourir et non pour s'enrichir : dans une Grèce où le corps était aussi important que l'esprit, tous étaient issus de bonnes familles et la seule récompense du meilleur était une couronne d'olivier. « *Le vainqueur était le meilleur et la victoire en elle-même sa récompense,* décrivait en 2008 l'historienne Claude Mossé (décédée en 2022) dans le magazine *L'Histoire. Dans certaines cités, à l'époque archaïque, des athlètes firent l'objet d'un culte héroïque.* »

Ceux qui concouraient étaient issus de milieux privilégiés

Mais qui étaient ces jeunes hommes si attachés à la pratique sportive ? « *Ce n'étaient pas des personnes venues pour s'élever socialement. Seules les personnes fortunées, des élites ou des aristocrates, qui avaient les moyens de payer un maître privé et de financer le déplacement, pouvaient envisager de concourir* », explique Pierre Fröhlich, professeur en histoire grecque à l'université Bordeaux Montaigne. D'autant qu'ils devaient arriver 30 jours avant le concours pour s'entraîner sous l'œil des magistrats, qui, à l'issue de cette période, désignaient ceux admis à concourir, moins d'une vingtaine pour chaque épreuve. « *Les athlètes adultes étaient de véritables professionnels. L'amateurisme cher à Pierre de Coubertin est une légende* », sourit Pierre

PIERRE FRÖHLICH

« Les athlètes adultes étaient de véritables professionnels. L'amateurisme cher à Pierre de Coubertin est une légende »

Pierre Fröhlich, professeur en histoire grecque à l'université Bordeaux Montaigne

RECONSTITUTION

L'archéologie expérimentale redonne vie aux athlètes

Restituer les épreuves au plus près de la réalité quand les textes, l'archéologie et les images restent muets. C'est ce à quoi s'attèle Brice Lopez, spécialiste d'archéologie expérimentale à Arles. Ses équipes ont ainsi pu établir comment se déroulait le saut en longueur : « *L'iconographie nous révèle qu'il se pratiquait avec des haltères, pour balancer le centre de gravité vers l'avant, mais on ne sait pas précisément comment. Fait rare, des textes nous révèlent une distance atteinte, 16,50 m. En expérimentant, nous avons établi que l'épreuve devait consister en une succession de cinq sauts, effectués sans élan.* » Ces expérimentations ont également permis de préciser la stratégie des courses. « *Le départ était donné les deux pieds sur une ligne puis, en bout de piste, les concurrents faisaient demi-tour en contournant des petits poteaux* (kampteres). *C'était un point essentiel pour la stratégie, car il n'y avait pas de règle : on pouvait se pousser et déséquilibrer l'adversaire. Arriver en tête en étant suivi de près n'était pas forcément un bon calcul !* »

ACTA SARL ANDRÉSAN MARTIN

Le saut en longueur se faisait à l'aide d'haltères, avec un départ sans élan sur les deux pieds (spectacle dans l'Eure en 2018).

Fröhlich. Pour preuve, voici comment s'exprimait le philosophe Épictète, au IIe siècle de notre ère, en s'adressant à un jeune ambitionnant de participer aux Jeux : « *Tu dois accepter une discipline, te soumettre à un régime, t'abstenir de friandises, faire de l'exercice par nécessité, à une heure déterminée, sous la chaleur et le froid, ne pas boire frais, ni de vin quand tu en as l'occasion ; tu dois t'être livré, en un mot, à ton entraîneur comme à un médecin. De plus, dans le combat, tu devras ramasser de la poussière, parfois te démettre la main, te fouler le pied, avaler beaucoup de sable, recevoir le fouet et, avec tout cela, il pourra t'arriver d'être vaincu.* »
L'affaire était sérieuse !
Si la victoire était symbolique, elle apportait néanmoins de précieux avantages. Après l'épreuve, le participant sacré champion déclinait son nom, celui de son père et celui de sa cité. Or, les cités étaient très soucieuses de leur image, si bien qu'elles réservaient des traitements particuliers aux vainqueurs. Ainsi, à Athènes, les champions olympiques recevaient une prime de 500 drachmes, ce qui correspondait à deux ou trois ans de salaire, plus le privilège d'être nourri aux frais de la cité pour le reste de leurs jours. On érigeait parfois même une statue à leur effigie. Mais seul le vainqueur avait droit à ces honneurs. Pas de podium, pas de deuxième place qui vaille.
De quoi susciter parfois des envies de triche. « *Si le dopage en tant que tel n'existait pas car il n'y avait ni pharmacopée le permettant ni possibilité de contrôle, la corruption en revanche est attestée depuis au moins le Ve siècle avant notre ère* », révèle Pierre Fröhlich. Même si tous les athlètes faisaient devant les juges le serment de respecter les règles au premier jour du concours, il arrivait que certains achètent leur adversaire pour gagner. « *Et si cela était découvert, les athlètes devaient payer une amende qui servait à financer la construction d'une statue de Zeus à Olympie !* » Et hélas pour eux, dans les ruines d'Olympie, la pierre sculptée était plus durable que la couronne d'olivier. La mémoire du site antique ne fut pas sélective : entre les colonnades effondrées, les archéologues ont retrouvé certaines bases de ces statues comportant le nom des contrevenants. Elles ont été replacées à l'entrée du stade. Dieux, champions et tricheurs continuent toujours d'habiter les lieux. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

La véritable histoire de l'épreuve du marathon : sciav.fr/929marath

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE
CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

UNE VISION COMPLÈTE
DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

2,5 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

7,3 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE
INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs sur notre chaîne Twitch https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2,2 millions de fans !	plus de 160 000 followers	plus de 163 000 instagrammeurs	Plus de 7 000 abonnés professionnels	plus de 17 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

Blaise Pascal, orfèvre du calcul

En 1642, Blaise Pascal conçoit une machine arithmétique capable de réaliser les additions et soustractions de nombres très grands. Mais au-delà de cet exploit technique, le génie du mathématicien est à rechercher ailleurs, dans ses explorations de domaines encore vierges comme les probabilités ou le calcul infinitésimal.

Par Vincent Jullien

Le jeune homme a 19 ans, un père très cultivé et attentif à l'éducation de ses enfants ; par ailleurs riche receveur des finances pour le roi. Blaise Pascal fait preuve d'une intelligence si vive qu'il a été accueilli, très tôt, dans le cercle savant et philosophique animé par le père Marin Mersenne qui tient séance chaque mercredi, au couvent des Minimes, à Paris. Les plus remarquables savants de France et d'Europe fréquentent cette académie. On y rencontre Étienne Pascal, le père, Roberval, Christiaan Huygens, Thomas Hobbes, Pierre Gassendi, Girard Desargues, Jean de Beaugrand, etc. Peut-être est-ce Marin Mersenne qui lui suggère de s'intéresser à la possibilité de réaliser automatiquement les opérations arithmétiques. Il savait, par les antennes dont il disposait dans toute la « République savante » européenne, que cette perspective était ouverte. Johannes Kepler aura pu lui faire connaître la réalisation presque aboutie d'une telle machine par l'astronome Wilhelm Schickard en 1624.

En 1642 donc, Blaise Pascal conçoit une machine arithmétique capable de réaliser les additions et soustractions de nombres très grands, dans des bases numériques décimales pour la version « scientifique », mais aussi en base six ou en base 12, ou 20, selon les usages auxquels elle est destinée. On pourra aussi multiplier et diviser par additions ou retraits successifs. La partie théorique, abstraite, intellectuelle de l'affaire est rapidement accomplie : « *J'ai employé à cette recherche*, écrit-il, *toute la connaissance de mes premières études dans les mathématiques. Les lumières de la géométrie, de la physique et de la mécanique m'en fournirent le dessein.* » Le plus dur — et de loin — restait à faire : réaliser concrètement ce qu'il avait conçu et confié au papier, avec des plans très précis. Ceci prendra deux années pleines. Il fallut trouver « *un ouvrier qui possédât parfaitement la pratique du tour, de la lime et du marteau* », et encore, il s'y reprit deux, trois, dix, 50 fois, estimant tous ces prototypes défectueux ou mal commodes, ou pas aussi solides qu'on l'exigeait. Enfin, la Pascaline, absolument satisfaisante, voyait le jour en 1645. Elle est dédiée au chancelier Pierre Séguier qui l'a puissamment encouragé et soutenu. Blaise Pascal peut s'autoriser de l'approbation de « *quelques-uns des principaux en cette véritable science [mathématique]* », notamment de son ami et très grand mathématicien Gilles Personne de Roberval. La gloire arrive, la reconnaissance est grande et générale.

Au cœur de sa réalisation, outre la quasi-perfection artisanale des très nombreuses pièces, vis, engrenages, moyeux, axes, tambours, autant de merveilles d'ajustement, de libre mouvement

V. JULLIEN

Professeur émérite d'histoire et de philosophie des sciences à Nantes Université, Vincent Jullien est membre du Centre Atlantique de philosophie (Caphi).

MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS, CNAM / JEAN-CLAUDE WETZEL

La Pascaline, machine à calculer présentée par le savant en 1645, facilite les opérations d'addition et de soustraction, en calculant les retenues automatiquement.

pour ainsi dire sans frottements, s'impose la résolution mécanique du problème stratégique des retenues : si l'on ajoute un nombre quelconque à 9999 par exemple, il faudra un premier mécanisme des unités qui ajoute un seul déplacement au deuxième mécanisme, celui des dizaines, puis en conséquence, en ajoute un à celui des centaines, etc. Et tout ceci indépendamment des additions propres de chaque genre. Telle est la fonction des fameux cliquets à ressort appelés sautoirs que Blaise Pascal a pensés, inventés et forgés ou fait forger. On ne saurait, ici, décrire ces complexes enchaînements mécaniques. Alors, inévitablement la Pascaline est chère, très chère. Quelques privilégiés en recevront ou en achèteront. Mais au total, il s'en construira et on en vendra 20 entre 1645 et 1655. Blaise Pascal sera passé à autre chose.

De tout ceci, on pourrait conclure au génie qui fait avancer les sciences, qui approfondit les connaissances que nous avons des phénomènes. On se tromperait je crois, et c'est pourquoi il me semble que l'on est au cœur de ce qui faisait la nature et la conviction de Blaise Pascal : ce qu'est l'humain, ce qu'il peut faire est immense, énorme et pourtant ce n'est rien ou si peu de choses. Nous, roseau pensant, sommes au point d'équilibre entre deux infinis, le grand et le petit, capables de penser et susceptibles d'être balayés par le moindre souffle d'air. Telle aussi est sa machine, elle additionne vite mais n'éclaire en rien les mystères infinis des nombres.

Un an avant de s'occuper de sa machine à calculer, tout jeune qu'il était, il rédigeait des résultats renversants de nouveauté et de profondeur sur les courbes coniques

Il renouvelle nos connaissances sur les lois de la nature

On vient de voir qu'elle constituait un événement de grande importance, un exploit théorique et pratique. Alors comment expliquer qu'elle n'occupe presque aucune place dans les livres qui nous transmettent ce que pensa, ce que fit Blaise Pascal ? Voyons l'édition des *Œuvres complètes* par Louis Lafuma, au Seuil : la Pascaline occupe sept pages sur 640 pages et 24 pages sur environ 4000 dans la grande édition de Jean Mesnard, compte non tenu des *Pensées* ni des *Provinciales*. La raison de ceci est que cet ouvrage-là n'a pas fait avancer les sciences mathématiques d'un pouce, ni la physique. Ce n'est pas que Blaise Pascal en

eut été incapable ou que son génie ne s'en mêla point. Au contraire, un an avant de s'occuper de ladite machine, tout jeune qu'il était, il rédigeait et publiait des résultats renversants de nouveauté et de profondeur sur les courbes coniques, dont les mathématiciens explorent les propriétés depuis l'Antiquité. Quelques années après avoir fermé le dossier de la Pascaline, il rédigeait et publiait une série d'opuscules décisifs sur ce que l'on appelait alors les indivisibles, des concepts et méthodes qui allaient transformer les mathématiques puisqu'ils ouvraient à cette science la maîtrise du calcul infinitésimal.

À quelque temps de là, Blaise explorait un domaine presque vierge en ces sciences, celui des probabilités, qu'il nommait *« le calcul des partis »*. Par ces voies qu'il ouvrait, alors oui, il transformait les mathématiques, ce qu'il ne faisait pas en permettant à un public ignorant en cette science de faire plus rapidement des additions. Les secrets des opérations arithmétiques étaient connus depuis des siècles, même si leur emploi pouvait être fastidieux. Et ce jugement vaut aussi pour Blaise Pascal physicien. Il n'y a rien de nouveau dans la Pascaline, touchant aux lois de la mécanique, de la gravité ou du magnétisme ; de ce point de vue, la merveilleuse machine ne compte pas. À l'inverse, lorsque Blaise Pascal réalise des expériences et rédige des traités sur le vide, qui vont puissamment contribuer au triomphe de la théorie de la pesanteur de l'atmosphère, qui vont valider, voire inventer les lois qui régissent la pression dans les liquides, alors oui, il fera bouger les lignes et renouvellera ce que l'on connaît des lois de la nature.

AKG IMAGES

Portrait présumé de Blaise Pascal (1623-1662), vers 1650.

Les additionneurs actuels suivent le même processus mental que la Pascaline

On ne saurait s'en tenir à ces observations et c'est un fragment des *Pensées* qui nous y invite. Voici ce qu'on peut y lire : *« La machine d'arithmétique fait des effets qui approchent plus de la pensée que tout ce que font les animaux ; mais elle ne fait rien qui puisse faire dire qu'elle a de la volonté, comme les animaux. »* Si par pensée, nous voulons bien entendre une notion proche de l'intelligence, alors, nous lisons que pour Pascal, sa machine relève de l'intelligence artificielle et se montre proche de la nature humaine, plus proche en tous les cas que tous les animaux, quoiqu'elle s'éloigne tout à fait de cette humanité par une absence totale de volonté, critère selon lequel des animaux nous sont plus proches.

Dans un sens, la suite justifie cette interprétation. Car, aussi élémentaires qu'aient été les problèmes que la Pascaline traitait, à savoir l'addition et la soustraction arithmétiques, elle a réellement inspiré les machines qui suivront : celle de Gottfried Wilhelm Leibniz en 1671, de Giovanni Poleni en 1709, de Thomas de Colmar en 1820, de Charles Babbage en 1834 et de Curt Herzstark, inventée dans le camp de concentration de Buchenwald en 1944 ; les multiplications et divisions y étaient intégrées. Sans doute, le passage à l'électronique a-t-il transformé les concepts, les méthodes et les matériaux. Mais, comme l'écrit fort bien (en 2009) le mathématicien Daniel Teman, *« c'est toujours suivant le même processus mental que se réalisent les additions dans les machines à calculer et ordinateurs de nos jours : ainsi, un composant de type full-adder 8 bits (un additionneur complet), pour ajouter deux nombres binaires d'un octet chacun, va, lui aussi, additionner, en utilisant les tables de vérité logiques de ses transistors, les bits successifs, de droite vers la gauche, en posant le résultat de chaque addition élémentaire et en faisant la retenue de 0 ou de 1 »*. ■

THÉORIE

L'induction complète, perle de l'arithmétique

Blaise Pascal réalise des percées du côté de la pensée automatique, bien plus fondamentales que son « additionneuse » de 1645, notamment le *Traité du triangle arithmétique* et les textes connexes. Il s'agit d'une figure déjà ancienne, mais à laquelle il va donner une extension exceptionnelle : horizontalement, une ligne de 1, verticalement, une ligne de 1. Le triangle se remplit à l'infini selon une règle toute simple : on remplit une case (une cellule) en additionnant celle du dessus et celle de gauche. La récolte des résultats faite par Blaise Pascal est d'une valeur inestimable : *« J'ai en ma possession bien des résultats encore, mais devant une telle abondance, je suis bien obligé de me limiter. »* Ce triangle lui permet de découvrir la somme des carrés, de prévoir la valeur d'une cellule quelconque, etc. Et surtout, il établit le principe fondamental de l'arithmétique infinie, le « principe de récurrence » ou encore d'« induction complète ».

Du point de vue de la théorie arithmétique, cela va bien au-delà de ce que fait la Pascaline.

Ce principe valide par une voie logique et démonstrative ce à quoi prétend l'intelligence artificielle de manière empirique : à partir d'un grand nombre de données, généraliser une propriété, une corrélation, mesurée ou observée, pour en faire une loi générale.

Les voyages du SAVOIR SCIENCES ET AVENIR

L'art rupestre à livre ouvert

LE SITE ARCHÉOLOGIQUE DE FOZ CÔA au Portugal

Avec Jean-Michel Geneste et Philippe Pajot

Du 9 au 14 septembre 2024

PHILIPPE PAJOT
Rédacteur en chef de *La Recherche*

Sur les berges escarpées de la rivière Côa, affluent du Douro, des chasseurs-cueilleurs ont gravé sur des roches des milliers de figures animales durant plusieurs millénaires. C'est à retrouver et décrypter ces gravures que s'emploient des chercheurs archéologues depuis 1996. Je vous invite à entreprendre avec moi ce voyage sur un site extraordinaire, témoin fascinant de l'évolution de l'art préhistorique où la recherche est toujours à l'œuvre. Grâce à Jean-Michel Geneste et à ses collègues et amis chercheurs que nous aurons le privilège de rencontrer et qui nous guideront, nous tenterons de percer les mystères de ces milliers de gravures de figures animales ! Mais cette région du Haut Douro réserve aussi de très belles surprises en matière de paysages, de monuments, de découvertes touristiques, sans oublier que le fameux vin de Porto a là ses vraies racines, et nous ne négligerons pas ces richesses ! ■

Cadana do inferno

En petits groupes, pour une meilleure qualité des visites, nous irons à la découverte de ces gravures millénaires, parfois difficiles à lire mais nos guides nous y aideront. Comprendre, interpréter et comparer ces expressions artistiques sera aussi l'objectif des conférences de Jean-Michel Geneste.

Sur la rivière Côa

Au programme : Visites de Porto, Braga, Guimarães, parc archéologique de Foz Côa, Pinhao, Vila Real.
5 nuits / 6 jours de Porto à Porto 1.950 € par personne en pension complète.

JEAN-MICHEL GENESTE
Directeur honoraire du Centre national de Préhistoire et rattaché à l'UMR PACEA à l'université de Bordeaux.
Archéologue du Paléolithique il s'est attaché à l'étude, la conservation et la gestion des sites d'art rupestre dont Lascaux et Chauvet. Il a été responsable de l'équipe de recherche de la grotte Chauvet à la suite de Jean Clottes jusqu'en 2017.

« Longtemps ignoré et non daté, l'art rupestre en plein air, qui fut contemporain de celui des grottes ornées telles que Chauvet et Altamira, n'a été porté à la connaissance du public que récemment.
La découverte de nombreux sites de gravures dans la vallée du Côa au Portugal, suite à un projet de barrage qui menaçait leur conservation a permis de lancer en 1996 un important processus scientifique de reconnaissance officielle de l'art paléolithique en plein air.
Je serai très heureux de vous accompagner dans cette découverte d'un autre aspect de l'art rupestre et de vous faire rencontrer mes collègues et amis archéologues, Luis Luis et Thierry Aubry, qui continuent à travailler sur les sites et à veiller à leur préservation. »

THIERRY AUBRY

Avec la participation des archéologues **Thierry Aubry** et **Luis Luis** en charge des fouilles et des études sur le site de Foz Côa.

LUIS LUIS

Organisation technique BLB TOURISME

PROGRAMME, RENSEIGNEMENTS ET RÉSERVATIONS :
blb-tourisme.bzh/voyages-du-savoir
Ou scannez

BLB TOURISME Zone de KERBOIS 15, Rue Yves de Kerguelen 56400 AURAY
Tél : **02 97 56 60 86** Courriel : **inscription@blb-tourisme.com**

TRANSVERSALES

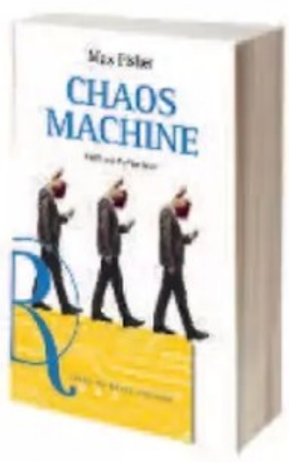
BULLIT MARQUEZ/AP/SIPA

Manifestation devant les bureaux de Facebook près de Manille (Philippines) contre l'inaction présumée du réseau social face aux « fake news », campagnes de dénonciation ou de calomnies.

L'extrémisme automatisé

« Chaos Machine » décortique les mécanismes par lesquels les réseaux sociaux amplifient les propos voire les actes violents. Ceux qui ont voulu sonner l'alarme n'ont pas été écoutés.

ALERTE Renée DiResta est analyste dans la Silicon Valley pour le compte d'un fonds d'investissement. Brianna Wu est développeuse de jeux vidéo. Ellen Pao a dirigé Reddit, le site de forums et d'agrégation d'actualités. Le Français Guillaume Chaslot était ingénieur informatique en intelligence artificielle chez Google. L'Australien David Madden est un entrepreneur dans le secteur des technologies basé au Myanmar. Jonas Kaiser est chercheur au Berkman Klein Center de Harvard (États-Unis). Tous ont en commun d'avoir découvert comment des réseaux sociaux tels Facebook, YouTube, Reddit ou Twitter amplifient les discours extrêmes et violents, excitent l'indignation morale jusqu'au délire, encouragent les utilisateurs à se montrer plus radicaux au point de provoquer des passages à l'acte. Jusqu'aux massacres des Rohingyas en Birmanie. Tous ont décortiqué les mécanismes (certains en ont été victimes) qu'ils ont mis au jour et tous ont sonner l'alarme. Aucun n'a été écouté (Guillaume Chaslot a été licencié par Google et Ellen Pao a été amenée à démissionner de Reddit).



Journaliste au *New York Times*, Max Fisher raconte leurs parcours avec un luxe de détails techniques et scientifiques, mais explore aussi la culture de la Silicon Valley, une *« élite geek masculine »* accrochée au credo d'une *« technolibération »* confinant au déni de la réalité des usages. Les histoires choquantes voire dramatiques abondent. Elles ne sont pas des épiphénomènes ou de simples dérapages. Elles montrent combien la bienveillance, la nuance, l'échange d'idées est en fait incompatible avec le modèle économique de ces plateformes. ■ **Arnaud Devillard**

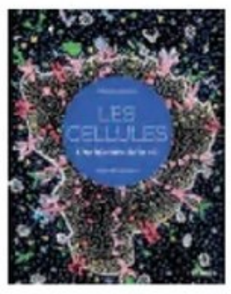
Chaos Machine, Max Fisher, Éditions Marie Romaine, 464 p., 19,90 €

SOMMAIRE

▶ C'est à lire p. 100
▶ C'est à voir p. 102
▶ Le ciel du mois p. 104
▶ Chroniques p. 106
▶ Questions de lecteurs p. 108
▶ Jeux p. 109

Dans les rouages de la vie

IMMERSION La cellule : sa vie, son œuvre. Elle est magnifiée dans ce livre où se mêlent intelligemment imagerie scientifique, schémas et calligrammes. L'histoire du vivant et son fonctionnement sont retracés de façon synthétique par le spécialiste du plancton Christian Sardet,



coconcepteur de la mission Tara Océans. Depuis les premières observations au microscope au XVIIe siècle, jusqu'aux études récentes du microbiote, voilà une immersion vertigineuse dans les rouages de la vie. ■ **A. De B.**

Les Cellules. Une histoire de la vie, Christian Sardet, éditions Ulmer, 223 p., 35 €

Francis Hallé, pour l'amour du vivant

HOMMAGE C'est l'histoire d'une vision partagée des sciences, pimentée par l'émerveillement. Elle aura rapproché un écrivain féru de biologie et un grand botaniste. Alexis Jenni a tiré de ses échanges avec Francis

Hallé le passionnant récit d'une vie vécue dans l'étude des plantes. Qu'il s'agisse de la fascinante aventure du Radeau des cimes ou de son projet de recréer une forêt primaire en Europe, le chercheur aura sans cesse proclamé la beauté du vivant. ■ **A. De B.**

Un naturaliste sur le toit de la forêt. Francis Hallé raconté par Alexis Jenni, Paulsen, 192 p., 21 €

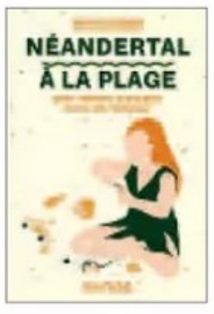
Le poids de nos émissions

DIAGNOSTIC Votre empreinte carbone est inconnue ? Ce livre est fait pour vous. L'auteur, chercheur à l'université de Lancaster (Royaume-Uni), a calculé l'empreinte carbone de plus d'une centaine de gestes et d'objets du quotidien : de la pinte de bière à l'achat d'un ordinateur, en passant par la coupe du monde de football. Rédigé sous la forme d'articles courts, cet ouvrage offre de véritables clés de compréhension sur l'origine de nos émissions. ■ **I. do O'G.**

Peut-on encore manger des bananes ?, Mike Berners-Lee, L'arbre qui marche, 304 p., 21,90 €

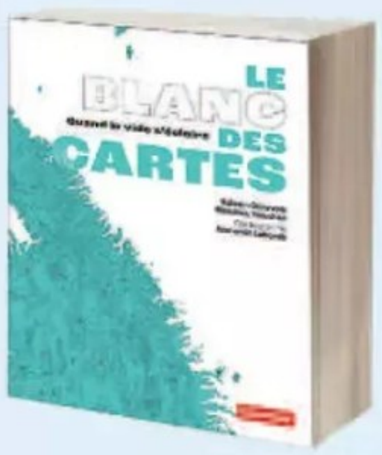
Neandertal, un portrait affiné

ÉVOLUTION Ses arcades sourcilières proéminentes et son corps trapu ont longtemps valu à l'homme de Neandertal l'image d'une brute. Mais les dernières découvertes ont permis de dresser un portrait plus subtil de cet *Homo* à la peau claire, aux cheveux roux ou châtain clair, qui a peuplé



l'Europe entre -400 000 et -40 000 ans. Il maîtrisait le feu, fabriquait des outils élaborés… Quels ont été ensuite ses échanges avec *Homo sapiens* ? C'est l'une des questions auxquelles tente de répondre cet ouvrage passionnant. ■ **S. R.**

Neandertal à la plage, Silvana Condemi, Jean-François Mondot, Dunod, 176 p., 15,90 €



Des vides éclairants

TERRITOIRES Et si les blancs des cartes étaient porteurs d'informations ? Tel est l'angle d'attaque de cet atlas peu ordinaire. Jadis, les *terrae incognitae* étaient comblées par des créatures fantasmagoriques. Mais dès la fin du XVIIIe siècle, les cartographes ont préféré laisser en blanc ce qu'ils ignoraient. Lorsqu'il dresse la carte de l'île Bourbon (La Réunion) en 1722, l'ingénieur Denis Denyon détaille son littoral, laissant l'intérieur en blanc. Les vides des cartes ont aussi participé à l'engouement pour les explorations scientifiques et aiguisé les appétits de conquêtes coloniales. Ils peuvent résulter de choix politiques ou culturels, ou être faits pour rendre visibles, par contraste, certaines informations. *« Et ce qui est invisibilisé porte donc un sens »*, soulignent les deux auteurs géographes qui nous offrent dans cet ouvrage l'analyse d'une quarantaine de cartes. Car, malgré le déluge actuel de données numériques, les lacunes persistent, révélant des territoires délaissés, l'absence de routes, d'électricité, etc. ■ **Sylvie Rouat**

Le Blanc des cartes. Quand le vide s'éclaire, Sylvain Genevois et Matthieu Noucher, cartes par Xemartin Laborde, Autrement, 128 p., 29 €

Nos amies les algues

PLAIDOYER L'infatigable défenseur des algues Vincent Doumeizel lance une nouvelle offensive pour sensibiliser le grand public à leur extraordinaire potentiel pour nourrir l'humanité ou lutter contre la pollution et le réchauffement. Il s'est associé à l'illustratrice Lilately pour

réaliser un livre à destination des jeunes mais qui sera utile à tous pour acquérir les données fondamentales sur les algues, leur place dans le vivant et leur potentiel pour accompagner le développement des sociétés. Le propos est validé par Philippe Potin, biologiste marin. ■ **M. N.**

Comment les algues peuvent sauver le monde, Vincent Doumeizel, Lilately, La Cabane bleue, 32 p., 18 €

En attendant Mars

EXPÉRIENCE En 2013, l'auteure, journaliste scientifique américaine, a participé à la première expérience menée par la Nasa

dans un milieu martien simulé — un dôme géodésique perché sur les pentes d'un volcan hawaïen censé reproduire les conditions de vie dans une base martienne. Elle raconte, une dizaine d'années plus tard, ce voyage immobile sur une fausse planète durant quatre mois. Elle y a vécu coupée du monde avec cinq autres volontaires dans un environnement où le concept de vie privé est *« pratiquement inexistant »*. ■ **F. D.**

Il était une fois ma vie sur Mars, Kate Green, La ville brûle, 271 p., 24 €

EXPOSITIONS

Alise-Sainte-Reine (21)

Ô sports, des jeux pour des dieux
L'histoire des jeux Olympiques est retracée à travers les écrits de l'époque, mais aussi à l'aide des statues, vases, pièces de monnaie et outils issus de fouilles archéologiques.
MuséoParc Alésia, 1, route des Trois orrmeaux, jusqu'au 30 novembre. Rens. : 03.80.96.96.23.

Annecy (74)

Archéo, une expo à creuser
Cette exposition est conçue comme un exercice pratique destiné à faire comprendre le métier d'archéologue. Comment fouille-t-on, avec quels outils ? Quels indices trouve-t-on ? Que fait-on des objets découverts ?
La Turbine Sciences, place Chorus, Cran-Gevrier, jusqu'au 1er septembre. Rens. : 04.85.46.74.30.

Auxerre (89)

Biolympiques
Des performances physiques impressionnantes… dans la nature. C'est l'angle décalé de cette exposition à l'heure des jeux Olympiques. Le guépard est champion de course, le crapaud grimpe, l'araignée fait de l'apnée… Et il est aussi question de travail d'équipe.
Muséum, 5, boulevard Vauban, jusqu'au 22 septembre. Rens. : 03.86.72.96.40.

Lillebonne (76)

Le sport dans l'Antiquité
Le sport comme exercice militaire, compétition, spectacle et même comme activité religieuse : les Grecs et les Romains ont façonné ces divers aspects de l'activité physique. À la fin de l'Antiquité, le sport devient une activité professionnelle.
Théâtre romain, place Félix-Faure, jusqu'au 31 octobre. Entrée libre. Rens. : 03.35.03.55.55.

Clères (76) / Parc

Parc animalier et botanique de Clères

Des flamants roses, pandas roux, ouistitis, antilopes, wallabys…. Nous sommes dans une petite vallée normande où ce parc à l'anglaise façonne le paysage depuis le XVIe siècle. Aujourd'hui, il abrite pas moins de 1400 animaux, dont près d'un millier évolue en liberté, ainsi que plus de 2500 espèces et variétés différentes de plantes. De nombreuses essences d'arbres ont été plantées dans le parc au fil du temps, telles qu'un séquoia géant, un ginkgo biloba, des tilleuls à feuilles laciniées, ainsi qu'un verger conservatoire. Des lémuriens, tamarins, gibbons… se prélassent sur les branches dans des enclos essayant de reproduire le plus fidèlement possible leur milieu naturel. Le lieu veut jouer un rôle dans la préservation d'espèces menacées, et s'investir dans la conservation de la biodiversité, dans la recherche scientifique ainsi que dans l'éducation et la sensibilisation du public aux richesses naturelles. Lire notre reportage : sciav.fr/929cleres ■ **Juliette Frey**

JULIETTE FREY

Près d'un millier d'animaux vivent en liberté dans le parc de Clères.

Parc de Clères, 32, avenue du Parc. Rens. : 02.35.33.23.08.

Lyon (69)

Mondes disparus
L'aventure en réalité virtuelle conçue pour le Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, se déplace. Pendant 45 minutes, le visiteur arpente les paysages de La Terre à plusieurs périodes de son évolution.
Relire notre reportage à Paris : sciav.fr/928mondes
Centre Eclipso, 112, cours Charlemagne. Rens. : sciav.fr/928eclipso

Morlaix (29)

Espace des sciences
Ce centre de médiation scientifique a été déplacé au sein de la Manufacture des tabacs. Il a été repensé avec, d'un côté, le lien entre patrimoine industriel et science, de l'autre, les sciences de la Terre et de l'Univers.
Manufacture des tabacs, 42, quai du Léon. Rens. : 06.71.47.94.65.

Nantes (44)

Musée Dobrée
Ce musée d'art et d'archéologie est réparti sur trois bâtiments, dont un manoir du XVe siècle et un palais néomédiéval. Il a rouvert mi-mai après rénovation, avec des collections couvrant 500 000 ans d'histoire et fortes de 2400 objets.
Musée Dobrée, 1 place Jean-V. Rens. : 02.40.71.03.50.

Nîmes (30)

Achille et la guerre de Troie
Le musée de la Romanité a extrait de ses réserves des œuvres consacrées à Achille, héros de la mythologie grecque. Une mosaïque de 30 m² restaurée en 2010 sera notamment exposée pour la première fois, ainsi que quelques prêts dont le sarcophage d'Achille à Skyros.
Musée de la Romanité, 16 place des arènes, jusqu'au 5 janvier 2025. Rens. : 04.48.21.02.10.

Paris (75)

Précieux déchets
L'eau, le sol, l'air sont empoisonnés par deux milliards de tonnes de déchets générées chaque année dans le monde. Cette exposition aide à la prise de conscience mais ouvre également des perspectives sur la valeur de ces mêmes déchets.
Lire notre reportage : sciav.fr/925dechet
Cité des sciences et de l'industrie, 30, avenue Corentin-Cariou, jusqu'au 1er septembre. Rens. : 01.85.53.99.74.

Olympisme, une histoire du monde
Les jeux Olympiques ne sont pas une trêve dans les tensions politiques et internationales. Au contraire : ils leur servent de chambre d'écho. C'est ce que montre ce parcours passionnant, qui s'appuie sur près de 600 œuvres, documents, films

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

Frise en bois peinte de cinq têtes de Daruma. Ère Meiji, Japon (1868-1912).

d'archives et photographies de 1896 à 2024.
Lire notre reportage : sciav.fr/929olympisme
Palais de la porte Dorée, 293, avenue Daumesnil, jusqu'au 8 septembre. Rens. : 01.53.59.58.60.

Mexica. Des dons et des dieux au Templo Mayor

Cette exposition revient sur 45 ans de fouilles consacrées aux Mexicas et à la vie religieuse dans Tenochtitlan, l'ancienne capitale impériale.
Musée du Quai-Branly Jacques-Chirac, 37, quai Branly, jusqu'au 8 septembre. Rens. : 01.56.61.70.00.

Pleumeur-Bodou (22)

Effets spéciaux, crevez l'écran

Cette reprise de l'exposition présentée en 2017 à la Cité des sciences, à Paris, va des trucages des films de Méliès aux prouesses du numérique dans les films d'action. Relire notre reportage à Paris : sciav.fr/effetsspeciaux
Cité des Télécoms, parc du Radôme, jusqu'en janvier 2025. Rens. : 02.96.46.63.80.

Ploëzal (22)

Impact, la biodiversité en questions

Conçue par le Muséum de Toulouse, cette exposition s'intéresse au rôle de l'humain dans les bouleversements des écosystèmes. Extinctions de masse, impact de la consommation, résilience naturelle…
Domaine départemental de la Roche-Jagu, jusqu'au 6 octobre. Rens. : 02.96.95.62.35.

Lyon (69) / Exposition

Épidémie. Prendre soin du vivant

De la peste au Covid-19, en passant par la variole, le choléra, la grippe espagnole et le sida, ces maladies ont marqué notre histoire. Mais avec quel impact sur les sociétés humaines et animales ? Le musée des Confluences propose de le découvrir. Le visiteur *« suit le fil d'une enquête anthropologique et historique pour mieux comprendre le fonctionnement des grandes épidémies »*, présente Hélène Lafont-Couturier, directrice générale du musée. Le parcours s'étend du néolithique à nos jours. À travers des collections d'ethnographie, de médecine et d'histoire naturelle, ainsi que des œuvres contemporaines, se dévoilent des enjeux de santé publique et d'évolution des sociétés face aux grands défis sanitaires. *« Ce projet, bien antérieur au Covid-19, s'inspire de l'exposition Outbreak : Epidemics in a Connected World au Musée national d'histoire naturelle Smithsonian à Washington, aux États-Unis, entre 2018 et 2021 »*, précise Hélène Lafont-Couturier. L'exposition lyonnaise se concentre davantage sur l'histoire longue et sur les réponses sociétales aux épidémies. La dernière crise sanitaire n'est qu'évoquée. Lire notre reportage : sciav.fr/928diapo ■ **J. F.**

MUSÉE DES CONFLUENCES - OLIVIER GARCIN

Musée des Confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 16 février 2025. Rens. : 04.28.38.12.12.

Rodez (12)

Éthiopie, la vallée des stèles

Dans le sud de l'Éthiopie, on compte plusieurs milliers de stèles réparties sur 130 sites identifiés à ce jour. Cette exposition restitue le travail scientifique et les derniers résultats concernant ces monuments.
Musée Fenaille, 14, place Eugène-Raynaldy, jusqu'au 3 novembre. Rens. : 05. 65.73.84.30.

Rouen (76)

Fantastique physique !

Des instruments tels le thermomètre de Kinnersley ou les tubes de Crookes racontent l'histoire de l'enseignement des sciences. Les collections évoquent aussi bien l'école primaire sous la IIIe République que le lycée napoléonien ou les méthodes actuelles.
Musée national de l'éducation, 185, rue l'Eau-de-Robec, jusqu'au 30 septembre 2026. Rens. : 02.35.07.66. 61.

Wizernes (62) / Film

Planétarium 3D de La Coupole

Construit entre septembre 1943 et juillet 1944, ce site devait servir à lancer des V2 sur Londres. Il ne fut jamais achevé. Il sert aujourd'hui de centre d'histoire et de mémoire, les V2 étant les ancêtres des premières fusées. Le lieu abrite également un planétarium 3D, le plus moderne du monde, mettant à l'honneur la conquête spatiale. L'écran à 360°, de 15 m de diamètre, assure aux spectateurs une immersion totale. Un film retrace l'épopée des sondes Voyager 1 et 2 à travers le Système solaire : le survol de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune y est époustouflant. La plongée dans les anneaux de Saturne donne l'illusion de flotter parmi ces milliards de cristaux de glace. Les passages en rase-motte sur Europe, satellite de Jupiter, ou encore Encelade autour de Saturne, sont à couper le souffle. Lire notre reportage : sciav.fr/929coupole ■ **Fabrice Nicot**

JÉRÔME POULLE

La conquête spatiale est retracée dans le film.

La Coupole, rue André-Ciabaux. Rens. : 03.21.12.27.27.

Toulouse (31)

« Cathares ». Toulouse dans la croisade

Deux sites évoquent la croisade du pape Innocent III contre les Albigeois au début du XIIIe siècle et « l'hérésie cathare ». Une notion utilisée surtout à des fins politiques. Mais le catharisme reste aujourd'hui un enjeu idéologique.
Musée Saint-Raymond, 1 ter, place Saint-Sernin, et cloître des Jacobins, allée Maurice-Prin, jusqu'au 5 janvier 2025. Rens. : 05.61.22.31.44.

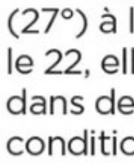
LE CIEL DE JUILLET

PAR JOHAN KIEKEN

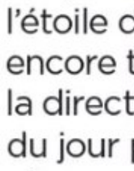
Où sont les planètes?

MERCURE
Bien que la petite planète atteigne sa plus grande distance angulaire (27°) à l'est du Soleil le 22, elle n'est pas dans de bonnes conditions d'observation sous nos latitudes, quasi noyée dans les lumières du couchant.

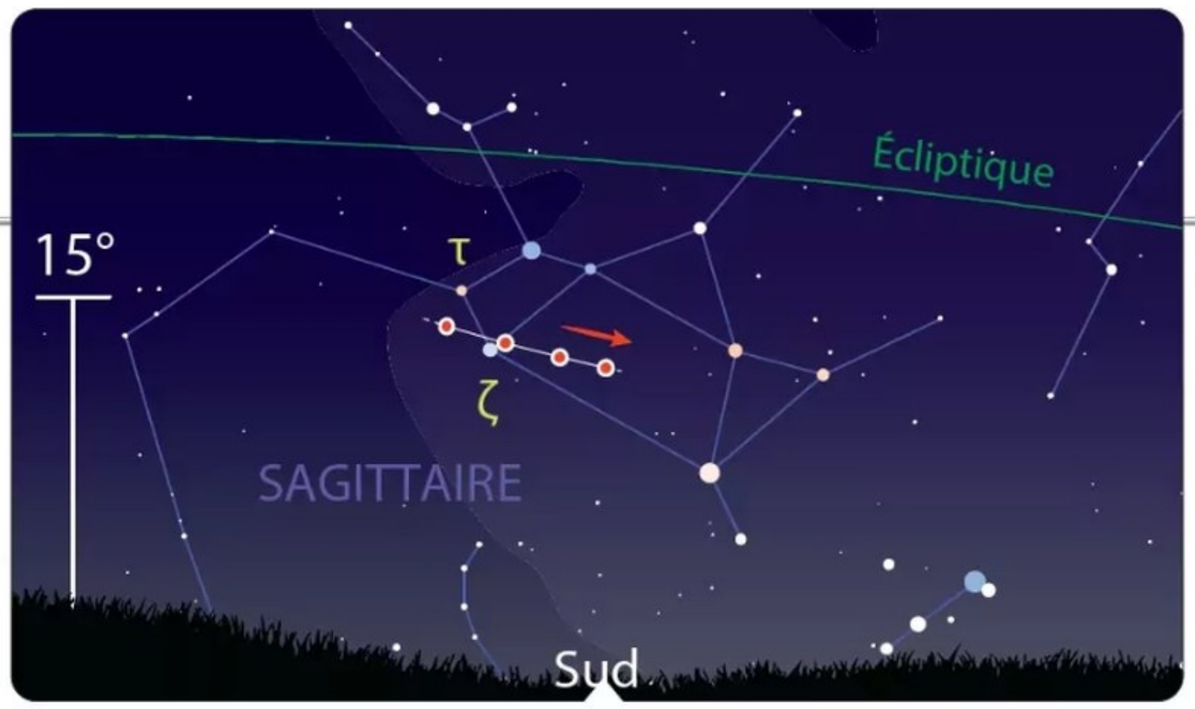
VÉNUS
Un mois après son passage en conjonction supérieure, l'étoile du Berger est encore trop proche de la direction de l'astre du jour pour être observable ce mois.



MARS
La planète Rouge gagne en luminosité chaque jour. Ce point légèrement orangé est visible en fin de nuit vers l'est, à une bonne vingtaine de degrés de hauteur. Mars quitte la constellation du Bélier pour le Taureau le 11.



JUPITER
La plus grosse des planètes domine le ciel de fin de nuit. Très brillante, elle voit ses conditions d'observation s'améliorer au fil des jours. Ainsi, elle se lève 2 h avant notre étoile le 1er et 4 h 10 min 30 jours plus tard.



Aspect du ciel étoilé le 1er à 2 h du matin ou — la situation étant quasiment la même — le 31 vers minuit. Le point rouge qui se déplace n'est autre que Cérès, dont la position est donnée les 1er, 11, 21 et 31.

Repérer Cérès aux jumelles

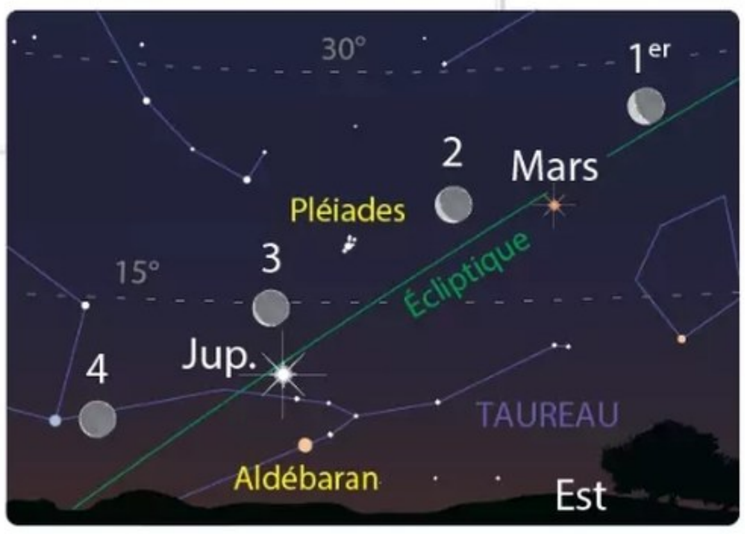
LE 6, L'ASTÉROÏDE ET PLANÈTE NAINE CÉRÈS passe à l'opposition. Situé dans la direction opposée au Soleil, il est au plus près de la Terre et à son maximum d'éclat pour l'année. Inobservable à l'œil nu, il demeure visible toute la nuit aux jumelles.

Notre conseil Trouvez d'abord le Sagittaire, à la forme caractéristique de théière, bas vers le sud. Son anse vous sera d'une grande utilité car les 7 et 8, Cérès sera juste au-dessus de l'étoile Ascella (ξ). Vous pourrez alors suivre, nuit après nuit, son déplacement parmi les étoiles.

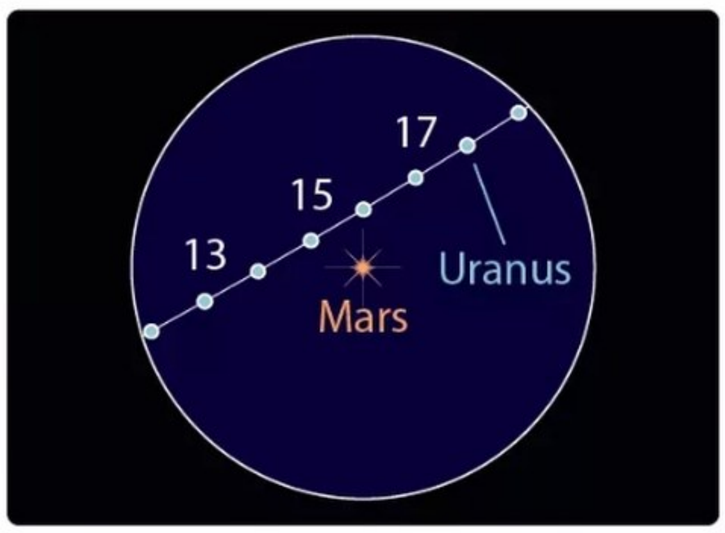
SATURNE
La planète aux anneaux se lève autour de minuit. Elle est proche de sa culmination vers le sud lorsqu'apparaissent les lueurs de l'aube.

L'appli du mois

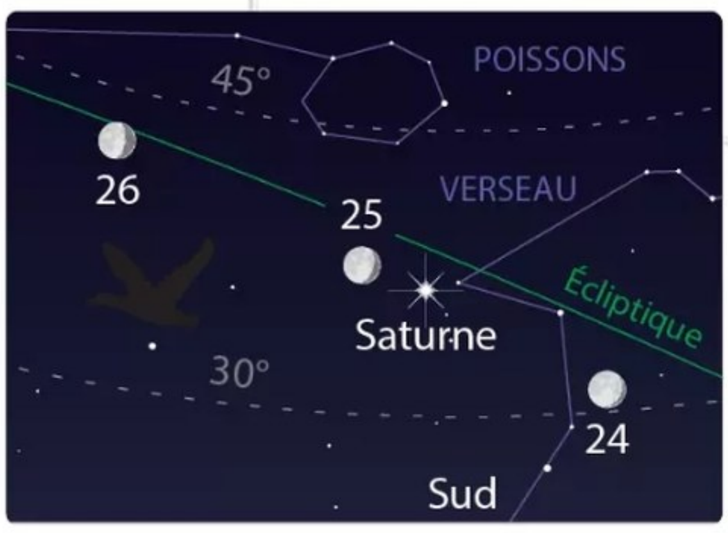
MY AURORA FORECAST est une application gratuite en français pour Android et iOS. Elle indique la probabilité d'observer une aurore depuis chez vous ou le lieu de votre choix, et fournit des informations sur le vent solaire. Elle propose également des vues en direct de quelques webcams de latitude élevée. Enfin, elle peut vous envoyer des notifications lorsque l'activité aurorale s'annonce forte.



DU 1ER AU 4, 1 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, contemplez le dernier croissant de Lune et sa lumière cendrée passer au large de Mars, de l'amas des Pléiades et de Jupiter.



DU 12 AU 19, MARS ET URANUS SERONT OBSERVABLES conjointement à travers une paire de jumelles. Un bon moyen pour découvrir la lointaine et blafarde géante de glace!



LE 25, 1 H 30 AVANT LE LEVER DU SOLEIL, la Lune en phase gibbeuse décroissante se trouvera à 3,5° au nord-ouest de la planète Saturne, dans la constellation du Verseau.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de juillet

Où sont les planètes ?

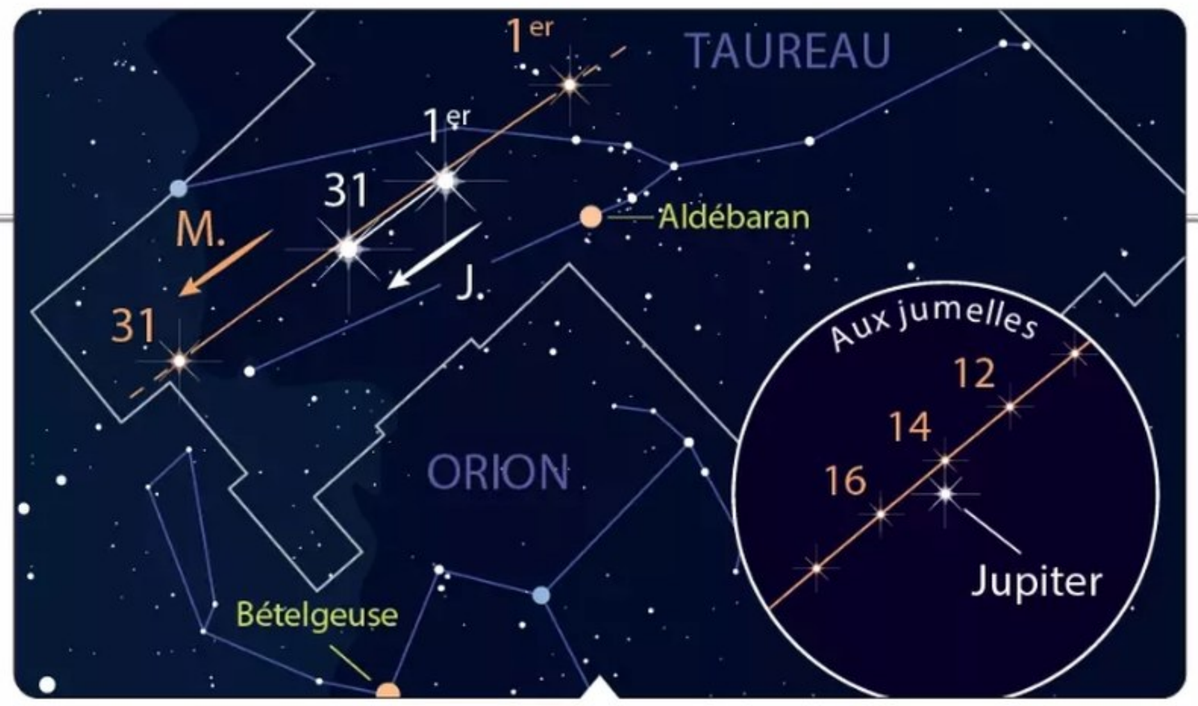
MERCURE
La « planète de fer » passe en conjonction inférieure le 19 et, comme le mois dernier, n'est pas observable. Elle est effacée, cette fois-ci, par l'éclat du levant.

VÉNUS
Bien qu'elle s'éloigne peu à peu de la direction du Soleil, Vénus est très basse en soirée vers le couchant. La faute en revient à l'écliptique, dont elle est proche, qui ne cesse de s'abaisser sur l'horizon. Tout ce mois, elle se couche ainsi 45 min environ après l'astre du jour.

MARS
La planète Rouge est visible en fin de nuit, non loin du phare qu'est la planète Jupiter. Son éclat est désormais comparable à celui d'Aldébaran du Taureau, dont elle est également proche à ce moment.

JUPITER
En quelques semaines, la planète géante s'est rapidement éloignée des lueurs de l'aube. Par sa luminosité, elle domine largement le ciel de seconde partie de nuit.

SATURNE
À un mois de son passage à l'opposition, le seigneur des anneaux est observable une grande partie de la nuit. Point dont la brillance équivaut à celle de Mars, on la trouve à une vingtaine de degrés sous le carré de Pégase, au cœur de la nuit.



Trajets de Mars (M.) et de Jupiter (J.) dans la constellation du Taureau du 1er au 31. Le zoom est une vue aux jumelles centrée sur Jupiter.

Un beau rapprochement Jupiter-Mars

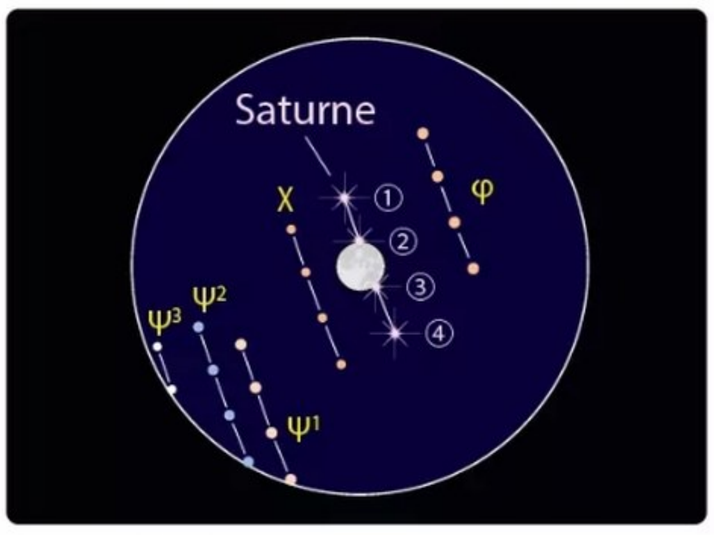
PENDANT UNE DIZAINE DE JOURS, Jupiter et Mars seront observables dans le même champ d'une paire de jumelles. Les 14 et 15, les deux planètes, bien visibles à l'œil nu, seront séparées par moins d'un demi-degré, soit moins que le diamètre apparent de la pleine lune.

Notre conseil Jupiter est immanquable dans le ciel du matin et vous permettra de déceler sans difficulté Mars, 15 fois plus faible. Le suivi matinal du déplacement de ces planètes par rapport aux étoiles, de leur rapprochement puis de leur éloignement est vraiment formateur.

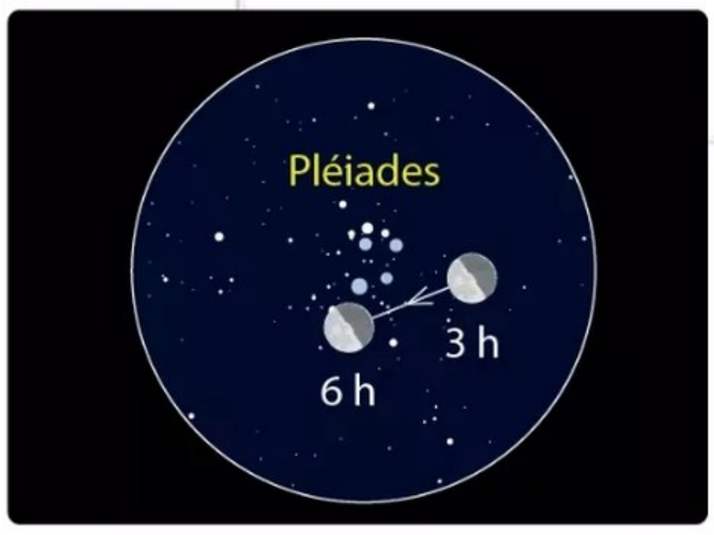
L'appli du mois

STATION SPATIALE ISS DETECTOR est une application gratuite en français pour Android et iOS, avec la possibilité d'extensions payantes. Connaissant votre position, elle fournit les heures et la localisation des passages de la Station spatiale internationale dans votre ciel et, si vous achetez les extensions, celles de nombreux autres satellites artificiels.

DANS LA NUIT DU 12 AU 13, NE MANQUEZ PAS LES ÉTOILES FILANTES du célèbre essaim des Perséides. Vous pourriez admirer jusqu'à plusieurs dizaines de météores par heure.



LE MATIN DU 21, ENTRE 5 H 25 ET 6 H 25 ENVIRON, la Lune presque pleine occultera Saturne : 1 h avant l'immersion (1), pendant l'immersion (2), pendant l'émersion (3), 1 h après l'émersion (4).



LE MATIN DU 26, ENTRE 3 H ET 6 H, la Lune en dernier quartier frôlera le superbe amas d'étoiles des Pléiades. Le spectacle prendra place à bonne hauteur vers l'est.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel d'août

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 3.

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec, groupe 1.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CÉLINE GUIVARCH ET CHRISTOPHE CASSOU

Une technologie révolutionnaire pour le climat et la santé, le vélo !

La France n'a pas une culture très développée de la pratique quotidienne du vélo, contrairement à certains de ses voisins européens. Ça change, en particulier grâce à des politiques publiques en faveur de son usage dans certaines métropoles et territoires, mais bien lentement ! La dernière enquête, datant de 2019, chiffrait les kilomètres parcourus à vélo par la population adulte en France à 4,6 milliards de kilomètres par an, soit 0,3 km/personne/jour, et seulement 3 % de la population se déplaçait régulièrement à vélo. À titre de comparaison, 28 % des déplacements se font à bicyclette aux Pays-Bas. Pas brillant pour une nation qui se présente comme « sportive ». En combinant analyses épidémiologiques, enquêtes de déplacement et prospective des mobilités, des études montrent pourtant que le vélo représente un potentiel significatif pour combattre le changement climatique et les effets de la sédentarité ; une véritable question de santé publique car celle-ci augmente l'incidence de certaines pathologies, le diabète de type 2 et les maladies cardio-vasculaires notamment. Le secteur des transports est le premier contributeur aux émissions de gaz à effet de serre françaises : 32 % des émissions territoriales en 2022, dont plus de la moitié incombe aux voitures. En reportant certains déplacements de courte distance de la voiture vers le vélo, nous gagnerions sur les deux tableaux : la santé, et le climat. Une étude récente estime que si on remplaçait un quart des déplacements de moins de 5 km actuellement réalisés en voiture par des trajets à vélo, cela éviterait environ 3500 maladies chroniques par an. Cela vous fait non pas une, mais deux bonnes raisons d'enfourcher votre vélo. En selle ! ■

Directrice de l'institut Henri-Poincaré, à Paris.

CAMILLE CIER/HANSLUCAS

MATHS PAR SYLVIE BENZONI-GAVAGE

Tout est dans le contrôle

Faire 10 000 pas. La réalisation de cet objectif journalier est scrutée par nombre de personnes sur leur montre connectée ou leur smartphone. Des gadgets omniprésents dans notre vie qui mesurent également des données de santé en lien avec l'activité physique, telle la fréquence cardiaque et son évolution au cours de la journée. L'observation et l'interprétation des courbes ainsi obtenues sont un exemple d'activité mathématique largement pratiquée, en interaction avec notre corps : on y observe les pics liés aux efforts fournis, on essaie de faire baisser la fréquence moyenne en adaptant son activité… Les sportifs n'ont pas attendu Internet pour contrôler leurs paramètres physiques afin d'améliorer leurs performances. Outre la fréquence cardiaque, leurs coachs surveillent leur consommation maximale d'oxygène, ou VO_2max : plus elle est élevée chez un ou une athlète, plus son corps aura de l'énergie à dépenser et pourra repousser ses limites. Au-delà de savoirs empiriques, on peut modéliser et ainsi quantifier les performances sportives en fonction de données physiologiques et de stratégies de course, entre partir trop ou pas assez vite par exemple, comme l'explique la mathématicienne Amandine Aftalion dans son livre *Pourquoi est-on penché dans les virages ?* (CNRS Éditions, 2023). Autrement dit, il existe une manière scientifique de faire du « contrôle » : c'est même un domaine entier des mathématiques. ■

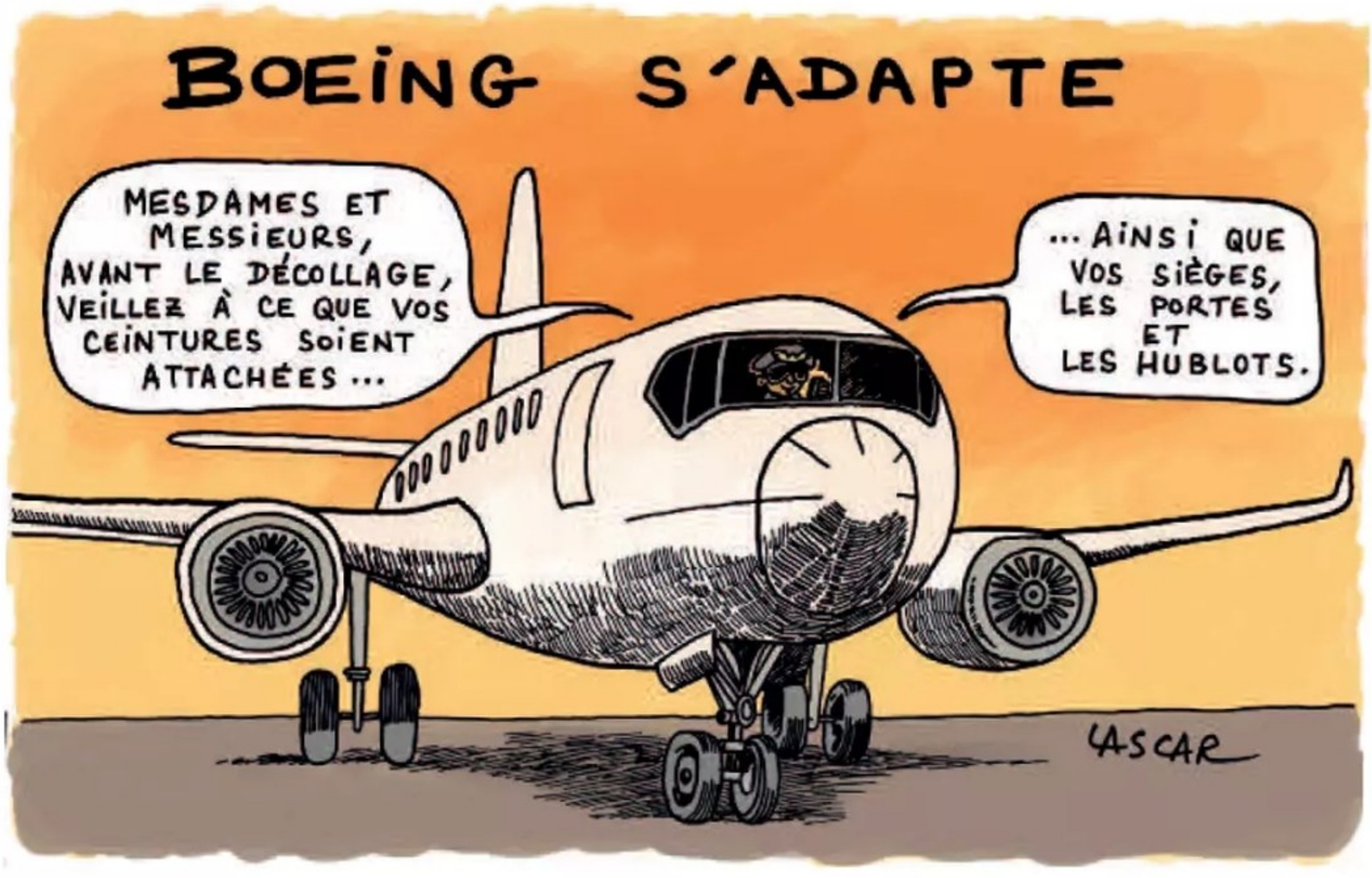
ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Annonces d'apocalypse : visée éthique ou stratégie panique ?

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

La fin de notre monde approche à grands pas ! Les prophètes de l'écologie profonde, du transhumanisme et de la collapsologie l'affirment avec assurance. Pour les uns, elle viendra de l'effondrement de la vie biologique et de la fonte des glaciers. Pour les autres, elle sera consécutive à l'avènement d'une super-intelligence générale. Comment ne pas s'en inquiéter ? Heureusement, ils proposent des solutions audacieuses et séduisantes. On maîtrisera le réchauffement en opacifiant l'atmosphère ou en accroissant l'albédo des nuages ; quant à l'intelligence artificielle générale, nous rivaliserons avec et l'emporterons grâce aux implants qu'Elon Musk promet de connecter à nos cerveaux. Notre grande peur s'arrête. Ouf ! Nous pouvons nous rendormir. Ces annonces fracassantes émoussent notre vigilance et nous engagent à confier les clefs de la maison commune à des entrepreneurs éloquents. Pourtant, les problèmes subsistent : climat, pollution, infox… Et aucune des solutions préconisées ne les résout, bien au contraire. Des études scientifiques montrent même qu'elles les amplifient. À les examiner avec attention, ces proclamations fatidiques relèvent d'une stratégie délibérée : épouvanter jusqu'à provoquer la panique. Dans l'affolement, on s'en remet à des bonimenteurs, là où il conviendrait d'adopter une démarche scientifique rigoureuse. L'étymologie de « panique » renvoie au dieu Pan de la mythologie. À la fois berger, joueur de flûte, séducteur à l'intense activité sexuelle, chasseur et guerrier, il provoque l'effroi par un bruit intense. Pan rime avec boucan ! Les annonces de cataclysmes produisent un effet tout semblable. En exagérant les risques, elles conduisent soit à envisager des solutions extrêmes inappropriées, soit à la résignation. Là où il faudrait de la clairvoyance pour changer nos comportements collectifs et prendre les mesures nécessaires pour endiguer les risques réels, elles engagent à l'inaction et au fatalisme. En somme, la panique n'est pas l'éthique ! ■

BRUNO LÉVY



L'ŒIL DE LASCAR

Série noire ou problème de qualité ? Depuis des mois, l'avionneur américain accumule avaries et incidents. Pas seulement la faute « à pas de chance » : en février, le rapport d'experts indépendants indiquait que le dispositif de Boeing en matière de sécurité présentait des lacunes. Des procédures *« complexes »,* sources de *« confusion »* chez les salariés étaient pointées du doigt. Le constructeur du célèbre 737 a réagi en établissant un plan d'action, remis à la FAA, le régulateur américain de l'aviation, pour résoudre les problèmes de non-conformité de sa production. **O. L.**

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

PHYSIOLOGIE

Pourquoi la moutarde monte-t-elle littéralement au nez?

Clémentine B.-M.

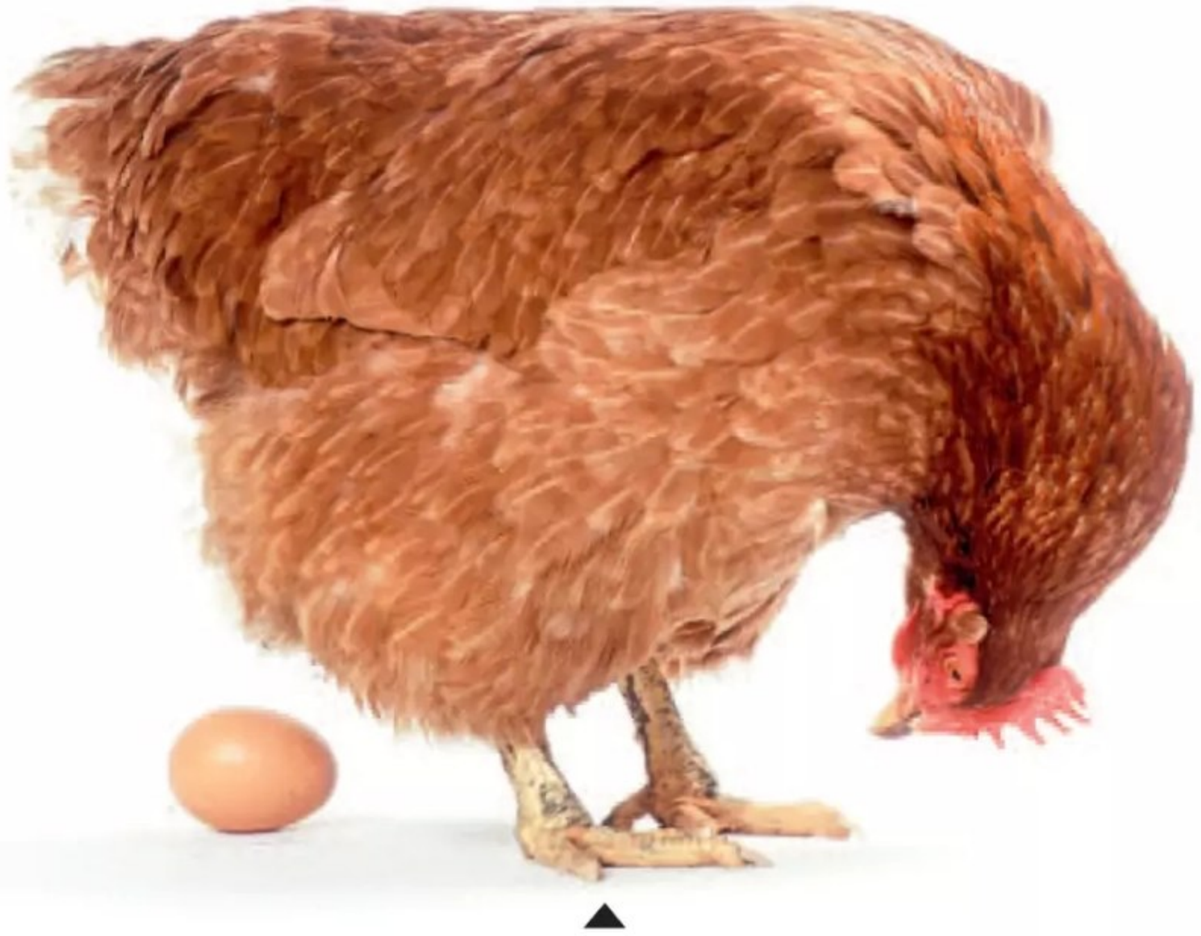
Les graines de moutarde contiennent un composé chimique, l'isothiocyanate d'allyle, qui provoque une sensation de brûlure et un effet lacrymogène lors de leur consommation. La teneur de ce composé dépend de l'espèce du plant de moutarde: de 3 à 4 mg/g pour *Brassica juncea* et de 4 à 18 mg/g pour *Brassica nigra.* Dans notre organisme, la sensation de piquant est perçue grâce aux récepteurs du système trigéminal, composé du nerf trijumeau qui se divise en trois branches dans la bouche, le nez et les yeux. C'est pour cette raison que la moutarde entrée par la bouche nous monte au nez! ■ **Anne-Sophie Tassart**

ANTHROPOMÉTRIE

Quelle taille atteindra l'homme du futur?

Sam U.

Même si la taille moyenne de la population a augmenté depuis plusieurs siècles grâce à une meilleure hygiène, une alimentation diversifiée et la vaccination (les infections ralentissant la croissance), elle se stabilisera sans doute autour de 1,85 m pour le mâle humain. Soit 3 cm de plus que la taille moyenne actuelle des Néerlandais, hommes les plus grands du monde. La stature, soumise à des contraintes mécaniques et osseuses, devient un handicap au-delà d'un certain seuil. De plus, il est très peu probable que la taille de notre cerveau croisse de façon importante, parce qu'elle est liée à cette stature et que la bipédie contraint la largeur du bassin: les femmes ne pourraient accoucher de bébés à la trop grande boîte crânienne. ■ **Franck Daninos**



Toutes espèces confondues, c'est l'œuf qui est arrivé en premier, bien avant la domestication de la poule.

PALÉONTOLOGIE

Qui de l'œuf ou de la poule est arrivé en premier?

Hugo G.

À première vue, cette question semble insoluble. Et pourtant, la science a bien la réponse! Si l'on considère que la question concerne les œufs de poule, et non les œufs en général, alors c'est la poule qui est apparue en premier. *« L'oiseau le plus ancien que l'on connaisse est le ptéryx, qui a vécu il y a environ 140 millions d'années. À la fin du crétacé se détache la branche des galliformes, c'est-à-dire la branche des poules au sens large. Mais la poule, telle qu'on la connaît aujourd'hui, est apparue il y a environ 10 000 ans »*, explique Damien Germain, maître de conférences au Muséum national d'histoire naturelle à Paris. *« La poule est le résultat de la domestication du coq doré, qui provient du sud-est de l'Asie. Les toutes premières poules domestiquées ont donc pondu les œufs d'un coq sauvage »*, complète Ellen Mather, paléontologue à l'université Flinders, en Australie.

Si l'on se demande qui de la poule ou de l'œuf — toutes espèces confondues — est apparu en premier, alors la réponse est l'œuf. Et il faut remonter dans le temps, bien avant la domestication de la poule. *« La plus vieille coquille d'œuf que l'on a retrouvée date du jurassique inférieur, il y a environ 195 millions d'années,* raconte Ellen Mather. *Et il s'agit d'œufs de dinosaures. Nous avons aussi retrouvé des fossiles prouvant que les crocodiles pondaient au jurassique tardif, il y a environ 160 millions d'années. »* ■ **Coralie Lemke**

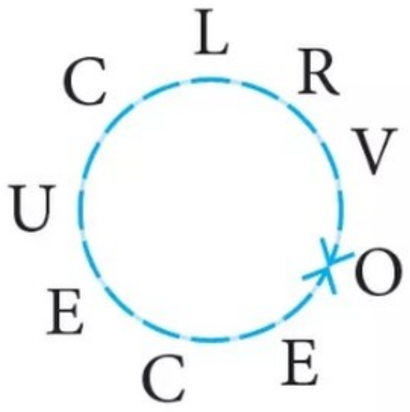
JOHN DANIELS/ARDEA/BIOSPHOTO

SOLUTIONS DANS LE PROCHAIN NUMÉRO

PAR PIERRE BERLOQUIN

▶ À cloche-lettre

Quel mot lisez-vous sur ce cercle en sautant à cloche-lettre, de 2 en 2, de 3 en 3 ou autre ?



▶ Maigrir ou compter ?

Laurent a une tendance évidente à l'embonpoint et entretient autour de son poids exact un certain mystère.

Sa mère lui dit : *« Cela ne peut plus continuer, il faut faire un régime, combien pèses-tu ? »* Et Laurent de répondre avec un sourire énigmatique *: « Je crois qu'on pourrait faire le régime ensemble, car en augmentant ton poids de 25 %, tu pèserais 2 kg de moins que moi, et en diminuant mon poids de 25 %, je pèserais 3 kg de moins que toi. »*

Quels sont les poids de Laurent et de sa mère ?

▶ Logique pratique

Le restaurant affiche un menu unique.

• Une entrée

• Trois plats du jour au choix :

gratin dauphinois

rôti froid

lasagnes

• Trois desserts au choix :

fruits de saison

sorbet

tarte

Albert, Béatrice et Christophe veulent commander tous les trois les mêmes plats, mais :

▸ Albert déteste les lasagnes et la combinaison du gratin et du sorbet ne lui convient pas non plus.

▸ Béatrice ne mangera pas du gratin avec des fruits, ni du sorbet s'il y a du rôti.

▸ Christophe ne prendra que du sorbet s'il y a du rôti.

Que va apporter le serveur ?

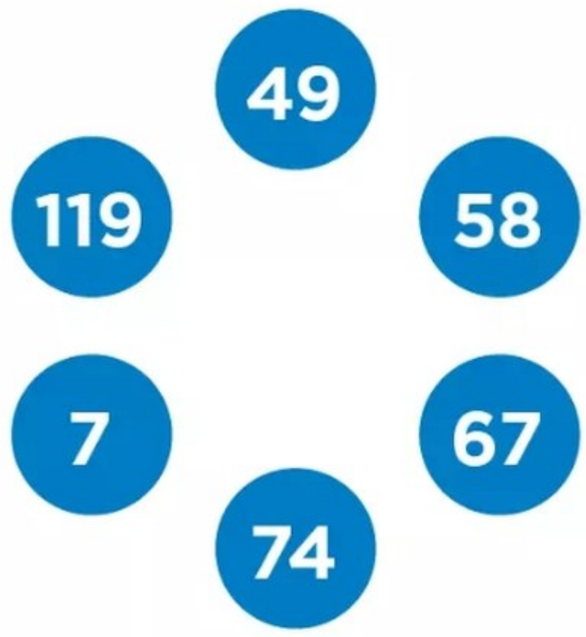
▶ Compter ou épeler ?

Quels sont les trois chiffres représentés par A B et C dans cette multiplication ?

$$\begin{array}{r} A\ A\ A \\ \times\quad B\ B\ B \\ \hline A\ A\ C\ C\ C\ A \end{array}$$

▶ Mariages de nombres

Il y a au moins sept manières de marier ces nombres par paires, par exemple 49 est un multiple de 7. Pouvez-vous en trouver six autres ?



Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 928, juin 2024

▶ Chasse aux signes

Il suffit d'additionner les 9 chiffres :

1+2+3+4+5+6+7+8+9 = 45

▶ Logique de lettres

O : il s'agit de toutes les lettres comprenant au moins une surface fermée.

▶ Fiançailles

7214 + 5464 = 12678

▶ Goutte-lettre

La vie sans plaisir est une mort hideuse.

▶ Carré séquentiel

16	14	11	24	12	→ 77
17	10	21	4	27	→ 79
7	22	25	13	3	→ 70
9	5	15	18	26	→ 73
23	20	8	19	6	→ 76
↓ 69	↓ 72	↓ 71	↓ 80	↓ 78	↓ 74 ↘ 75

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

La 3e édition du festival réunira scientifiques, explorateurs et amoureux de l'océan pour partager leur expérience avec le public à la Cité de la mer à Cherbourg-en-Cotentin. Avec cette année une nouveauté : Barneville-Carteret accueillera la dernière journée du festival.

ALEX MUSTARD/NATUREPL/EBPHOTO

Les trésors cachés de l'océan

L'océan se trouve à nouveau au cœur des pages de *Sciences et Avenir*. Vaste par sa superficie, il l'est aussi par les problématiques qu'il soulève : acteur majeur de la régulation du climat, source de nourriture pour les humains, écosystème complexe à la biologie extrême. Et son littoral n'est pas en reste : il attire, tel un aimant, des centaines de millions de terriens, en villégiature ou dans d'immenses métropoles — en 2050, 75 % de la population mondiale pourrait vivre à moins de 75 kilomètres d'une côte.

Source de convoitise, il faut le protéger de la pollution, du réchauffement climatique engendrant son acidification et la montée des eaux… Sujet majeur pour le XXIe siècle. C'est pourquoi, fidèles lectrices et lecteurs, notre magazine a convié scientifiques prestigieux et personnalités éminentes à participer à ce dossier. Toutes et tous nous ont fait l'honneur d'intervenir lors du festival Grand Océan, cet événement destiné au grand public, conçu par *Sciences et Avenir* en partenariat avec le pôle événementiel Les Échos-Le Parisien et soutenu par toutes les collectivités locales. Et c'est avec plaisir que nous pouvons annoncer ici la tenue de sa 3e édition qui se déroulera, à l'instar des années précédentes, à la Cité de la mer à Cherbourg-en-Cotentin pour les échanges scientifiques (13-14 septembre), puis, cette année, à Barneville-Carteret pour une journée familiale (15 septembre). De quoi faire le point sur l'urgence océanique, avant la conférence des Nations unies pour l'océan qui se tiendra en juin 2025 à Nice. ■

Dominique Leglu

▸ **La déclaration des sages** p. 112 ▸ **La mission Bougainville au cœur de la biologie planétaire** p. 116 ▸ **L'océan est toujours menacé** p. 120 ▸ **Après l'urgence climatique, l'urgence océanique** p. 121 ▸ **Un robot humanoïde pour explorer les fonds marins** p. 122 ▸ **La montée des eaux va recomposer la vie sur les bords de mer** p. 124 ▸ **Rencontre avec les collectivités locales** p. 128 ▸ **Il faut sauver l'anguille** p. 130

Innovons pour sauver l'océan

Les « sages » de l'édition 2023 du festival Grand Océan se sont réunis pour établir une déclaration afin de sensibiliser à la protection de l'océan. Ils livrent leurs préoccupations et leurs espoirs.

ÉCOSYSTÈME

L'OCÉAN EST UNE RESSOURCE INESTIMABLE DANS NOTRE RECHERCHE DE SOLUTIONS

Par Françoise Gaill, présidente d'Ocean Sustainability Foundation, vice-présidente de la Plateforme Océan et Climat

AFP

Pour protéger, il faut aimer mais il faut aussi connaître. Pour notre avenir, il faut pouvoir comprendre l'océan. Ses caractéristiques physiques, chimiques, mais aussi l'ensemble des aspects qui vont nous concerner. Toutes les mers et les océans ne font qu'un. Et en ce sens, on sait qu'une action à un point du globe peut avoir une incidence à l'autre bout de l'océan. C'est un bien commun de l'humanité. Nous en sommes tous responsables, en tant qu'individus, mais aussi en tant que décideurs. Les Nations unies ont été les premières à donner un statut juridique aux fonds marins et surtout à la partie minérale des océans. Mais qu'en est-il de la haute mer ? Actuellement, c'est *« premier arrivé, premier servi »*. C'est pourquoi de petits États insulaires voient arriver à leurs portes une armada de bateaux sillonnant les mers. Qu'il s'agisse du tourisme ou du transport maritime, notre densité de présence en mer croît à très grande vitesse. C'est vrai pour la surface des océans, mais aussi pour le fond des mers. S'agit-il, pour nous, d'avoir un équilibre du point de vue géostratégique, du point de vue économique, du point de vue environnemental ? C'est à nous, scientifiques, que revient aujourd'hui la possibilité de donner un éclairage sur ce que pourrait être le comportement de l'océan demain et des usages que nous pourrions avoir.

L'océan est une ressource inestimable dans notre recherche de solutions, et nous permet de faire face au dérèglement climatique. Nous devons également en tenir compte dans nos choix

ANTOINE SOUBIGOU

La déclaration

Par Bruno David, Françoise Gaill, Michel L'Hour, Patricia Ricard, Olivier Roellinger

L'OCÉAN EST UN !

Tous les espaces marins sont connectés, le fonctionnement de la planète tout entière en dépend. L'océan est le bien commun de l'humanité.

L'OCÉAN, SOURCE DE CONNAISSANCES

On connaît mieux la surface de Mars que le fond de l'océan où il reste tout ou presque à découvrir. Il faut accélérer l'exploration scientifique dans tous les domaines de la connaissance, et le faire savoir.

UN OCÉAN, SOURCE D'INNOVATIONS

Les solutions fondées sur l'espace océanique sont porteuses d'avenir pour les sociétés humaines. Santé, énergie, alimentation… L'océan mémoire et avenir de l'humanité. C'est le plus grand musée du monde ; il recèle toutes les traces des civilisations. Il faut le respecter et le protéger. Tout ce qu'on y jette nous revient, il ne doit pas être le réceptacle de nos déchets. Il doit rester vivant.

OCÉAN DURABLE

L'océan est un miroir sur lequel on peut encore dessiner un futur souhaitable et durable. Il faut faire le strict inverse de nos erreurs passées. La protection doit être la norme, l'exploitation l'exception.

économiques. L'exploration des grands fonds océaniques a suscité la curiosité des industriels et posé la question de l'exploitation des métaux rares dans ces zones de concentration métallique particulières. Mais le problème est le suivant : si on connaît certains des organismes qui y vivent, on ne connaît pas le fonctionnement de l'écosystème dans son ensemble, et encore moins les interactions entre la colonne d'eau et les courants océaniques. Nous ignorons les conséquences potentielles qu'une telle exploitation pourrait avoir sur les larves, leur dispersion, etc. Ce problème illustre bien une préoccupation majeure et actuelle : la connectivité de la colonne d'eau, depuis les fonds sous-marins — appelés zone bathyale — jusqu'à la surface où l'écosystème planctonique est le mieux connu. On a des données parcellaires mais il reste à les relier et à approfondir le paysage des connaissances pour avoir une vision d'ensemble et en tirer une meilleure compréhension globale." ■

PATRIMOINE

PROTÉGER LES TRÉSORS ARCHÉOLOGIQUES SOUS-MARINS

Par Michel L'Hour, archéologue subaquatique, membre de l'Académie de marine, ex-directeur du Drassm*

"En 1928, un article, présentant des résultats archéologiques enregistrés sur une épave au large de la Tunisie, qualifiait la Méditerranée orientale de plus grand musée du monde. Ce n'était pas faux, juste insuffisant car, à mon sens, c'est l'ensemble des océans qui forme le plus grand musée du monde. Et cette mémoire qui mérite l'attention de chacun justifie d'être protégée, valorisée et étudiée. Au regard des épaves de l'abysse, je dirais que 60 % des épaves profondes sur lesquelles j'ai eu à intervenir sont déjà partiellement détruites par le passage des chalutiers de grands fonds, lesquels chalutiers sont amenés à travailler de plus en plus au large et de plus en plus profond par suite de la raréfaction des ressources halieutiques. Mais il subsiste des trésors archéologiques encore plus enfouis, dans les fosses abyssales. C'est pourquoi j'ai lancé en 2007 le programme dit de l'archéologie des abysses. Avec des roboticiens, nous avons développé des machines spécifiquement conçues pour permettre à des archéologues chevronnés d'étudier des épaves définitivement inaccessibles à l'humain. Particulièrement bien préservées, ▶

elles n'ont pas subi l'agression de la houle ni les effets du ressac qui génère une oxydation puissante. Elles n'ont pas non plus été pillées et sont protégées par les températures qui règnent dans les abysses, à l'abri des vers xylophages marins.

Un patrimoine qui participe de la culture de l'humanité

Parmi ces épaves, il y en a une que j'affectionne particulièrement, qui a été découverte en 1993 par Paul-Henri Nargeolet. Il s'agit de *La Lune*, qui gît par 91 mètres de fond au large de Toulon. C'est un vrai Pompéi sous-marin ! À l'hiver 1664, 1200 hommes revenaient d'une expédition sur la côte barbaresque, mais à cause

TEDDY SEGUIN

d'une tempête, le navire a fait naufrage et seule une vingtaine d'entre eux en a réchappé. Depuis, le temps s'est figé et l'épave est demeurée quasiment intacte au fond de la Méditerranée. Ce patrimoine sous-marin participe aujourd'hui de la culture de l'humanité tout entière. Les archéologues font aussi face à d'autres urgences. Parmi les épaves dont ils s'occupent aujourd'hui, celles des grands conflits du siècle dernier pourraient constituer une forte menace pour l'avenir de l'humanité. Et je songe bien sûr ici à celles qui, au jour du naufrage, transportaient des cargaisons dangereuses. Année après année, la corrosion les détruit, de sorte qu'elles constituent aujourd'hui de véritables bombes à retardement. À titre indicatif, il faut rappeler que la corrosion marine dévore en moyenne une épaisseur d'un centimètre de métal par siècle. Cela signifie

BIOLOGIE

CHAQUE NOUVELLE DÉCOUVERTE PERMET DE MESURER NOTRE IGNORANCE DE L'OCÉAN

Par Bruno David, biologiste marin, ancien président du Muséum national d'histoire naturelle

Émerveiller pour instruire : je pense que le monde qui nous entoure peut facilement nous émerveiller et que cet émerveillement est un formidable levier pour convaincre. Depuis peu, nous avons pris conscience que nous connaissions mal l'océan. Son exploration et chaque nouvelle découverte nous permettent non seulement de connaître mieux, mais aussi d'estimer ce qui nous est encore inconnu, et donc de mesurer notre ignorance. L'océan représente 70 % de la surface de la planète, et même 96 % du volume offert à la vie sur Terre, puisque la vie occupe toute la profondeur de l'océan : une colonne d'eau de 3700 mètres en moyenne. C'est vaste !

Aujourd'hui, on parle de « croissance bleue ». Cette terminologie montre bien qu'on attend de l'océan un retour économique. Le problème que l'on rencontre actuellement, ce sont les tentations économiques — à certains égards légitimes — qui se heurtent à un manque de connaissances. Nous risquons d'engager des actions dont on s'apercevra plus tard qu'elles n'étaient pas opportunes car leurs conséquences environnementales n'avaient pas pu être évaluées scientifiquement, faute de connaissance. Pour éviter ces situations, la recherche avance à pas de géant.

150 000 nouvelles espèces de micro-organismes identifiées

Parmi les découvertes qui m'ont impressionné, je citerai les travaux de recherche de Romain Troublé, directeur général de la fondation Tara Océan. Il y a une dizaine d'années, les équipes scientifiques de *Tara* ont prélevé des échantillons d'eau à différentes profondeurs, puis effectué un balayage de tous les types génétiques qu'on pouvait trouver dans ces échantillons. Et là, surprise : ce ne sont pas des virus et des bactéries nouvelles qu'ils ont découverts en majorité, mais des eucaryotes unicellulaires. C'est-à-dire des organismes assez complexes, avec un noyau et des organites aux fonctions bien précises. Ils en ont identifié 150 000 nouvelles espèces. Or, à l'époque, on connaissait 400 000 espèces dans le monde marin.

AFP

notamment que tous les fûts d'ypérite — le fameux gaz moutarde — qui se retrouvent actuellement sur le fond, par faits de guerre, de tempête ou parce qu'on les a engloutis pour s'en débarrasser, vont peu à peu libérer leur contenu dans l'océan. Il faut dire qu'on considérait malheureusement déjà à l'époque la mer comme une poubelle, et qu'on n'imaginait pas que les chalutiers travailleraient 50 ans plus tard jusqu'à 1800 m de profondeur. Nous devons désormais nous confronter à cet héritage car c'est l'un des enjeux de notre avenir." ■

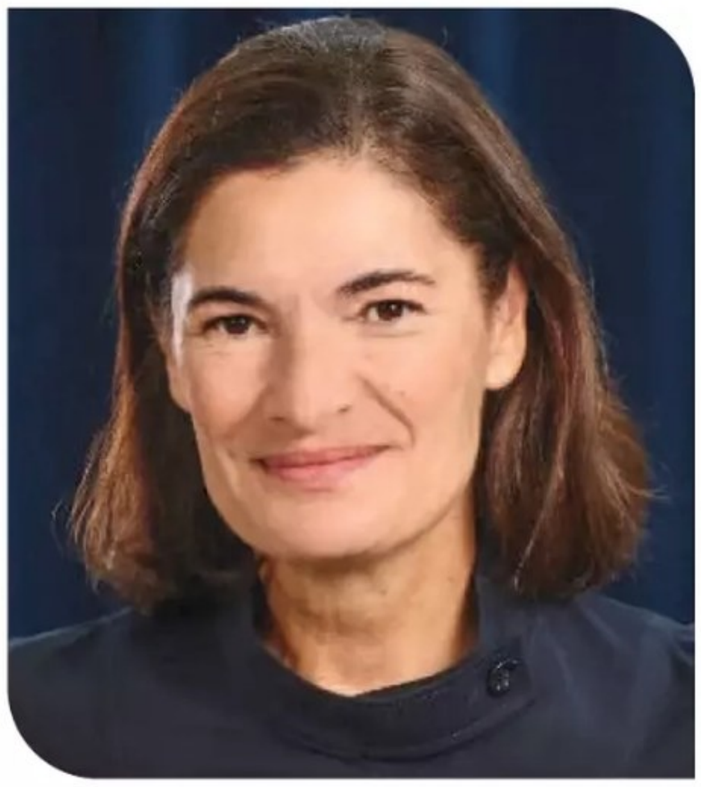
* Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines.

On a des informations sur le génome de ces organismes, il reste à présent à les identifier, savoir à quoi ils ressemblent, et leur donner un nom. C'est une très belle illustration de notre ignorance, car pouvons-nous affirmer que nous avions une bonne appréciation de l'écologie fonctionnelle du plancton avant de les détecter? Tout cela démontre que le vivant est complexe et que derrière cette complexité, se cache de l'incertitude. Pour les politiques, cette incertitude est un frein à la décision et à l'action, car il est difficile de faire des projections à long terme sur du vivant, mais il faut accepter cette limite au risque de s'orienter vers des choix délétères.

Je pense que pour convaincre de changer notre manière de nous comporter sur Terre, on peut séduire par la beauté de la nature sans être (trop) anxiogène. Il s'agit alors, non pas de donner des leçons, mais de sensibiliser par l'émotion devant ce qu'est le vivant, de sorte que l'on devienne plus réceptif aux messages et aux alertes qui nous viennent, entre autres, de la mer." ■

RESSOURCES

IL FAUT DÈS À PRÉSENT RÉPARER NOS ERREURS PASSÉES



FONDATION PERNOD RICARD

Par Patricia Ricard, présidente de l'Institut océanographique Paul-Ricard

"La nature peut être un guide. Nos actions affectent l'océan par des biais divers : climat, habitat, usages, rejets… Nos activités sont décisives pour notre futur, et chacun des acteurs de notre société a un rôle à jouer. Pour mettre en place des solutions efficaces, il faut trouver un équilibre. Je parle souvent du modèle partenariat en « carré magique », car quatre piliers sont nécessaires. D'une part, le monde académique. C'est aux scientifiques qu'il revient de coconstruire cette connaissance, de la diffuser, de l'expliquer. Cette médiation s'inscrit dans le temps long et demande encore quelques ajustements. Le second pilier est l'économie. Elle active cette frénésie car elle nous donne des objectifs à atteindre en un temps donné. Puis il y a la société civile, les médias, les ONG. Prenons l'exemple du plastique et de l'océan. Le chemin parcouru dans l'esprit du grand public est probant. Et enfin, autour de tout ça, il y a l'institution et le territoire, qui s'établissent dans un temps long, garants du cadre réglementaire nécessaire.

Écouter et observer ce que l'océan peut nous révéler

Comment les choses vont-elles évoluer ? J'ai espoir que l'économie se rende compte que la durabilité cache d'autres richesses, des innovations, et même, de nouveaux marchés ! J'aime la métaphore de l'océan miroir. Dans un miroir, tout est inversé. Et c'est à présent ce qu'il nous faut faire : inverser nos visions et actions et réparer nos erreurs passées. Notre deuxième chance est de prendre des leçons de la nature. Pour se protéger des vagues, elle ne construit pas de grandes digues mais des herbiers de posidonies, des récifs coralliens ou des mangroves. Autre exemple : dans les écosystèmes marins, la propulsion se fait par ondulation, il n'y a pas d'hélice. L'océan nous interpelle. Si on prend le temps de l'observer, d'intéressantes innovations peuvent naître, comme on le voit déjà avec le biomimétisme.

Encadrer les comportements pour mieux préserver

J'aime parler des réussites, et dans le domaine de la préservation, le parc de Port-Cros (Var) est un très bon exemple. Lorsqu'il a été créé, il ne restait que quatre mérous. Aujourd'hui, on en compte près de 800. Comment on arrive à un tel résultat? Les comportements sont très encadrés. Il est recommandé de ne pas jeter l'ancre pour ne pas abîmer les herbiers. La fréquentation y est aussi limitée. Si vous voulez aller voir un spectacle culturel, un opéra ou une pièce de théâtre, vous trouvez normal de réserver votre place et d'y aller. Pourquoi ne pas réserver sa place pour aller, moins nombreux, voir chacun son tour au bon moment, dans les bonnes conditions, le beau spectacle de la nature?" ■

La mission Bougainville au cœur de la biologie planétaire

Il absorbe le quart de nos émissions de gaz carbonique, il est à la base de toute la vie aquatique, et pourtant il est très mal connu du grand public comme des chercheurs. Lui, c'est le plancton, monde marin insaisissable que les scientifiques explorent désormais à l'aide de moyens frugaux dans le cadre de la mission Bougainville.

Par Christophe Prazuck, directeur de l'institut de l'Océan de l'Alliance Sorbonne Université

Le plancton est tout le vivant qui dérive au gré des courants. Cela peut désigner des organismes assez gros, comme les méduses, qui sont bel et bien du plancton. Mais les scientifiques se sont rendu compte, depuis plus d'un siècle, qu'il existe aussi et surtout sous une forme microscopique. En mesurant la couleur de l'eau, les satellites en offrent un point de vue déterminant : quand l'océan est vert, c'est le signe qu'il contient de la chlorophylle. Autrement dit, des microalgues végétales — le phytoplancton — qui sont la base alimentaire pour d'autres espèces animales. Mais l'image satellite reste à la surface. Il y a une dizaine d'années, grâce aux scientifiques embarqués sur la goélette *Tara* — des chercheurs du CNRS, de Sorbonne Université, du laboratoire européen de biologie moléculaire de Heidelberg (EMBL)… —, les observations ont gagné en profondeur. Il est apparu que sous le vert de la mer se cachent des forêts sous-marines foisonnantes. Elles sont d'une diversité extraordinaire. L'ordre de grandeur est stupéfiant : un seau d'eau prélevé au milieu de ces forêts marines contient entre 10 et 100 milliards d'organismes vivants.

Voilà le plancton, dont la partie invisible, très majoritaire, s'appelle aussi le microbiome océanique. L'écosystème planctonique contribue à l'absorption de 25 % du gaz carbonique émis par les activités humaines. Pour chaque tonne de CO_2, une moitié environ reste dans l'atmosphère, un quart est capturé par la partie émergée de la planète — les forêts classiques — et le quart restant est absorbé par l'océan. En partie par le phytoplancton, qui absorbe du gaz carbonique et produit en passant de l'oxygène dans des proportions considérables : à peu près autant que l'oxygène fourni par toute la végétation terrestre.

L'incroyable variété de ces forêts sous-marines et leur complexité suggèrent qu'elles sont composées de millions d'organismes différents. Les expéditions Tara ont permis d'en dévoiler la diversité sur quelques centaines de points de mesure. Un travail fondamental, mais qui demeure insuffisant. C'est comme si, en voulant étudier la végétation terrestre, on allait regarder dans chaque pays une seule forêt, pendant quelques jours. Et l'on pourrait, avec si peu, connaître la richesse du vivant ?

Une communauté de citoyens de la mer, les « seatizens »

D'où l'idée du programme au long cours Plankton Planet, lancé il y a sept ans par Colomban de Vargas, directeur scientifique de la mission Bougainville *(lire l'encadré p. 126)* : faire travailler de conserve des scientifiques et des ingénieurs, des marins et des citoyens. Une communauté de « seatizens » — les citoyens de la mer — qui vont ensemble observer la vie invisible des océans sur des échelles

MARINE NATIONALE

Prélèvement de plancton à bord du « Champlain », bateau de la Marine nationale partenaire de la mission Bougainville.

inédites. Multiplier le nombre d'observateurs, c'est mécaniquement accroître celui des observations pour avoir à la fois une vision globale qui couvre tous les océans du monde et une vision pérenne, qui dure dans le temps. De quoi voir, en fonction de l'élévation de la température, de la désoxygénation, de l'acidification de l'océan ainsi que des pollutions et impacts humains plus locaux, l'évolution dans la durée de ces forêts sous-marines qui soutiennent toute la vie aquatique. Sans ce microbiome, il n'y a pas de poissons. La vie disparaît. Notre ambition n'est rien de moins que de mesurer l'état de santé de l'océan vivant. Et d'apporter un outil clé pour le développement de cette nouvelle science que l'on appelle la biologie planétaire.

C'est face à ce constat que s'est construit le programme Plankton Planet. Il a d'abord consisté à inventer et mettre au point des capteurs dits frugaux. Une nouvelle génération d'instruments relativement peu coûteux, maniables et open source. Le Planktoscope, par exemple, génère pour 4000 euros une mesure équivalente à celle de son homologue commercial le Flowcam qui, lui, coûte 60 000 euros. Pour rappel, un jour de mer pour un bateau de la flotte océanographique française représente un budget de 10 000 à 40 000 euros.

Le second objectif de Plankton Planet est de permettre que ces capteurs puissent être embarqués par n'importe quel type de navire. Des voiliers, des cargos, des bateaux de pêche, qui tous contribuent à la récolte de données. Nous avons décidé de commencer par un partenaire que je connais bien : la Marine nationale. Ainsi, deux navires militaires, le *Champlain* et le *D'Entrecasteaux*, ont embarqué les capteurs dans cette nouvelle aventure que nous avons nommée la mission Bougainville. Ils naviguent respectivement dans l'océan Indien, autour de La Réunion, et dans l'océan Pacifique, entre la Polynésie française et la Nouvelle-Calédonie. Les capteurs frugaux ne leur prennent pas beaucoup de place : ils logent dans un espace res-

INSTITUT DE L'OCÉAN

« Nous voulons que n'importe quel type de navire, des voiliers, des cargos, des bateaux de pêche, contribuent à la récolte de données »

MISSION BOUGAINVILLE

VERBATIM

COLOMBAN DE VARGAS DIRECTEUR DE RECHERCHE CNRS, DIRECTEUR SCIENTIFIQUE DE LA MISSION BOUGAINVILLE

« L'accès à des environnements marins extrêmes »

« J'ai cofondé, en 2008, l'expédition Tara Océans d'exploration holistique du plancton autour du globe : elle a constitué une première en science pour avoir réalisé la mesure de tout un écosystème à l'échelle de la planète. Le plancton est formé essentiellement par des espèces microscopiques qui composent le microbiome : des virus, des bactéries, des archées et des eucaryotes unicellulaires (les protistes) et multicellulaires (les métazoaires ou animaux). Ce travail pionnier a permis la constitution de la première base de données sur la biodiversité du plancton mondial, au succès formidable : elle est citée par plus de 1500 études internationales ! Ce sont les prémices d'une biologie planétaire impliquant certaines institutions clefs comme le Laboratoire européen de biologie moléculaire. Tara Océans est comme une photographie du plancton à « l'instant zéro ». Or, le plancton change et s'adapte rapidement. Depuis 3,5 milliards d'années, les organismes qui le constituent ont appris à vivre de manière coordonnée, pour maintenir un écosystème complexe en suspension, contre la gravité et en mouvement perpétuel… C'est une biologie de l'extrême. Pour la comprendre, il nous faut maintenant mesurer la dimension dynamique du système, son adaptation et son évolution dans l'espace-temps planétaire. La mission Bougainville nous y donne accès. Elle voit la Marine nationale utiliser les capteurs frugaux que nous avons mis au point dans le cadre du programme Plankton Planet. Grâce aux militaires, il est possible de tirer profit de la zone économique exclusive française. Cette ZEE couvre 11 millions de km² et se déploie sur tous les grands bassins océaniques, de l'équateur aux zones polaires. Cela nous donne les moyens d'investiguer le plus grand mouvement de biomasse sur Terre qu'est la migration verticale du zooplancton dans l'océan global. Des milliers d'espèces migrent en profondeur durant le jour et remontent brouter et chasser en surface la nuit. Un va-et-vient qui serait un des moteurs essentiels de la pompe à carbone biologique qui séquestre le CO_2 atmosphérique. La migration du zooplancton devrait aussi avoir un impact sur le microbiome océanique de surface. Or, très peu de données existent pour mesurer ce phénomène à l'échelle planétaire. C'est une lacune que pourrait, parmi d'autres, combler la mission Bougainville. »

Très peu de données existent pour mesurer la migration quotidienne du zooplancton

▸ treint, à peine plus gros qu'une boîte à chaussures ; on y trouve par exemple un dispositif optique capable d'échantillonner le flux de micro-organismes qui composent le plancton dans l'eau prélevée ou des filtres pour prélever l'ADN qui fera l'objet d'analyses ultérieures. Depuis l'automne 2023, ces équipements sont utilisés par quatre jeunes gens, des étudiants que la Marine nationale a embarqués le temps d'une année de césure. Thomas, Manon, Mathilde et Hugo étaient en master de sciences de la mer à Sorbonne Université : ils sont devenus volontaires officiers aspirants biodiversité (VOA-B) et, chaque jour, ils réalisent des observations sur ce vivant invisible de l'océan.

L'influence des îles sur l'activité biologique des océans

Pour avancer scientifiquement, il faut se poser des questions. L'une des premières tient à l'influence des îles. L'image satellitaire montre que, sous le vent d'une île, il existe une activité biologique particulièrement importante. En fonction des flux atmosphériques, du ruissellement de la pluie ou des remontées d'eaux profondes riches en nutriments, des éléments essentiels sont injectés dans l'océan, permettant aux micro-algues de se multiplier et de créer un nouvel écosystème visible depuis l'espace : cet écosystème éphémère peut se détacher de l'île et voyager dans l'océan sur des centaines voire des milliers de kilomètres. La mission Bougainville essaie de mesurer cet « effet île » en couplant les images satellite et les observations faites depuis les bateaux de la Marine nationale. Les territoires océaniques français de l'Indo-Pacifique sont riches d'au moins 140 îles : ainsi que le dit Colomban de Vargas, c'est un laboratoire à échelle planétaire pour travailler dans une mosaïque de conditions biogéochimiques variées des zones subtropicales à subpolaires.
Dès le départ, les militaires ont été enthousiasmés par la mission Bougainville. Ils y ont vu leur intérêt. Je le comprends, moi qui ai été marin pendant

Un système de filtration portatif

Le système de filtration Lamprey, qui permet de récolter la biomasse océanique pour effectuer ensuite des analyses de séquençage ADN en laboratoire, fait partie des instruments dits frugaux.

« Tulipe » : support de maintien du récipient contenant l'eau de mer (partie supérieure) et le tube à vide (partie inférieure). Le filtre est placé entre les deux.

Seringue manuelle pour pomper l'eau de la tulipe dans le tube à vide.

Boîtes de filtres neufs. Les dépôts d'ADN seront faits sur ces filtres.

Pipette pour humidifier les filtres et nettoyer les équipements.

quarante ans. À la passerelle du bateau, nous devions scruter l'extérieur. Il fallait faire des relevés météo. Observer la hauteur des vagues, leur période, leur direction. Et la houle, d'où vient-elle ? J'ai ainsi compris que lorsqu'on s'intéresse à son environnement, on développe son sens de la navigation et on devient un meilleur marin.

Avec la mission Bougainville, les marins vont découvrir un nouveau monde. Les essais faits à bord des navires *Rhône* et *Garonne* au large de Brest, avant le départ des quatre VOA-B, ont montré la fascination des militaires pour cette approche qui leur révèle tout un univers. Sous la coque des navires, les marins perçoivent enfin ce qui leur demeurait inconnu : des millions d'organismes vivants différents qui sont au cœur de l'équilibre écologique global de notre planète et limitent les effets du dérèglement climatique. Cette prise de conscience constitue une expérience importante.

Une contribution collective à la biologie planétaire

Tous les usagers de la mer pourraient participer, faire avancer la science et en tirer avantage quant à leurs propres activités. Un pêcheur, par exemple, a tout intérêt à analyser le plancton des eaux où il navigue. La quantité et la diversité du plancton déterminent les stocks et espèces de poissons. Ce type d'observation est aussi très utile aux abords des usines de désalinisation de l'eau de mer. Certains micro-organismes planctoniques peuvent saturer et boucher leur filtre. En cas de bloom, quand une espèce de phytoplancton augmente massivement et soudainement, les opérateurs peuvent arrêter les pompes pour éviter de mettre en danger leurs installations. J'espère que la mission Bougainville est partie pour un siècle. En octobre, ce sont six nouveaux jeunes opérateurs qui prendront la mer sur des bâtiments de la Marine nationale. Cette dernière nous a indiqué son souhait de prolonger l'aventure au-delà de 2025. C'est une splendide nouvelle et j'espère que, grâce à l'exemple de la Marine, nous pourrons embarquer des armateurs, des pêcheurs, des aquaculteurs, et tous les marins, ainsi que tous ceux qui pourront contribuer à cette collecte d'observations et écrire des pages déterminantes de la biologie planétaire. ■

FAIRSCOPE

PORTRAIT

Le premier Français autour du monde

« Je confie ma renommée à une fleur », aurait dit Louis-Antoine de Bougainville (1729-1811). Le célèbre navigateur a toute sa vie été partagé entre le désir d'action et l'intérêt pour les sciences. Auteur de travaux sur le calcul infinitésimal remarqué par les scientifiques de son temps, il affronte les Anglais pendant le siège de Québec. Devenu un marin aguerri, Louis-Antoine de Bougainville explore l'Atlantique Sud puis devient le premier Français à accomplir le tour du monde en bateau. Une particularité de ses traversées est qu'il embarquait des savants avec lui. Comme le botaniste Philibert Commerson qui, lors d'une escale au Brésil, identifie une belle fleur à laquelle il donne le nom de son capitaine : le bougainvillier.

GLOBAL SEA MINERAL RESOURCES

L'exploitation minière en eaux profondes présente des risques pour la vie marine.

L'océan est toujours menacé

Exploitation de minerais en eaux profondes, subventions d'activités destructrices de pêche, pollution par les plastiques : il est urgent que la société change ses pratiques pour sauver les espaces marins.

Par Albert II, prince souverain de Monaco

Ces derniers temps ont été riches en bonnes nouvelles sur le front de la préservation des mers et des océans. Nous avons enfin abouti à un accord contraignant sur la préservation de la biodiversité en haute mer après près de deux décennies de négociations. Nous avons également abouti à plusieurs autres avancées significatives, comme lors de la dernière COP de la convention sur la biodiversité. Et nous poursuivons avec quelques espérances les négociations sur un traité mondial contre les pollutions plastiques ou encore sur une réglementation assurant une protection effective des eaux profondes contre l'exploitation minière. Cela étant, si la cause de l'environnement progresse, les discours de ceux qui s'y opposent progressent également, changent de forme et bénéficient d'une audience renouvelée en cette période de trouble et de doute. Ils appellent donc à une réponse, capable non seulement de réaffirmer la nécessité de tout faire pour préserver l'environnement, mais surtout de le faire en déployant des solutions au bénéfice de tous.

Nous savons qu'il nous faut très vite apprendre à vivre, nous déplacer, travailler, consommer différemment. Et différemment, cela doit toujours être synonyme d'innovation, d'invention et d'espoir. Le progrès doit redevenir notre boussole. C'est particulièrement vrai au service de la connaissance des mers et des océans, de leur exploitation, de leur protection. Car le progrès seul nous permettra de réussir le défi de réconcilier l'humanité et la mer.

La crise actuelle exige un changement de modèle

Il n'est pas acceptable que des entreprises puissent aujourd'hui se préparer à investir des milliards pour récupérer des minerais en eaux profondes, sans connaissances scientifiques précises des conséquences environnementales, alors que les potentialités des énergies marines renouvelables, par exemple, sont encore largement inexploitées. Il n'est pas concevable que de nombreux États continuent de subventionner des activités de pêche qui vident les mers et les océans et menacent directement les espèces protégées, alors que des solutions d'aquaculture responsables existent. Il n'est pas supportable non plus que l'on continue à déverser des millions de tonnes de plastique dans les mers alors que des matières biodégradables, issues notamment des algues, sont aujourd'hui à notre portée.

L'innovation n'est pas facile à faire émerger et à accepter. Pourtant, elle seule nous permettra d'opérer le changement de modèle qu'exige la crise actuelle. Le changement ne doit pas être simplement technique, mais doit s'accompagner d'un nouvel espoir, d'une croyance renouvelée dans le progrès. « *Osez, le progrès est à ce prix* », écrivait Victor Hugo. ■

AFP

« Le progrès seul nous permettra de réussir le défi de réconcilier l'humanité et la mer »

Après l'urgence climatique, l'urgence océanique

F. TANNEAU / AFP

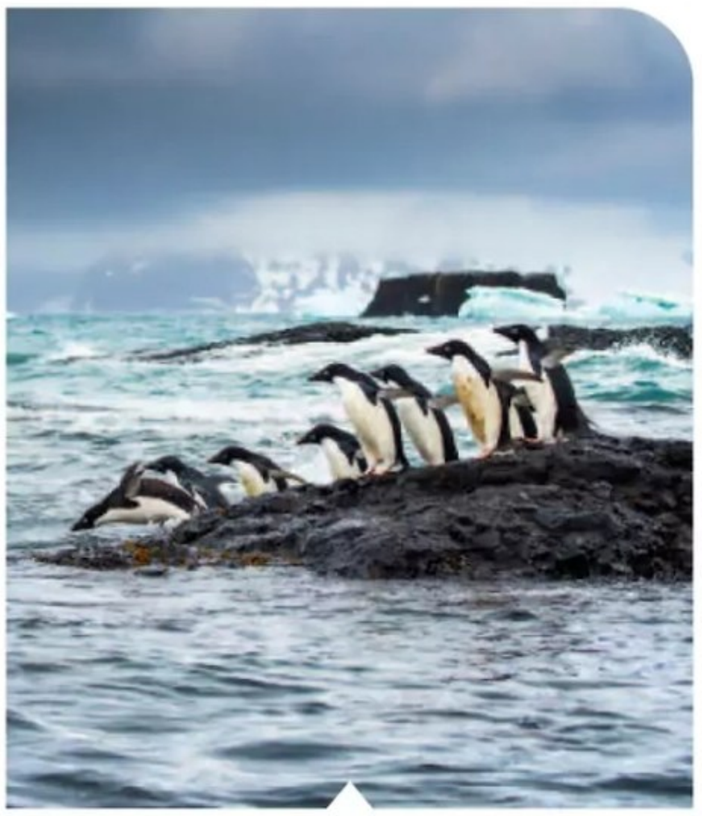
« Il faut faire de la protection la règle, et faire de l'exploitation l'exception »

La conférence des Nations unies pour l'océan, en juin 2025 à Nice, sera vitale pour la protection des écosystèmes marins. Représentera-t-elle un déclic, un peu comme la COP21 l'a été pour le climat ?

Par Olivier Poivre d'Arvor, ambassadeur de France pour les Pôles

Les voix de l'océan sont peu entendues, surtout quand elles sont relayées par les citoyens. On entend souvent celle des politiques qui essaient d'annoncer des bonnes nouvelles, mais je crois que ce qui fera les belles années de l'océan, de la biodiversité et du climat, c'est la nouvelle génération qui est en train de se créer autour d'une conscience particulière pour la planète. Aujourd'hui, 3 % des émissions de gaz à effet de serre sont attribuables au transport maritime. Si en 2050, il n'y a pas de décarbonation dans ce secteur, il sera responsable de 17 % des émissions de gaz à effet de serre.

Les États ont un rôle majeur à jouer dans la lutte contre le réchauffement climatique. Et en cela, les accords de Paris lors de la COP21 sont fondateurs. Nous sommes maintenant face à une réalité chiffrée. Tous les ans, les États sont confrontés à ce repère climatique. ONG, sociétés civiles et États doivent se rejoindre autour de cet enjeu, en laissant de côté les tensions géopolitiques qu'on connaît actuellement. On a déjà réussi à le faire ! En 1959, au pire moment de la guerre froide, Russes, Américains, Français et bien d'autres parviennent à


BENOIST CLOUET / NATURAGENCY

La disparition des glaciers menace notamment les populations de manchots (ici en Antarctique).

sanctuariser 80 % des ressources d'eau douce de la planète : l'Antarctique. Ce traité doit être un modèle pour nous. Le classement des espaces naturels est une première étape redoutablement efficace pour les protéger.

Aujourd'hui, une grande catastrophe est en cours : l'effondrement de la cryosphère. Derrière ce mot, se cache un phénomène vital pour l'humanité. Car d'ici à 2050, la moitié des glaciers auront disparu. D'ici à 2100, il faut imaginer une inondation considérable de bassins entiers. Celui du Bangladesh évidemment, mais aussi ceux des grandes villes françaises comme Le Havre ou Bordeaux. Aujourd'hui, 83 communes françaises sont ainsi classées en danger.

L'artificialisation des littoraux doit être contenue

Or, la tendance actuelle en matière de répartition démographique, c'est de se rapprocher des côtes. En 2050, on estime que 75 % de la population mondiale vivra à moins de 75 kilomètres d'une côte. Donc d'ici au milieu du siècle, on assistera forcément à la rencontre de la mer et des humains, qui exerceront sur elle une pression anthropique très forte. Les élus ont d'ailleurs un rôle considérable à jouer dans ce domaine : limiter l'artificialisation des littoraux.

Puisque la rencontre est inévitable, il faut s'y préparer. C'est sur la protection que nous devons nous engager, tous. Il faut renverser le paradigme. Finie l'exploitation sans limite. Il faut faire de la protection la règle, et faire de l'exploitation l'exception. C'est cette idée que nous défendrons lors de la conférence des Nations unies pour l'océan, en juin 2025 à Nice. J'espère qu'elle représentera un déclic pour la protection des océans, un peu comme la COP21 l'a été pour le climat. ■

FRÉDÉRIC OSADA / IMAGES EXPLORATIONS - FRÉDÉRIC OSADA/DRASSM/STANFORD

Un robot humanoïde pour explorer les fonds marins

Ocean One K est capable de travailler dans une multitude de conditions, et ce pendant des heures, sans avoir à respecter des paliers de décompression. Ses champs d'action sont multiples : soins sur les coraux, inspection d'infrastructures sous-marines et, bien sûr, exploration d'épaves.

Par Oussama Khatib, professeur à l'université Stanford, aux États-Unis. Créateur de Ocean One.

À l'origine de l'aventure de Ocean One, nous nous sommes inspirés de la robotique domestique, des robots d'entretien, ou médicaux, capables d'exécuter des tâches avec une précision incroyable. À partir de là, nous avons conçu un robot d'intervention qui peut aider les plongeurs dans leurs tâches, mais aussi permettre d'explorer à distance une épave inaccessible à l'humain, comme si nous y étions, à la place du plongeur. Ce robot a une faculté extraordinaire : il peut faire sentir à son utilisateur ce qu'il touche. Si vous entrez dans mon laboratoire, vous verrez un scientifique avec des lunettes 3D, une interface haptique au bout des mains qui lui transmettent les sensations du robot. En d'autres termes, vous ressentez au bout de vos doigts le contact du robot avec son environnement à des centaines de mètres de profondeur. Ce n'est pas seulement ce qu'il touche d'ailleurs : quand Ocean One atteint le fond, vous le ressentez également.

Il est donc possible d'intervenir sur les épaves par son intermédiaire. C'est ainsi que nous avons réussi à récupérer un superbe vase datant de l'époque de Louis XIV provenant de *La Lune*, englou-

Les chercheurs équipés de lunettes 3D ou de capteurs haptiques peuvent suivre les images et les sensations transmises par le robot en plongée. Comme ici (à gauche), lorsqu'il s'est approché de l'épave du « Francesco-Crispi », au large de Bastia.

tie au large de Toulon. Pour cette expédition, le robot a dû descendre à 100 mètres de profondeur, alors que la profondeur moyenne des océans est de 3700 m. Nous avons donc décidé d'améliorer Ocean One pour qu'il puisse résister à une pression 100 fois supérieure à la pression atmosphérique. C'était un challenge de taille! Il a été développé dans une piscine de Stanford (États-Unis), pendant la pandémie de Covid-19. Avec une entreprise française, nous avons trouvé les matériaux adéquats et développé une nouvelle version : Ocean One K, avec K pour *kilometer,* car il est actuellement capable de descendre à 1000 m de profondeur.

Il est parvenu à atteindre les 1000 mètres de profondeur

Mais l'élément le plus remarquable de ce robot, ce sont ses bras. Ils sont très légers, remplis d'huile pour améliorer la précision des gestes, et dotés d'une technologie complexe de sensibilité au toucher. C'est comme ça que nous avons remonté à la surface des objets aussi fragiles qu'un morceau de bois d'un bateau vieux de 2000 ans. Par la suite, Ocean One K s'est bien rendu à 1000 mètres de profondeur. Il a même déposé un message sur le plancher océanique : « *Un premier contact pour un robot avec le fond marin. Un vaste nouveau monde à explorer pour les humains* » (« *A robot's first touch of the deep seafloor. A vast new world for humans to explore* »).

Lors d'une autre plongée, sur le *Francesco-Crispi*, une épave au large de Bastia, nous sommes parvenus à étudier l'environnement intérieur du bateau. Le robot n'a pas pu s'y rendre lui-même, mais grâce à une caméra embarquée, nous avons réussi à observer de près l'intérieur de l'épave et même vu des bactéries mangeuses de fer, ce qui est très rare dans cette partie de la Méditerranée. Pour cette exploration, il est descendu jusqu'à 852 m.

Plus tard, à Dubaï (Émirats arabes unis), nous avons mené une expérience aussi intéressante qu'insolite dans la piscine la plus profonde du monde, Deep Dive, qui est une véritable ville sous-marine. Nous nous sommes entraînés à manipuler, réparer et maintenir des outils à distance avec le robot. Nous avons également interagi avec les plongeurs : le robot les a battus aux échecs lors d'une partie sous l'eau. Il a même joué au billard ! Ocean One K sait être très précis, il est en effet capable de travailler comme un plongeur humain. C'est aussi pour parvenir à cet objectif que nous lui avons donné une forme humanoïde.

Il devient les yeux et les mains des plongeurs

Dans un environnement aussi complexe que celui d'une épave au fond de l'océan, il était essentiel qu'il ait deux mains, et non un seul grappin. Sa rapidité d'exécution et sa capacité à manipuler des objets complexes en sont accrues. Ensuite, nous avons travaillé sur le visuel. Les archéologues ont souvent besoin de se représenter l'objet dans les mains. Nous devions alors placer une caméra, un peu en hauteur, au-dessus des bras. Le plus simple était de doter le robot d'une tête ! Grâce à cette apparence semi-humanoïde, un peu comme une sirène, les plongeurs peuvent à distance se projeter dans l'eau. Ocean One K devient nos yeux et nos mains.

S'il est certes dirigé par une personne, sa force réside dans sa capacité à travailler dans une multitude de situations, ce qui en fait un allié de choix quand les conditions deviennent trop dangereuses pour les plongeurs, que la pression est trop forte, que l'eau est trop froide… Et ce pendant des heures, sans avoir à se préoccuper des paliers de décompression. On le fait intervenir sur les coraux, les infrastructures sous-marines, les câbles au fond des océans. Nous avons réussi à le contrôler à 10 000 km de distance ! Reste à présent à délimiter précisément les conditions éthiques de son utilisation afin que la robotique aide au progrès de l'humanité, et à conservation de notre planète. ■

AFP

« Ses bras sont remplis d'huile pour améliorer la précision des gestes, et dotés d'une technologie complexe de sensibilité au toucher »

La montée des eaux va recomposer la vie sur les bords de mer

Le recul du trait de côte observable aujourd'hui est lié au changement climatique : dilatation thermique des océans, fonte des calottes polaires et, surtout, épisodes météorologiques extrêmes qui aggravent l'érosion littorale. Face à cette situation préoccupante, les initiatives se multiplient pour tenter de s'adapter au mieux.

Le 8 mars dernier, alors que des pluies diluviennes s'abattent depuis plusieurs jours sur la commune de Vauville, en Normandie, la falaise crayeuse se dérobe soudain sous une maison « avec vue sur mer imprenable ». La bâtisse, immédiatement classée en état de péril — sa véranda surplombant le vide —, a dû être abandonnée, sans espoir de retour, par ses propriétaires. Il s'agit là de la dernière villégiature désertée en urgence sur la côte normande, dont 16 communes sont aujourd'hui considérées comme exposées au recul du trait de côte. La Normandie n'a hélas pas l'apanage du phénomène. Un décret paru au *Journal officiel* en 2022 a établi la liste des 126 communes françaises dont le territoire est considéré comme vulnérable : 41 se situent en Bretagne — dont 23 dans le Finistère —, 31 en Nouvelle-Aquitaine, 16 en Normandie, donc, auxquelles il faut ajouter 25 collectivités d'outre-mer. Selon un rapport du Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) publié en avril, près de 20 % de nos côtes ont déjà reculé, soit environ 900 km. Mais le recul du trait de côte concerne actuellement les quelque 20 000 km du littoral français, incluant la métropole et les territoires d'outre-mer. D'ici à 2028, un millier de bâtiments, dont 300 logements résidentiels, pourraient être affectés par ce phénomène. Un chiffre qui monte à 5200 logements primaires et secondaires à l'horizon 2050, et potentiellement à 450 000 en 2100.

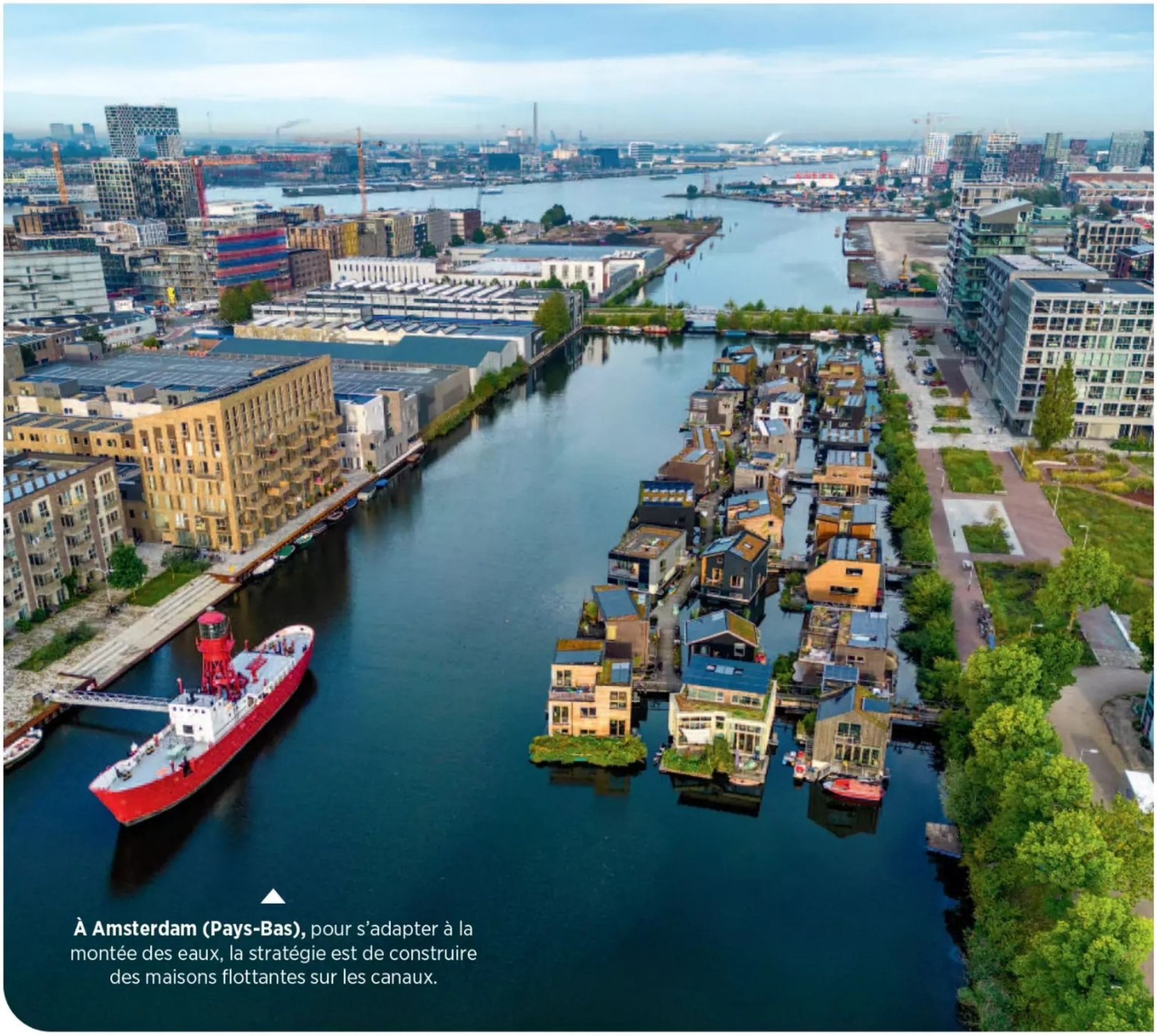
Les actions humaines amplifient le phénomène

Le recul du trait de côte observable aujourd'hui est principalement lié au changement climatique. Et, en premier lieu, à la dilatation thermique des océans, un phénomène par lequel le volume des océans augmente en réponse à une élévation de la température de ses eaux. En effet, lorsque les températures montent, les molécules vibrent davantage et prennent plus d'espace et donc de volume. Dans le même temps, glaciers et calottes de l'Antarctique et du Groenland se réduisent drastique-

DÉLIMITATION

Définir le trait de côte

Le trait de côte est la rencontre entre la mer et le littoral, une ligne assez difficile à définir. Effectivement, comment le tracer sur le terrain ? La limite la plus fréquemment employée est celle de la végétation, certaines plantes ne supportant pas les submersions marines. Elles permettent de suivre les fluctuations du trait de côte sur le long terme. La laisse de mer, soit l'accumulation de débris organiques abandonnés par les marées, permet, elle, de délimiter les plus hautes mers. D'autres indicateurs sont utilisés, tels que la rupture de dénivelé entre la plage et les dunes ou des aménagements côtiers comme les digues ou les enrochements.



À Amsterdam (Pays-Bas), pour s'adapter à la montée des eaux, la stratégie est de construire des maisons flottantes sur les canaux.

PIDJOE/GETTY IMAGES

ment. Selon les enregistrements des missions satellitaires Grace de la Nasa, le Groenland perd environ 270 milliards de tonnes de glace par an, quand l'Antarctique en perd près de 150 milliards. Deux articles publiés en mars 2020 dans la revue *Nature* indiquaient qu'entre 1992 et 2017, les calottes du Groenland et de l'Antarctique avaient perdu environ 6400 milliards de tonnes de glace, ce qui a fait monter de 17,8 millimètres le niveau global de l'océan. Soit une augmentation six fois plus rapide que prévu!

L'apport de la fonte des calottes glaciaires compte désormais pour un tiers de l'élévation du niveau de la mer. Ajoutons à ce tableau alarmant la contribution moins connue de l'extraction d'eau des aquifères à des fins d'irrigation, de consommation industrielle et domestique. Ces eaux jusque-là souterraines s'écoulent à terme dans l'océan. Mais ce sont surtout les épisodes météorologiques extrêmes, les tempêtes notamment, qui aggravent l'érosion littorale à court terme. Or, le changement climatique se traduit déjà par une augmentation de fréquence et d'intensité des tempêtes!

Ce phénomène est amplifié par nos pratiques d'aménagement des cours d'eau et des estuaires. En effet, barrages, épis et autres infrastructures bloquent en amont sable et alluvions. Privées de ce matériau qui ne vient plus les engraisser et les protéger, les côtes se retrouvent dénudées face aux assauts répétés des tempêtes. Et c'est sans compter la bétonisation effrénée des fronts de mer, qui

rompt les dynamiques terre-mer, fluides par essence!
« *Dans le scénario le plus pessimiste d'élévation du niveau de la mer, soit plus d'un mètre d'ici à 2100, l'ensemble des territoires côtiers sera affecté: l'augmentation du niveau des mers va refaçonner la carte mondiale* », remarque Gauthier Carle, coordonnateur des ONG de la Plateforme Océan et climat — qui a été nommée au Comité national du trait de côte pour définir l'adaptation des littoraux lancé par le gouvernement en mars 2023. D'ici à 2050, plusieurs grandes villes côtières seront en effet gravement menacées. Elles cumulent la plupart du temps deux problématiques: la montée du niveau de la mer et la subsidence urbaine — l'enfoncement des villes — , due à l'épuisement des nappes phréatiques et à la construction d'infrastructures de plus en plus massives. Jakarta, capitale de l'Indonésie, s'enfonce aujourd'hui de 5 à 10 cm par an, raison pour laquelle le gouvernement a décidé de déplacer sa capitale sur l'île de Bornéo, avec un impact néfaste sur la biodiversité. Manille (Philippines), New York (États-Unis), Bangkok (Thaïlande) — qui subit des moussons de plus en plus intenses —, ou encore Lagos (Nigeria), l'une des villes les plus peuplées d'Afrique, pourraient devoir lutter demain contre les assauts de la mer.
Cette situation met également en danger la diversité biologique des écosystèmes côtiers. Dans le département normand de Seine-Maritime notamment, où les oiseaux marins, qui nichent dans les falaises, sont déjà perturbés. En Méditerranée, les flamants roses et les avocettes élégantes sont parmi les plus menacés par l'élévation du niveau de la mer qui affecte déjà ses zones humides. D'ici 2050 à 2100, les tigres du Bengale, qui occupent des îles basses comme dans la région des Sundarbans (Inde et Bangladesh), seront eux aussi menacés, ainsi que les tortues marines qui pondent sur des plages de plus en plus réduites.

Les digues ne font que repousser le problème

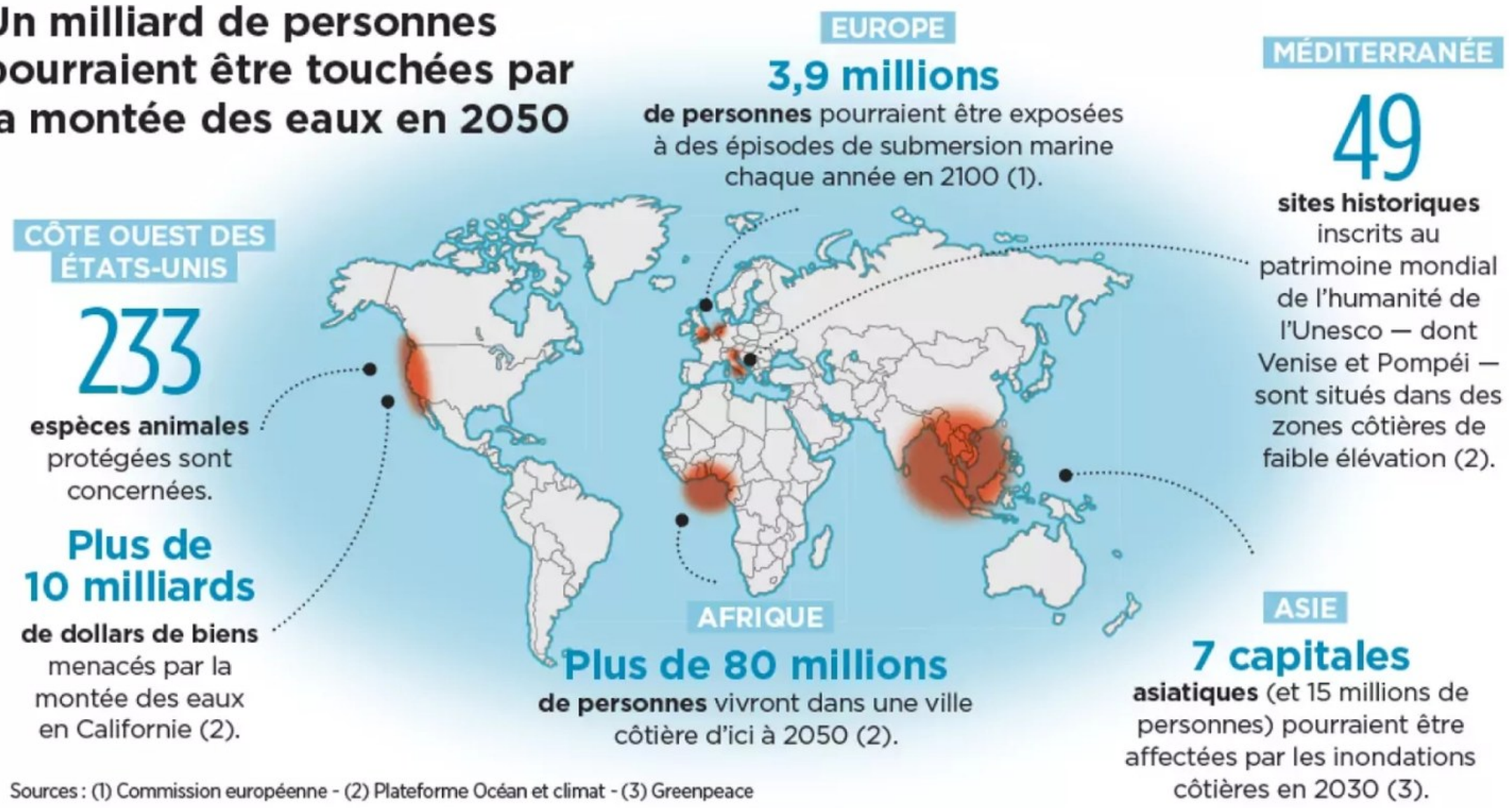
D'ores et déjà, des mesures sont adoptées par les autorités littorales. Les politiques à court terme misent sur les défenses dites dures. À Lacanau, sur la côte girondine, il a été choisi de renforcer les digues pour un coût de 30 millions d'euros d'ici à 2050. L'endiguement a été développé par diverses sociétés depuis le Moyen Âge pour se défendre face aux submersions marines. C'est notamment le cas aux Pays-Bas, constitués de basse plaines littorales. À la suite du raz-de-marée de 1953, qui a causé 1835 morts, le pays a construit un grand nombre de barrages, de digues et de portes anti-tempête pour protéger le delta du Rhin, de la Meuse et de l'Escaut. Mais ces infrastructures ont modifié le fonctionnement de celui-ci, ce qui a eu pour conséquences une diminution du stock de poissons et des eaux stagnantes polluées en métaux lourds. « *Nous sommes en train de toucher les limites de ces solutions,* note Gauthier Carle. *D'abord, parce qu'elles sont très chères à mettre en œuvre et à entretenir.* » Or, c'est parce qu'elles étaient mal entretenues que des digues de la Nouvelle-Orléans (États-Unis) ont cédé lors du passage de l'ouragan Katrina, le 29 août 2005, laissant les eaux du lac voisin inonder 80 % de la ville. « *D'autre part,* ajoute-t-il, *les digues ne font que repousser le problème, voire le déplacer ailleurs en modifiant la dynamique sédimentaire.* »
Aussi, d'autres territoires mettent en œuvre des solutions plus souples telles que le réensablement, l'enrochement des zones côtières ou la stabilisation des dunes par géotextiles. « *À moyen*

MESURES

Une élévation inégale selon les océans

Le premier marégraphe de France a été mis en service à Marseille, en février 1885. Il était destiné à fixer le niveau d'altitude zéro pour la France continentale. Il faudra douze ans de mesures des variations du niveau de la mer pour le définir. Il est aujourd'hui matérialisé pas un repère scellé dans les locaux du marégraphe, désormais secondé par un appareil numérique à onde radar et par des données satellitaires. Les moyennes mensuelles du niveau de la mer, qui y ont été enregistrées entre 1885 et 2020, ont permis d'estimer à 18 cm sa hausse sur cette période. Mais cette élévation n'est pas égale dans tous les océans. On observe en effet qu'elle est deux à trois plus importante dans le Pacifique que dans le reste du monde. Cela s'explique par la présence de vents constants, les alizés, qui soufflent d'est en ouest dans l'hémisphère Nord et accumulent les eaux de surface vers l'ouest du bassin océanique.
Le Pacifique connaît aussi une oscillation décennale, caractérisée par des alternances de phases chaudes et froides qui peuvent durer des décennies. Durant la phase positive, les eaux de surface du Pacifique occidental se réchauffent, augmentant ainsi le volume d'eau. Il faut aussi compter avec l'influence des phénomènes climatiques El Niño et La Niña, qui tendent à élever le niveau de la mer, dans l'Est pour le premier et dans l'Ouest pour la seconde. Enfin, des variations locales de salinité et de température de l'eau de mer peuvent affecter sa densité, et donc son niveau.

Un milliard de personnes pourraient être touchées par la montée des eaux en 2050



Sources : (1) Commission européenne - (2) Plateforme Océan et climat - (3) Greenpeace

terme, il faudra combiner une diversité de solutions, estime Gauthier Carle. *Cela reposera à la fois sur des solutions dures et des pratiques qui laissent la nature reprendre ses droits pour atténuer l'énergie des vagues et renforcer l'accumulation des sédiments.* » En France, le Conservatoire du littoral est à la manœuvre pour instaurer notamment le processus de dépoldérisation : il s'agit de réexposer des terres gagnées sur la mer (les polders) à l'influence des eaux marines ou fluviales, afin qu'elles redeviennent des zones humides — marais ou prés-salés — ou des estuaires naturels. Soit des écosystèmes tampons qui devraient permettre d'absorber tout ou partie des submersions marines à venir. Tel est l'objectif du projet Adapto, mis en œuvre dans dix territoires pilotes (*lire* S. et A. *n° 914, avril 2023*).

Dans les régions tropicales, un autre écosystème peut jouer ce rôle d'atténuation : la mangrove, forêt marécageuse littorale, dont les systèmes racinaires créent des structures denses, qui absorbent et dispersent l'énergie des vagues à mesure qu'elles progressent dans leur réseau complexe. Parmi les régions qui misent sur ce milieu et œuvrent à sa restauration, citons l'Inde, et plus spécialement le Karnataka, qui mobilise les communautés locales pour leur conservation, et le Nigeria, qui prévoit de restaurer et accroître de 25 % la couverture des mangroves dans le delta du Niger. Le Cambodge et les Philippines projettent quant à eux de planter des milliers de jeunes spécimens pour recréer les mangroves disparues.

« *Mais à terme, la principale solution va être la recomposition territoriale en relocalisant les biens, les activités, etc.,* souligne Gauthier Carle. *Cela implique d'être socialement équitable.* » Lorsque de plus en plus de propriétés ou d'exploitations vont devoir être abandonnées, cela va en effet représenter un coût très élevé. « *Il faut réfléchir à de nouveaux moyens de financer les ouvrages, les biens, en hiérarchisant les priorités,* précise le spécialiste. *Faudra-t-il dédommager de la même manière les résidences primaires et les secondaires ? Les activités de loisir et les entreprises ? L'objectif est que des arbitrages soient intégrés dans le projet de loi de finances de l'automne 2024.* »

Aux Pays-Bas, une autre solution est en test : il ne s'agit plus de repousser la mer, mais d'habiter dessus. Depuis 2013, à Amsterdam, le quartier d'Ijburg — composé d'îles artificielles — accueille un ensemble de 90 maisons flottantes. La vie de ses 300 habitants préfigure peut-être celle de millions de personnes à l'avenir. ■

Sylvie Rouat

BRUNO BOURGEOIS

G CARLE

« À terme, la principale solution va être la recomposition territoriale en relocalisant les biens, les activités... »

Gauthier Carle, responsable playdoyer et coordonnateur des ONG de la Plateforme Océan et Climat

Anticiper la transformation du littoral

Les quatre partenaires institutionnels du festival Grand Océan détaillent leur action en matière de protection du trait de côte et leurs engagements pour adapter les activités humaines.

INCITER LES TERRITOIRES CÔTIERS À METTRE EN PLACE UNE STRATÉGIE D'ADAPTATION

Hervé Morin,
président de la Région Normandie

“Avec plus de 600 kilomètres de littoral et un regard assurément tourné vers la mer, la Normandie entretient une relation particulière à cet espace naturel. C'est pourquoi la Région investit tout au long de nos côtes pour développer nos ports, accélérer le déploiement d'énergies marines renouvelables, soutenir la pêche normande, préserver la biodiversité marine et structurer le nautisme. Depuis plusieurs années, nos investissements visent également à renaturer le littoral. La Normandie est particulièrement vulnérable aux dynamiques côtières. Selon le Giec normand, près des deux tiers du littoral sont concernés par l'érosion du trait de côte, avec un recul des falaises crayeuses de 20 à 25 centimètres par an et jusqu'à 40 centimètres pour certains territoires. Confrontée à cette urgence, la Région se mobilise pour que la Normandie puisse faire face aux risques d'inondations et de recul du trait de côte sous l'effet cumulé de l'élévation du niveau des mers et de l'érosion. Notamment en incitant les territoires côtiers à mettre en place une stratégie d'adaptation à ces phénomènes. Elle est également partenaires de nombreux projets de recherche pour déployer des projets pilotes sur son territoire. Par ailleurs, la Région s'implique fortement pour accompagner les collectivités dans leurs projets de réaménagement territorial. Depuis 2019, elle soutient par exemple la relocalisation d'équipements côtiers de la basse vallée de la Saâne, parmi lesquels le camping de la plage à Quiberville. Son emplacement actuel étant situé en zone inondable, la Région finance la création d'un nouvel équipement touristique destiné à prendre le relais de ce camping. Sur tous ces sujets, et bien que la maritimisation de la Normandie ne soit plus à démontrer, Grand Océan constitue une précieuse source d'inspiration pour tous. C'est pourquoi la Région est particulièrement heureuse de soutenir l'organisation de sa 3e édition dans un haut lieu de la Normandie maritime : la Cité de la mer de Cherbourg-en-Cotentin.” ■

RÉGION NORMANDIE - SIMON LAMBERT / DIVERGENCE

IMAGINER UN AMÉNAGEMENT RÉSILIENT

Benoît Arrivé,
Maire de Cherbourg-en-Cotentin

“La montée des océans et le recul du trait de côte qui en découle s’imposent comme l’un des effets majeurs du dérèglement climatique. Majeur parce qu’il faut dans l’urgence faire face aux premières avancées de la mer, mais aussi préparer l’avenir en anticipant les bouleversements futurs. À Cherbourg-en-Cotentin, où les espaces portuaires situés en cœur de ville sont soumis à cet aléa, les urbanistes essaient d’imaginer la ville de demain en conciliant les activités humaines et la montée des eaux. Il ne s’agit ni de résister à la mer, ni de se replier vers l’intérieur, mais d’imaginer un aménagement résilient du bord à quai où l’on cohabite régulièrement avec l’eau. Notre ville témoignera de son expérience au cours de cette 3e édition de Grand Océan, que nous sommes heureux d’accueillir pour deux jours de débats et d’échanges sur cette question capitale qu’est la montée du niveau des océans, avec ses causes et ses effets multiples sur l’activité humaine.” ■

UN PROGRAMME AMBITIEUX DE SENSIBILISATION

Jean Morin,
président du département de la Manche

“Son littoral long de 674 kilomètres offre à la Manche une position privilégiée dans l’observation de la hausse du niveau des mers et du recul du trait de côte. Le département n’a d’ailleurs pas attendu les évolutions et constatations récentes dues à une amplification des phénomènes climatiques pour s’en soucier. Dès 1991, la collectivité a confié à l’université de Caen une étude globale de défense contre la mer. Déjà à l’époque, l’objet était clairement affiché : relever les évolutions saisonnières et structurelles du trait de côte. La somme des données collectées au cours de ces décennies constitue une base précieuse. Les dernières analyses estiment que 35 % de notre littoral départemental sont menacés par la submersion marine dans un avenir relativement rapproché, ce qui correspond à plus de 20 000 logements et locaux professionnels. Il s’agit là d’un enjeu considérable pour notre territoire ! C’est d’ailleurs pour cette raison que la Manche préside le groupe de travail littoral au sein de l’assemblée des départements de France. Permettre au grand public de prendre conscience qu’il s’agit d’un risque réel, et non des conséquences ponctuelles de quelques grandes tempêtes hivernales, devient donc une priorité absolue pour les élus que nous sommes. Dès le début de l’actuelle mandature, j’ai souhaité déployer une stratégie ambitieuse de sensibilisation de la population à ce risque de submersion, stratégie dotée d’un budget significatif de 8 millions d’euros. Les premiers résultats sont là, même si cette réalité est encore compliquée pour certains à appréhender. Les colloques, les sommets, comme le sera Grand Océan en septembre, contribuent fortement à transmettre un message de résilience au grand public. Des solutions existent, à nous de les déployer.” ■

LE POINT DE DÉPART D’UNE MOBILISATION LARGE ET CONJUGUÉE

David Margueritte,
président de l’agglomération Le Cotentin, vice-président de la Région Normandie

“Grand Océan devient progressivement l’événement national de référence sur les enjeux maritimes, et Le Cotentin qui l’accueille constitue le territoire de l’excellence maritime. Le recul du trait de côte est une problématique majeure. Pour ne prendre que le problème de la montée du niveau de la mer, les côtes normandes vont faire face d’ici à 2100 à un rehaussement pouvant atteindre 1,10 mètre, voire 1,80 mètre. Face à ce phénomène complexe, l’ensemble des acteurs publics doivent adapter leurs politiques publiques. Pour les riverains et les entreprises côtiers, il conviendra de faire évoluer les bâtiments et d’en déplacer certains. L’intérieur des terres sera également concerné puisque la montée des eaux de mer entraînera celle du niveau des nappes avec, là encore, des conséquences sur l’activité humaine, pour l’agriculture et la qualité de l’eau. Nous constatons déjà un début de salinisation de certaines nappes. Le Cotentin travaille avec l’Essec pour évaluer l’impact du phénomène et la manière d’impliquer la population. L’Agglomération étudie également l’impact sur la ressource en eau. Les territoires côtiers sont souvent les plus dynamiques. L’enjeu est donc majeur et partagé par la plupart des pays. Je forme le vœu que Grand Océan soit le point de départ d’une mobilisation large et conjuguée sur le sujet.” ■

MATHIEU FOULQUIÉ / BIOSPHOTO

Classée depuis 2008 « en danger critique d'extinction » par la Cites, l'anguille européenne continue pourtant d'être pêchée.

Il faut sauver l'anguille

Ce poisson hors du commun est menacé par la pêche, la destruction de son habitat, les obstacles bloquant sa migration et la pollution des eaux.

Par Olivier Roellinger, cuisinier, compositeur d'épices

En 2011, j'ai lancé un appel officiel à tous les cuisiniers du monde pour leur demander d'arrêter de préparer du thon rouge, pêché en Méditerranée et dans l'Atlantique Sud. Comme les résultats de cette campagne sont probants, je voudrais réitérer avec un autre poisson européen, plus en danger que le panda, le tigre ou la baleine à bosse : l'anguille européenne. Ce poisson, qui ressemble un peu à un serpent, était autrefois très commun et abondant. Mais en quarante ans, sa population a drastiquement chuté : sur 100 anguilles dans les années 1980, il n'y en a plus aujourd'hui que cinq. Pourtant, c'est un animal hors du commun, l'un des rares poissons à vivre aussi bien dans l'eau douce des rivières que dans les eaux salées de l'océan. Cela suppose une formidable physiologie. L'anguille s'adapte au degré de salinité de l'eau mais aussi à sa pression — elle peut descendre jusqu'à 600 m de profondeur. À l'inverse, elle parvient à remonter les rivières jusqu'à une altitude inégalée par les autres espèces.

J.C MOSCHETTI/REA

« Face à l'inaction de nos administrations, nous devons agir à notre niveau : suspendons sa consommation et sa pêche »

Elle est également capable de ramper sur la terre des zones marécageuses. Comment expliquer son extinction ? Les causes sont nombreuses : la destruction de son habitat, les obstacles bloquant sa migration, la pollution des eaux liées à l'industrie agrochimique : pesticides, PCB, dioxine, perturbateurs endocriniens…, autant de molécules toxiques que l'on retrouvera parfois en concentration importante dans la chair du poisson, et donc dans l'assiette. Et, bien sûr, à toutes ces menaces s'ajoute la pêche. Qu'elle soit légale ou illégale. Depuis plus de vingt ans, les scientifiques nous alertent sur la nécessité de réduire ces pressions. Dans leurs avis de 2021 et 2022, ils conseillent de mettre fin à la pêche à l'anguille sous sa forme adulte ou juvénile partout en Europe. Mais nos gouvernants ont passé outre cette recommandation.

90 % des captures européennes de civelles proviennent de France

Certes, en dix ans, le nombre des pêcheurs d'anguilles a diminué de moitié, mais que sait-on de l'activité de ceux qui sont restés ? La pêche de la civelle, c'est-à-dire le juvénile, a augmenté de 30 % sur cette période. Et pour l'anguille adulte ? 15 fois plus ! Le marché de l'anguille en Europe représente quasiment 100 millions d'euros par an. Et la France joue un rôle clé, car elle est le plus gros vendeur de civelles : 90 % des captures européennes proviennent de France. C'est aussi le deuxième vendeur d'anguilles adultes.

Face à l'inaction de nos administrations nationales et européennes, nous nous devons d'agir à notre niveau : suspendons sa consommation et sa pêche tant que sa population ne se porte pas mieux. Le respect du produit fait la grandeur du métier de pêcheur et de cuisinier. On ne peut plus se délecter d'un poisson en faisant semblant de ne pas connaître sa situation. Sans cette considération, nous n'aurons peut-être plus jamais d'anguille dans nos assiettes. La tradition s'éteindra. ■

LABORATOIRES
ILAPHARM
www.ilapharm.com

A vos côtés, pour votre santé !

Entreprise familiale française depuis 1992, nous vous proposons le meilleur des plantes pour une santé chaque jour renforcée.

OFFRE Découverte
Dès 5€

**Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

Code privilège : **CS453**

Jambes lourdes
VIGNE ROUGE BIO

Active votre circulation sanguine pour des **jambes légères et confortables.**

6€ 45 gélules

Mobilité articulaire
HARPAGOPHYTUM BIO

Conservez des **articulations souples, mobiles** et en bonne santé. *(1)*

5€ 45 gélules

Brûle-graisse
GUARANA BIO

Boostez **l'élimination des graisses et la perte de poids.** *(1), (7), (9)*

6€ 45 gélules

Libido
MACA BIO

Source d'énergie et aphrodisiaque, elle **stimule le désir sexuel. Idéal avec le Safran Bio !**

7€ 45 comprimés

Os et articulations
SILICIUM ORGANIQUE et Vitamine C

Vitamine C (formation du collagène) et **Silicium** (constituant naturel) pour vos os et cartilages.

7€ 45 gélules

Ballonnement
CHARBON & FENOUIL BIO

Soulage rapidement en cas de **ballonnement** et **flatulences.** *(10)*

6€ 45 gélules

Prostate
HUILE DE COURGE BIO

Aide au bon fonctionnement de la **prostate** et de la **vessie.** Pour un **bon confort urinaire.**

7€ 45 capsules

Fatigue nerveuse
MAGNÉSIUM MARIN et B6

Il contribue au bon fonctionnement de votre **système nerveux.**
*Allergène : **poisson.** (4), (6)*

5€ 45 gélules

Cholestérol
AIL NOIR BIO

Il aide au maintien d'un **taux normal de cholestérol** dans le sang. *(5), (11)*

6€ 30 gélules

Érection
SAFRAN BIO

Le Safran participe au maintien de la **fonction érectile. Idéal avec la Maca Bio !** *(2)*

7€ 20 gélules

Complexe mémoire
NOOBRAL

Plantes, vitamines, minéraux et Oméga-3 pour **conserver** un **esprit alerte** et une **bonne mémoire.**
*Allergènes : **poisson** et **soja.** (8)*

9€ 30 capsules

Foie - Draineur
ARTICHAUT - RADIS NOIR BIO

L'artichaut favorise le **fonctionnement du foie et détoxifie.** *(7)*

6€ 10 ampoules ~~15,60€~~

Endurance et puissance
TRIBULUS

Il favorise la **capacité** et les **performances sexuelles.** *(8)*

6€ 45 gélules

Sommeil
PASSIFLORE BIO

Calmante et apaisante, elle procure un **sommeil de qualité.** Ni accoutumance, ni somnolence.

6€ 45 gélules

Articulations
FRÊNE BIO

Pour le bon fonctionnement des articulations. **Gardez le plaisir de bouger !** *(9), (12)*

5€ 45 gélules

Bonne vision
SPIRULINE BIO

Préservez votre vision grâce à la **Vitamine A** issue du **Bêta-carotène** de la Spiruline. *(7)*

6€ 45 comprimés

VOS 3 CADEAUX

L'Ensemble Papeterie

Pierre Cardin

OFFERT

3 carnets lignés, à couverture souple (dim. 10x14,8 cm), conditionnés dans un étui cartonné et un stylo bleu en aluminium (encre bleue).

+ Les Frais de Port Dès 15€ d'achat 0€ *Au lieu de ~~6,50€~~* **+**

dès 5€ **Tous vos produits EXEMPLE :**

Harpagophytum BIO	5€
Spiruline BIO	6€
Huile de Courge BIO	7€
Safran BIO	7€
Maca BIO	7€
L'Ensemble Papeterie	OFFERT
Frais de port	OFFERTS
TOTAL	**32€**

Tous nos produits sont déconseillés aux enfants de moins de 18 ans et aux femmes enceintes ou allaitantes. (1) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal et de calculs biliaires. (2) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (3) Contient de la caféine (50 mg par jour). (4) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (5) Ne pas associer avec des anticoagulants. (6) Possible effet laxatif. (7) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (8) Déconseillé en cas de traitement antihypertenseur ou antidiabétique. (9) Déconseillé en cas de troubles cardiaques. (10) Déconseillé en cas d'allergie croisée connue, en particulier à la famille des Apiaceae ou au pollen d'armoise ou à l'anéthole. (11) Déconseillé en cas de traitement concomitant par un médicament anti-rétroviral. (12) Déconseillé en cas d'insuffisance rénale œdémateuse. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

NOS GARANTIES

PAYEZ DANS 1 MOIS

*Envoyez votre **réglement par chèque**, **avec votre bon de commande**, il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité fevad · synadiet · La Poste 72h

POUR COMMANDER

@ C'EST FACILE
sur notre site internet :
www.ilapharm.com

01 49 09 11 11
Du lundi au vendredi :
9h -13h et 14h -18h

Laboratoires ILAPHARM
C/O BSL - BP 60475
35171 BRUZ CEDEX

COMMANDE "OFFRE DÉCOUVERTE" - SANS ENGAGEMENT

Vos coordonnées ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....
Votre date d'anniversaire : |_|_| |_|_| |_|_|_|_|
E-mail* : .....
pour recevoir les **Offres mails de nos partenaires** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**
** Recommandé pour la livraison.*

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**
N°|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
Date d'expiration : |_|_|_|_|
Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|
Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX RÉDUIT	TOTAL
Vigne Rouge BIO	PVRB45		6€	
Harpagophytum BIO	PHAB45		5€	
Guarana BIO	PGUB45		6€	
Maca BIO	PMAB45		7€	
Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		7€	
Charbon & Fenouil BIO	PCFB45		6€	
Huile de Courge BIO	PPCB45		7€	
Magnésium Marin et B6	PMM45		5€	
Ail Noir BIO	PANB30		6€	
Safran BIO	PSFB20		7€	
Noobral - Complexe mémoire	NOBA		9€	
Artichaut - Radis Noir BIO	PXRAB		6€	
Tribulus	PTR45		6€	
Passiflore BIO	PPAB45		6€	
Frêne BIO	PFNB45		5€	
Spiruline BIO	PSNB45		6€	
☐ Je reçois **gratuitement** mon **Ensemble Papeterie** et mon **Catalogue**				OFFERTS
☐ Ma commande atteint 15€, **j'économise 6,50€ sur les frais de port**				OFFERTS
☐ Ma commande est inférieure à 15€, **je rajoute 6,50€ de port**				
Code privilège : **CS453**			**TOTAL À RÉGLER**	.....€

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 6,50€ de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Règlement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 48h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 - mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages : FR202486_01JWKA, ADEME papiers : FR308139_031QWZ. Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.mangerbouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires ILAPHARM, cochez cette case ☐ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case ☐ ou écrivez-nous.

KENZA A PLEIN DE CHOSES À FAIRE

MALGRÉ SON TRAVAIL ET SA MÈRE MALADE, ELLE A PU RÉDUIRE SA CHARGE MENTALE.

Avec son service d'accompagnement social, Harmonie Mutuelle s'engage auprès des entreprises et des salariés pour les aider à traverser des situations personnelles difficiles. C'est en agissant sur les déterminants de santé que nous avons un impact positif sur la société.

Découvrez tous nos engagements sur **harmonie-mutuelle.fr**

MUTUALITÉ FRANÇAISE
MEMBRE DE LA

Harmonie mutuelle
GROUPE VYV
AVANÇONS collectif

Harmonie Mutuelle, mutuelle soumise aux dispositions du livre II du Code de la mutualité, immatriculée au répertoire Sirene sous le numéro Siren 538 518 473. Numéro LEI 969500JLU5ZH89G4TD57. Siège social : 143, rue Blomet - 75015 Paris. Crédit photo : Nicolas Prado - BABEL