SCIENCES ET AVENIR

© A. PECCHI/DASSAULT AVIATION

Des traitements efficaces contre L'HYPERTENSION

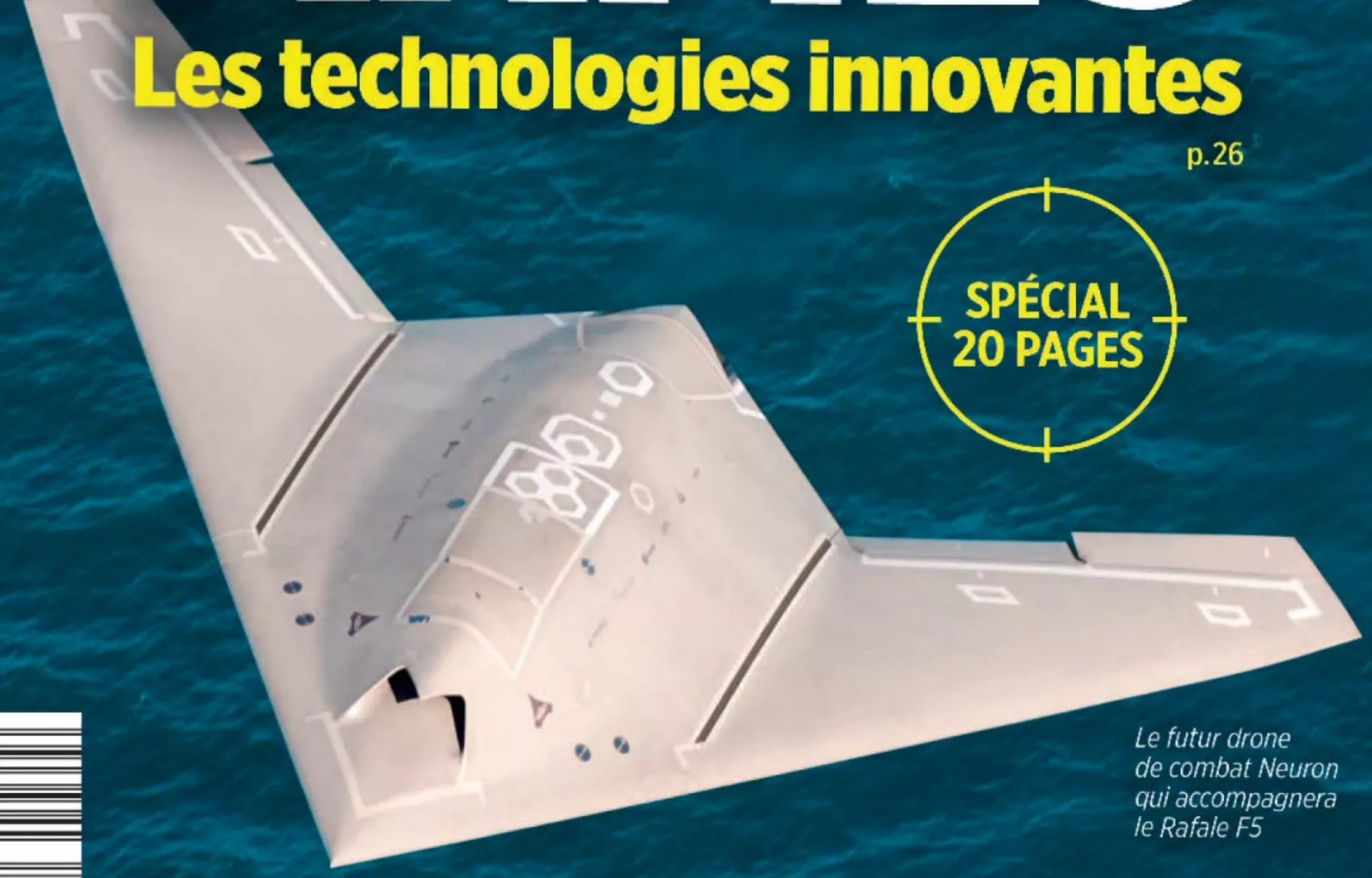
p.64

Les nouvelles ARMES

Les technologies innovantes

p.26

SPÉCIAL 20 PAGES



Le futur drone de combat Neuron qui accompagnera le Rafale F5

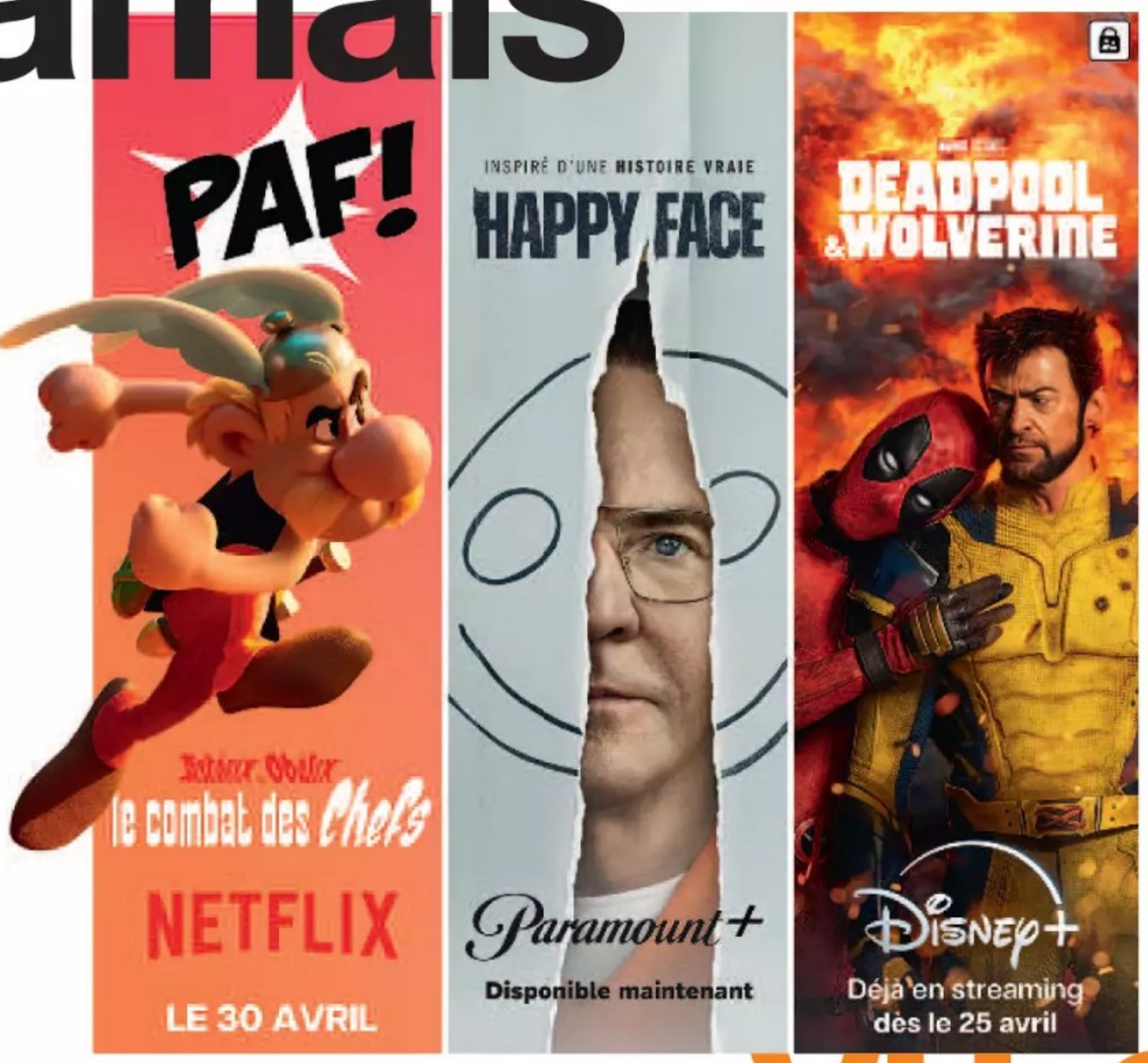
Missile hypersonique, avion furtif, sous-marin nucléaire...

SCIENCES ET AVENIR – N° 939 – MAI 2025 – LES NOUVELLES ARMES

MAI 2025 - N° 939 - ALLEMAGNE 7,40 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / PORTUGAL 5,70 € / DOM 5,90 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8,60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

L 13418 - 939 S - F: 5,30 € - RD

Jamais vu ça



-5 €/mois
et par plateforme de streaming

remise cumulable,
sur tous les abonnements
avec ou sans pub.

La Fibre Orange vous offre des mois et des mois de plaisir sur Netflix, Paramount+ et Disney+

Disponible avec l'offre Livebox Max.

Offre soumise à conditions, engagement 12 mois, en France métropolitaine. Avec l'offre Livebox Max à 57,99 €/mois (prix hors promotion), sous réserve d'éligibilité (frais de mise en service : 49 €), avec décodeur compatible. Souscription de la ou des plateformes en plus auprès d'Orange dans un délai de 3 mois suivant la mise en service de l'offre Livebox Max et activation du compte de la plateforme selon les conditions générales d'utilisation de chacune. Remise(s) appliquée(s) sur la facture Orange. Liste des plateformes au 10/04/2025 susceptible d'évolution. Perte de la remise en cas de résiliation après les 3 mois. Frais de résiliation Livebox : 50 €. Détails et tarifs sur orange.fr

Astérix & Obélix : le combat des Chefs - Droits d'adaptation : les Éditions Albert René. ©2025 les Éditions Albert René/Goscinny-Uderzo.
Happy Face : ©2025 CBS Studios. Deadpool & Wolverine : ©2025 20th Century Studios/© & TM 2025 MARVEL. Tous droits réservés.

orange™ est là

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Entre guerre et paix

Quand on s'appelle *Sciences et Avenir*, il n'y a pas d'autre choix que de garder en permanence un œil sur l'horizon, même lorsqu'il s'assombrit. Lorsque l'Union européenne a entériné le 6 mars au cours d'un Conseil extraordinaire le plan « ReArm Europe » de 800 milliards d'euros, l'avenir est soudainement devenu en effet plus sombre. Côté français, les chiffres donnent également le vertige. « *100 milliards d'euros par an constitueraient le poids de forme idéal pour les armées françaises* », lançait dès le lendemain le ministre des Armées Sébastien Lecornu. Budget qui était de 32 milliards d'euros en 2017 et qui est annoncé à 60 milliards cette année, selon nos confrères de *Challenges*. Dans la foulée, le président Emmanuel Macron affirmait que « *nous allons accroître et accélérer les commandes de Rafale* », évoquant également l'an 2035 pour l'entrée en service du futur Rafale F5, qui sera accompagné dans ses missions d'un drone d'attaque. Les milliards se transforment en objets technologiques. L'avenir militaire se conjugue toujours avec la science. Car de tous temps les guerres se sont gagnées en alliant tactique et innovation. Quelles nouvelles armes se conçoivent aujourd'hui ? Nous avons mené l'enquête. Elle nous a conduits sur les voies de la dronisation et de l'hypersonique. En mer, sur terre, dans les airs, dans l'espace et même dans le cyberespace, les armes iront plus vite, de façon plus discrète et plus autonome. « *Si nous ne sommes plus vraiment en paix, nous ne sommes pas en guerre* », rappelle l'ingénieur général de l'armement Patrick Aufort, qui dirige l'Agence de l'innovation de défense *(p. 28)*. Puissions-nous ne pas nous y engager et les nouvelles armes passer à la postérité comme d'extraordinaires prouesses technologiques qui n'auront servi qu'à la dissuasion. ■

En mer, sur terre, dans les airs, dans l'espace et même dans le cyberespace, les armes iront plus vite, de façon plus discrète et plus autonome

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

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 Les Dossiers 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
Chef(fe)s de service Rachel FLÉAUX (MULOT) (enquêtes) - 01.55.35.56.07, Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46, Hervé RATEL (adjoint, actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78, Mathias GERMAIN (La Recherche, 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, H. CHACHATY, C. GOYA, N. GUTIERREZ C., É. HULATA, P. KALDY, V. LAMIGEON, A. NEYRAT, N. TERRASSE
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Pôle digital 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
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
Directrice de publicité Caroline GILLES - 01.44.88.89.03
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 réabonnement: Yasmina FERHAT – 01.55.35.56.64
Responsable du marketing direct Lina GUACH - 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 Sciences et Avenir « bienvenue aux abonnés » et un encart « Sophia Boutique – Montre Vuillemin Regnier - spécial Fête des mères » jetés sur une partie de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0225 K 79712.
ISSN 3040-0457. Distribué par MLP.

CCF
BANQUE

NOTRE HISTOIRE AU SERVICE

de votre avenir

Au Crédit Commercial de France, nous nous appuyons sur plus d'un siècle d'expérience pour **vous accompagner à toutes les étapes de votre vie.**

Rendez-vous dès maintenant **en agence** ou sur **ccf.fr**

CCF | BANQUE PATRIMONIALE DEPUIS 1917

CCF - S.A. au capital de 147 000 001 euros, agréée en qualité d'établissement de crédit et de prestataire de services d'investissement, immatriculée au RCS de Paris sous le numéro 315 769 257 - Siège social : 103 rue de Grenelle - 75007 Paris. Intermédiaire en assurance immatriculé à l'ORIAS sous le numéro 07 030 182 (www.orias.fr).

SOMMAIRE

Sciences et Avenir / N° 939 / Mai 2025

DOSSIER P. 26

La nouvelle course à l'armement

La guerre en Ukraine et les revirements de l'allié américain entraînent la France et l'Europe dans une politique de réarmement accéléré. Missiles hypersoniques, sous-marins, avions furtifs, lasers anti-drones, satellites… Les armes du futur allient innovation et prouesses technologiques. Passage en revue.

P. 54

Agrivoltaïsme : le soleil se met au vert

Quelque 200 projets de panneaux photovoltaïques sont en cours de réalisation sur des terrres agricoles en France. Et des plantes adaptées à cet ombrage artificiel sont sélectionnées.

P. 64

Hypertension, le tueur silencieux

Près d'un adulte français sur trois souffre d'une tension artérielle élevée. Une meilleure hygiène peut la prévenir et des traitements existent pour les formes les plus sévères.

P. 78

Le médecin qui escorte la mort au musée

Le célèbre médecin légiste et paléopathologiste Philippe Charlier détaille son projet de musée dédié aux corps anciens et relate quelques « cold cases » historiques fascinants.

3 **Édito** par Mathieu Nowak

6 **Courrier**

SCIENCES FONDAMENTALES

8 **ACTUALITÉS** Une galaxie lointaine éclaire les débuts de l'Univers / Un écran LED à la résolution record

44 **Sidérurgie : l'hydrogène ouvre l'ère de l'acier décarboné**

49 **L'énergie noire ébranle la cosmologie**

52 **Journal de l'IA : IA contre IA, ou comment traquer les « deepfakes »**

NATURE

12 **ACTUALITÉS** Des loups préhistoriques (presque) ressuscités / Un drone anti-incendie testé en Allemagne

54 **Agrivoltaïsme : le soleil se met au vert**

59 **Du lait et de la viande sans vache**

62 **La station polaire Tara à l'assaut des glaces**

SANTÉ

18 **ACTUALITÉS** Le vaccin contre le zona réduirait les démences / Une interface cerveau-machine fait parler la pensée

64 **Hypertension, le tueur silencieux**

71 **Trump met en péril la santé mondiale**

74 **L'oculométrie prédit les risques de Parkinson**

76 **Nutrition : Kéfir, lassi, kombucha… Les nouveaux élixirs santé**

HISTOIRE

22 **ACTUALITÉS** Les sombres mammifères du crétacé / Un manuscrit de la légende du roi Arthur refait surface

78 **Philippe Charlier, le médecin qui escorte la mort au musée**

84 **La « Joconde du Cambodge » en majesté à Paris**

86 **Histoire des sciences : La pionnière de la biologie marine**

TRANSVERSALES

90 **Sélection livres**

92 **Expositions**

94 **Chroniques**
Climat par Christophe Cassou et Céline Guivarch / Mathématiques par Claire Mathieu / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

96 **Questions de lecteurs**

97 **Le ciel de mai**

98 **Jeux**

DASSAULT AVIATION - FRANÇOIS GUENET / DIVERGENCE - BAYWA R.E. - GARO / PHANIE - PATRICE NORMAND / OPALE / LEEXTRA POUR SCIENCES ET AVENIR

COURRIER

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

« Objectif Mars. Les défis d'un vol habité »
(*Sciences et Avenir* n° 938, avril 2025)

Je viens de lire l'excellent article sur Mars véritablement complet. J'aurais aimé un paragraphe sur l'option d'envoi de robots à la place de l'humain, vu les contraintes énumérées dans votre article. Ils demandent beaucoup moins de matériel et pourraient tester tous les équipements et aussi planter le drapeau américain, ce qui semble un objectif très important. **M. Le Page**

S. et A. : Vous avez tout à fait raison : il est incomparablement moins difficile d'envoyer des robots que des humains sur la surface de Mars — ce que fait d'ailleurs la Nasa depuis les années 1970. Pour rallier la planète Rouge, l'explorer, y rechercher d'éventuelles traces de vie ou construire des infrastructures dans des conditions si inhospitalières (atmosphère irrespirable, radiations, météorites, tempête de sable, etc.), les machines automatisées sont bien plus efficaces, robustes et endurantes que des astronautes. L'objectif d'envoyer des humains sur Mars est, de fait, essentiellement symbolique et politique. Il n'y a par ailleurs guère d'autres destinations possibles pour l'humain dans le Système solaire dans un avenir raisonnable, outre la Lune bien sûr.

Gulf Stream

J'ai lu avec intérêt votre article sur la fin du Gulf Stream (*S. et A.* n° 937), mais deux points me questionnent : il est noté que le ralentissement de la circulation profonde affaiblit ce flux de remontée vers la surface, favorisant ainsi l'accumulation progressive des nutriments dans les profondeurs de l'océan. Ensuite il est expliqué dans la même page que le piégeage des nutriments dans les profondeurs de l'océan diminuera au fil du temps. Cela n'est-il pas contradictoire ? **Pascal Villain**

S. et A. : Si la circulation profonde ralentit et que les nutriments demeurent dans les grands fonds, il y aura de fait moins de nourriture disponible pour la biologie de surface bien plus abondante. Mais le fait que les nutriments demeurent piégés dans les grands fonds va entraîner au fil du temps une diminution de la biomasse nécessaire aux consommateurs primaires que sont le plancton, les poissons, etc.

Transmutation

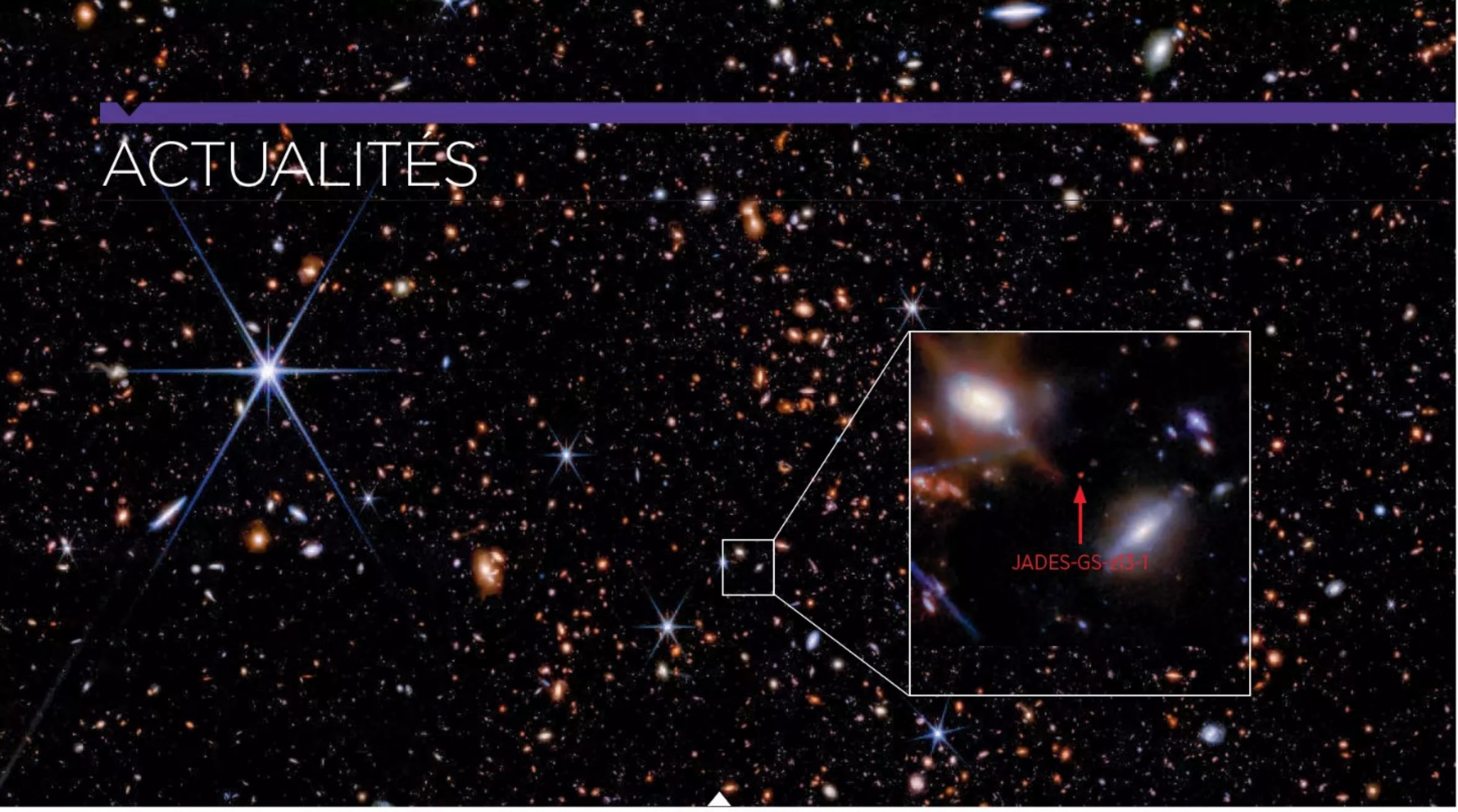
J'ai lu avec intérêt votre article « Transmutation : réduire la durée de vie des déchets nucléaires » (*S. et A.* n° 937), mais sur le plan didactique je lui trouve une grosse lacune. En effet, il est bien expliqué comment les protons sont accélérés, mais sans transition, ce sont des neutrons rapides qui frappent les actinides… Tous vos lecteurs ne savent pas qu'il y a un processus de spallation entre les deux étapes, et cela aurait bien valu quelques lignes de commentaires. **W. J. Pilloy**

S. et A. : En effet, une première « équipe » de neutrons naît du bombardement des protons atterrissant dans le milieu du fluide caloporteur. Ce sont des particules dites de spallation qui vont, à leur tour, impacter les atomes des différents combustibles et déchets. D'autres neutrons vont alors s'extraire de ces atomes.

La science, CQFD.
Natacha Triou
DU LUNDI AU JEUDI
16H – 17H
> Disponible sur le site et l'appli Radio France.

© Radio France/Ch. Abramowitz
En partenariat avec
SCIENCES ET AVENIR
france culture
L'esprit d'ouverture

ALOEST FILMS
PRÉSENTE
"LA MALADIE D'ALZHEIMER
COMME VOUS NE L'AVEZ JAMAIS VUE"
SCIENCES & AVENIR
SÉLECTION OFFICIELLE
FIPADOC 2025
FESTIVAL INTERNATIONAL
MUSIC & CINEMA
MARSEILLE
HORS COMPÉTITION
2025
LES ESPRITS LIBRES
UN FILM DE
BERTRAND HAGENMÜLLER
Femme Actuelle
LA VIE
AU CINÉMA LE 30 AVRIL
SCIENCES ET AVENIR
La Recherche
ALOEST
FRANCE ALZHEIMER & MALADIES APPARENTÉES
JCDecaux
Fondation ÉCOUTER VOIR
GROUPE VYV
FONDATION RECHERCHE ALZHEIMER



Observée dans l'infrarouge par l'un des instruments du James-Webb, JADES-GS-z13-1 révèle l'activité des premiers astres de l'Univers.

Cette galaxie lointaine éclaire les débuts de l'Univers

Le télescope spatial James-Webb a détecté une galaxie dont la lumière révèle un moment clé de l'histoire cosmique : le début de la réionisation, seulement 330 millions d'années après le Big Bang.

C'est une lumière pleine de promesses que vient de capter le télescope spatial James-Webb (JWST). Elle a été émise par des atomes d'hydrogène depuis la galaxie JADES-GS-z13-1, seulement 330 millions d'années après le Big Bang. Mais à cette distance dans l'espace et le temps, on ne s'attendait pas à la voir : à cette époque, l'Univers était une vraie purée de pois. Il était empli d'atomes d'hydrogène neutre, formant un épais brouillard entravant la progression des photons. Malgré tout, cette lumière particulière, dite Lyman-Alpha, s'est faufilée jusqu'à nous. Selon une étude parue dans la revue *Nature*, une fraction du rayonnement Lyman-Alpha a pu s'échapper car la galaxie a créé une bulle de gaz ionisée autour d'elle, en arrachant des électrons aux atomes à l'aide de photons énergétiques. En effet, si le gaz d'hydrogène neutre est opaque, il devient transparent lorsqu'il est ionisé. Les photons ont donc pu voyager dans cette bulle, puis s'en échapper. Pour les chercheurs, celle-ci constitue le début de la réionisation, une période clé de l'Univers au cours de laquelle il est devenu totalement transparent, comme nous pouvons le contempler aujourd'hui.

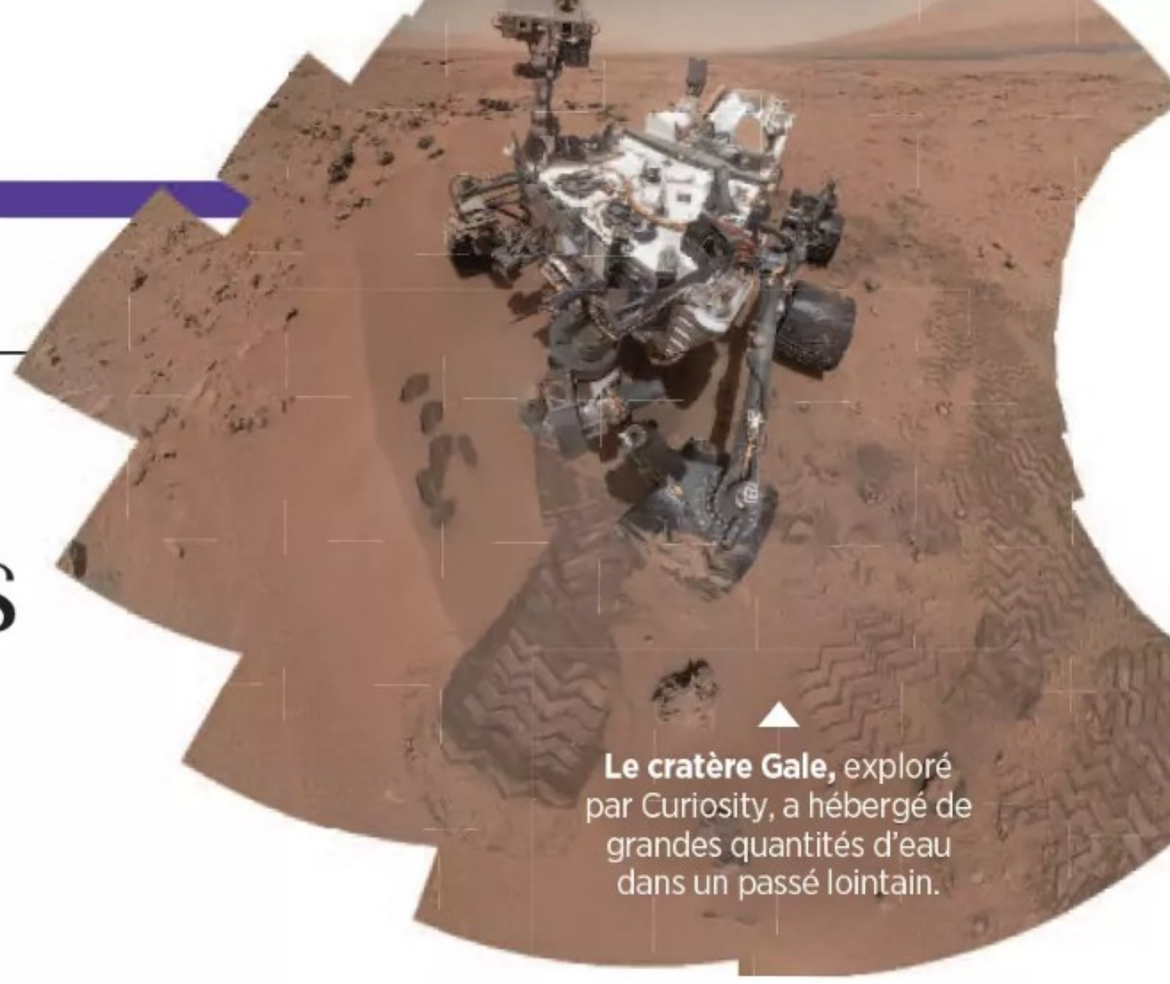
Mais pour éclaircir l'espace autour d'elle, la galaxie devait émettre de grandes quantités de photons ionisants. Les observations du JWST révèlent plusieurs indices concordants pour identifier leur source : un spectre ultraviolet très bleu — signe d'une population d'étoiles chaudes et jeunes — et une galaxie extrêmement compacte, 400 fois plus petite que la Voie lactée, ce qui augmente la densité du rayonnement.

La mythique première génération d'étoiles

L'émission intense de photons pourrait donc indiquer soit la présence d'un trou noir supermassif actif, engendrant un rayonnement ionisant intense en dévorant du gaz, soit une éclosion d'étoiles très chaudes et très massives. Les auteurs évoquent même la possibilité que l'on trouve parmi elles les mythiques étoiles de « population III », cette toute première génération d'étoiles de plus de 1000 masses solaires, ultrabrillantes, ayant éclos dans l'Univers. Leur quête, vaine à ce jour, est l'un des objectifs majeurs du JWST.

Cette découverte marque quoi qu'il en soit la première preuve qu'un objet si lointain peut libérer suffisamment de photons pour modifier localement l'état du gaz intergalactique. Elle témoigne ainsi de la façon dont le voile qui obscurcissait l'Univers à ses débuts s'est peu à peu déchiré, sous l'effet de ces jeunes galaxies très actives. ■ **F. N.**

ESA/WEBB, NASA & CSA, JADES COLLABORATION, J. WITSTOK, P. JAKOBSEN, A. PAGAN (STSCI), M. ZAMANI (ESA/WEBB)



Le cratère Gale, exploré par Curiosity, a hébergé de grandes quantités d'eau dans un passé lointain.

NASA

D'intrigantes molécules organiques sur Mars

Le rover Curiosity, présent depuis 2012 sur la planète Rouge, a identifié des composés organiques complexes.

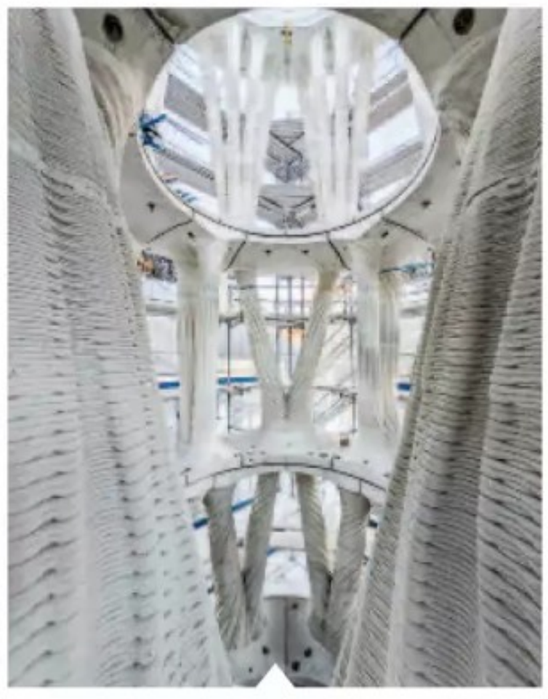
Un échantillon récupéré sur Mars dans le cratère Gale par le rover Curiosity vient de livrer de fascinantes informations sur ses constituants moléculaires. Dans ce morceau de roche riche en argiles et vieux de 3,7 milliards d'années se trouvent en effet les plus longues chaînes de molécules organiques identifiées à ce jour sur la planète Rouge. Selon des analyses menées notamment en France, au CNRS, elles sont composées de 10, 11 et 12 atomes de carbone. Et proviennent très probablement de molécules encore plus grandes, dénommées « acides gras », qui, sur Terre, font partie des lipides constituant toutes les membranes cellulaires, notamment les bactéries. Des processus chimiques, non biologiques, peuvent certes produire aussi des acides gras. Mais la provenance et la distribution de ces molécules sont d'un grand intérêt pour la recherche d'anciennes traces de vie sur Mars. Et encouragent les scientifiques à débusquer d'autres composés organiques complexes et biosignatures potentielles dans le cratère Gale. ■ **F. D.**

EN DEUX MOTS

EXOPLANÈTE Le télescope spatial James-Webb a observé pour la première fois de façon directe de grandes quantités de CO_2 sur quatre géantes gazeuses du système HR 8799, à 130 années-lumière. **IA** Le prix Turing 2024, « prix Nobel de l'informatique », a été décerné à l'Américain Andrew Barto et au Canadien Richard Sutton, inventeurs de l'apprentissage par renforcement.
MISSION Le 29 avril, Arianespace lancera le satellite Biomass de l'ESA, conçu pour livrer des informations sur l'état des forêts.

274 Le nombre de lunes autour de Saturne

ASTRONOMIE L'Union astronomique internationale a validé la récente découverte de 128 nouveaux satellites naturels autour de la planète aux anneaux, portant le total à 274. Leur diamètre n'excède pas quelques kilomètres et leurs orbites sont largement excentriques, nombre de ces lunes évoluant même en sens inverse de la rotation de la planète. De quoi placer Saturne en tête des planètes du Système solaire en nombre de lunes, reléguant Jupiter et ses 95 satellites loin derrière. **F. N.**



ANDREJ IPA

Les éléments de la tour de 30 m de haut ont été imprimés en béton.

Le plus haut bâtiment du monde par impression 3D

INGÉNIERIE La Tor Alva (tour blanche) est un projet de l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETZH). Haute de 30 mètres, elle se compose de 32 colonnes en V réparties sur quatre niveaux. Ses éléments ont été imprimés en béton liquide à l'ETZH avant d'être assemblés dans le village de Mulegns. Aucun adhésif n'est utilisé, c'est le poids de chaque couche de béton solidifié qui maintient la structure. Une armature d'acier a servi à atteindre cette hauteur inédite pour de l'impression 3D. **A. D.**

FIREFLY AEROSPACE / AFP

La lumière du couchant, saisie par le robot Blue Ghost depuis le sol lunaire, fait briller la Terre (en haut).

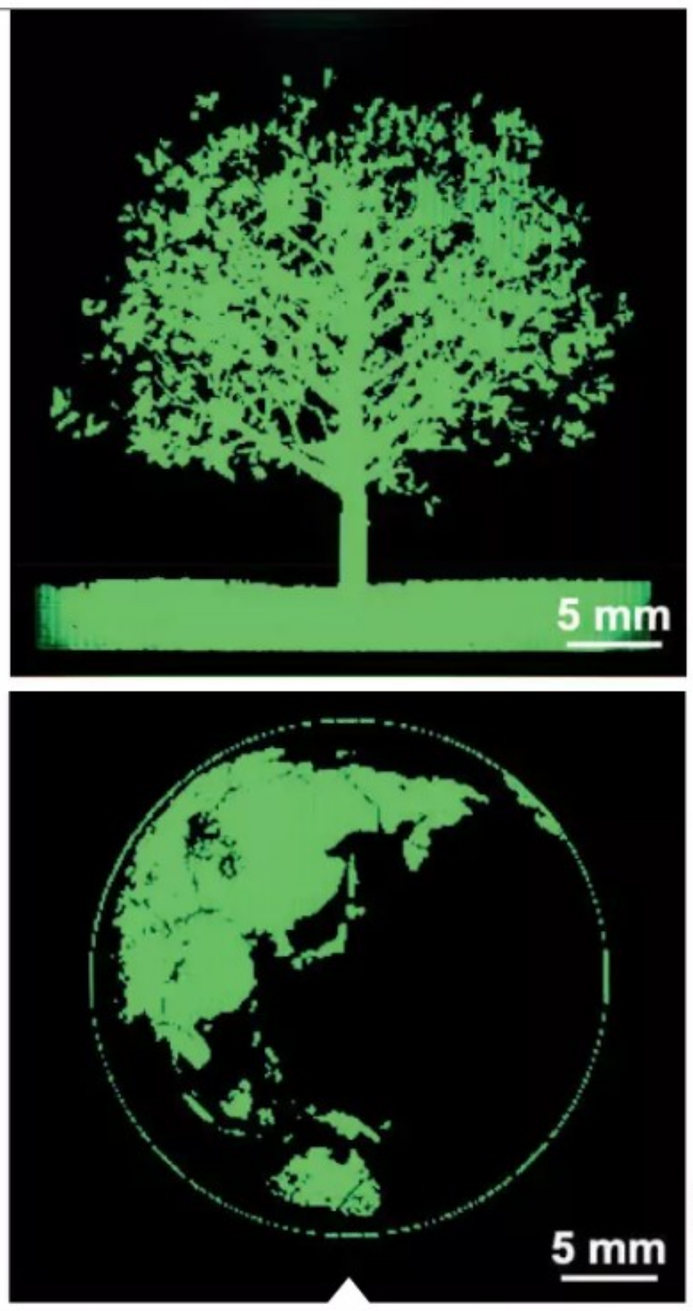
Un coucher de Soleil en HD sur la Lune

SÉLÉNOLOGIE La Nasa et l'entreprise spatiale américaine Firefly Aerospace ont révélé les premières images en haute définition d'un coucher de soleil lunaire. Pris par le robot Blue Ghost après son alunissage début mars, ce cliché dévoile un paysage sombre baigné d'un halo vert, où le Soleil rasant fait briller la Terre au-dessus de l'horizon et laisse deviner Vénus en petit au loin. **H. J.**

Un écran LED à la résolution record

Chaque pixel ne mesure que 90 milliardièmes de mètre, offrant ainsi une résolution de 127 000 pixels par pouce.

L'écran LED (diode électroluminescente) le plus petit jamais conçu est présenté par des physiciens chinois et britanniques dans la revue *Nature*. Chaque pixel ne mesure que 90 milliardièmes de mètre, soit environ la taille d'un virus ! Ce qui permet d'atteindre une résolution de 127 000 pixels par pouce — un record. Jusqu'à présent, les pixels étaient limités à quelque 10 millionièmes de mètre de large, seuil au-dessous duquel les performances des semi-conducteurs exploités dans les LED s'effondrent, sans compter les coûts élevés de fabrication. Pour passer cette limite, les chercheurs ont utilisé d'autres matériaux cristallins : des pérovskites, peu coûteux et faciles à fabriquer, qui convertissent l'électricité en lumière avec une très grande efficacité. Les écrans LED conservent ainsi une bonne brillance à des dimensions extrêmement réduites (uniquement dans les couleurs vertes pour le moment). Une propriété qui pourrait être exploitée dans les futurs casques de réalité virtuelle et d'autres dispositifs d'affichage. ■ **F. D.**



LIAN, Y. ET AL

Ces images ont été obtenues grâce à des LED micrométriques composées de pérovskite.

NASA, ESA, CSA, STSCI

Une galaxie spirale (en haut à gauche) était cachée par le jet de gaz.

Une tornade cosmique percée à jour

ASTRONOMIE Le télescope spatial James-Webb a sondé une spectaculaire « tornade cosmique » à 630 années-lumière, dans la nébuleuse du Caméléon I, région active de formation d'étoiles. Cet objet, baptisé Herbig-Haro 49/50, résulte d'un jet de matière provenant d'une étoile naissante. En se refroidissant, la poussière émet de la lumière dans le visible et les infrarouges. En bonus, le télescope a débusqué une galaxie spirale qui restait masquée par ce tourbillon stellaire. **J. I.**

De l'eau 100 millions d'années après le Big Bang

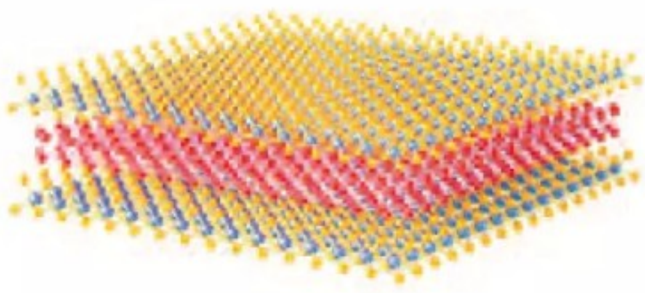
ASTROPHYSIQUE Des simulations indiquent que les molécules d'eau auraient été formées en abondance dès 100 à 200 millions d'années après le Big Bang, et non un milliard d'années comme les scientifiques le pensaient jusqu'à présent. Elles résulteraient des interactions entre des nuages d'hydrogène et l'oxygène expulsé par les toutes premières étoiles de l'Univers. **F. D.**

SOURCE : D. WHALEN, UNIVERSITÉ DE PORTSMOUTH, ROYAUME-UNI

Des feuilles métalliques ultrafines

MATÉRIAU Une équipe a réussi à créer les premiers matériaux métalliques en 2D : des feuilles de bismuth, de gallium, d'indium, d'étain et de plomb d'une épaisseur de seulement quelques atomes ! Les métaux ont d'abord été chauffés au-delà de leur point de fusion pour former des gouttelettes, elles-mêmes fortement comprimées entre deux enclumes en saphir. **F. D.**

SOURCE : J. ZHAO, ACADÉMIE CHINOISE DES SCIENCES



INSTITUTE OF PHYSICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

L'épaisseur de la feuille de bismuth (en rose) n'est que de deux atomes.

36 millions
Le nombre de mesures pour la masse du neutrino

PHYSIQUE Elles ont été réalisées par l'expérience allemande Katrin pour établir la meilleure limite de la masse du neutrino. Résultat : celle-ci ne dépasse pas 0,45 électronvolt. C'est un million de fois plus léger qu'un électron. Le neutrino est, avec le photon, la particule la plus abondante de l'Univers, mais aussi la plus difficile à étudier car elle interagit très peu avec la matière. **F. N.**

PUBLI
COMMUNIQUÉ

Varilux© : Des technologies de pointe au service de la vision

Les verres progressifs Varilux, fabriqués en France dans le laboratoire d'excellence d'EssilorLuxottica, restent à la pointe de l'innovation soixante-cinq ans après leur création. Les chercheurs du Groupe utilisent depuis plusieurs années l'intelligence artificielle comportementale pour concevoir des verres sur-mesure toujours plus performants pour les personnes presbytes. Respectant le comportement naturel de l'œil, ils garantissent une vision nette à toutes les distances.

Une recherche dynamique et engagée depuis plus de 65 ans

Conséquence naturelle du vieillissement du cristallin, la presbytie touche 20 millions de Français. À l'horizon 2050, les scientifiques estiment que 4 milliards de personnes dans le monde seront concernées par ce trouble de la vision qui apparaît autour de 45 ans.

Depuis 1959, les verres progressifs Varilux ont toujours été les plus innovants pour à la fois corriger la presbytie et s'adapter au mode de vie d'aujourd'hui : réussir à jongler avec les différentes distances de vision, de près (pour lire les 80 notifications que chacun reçoit en moyenne quotidiennement), et de loin.

Pour concevoir ces solutions optiques, véritables concentrés de technologies, les 300 chercheurs du centre de R&D de Créteil s'appuient sur des expertises croisées en optique, en neurosciences et en modélisation numérique. Ces solutions optiques nécessitent des cycles de développement qui peuvent prendre 5 à 10 ans avant d'être proposés aux personnes presbytes.

L'intelligence artificielle, moteur de l'innovation

Lancé en 2023, Varilux XR series a été le premier verre progressif au monde intégrant une technologie d'IA comportementale. Une avancée majeure qui permet une personnalisation inédite grâce à l'analyse des habitudes visuelles des porteurs de lunettes. Les chercheurs ont exploité plus d'un million de données comportementales et posturales recueillies en conditions réelles. Leur objectif : faciliter la fluidité de la vision, notamment lors d'activités multi-tâches (de plus en plus présentes dans le quotidien).

L'approche novatrice des jumeaux numériques

Pour optimiser la conception des verres, les équipes ont recours aux jumeaux numériques. « Nous avons recréé virtuellement une personne presbyte et son environnement en 3D afin d'optimiser le design optique », explique Sébastien Fricker, Responsable Modélisation de la Vision et de la Perception en R&D chez EssilorLuxottica.

Cette approche permet de simuler les interactions entre le regard, les mouvements et l'environnement visuel de la personne. Il est alors possible de prédire le comportement de chaque porteur de verre. Ensuite il s'agit de concevoir un verre progressif unique qui garantit une netteté instantanée notamment dans les situations dynamiques où la réactivité est clé. Les performances des verres conçus de cette manière sont systématiquement validées ensuite par des testeurs, qui confirment le bénéfice apporté.

Ces innovations dans l'IA renforcent la position d'EssilorLuxottica comme pionnier de l'optique de précision, avec une ambition claire : offrir au quotidien un confort visuel optimal aux porteurs de verres optiques et améliorer ainsi la qualité de vie des presbytes en France et dans le monde.

Chiffres clés

2 milliards : nombre de personnes concernées par la presbytie dans le monde

1959 : année de création du premier verre Varilux par un ingénieur français

65 : étapes de fabrication pour un verre Varilux dans son laboratoire d'excellence dédié en France

30 : le nombre de brevets déposés dans un verre Varilux

Varilux, **1ère** marque de verres progressifs au monde*

*Euromonitor International, Données 2023. Valeur marchande dans la catégorie des verres ophtalmiques. La marque représente les verres progressifs.

COLOSSAL BIOSCIENCES

Ce loup génétiquement modifié possède d'anciens variants génétiques de « Aenocyon dirus » (loup sinistre) liés à une plus grande taille (l'animal ici n'a que 6 mois), un pelage clair et une musculature puissante.

Des loups préhistoriques (presque) ressuscités

Des scientifiques ont introduit 20 modifications dans le génome de loups gris pour tenter de recréer les traits distinctifs d'une espèce disparue il y a 13 000 ans.

Romulus, Remus et Khaleesi, deux mâles et une femelle au pelage blanc, grandissent dans une réserve sécurisée du Texas (États-Unis). Présentés comme les premiers « loups sinistres » (*Aenocyon dirus*) arpentant la Terre depuis leur disparition il y a 13 000 ans, ils sont le fruit d'un programme de désextinction mené par la société Colossal Biosciences. La même qui avait présenté le mois dernier des souris laineuses avec des gènes de mammouth *(lire* S. et A. *n° 938)*. Grâce à l'édition génétique, 20 modifications ont cette fois été introduites dans le génome de loups gris, dont 15 proviennent directement d'anciens variants génétiques du loup sinistre.

L'objectif est de recréer les traits distinctifs de cette espèce : taille 25 % plus grande que celle d'un loup, musculature puissante, fourrure claire et grosse mâchoire. Auparavant, il aura fallu décrypter l'ADN de deux fossiles vieux de 13 000 et 72 000 ans pour les comparer avec d'autres espèces proches et ainsi identifier les variants influant sur leur aspect.

Une réussite contestée par des experts

Les chercheurs ont ainsi modifié des embryons de loup gris avant de les implanter dans l'utérus de chiennes de grande taille qui ont finalement donné naissance à ces hybrides. Car plus que de vrais loups sinistres, les trois jeunes canidés sont en fait des hybrides de loups gris génétiquement modifiés pour afficher un phénotype proche de celui de l'espèce disparue.

Pour Colossal Biosciences, cette ressemblance suffit à revendiquer une désextinction réussie. Une annonce sensationnaliste qui ne convainc pas nombre d'experts considérant que les différences génétiques entre un vrai loup sinistre et ces créatures sont encore trop nombreuses. Outre la naissance des trois louveteaux hybrides, la start-up annonce celle de deux portées de louveteaux rouges (*Canis rufus*) issus de trois lignées génétiques. Il s'agit d'une espèce classée en danger critique d'extinction. ■ **J. I.**

1620 km

L'étendue des côtes découvertes par le réchauffement au Groenland

CLIMATOLOGIE
La fonte des glaciers suivie par satellite ces vingt dernières années a dégagé 2466 kilomètres d'un littoral auparavant recouvert par la glace, selon une nouvelle étude. Les chercheurs ont constaté qu'environ 66 % de ces nouvelles côtes se trouvaient au Groenland. **H. J.**

SOURCE : JAN KAVAN, UNIVERSITÉ MASARYK, RÉPUBLIQUE TCHÈQUE

BHARAT BARUAH

Le matériau contient un mélange d'œuf et de riz.

L'étonnante recette pour rendre le bois transparent

ÉCOLOGIE Des chercheurs sont parvenus à rendre transparentes des planches de balsa en remplaçant la lignine et l'hémicellulose du bois par un mélange… d'œuf et de riz ! Une méthode bien plus écologique que les résines époxydes issues du pétrole. Or, du fait de sa résistance, sa légèreté et ses propriétés thermiques, ce matériau renouvelable est considéré comme prometteur, notamment pour la construction d'écrans ou de fenêtres. **H. R.**

SOURCE : BHARAT BARUAH, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DE KENNESAW, ÉTATS-UNIS.

PROFITEZ D'UNE REMISE DE 20%
SUR L'ACHAT DE VOTRE TICKET AVEC LE CODE **SA-VT25**

VIVA TECHNOLOGY

11-14 JUIN 2025

THE PLACE TO B2B*.

3 500 exposants de +25 secteurs d'activité et 160 pays,
+100 représentants institutionnels internationaux,
13 500 start-ups et 3 200 investisseurs.

*Le lieu pour faire du business

RÉSERVEZ VOTRE TICKET
SUR **VIVATECH.COM**

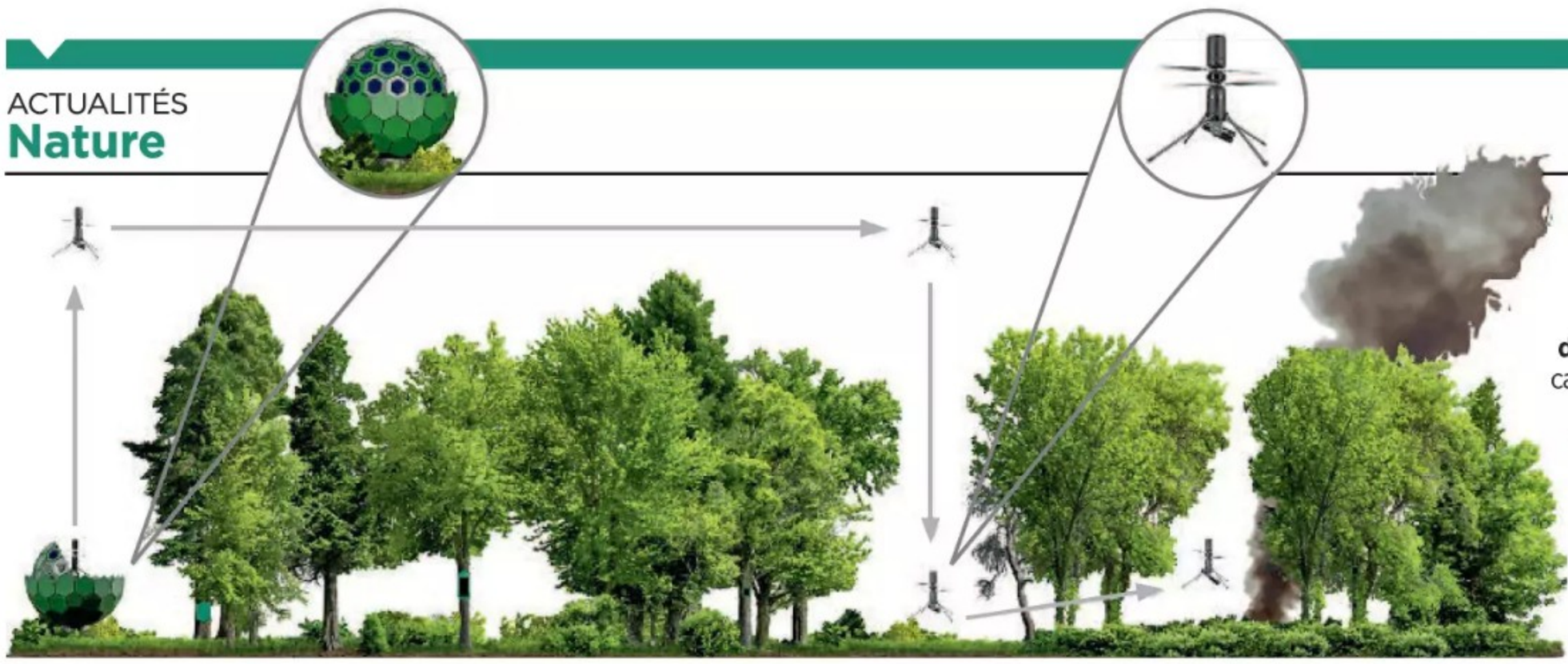
PARIS
PORTE DE VERSAILLES

CO-ORGANISATEURS

PUBLICIS GROUPE · Groupe Les Echos Le Parisien

PARTENAIRES MÉDIAS

franceinfo: · 20minutes · france tv · webedia · BFM BUSINESS · africa news. · euro news. · Bloomberg Media · CNN · FT FINANCIAL TIMES · rfi · FRANCE 24 · MCD · France médias monde



Lorsque de la fumée est détectée par des capteurs présents dans la forêt, le drone est libéré de sa capsule et va localiser l'incendie. ◀

Un drone anti-incendie testé en Allemagne

Cet engin autonome devrait être capable de localiser rapidement et avec précision les départs de feu.

Pour contrer des feux de forêt de plus en plus fréquents et dévastateurs, une start-up allemande, Dryad, a testé son système de drones autonomes dotés d'une intelligence artificielle capable de localiser rapidement et avec précision les départs de feu. Le système repose sur des capteurs fixés aux arbres. Lorsqu'ils détectent des molécules signant la présence de fumée, ils alertent un centre de contrôle chargé de libérer le drone en veille dans une grosse bulle dotée de panneaux solaires en lisière de la forêt. L'appareil de 2 mètres de diamètre effectue alors un survol pour repérer l'emplacement précis du départ de feu. À terme, il devrait même être équipé d'un canon sonique projetant des ondes sonores de basse fréquence permettant d'étouffer les petits incendies. Pour l'instant, le test réalisé en Allemagne fin mars a échoué en raison d'un signal GPS défectueux. ■ **H. J.**

DRYAD NETWORKS

BIOSPHOTO

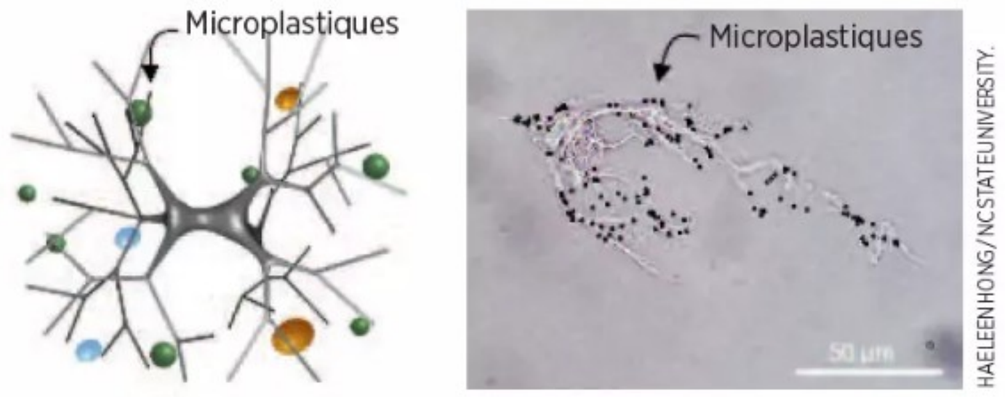
Le krill fuit les excréments de manchots

ÉTHOLOGIE Nager plus vite, zigzaguer... Le krill antarctique *(photo)* adopte un comportement de fuite lorsqu'il détecte du guano de manchot Adélie à proximité. Ce simple signal chimique, associé à la présence d'un de ses prédateurs, déclenche cette réponse. En plus de nager frénétiquement, le krill se nourrit moins, réduisant sa pression de prédation sur ses proies, l'impact étant donc élargi à l'ensemble de son écosystème. **N. T.**

SOURCE : M. WEISSBURG, INSTITUT DE TECHNOLOGIE DE GÉORGIE, ÉTATS-UNIS.

47 Le nombre de projets miniers en Europe

MATIÈRES PREMIÈRES
Lithium, platine, terres rares, cobalt, nickel... L'Union européenne a présenté une liste de 47 projets miniers (extraction, recyclage ou transformation) pour réduire sa dépendance aux matières premières chinoises indispensables à la transition verte. Parmi ceux-ci, huit concernent la France, dont deux sites d'extraction de lithium dans l'Allier et en Alsace. **H. J.**



HAELEEN HONG/NCSTATEUNIVERSITY.

Les particules biodégradables s'autodispersent dans l'eau, capturent les microplastiques lorsqu'ils coulent puis remontent à la surface.

Des polymères à la pêche aux microplastiques

POLLUTION Des chercheurs ont développé des particules en polymère biodégradable dont la structure peut piéger les microplastiques polluant les mers ou les cours d'eau. Un traitement chimique leur permet de couler et dériver durant 30 minutes pour agréger les plastiques en profondeur avant de remonter à la surface, où les particules peuvent alors être récupérées par écrémage. **H. J.**

SOURCE : HAELEEN HONG, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DE CAROLINE DU NORD, ÉTATS-UNIS.

Le relief de la France bientôt connu au centimètre près

GÉOGRAPHIE Entamée en 2021, la couverture systématique du territoire français et des départements d'outre-mer par la technique du Lidar va permettre de connaître précisément les reliefs en incluant, outre la topographie, les bâtiments et végétaux qui la recouvrent. L'IGN qui en a la charge vient de dévoiler trois modèles numériques représentant l'altimétrie du sol et les éléments artificiels et naturels (végétations basse ou haute). **L. C.**

TSFJAZZ.COM
TSF JAZZ ET LIVE NATION
en accord avec Montuno

PRÉSENTENT LA 2ème ÉDITION DU

TSF JAZZ CHANTILLY FESTIVAL

SAMEDI 5 ET DIMANCHE 6 JUILLET 2025

DANS LE PARC DU CHÂTEAU DE CHANTILLY

15 CONCERTS
100 ARTISTES

SAMARA JOY · MARCUS MILLER · MONTY ALEXANDER
AVISHAI COHEN · KAMASI WASHINGTON · SOPHYE SOLIVEAU
GABI HARTMANN · ISAIAH COLLIER · SULLIVAN FORTNER · TYREEK MCDOLE
LUDOVIC LOUIS · THE HOOKUP - LAURENT / MOUTIN(S) / HUCHARD
COULONDRE / DOLMEN / PRIVAT · FANOU TORRACINTA

JAZZ CELEBRATION

BILLETTERIE OUVERTE DANS TOUS LES POINTS DE VENTE HABITUELS
PLUS D'INFOS SUR WWW.TSFJAZZCHANTILLYFESTIVAL.COM

LE FESTIVAL 100 % JAZZ

Ville de Chantilly
Ville d'Art et d'Histoire

Château de Chantilly
INSTITUT DE FRANCE

Région Hauts-de-France

Aire Cantilienne

Le Parisien

media transports
Pour une publicité utile

Vive le jazz

Les zones humides stockent plus de CO_2 que les forêts

ÉCOLOGIE En revisitant 30 ans de mesures des flux de carbone entre les sols terrestres, l'atmosphère et les océans, une équipe révèle que 6 % seulement du CO_2 de l'air est effectivement capté par les arbres. Plus de la moitié est stockée dans les sédiments des lacs, étangs, marais ainsi que dans les tourbières, le reliquat l'étant dans les sols. Si la lutte contre la déforestation s'impose toujours, la protection des zones humides devient primordiale. Or, 64 % de ces écosystèmes ont disparu au cours du XX^{e} siècle. **L. C.**

SOURCE : SAMUEL HAMARD, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, FRANCE.

Un coup de foudre embellit ces arbres

DENDROLOGIE L'arbre tropical *Dipteryx oleifera* tire profit des coups de foudre : il se retrouve dans un meilleur état après l'impact, sa morphologie agissant tel un paratonnerre. Lorsqu'il est frappé, ses lianes parasites sont éliminées et les arbres voisins sont affectés, réduisant la concurrence pour la lumière et les nutriments présents dans le sol. La foudre confère ainsi à cette espèce de grande taille un avantage pour l'accès à ces ressources. **N. T.**

SOURCE : EVAN GORA, INSTITUT D'ÉTUDES DES ÉCOSYSTÈMES DE CARY, ÉTATS-UNIS.

EVANGORA

Un « Dipteryx oleifera » juste après avoir été foudroyé (en haut) et deux ans plus tard (en bas).

SYLVAIN CORDIER/ BIOSPHOTO

Bien qu'appartenant à l'ordre des carnivores, le mammifère ne se nourrit quasiment que de bambou.

Le panda est sous influence génétique du bambou

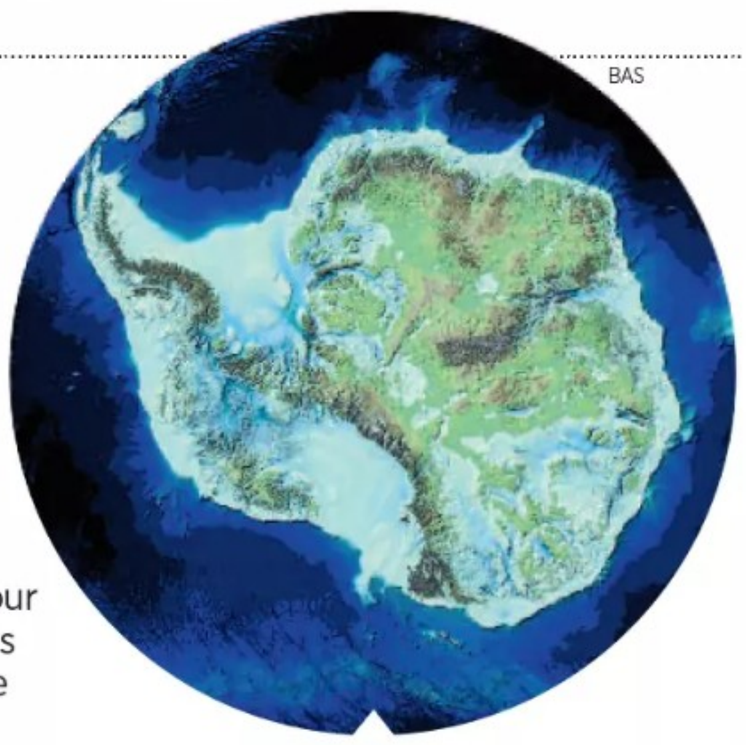
Des micro-ARN de la plante retrouvés dans le sang de cet ursidé pourraient influencer son comportement et sa physiologie.

La dépendance aux bambous du panda géant serait activement entretenue par la plante sur le plan génétique, selon une étude publiée par une équipe chinoise dans la revue *Frontiers in Veterinary Science*. Les scientifiques ont en effet découvert que le sang de cet ursidé contenait des micro-ARN directement issus de sa source exclusive d'alimentation. Soit des petites séquences génétiques très stables capables de modifier l'expression de gènes dans les cellules environnantes. Ces dizaines de micro-ARN variaient suivant l'âge et le sexe des ursidés étudiés. Chez le jeune panda, ils correspondaient ainsi à des gènes impliqués dans son développement. Chez le mâle adulte, en revanche, les micro-ARN du végétal ciblaient des informations génétiques impliquées dans son comportement, sa reproduction, mais aussi dans la perception du goût, des odeurs et la sensation de plaisir. Les nombreux micro-ARN du bambou absorbés en mangeant les feuilles, les racines et les jeunes pousses pourraient influencer de nombreux processus physiologiques et encourager la consommation assidue de ce végétal par les pandas, pourtant pourvus d'un système digestif typique des carnivores. **P. K.**

Les dessous de l'Antarctique révélés

GÉOGRAPHIE Plus de six décennies de données acquises par avion, satellite, navire et même traîneau à chiens ont été compilées pour cartographier ce que serait le continent Antarctique sans ses 27,17 millions de kilomètres cubes de glace. Cette carte baptisée Bedmap3 fait apparaître avec une précision inédite le contour de profondes vallées et des montagnes rocheuses cachées sous une épaisseur moyenne de glace de 1948 mètres. Selon ces données, le niveau des océans s'élèverait de 58 mètres si toute la glace fondait. **H. J.**

SOURCE : HAMISH PRITCHARD, BRITISH ANTARCTIC SURVEY, ROYAUME-UNI.



BAS

La carte Bedmap3 montre la topographie du continent blanc dépourvu de glace.

Sophia Boutique, la boutique des lecteurs de SCIENCES ET AVENIR

L'AFFAIRE DU MOIS

LA MONTRE *à énergie* SOLAIRE

VUILLEMIN REGNIER

VR

78 ex à saisir !

~~89€~~
69€

Mouvement analogique 3 aiguilles « flèches »
Cadran solaire avec index luminescents
Boîtier de 45 mm en alliage de métaux
Bracelet en acier
Garantie 2 ans

BON DE COMMANDE

À compléter et à renvoyer avec votre règlement sous enveloppe affranchie à :
SOPHIA BOUTIQUE
45, avenue du Général Leclerc
60643 Chantilly Cedex

	RÉF	QTÉ	PRIX	TOTAL
La montre à énergie solaire	V174		69€	€
Frais d'envoi				OFFERTS
TOTAL DE MA COMMANDE				€

ADRESSE DE LIVRAISON

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code Postal

Ville :

Téléphone

E-mail : @

Pour la bonne gestion de votre commande, merci d'indiquer votre email

☐ J'accepte de revoir des offres par email des partenaires de Sophia Boutique.

MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Je règle par chèque à l'ordre de : **Sophia Boutique**

☐ Je règle par carte bancaire

N°

Expirant le

Signature obligatoire :

Les Éditions Croque Futur situées au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e, et qui éditent Sophia Boutique sont responsables de traitement et collectent des données afin de servir votre commande. Vos données pourront être transmises à d'autres organismes (presse, VAD, caritatif) et sont conservées pour une durée de 3 ans à partir de votre commande. Vous pouvez exercer vos droits d'accès, de rectification, de limitation, de portabilité, d'opposition, d'effacement au traitement de vos données et définir vos directives postmortem à l'adresse mail suivante : dpo@sophiaboutique.fr en joignant une copie de votre carte d'identité. Les Éditions Croque Futur disposent d'un délégué à la protection des données pouvant être contacté au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e ou à l'adresse mail dpo@sophiaboutique.fr. À tout moment vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL.

PSCA939

Les blessures de nuit cicatrisent moins vite

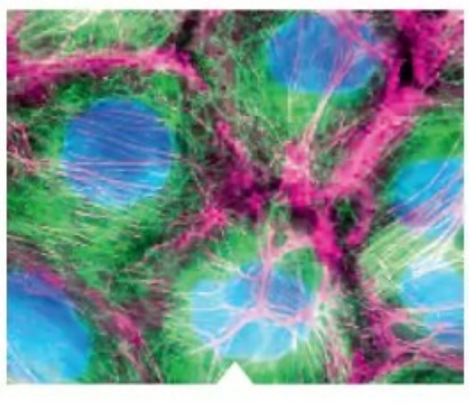
PHYSIOLOGIE Les cycles circadiens, ces horloges qui régulent les fonctions biologiques, jouent aussi un rôle important dans la réparation du corps. C'est ce que montre une étude ayant observé chez la souris que l'activation des cellules souches après une blessure passait par l'expression de plusieurs milliers de gènes, dont ceux impliqués dans la réponse inflammatoire. De sorte qu'une blessure survenant durant les heures de repos cicatrise moins vite que celles subies en journée. **N. G. C.**

SOURCE : PEI ZHU, UNIVERSITÉ NORTHWESTERN, ÉTATS-UNIS

Les cellules épithéliales communiquent par signaux électriques

BIOLOGIE Pour la première fois, des chercheurs ont détecté des impulsions électriques générées par des cellules épithéliales humaines, celles qui forment la surface de la peau et tapissent les organes internes de l'organisme. Elles sont certes mille fois plus lentes que celles des neurones, mais semblent pousser des « cris » de longue distance impliqués dans la cicatrisation des plaies. **C. G.**

SOURCE : SUN-MIN YU, UNIVERSITÉ DU MASSACHUSETTS, ÉTATS-UNIS.



SPL/SUCRÉSALÉ

Vue microscopique de cellules épithéliales du pancréas humain.

PLAINPICTURE

Chez les plus de 65 ans, la vaccination contre le zona est recommandée en France.

Le vaccin contre le zona réduirait les démences

Le risque de démence sénile, dont Alzheimer, serait diminué de 20 % pour les personnes vaccinées contre cette maladie infectieuse.

Mis sur le marché depuis à peine plus de dix ans pour la prévention du zona, le vaccin Zostavax pourrait bien offrir un autre effet protecteur inespéré : la réduction du risque de démences séniles. C'est ce que suggère une nouvelle étude parue dans la revue *Nature*, la deuxième en moins de dix mois. Alors que la première comportait un biais dans le choix des personnes observées pouvant faire douter de ces résultats étonnants, celle récemment publiée par une équipe de l'université Stanford, aux États-Unis, vient renforcer l'hypothèse d'un double effet protecteur. Outre l'efficacité connue du vaccin contre le zona — une réactivation du virus de la varicelle provoquant une éruption cutanée douloureuse —, les chercheurs ont en effet mesuré une diminution de 20 % du diagnostic de démence sénile, dont Alzheimer, chez les personnes âgées de 71 à 88 ans vaccinées. L'étude s'est appuyée sur le programme de vaccination lancé en 2013 au Pays de Galles (Royaume-Uni), qui a permis aux chercheurs d'étudier les données de 280 000 personnes.

Un effet protecteur qui reste mystérieux

La raison pour laquelle ce vaccin offrirait une protection reste en revanche mystérieuse. Deux mécanismes ne s'excluant pas l'un l'autre sont avancés par Pascal Geldsetzer, professeur assistant de médecine à Stanford et auteur principal de l'étude : *« Le premier est spécifique au virus de la varicelle : de plus en plus de travaux tendent à montrer que les virus ciblant le système nerveux et y hibernant une grande partie de la vie pourraient être impliqués dans le développement de la démence. Le deuxième mécanisme est que les vaccins peuvent avoir des effets sur le système immunitaire qui vont au-delà de la simple production d'anticorps spécifiques pour lesquels ils ont été conçus. »* Charge désormais à l'équipe de lancer un essai clinique classique permettant de transformer cette corrélation en lien de cause à effet. ■ **C. L.**

IL A DIT

« 97 % de l'Académie de médecine a voté quasi unanimement pour dire que nous pensons plutôt que le Sras-CoV-2 est issu d'une erreur de laboratoire »

Pr Jean-François Delfraissy, ex-président du Conseil scientifique Covid-19, lors d'une conférence de presse présentant le dernier rapport de l'Académie nationale de médecine. Le lien n'est toutefois pas encore démontré.

LATTICE MEDICAL

La structure ajourée est obtenue par impression 3D.

Une bioprothèse pour la reconstruction mammaire

CHIRURGIE Dix patientes opérées d'un cancer du sein ont bénéficié d'une nouvelle technique de reconstruction au centre Léon-Bérard de Lyon. Au lieu de recevoir une prothèse mammaire classique, elles testent la bioprothèse Matisse, une structure ajourée biorésorbable dans laquelle grossit un lambeau de graisse préalablement implanté. Développé par la société lilloise Lattice Medical, le dispositif se dissout à mesure de la repousse pour laisser place à un sein reconstruit de façon pérenne.
50 patientes seront à terme incluses dans cet essai clinique prometteur. **C. G.**

Une IA prévient la mort subite

CARDIOLOGIE
En analysant les données de plus de 240 000 électrocardiogrammes, un réseau de neurones artificiels mis au point par des chercheurs français a permis de détecter les patients risquant de faire une arythmie grave dans les deux semaines suivantes dans plus de 70 % des cas. L'intelligence artificielle a en effet révélé de nouveaux signaux faibles annonçant ces troubles inexpliqués du rythme cardiaque pouvant provoquer un arrêt fatal. **H. J.**

SOURCE : LAURENT FIORINA, UNIVERSITÉ PARIS CITÉ, FRANCE.

Première cartographie des centrales énergétiques du cerveau

NEUROLOGIE Une équipe franco-américaine a réalisé la première carte des mitochondries du cerveau, des organites enchâssées à l'intérieur de chacune de nos cellules et fournissant l'énergie dont celles-ci ont besoin. Une opération importante puisque 20 % des calories consommées sont utilisées pour le fonctionnement du cortex cérébral. Or, ces petites centrales énergétiques sont impliquées dans diverses pathologies cérébrales. **H. R.** SOURCE : EUGENE MOSHAROV, UNIVERSITÉ COLUMBIA, ÉTATS-UNIS.

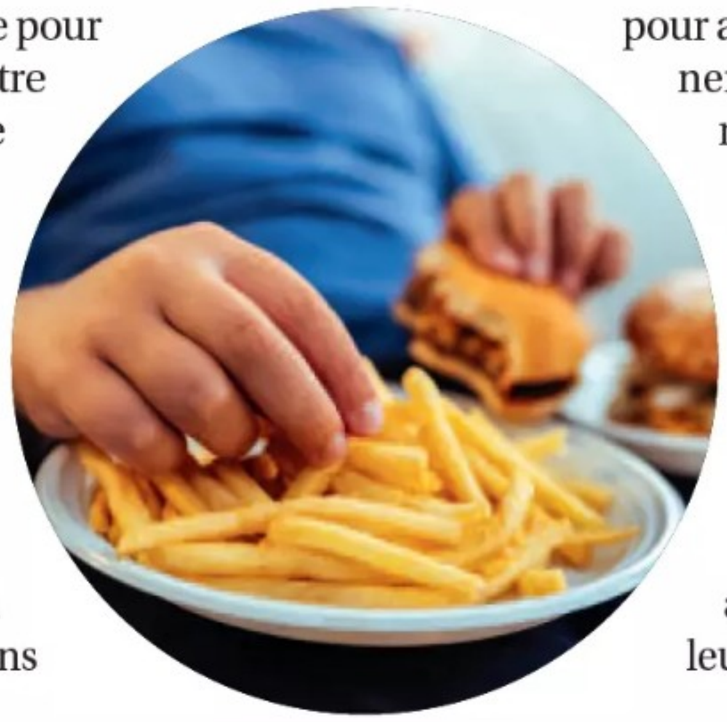
MICHEL THIEBAUT DE SCHOTTEN

◀ **Mitochondries** des cellules cérébrales (en rouge les zones les plus denses).

La protéine à l'origine d'un paradoxe de l'obésité

Restaurer un niveau normal de la neurotensine permettrait aux personnes obèses de mieux contrôler leur comportement alimentaire.

C'est peut-être une nouvelle stratégie pour traiter l'obésité que vient de mettre en lumière une équipe américaine à l'université de Californie de Berkeley (États-Unis). Dans la revue *Nature*, à partir d'expériences comportementales sur des souris, elle montre qu'une protéine neuronale, la neurotensine, serait étroitement liée à un comportement paradoxal chez les personnes obèses. À savoir que le fait de manger de façon chronique des aliments riches en calories tend à diminuer le plaisir lié à cette nourriture, sans pour autant conduire la personne à s'en détourner. En d'autres termes, l'habitude prend le relais du plaisir. La neurotensine, produite par certains neurones et observée dans le cerveau des rongeurs, influe en effet fortement sur le système de la récompense. Chez les animaux habitués à la nourriture calorique, elle était ainsi produite en moindres quantités. Les chercheurs suggèrent qu'en restaurant des niveaux normaux de cette protéine, il serait plus aisé aux personnes obèses de contrôler leurs comportements alimentaires. ■ **C. G.**



LJUBAPHOTO/ GETTY IMAGES

IL A DIT

« *L'excédent des décès sur les naissances devrait être compensé par le solde migratoire jusqu'à 2040* »

Gilles Pison, conseiller de la direction de l'Institut national des études démographiques (Ined), dont les dernières estimations annoncent un déclin démographique de la population française dès 2027, avec plus de décès que de naissances.

AFP

Les aliments à base de soja contiendraient trop d'isoflavones.

Alerte au soja dans les cantines

NUTRITION Une expertise de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation (Anses) recommande de ne plus servir d'aliments à base de soja en restauration collective. Desserts, yaourts, lait, steaks végétaux, tofu contiennent trop d'isoflavones, des composés naturellement présents dans le soja et proches des hormones féminines, dont les effets sont potentiellement nocifs en cas de consommation excessive, notamment sur le système reproducteur. **H. J.**

NOAH BERGER

Cette femme atteinte du syndrome d'enfermement a pu reparler grâce à un implant et un avatar numérique.

Une interface cerveau-machine fait parler la pensée

Des électrodes sur le cortex et une intelligence artificielle (IA) décryptent les signaux cérébraux associés aux mots.

Une femme atteinte d'un syndrome d'enfermement a retrouvé la parole grâce à une lecture en temps réel de l'activité cérébrale de sa prononciation mentale, annoncent des chercheurs américains dans la revue *Nature Neuroscience*. En 2023, la même équipe de l'université de Californie (États-Unis) avait déjà montré qu'il était possible de traduire en paroles, grâce à une intelligence artificielle, les signaux sensori-moteurs enregistrés par une plaque de 253 électrodes posée sur son cortex. Un décalage de plusieurs secondes subsistait néanmoins entre la lecture des signaux neuronaux et les paroles produites. Le système permet maintenant une reproduction presque en temps réel des sons que la femme articule mentalement.

Cette performance est rendue possible par un apprentissage machine préalable des signaux cérébraux associés aux mots. Sa voix d'origine est reconstituée par IA à partir d'enregistrements effectués avant l'accident vasculaire qui l'a privée de tout geste et possibilité d'élocution. Cette femme peut désormais parler à la vitesse moyenne de 70 mots par minute, un record se rapprochant de celle du discours normal en anglais de 160 mots par minute. ■ **P. K.**

Du glutamate pour régénérer le foie

HÉPATOLOGIE Supplémenter en glutamate les patients souffrant de lésions chroniques au foie pourrait rétablir et stimuler la capacité autorégénératrice de l'organe. Une capacité qu'il perd lorsqu'il est atteint de fibrose ou d'une cirrhose. C'est ce que suggère une étude préclinique chez la souris qui a permis d'élucider le rôle du glutamate dans la façon dont le foie est naturellement capable de se régénérer. **C. L.**

SOURCE : MARÍA DEL MAR RIGUAL, CENTRE NATIONAL DE RECHERCHES ONCOLOGIQUES, ESPAGNE.

Le plus petit pacemaker du monde

CARDIOLOGIE Jamais un stimulateur cardiaque n'avait été miniaturisé à ce point. Ses dimensions (1,8 mm x 3,5 mm x 1 mm) pourraient permettre des implantations mini-invasives. Uniquement testé sur des modèles animaux et des tissus cardiaques humains, ce dispositif biorésorbable, sans fil ni batterie, est alimenté grâce à des électrodes intégrées qui, lorsqu'elles sont exposées aux fluides corporels, génèrent un courant électrique. Il est destiné à des utilisations temporaires, pour des patients souffrant de bradycardie passagère (ralentissement du rythme), y compris les bébés. **H. J.**

SOURCE : YAMIN ZHANG, UNIVERSITÉ NORTHWESTERN, ÉTATS-UNIS.

JOHN A. ROGERS

Le micro-stimulateur cardiaque est destiné à un usage temporaire.

DÉSTOCKAGE DES GRAISSES

Perdre du poids ? Oui, mais durablement !

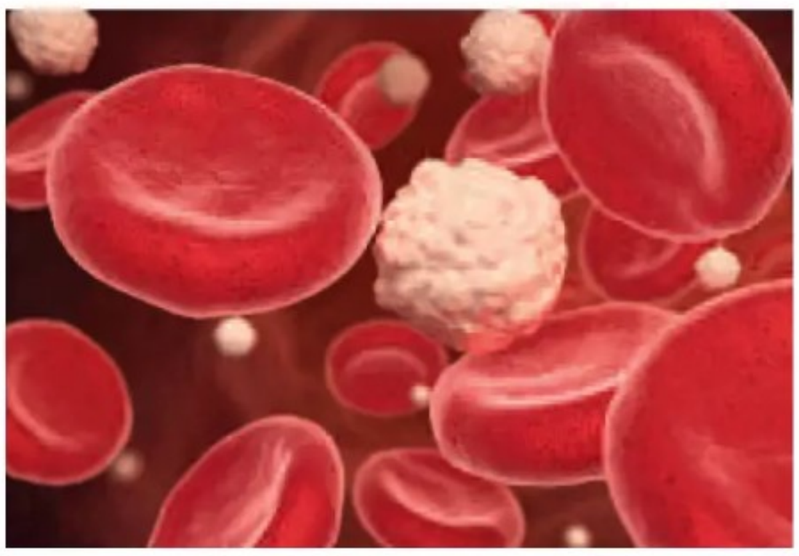
Contrôler le taux de sucre dans le sang est une approche scientifiquement reconnue pour perdre du poids. Les feuilles de mûrier japonais, très utilisées en médecine traditionnelle asiatique, contiennent une substance naturelle appelée DNJ* qui aide à diminuer l'absorption des sucres après le repas.

*1-deoxynojirimycine

Des sucres complexes au stockage des graisses

Les sucres complexes apportés par l'alimentation (comme l'amidon présent dans les pâtes et le pain, par exemple) sont transformés en glucose au moment de la digestion. Ce dernier passe ensuite dans la circulation sanguine pour être utilisé par l'organisme.

Si la quantité de glucose qui passe dans le sang excède les besoins de l'organisme, le surplus est stocké sous forme de graisse.



Tradition japonaise

Depuis des siècles, les japonais profitent des bienfaits des infusions de feuilles de Mûrier Blanc. Aujourd'hui nous savons grâce aux études scientifiques comment il régule le taux de sucre dans le sang. Les feuilles de Mûrier japonais contiennent une substance naturelle appelée DNJ qui diminue l'absorption des sucres en limitant leur transformation en glucose lors de la digestion. Pour les nutritionnistes, cela signifie aussi une moindre production d'insuline.

Perdre du poids naturellement en 3 étapes

Les laboratoires de recherche végétale New Nordic ont développé **Zuccarin** Extra Fort, des comprimés naturels hautement concentrés en feuilles de mûrier japonais avec une teneur en DNJ garantie**, pour une efficacité maximale. **Zuccarin** Extra Fort permet de :

Limiter l'absorption des sucres : diminuer la quantité de glucose qui passe dans le sang au moment de la digestion évite son stockage sous forme de graisse.

Favoriser le déstockage des graisses : l'organisme, trouvant moins de glucose, son principal « carburant », utilise les réserves de graisse pour produire de l'énergie.

Diminuer les envies de grignotage : réguler le taux de sucre dans le sang permet d'éviter les pics de glycémie ainsi que les hypoglycémies qui conduisent au grignotage.

**3 comprimés Zuccarin Extra Fort par jour apportent 2400 mg d'un extrait concentré de feuilles de Mûrier japonais standardisé à 2% de DNJ, soit 48 mg de DNJ

TESTEZ-VOUS :

	OUI	NON
Consommez-vous régulièrement des aliments à index glycémique élevé (pain blanc, riz blanc, pâtisseries, boissons sucrées) ?	○	○
Vous est-il déjà arrivé de ressentir des signes d'hypoglycémie (tremblements, sueurs, irritabilité) en dehors des repas ?	○	○
Avez-vous déjà présenté une glycémie à jeun proche de la limite supérieure de la normale (≥ 1,00 g/L ou 5,6 mmol/L) lors d'un bilan sanguin ?	○	○
Souhaitez-vous limiter l'absorption des sucres lors de vos repas ?	○	○

Vous avez une majorité de OUI ? Zuccarin est l'allié idéal pour vous accompagner.

Zuccarin™ Extra Fort

Réguler le taux de sucre dans le sang

Disponible en pharmacie

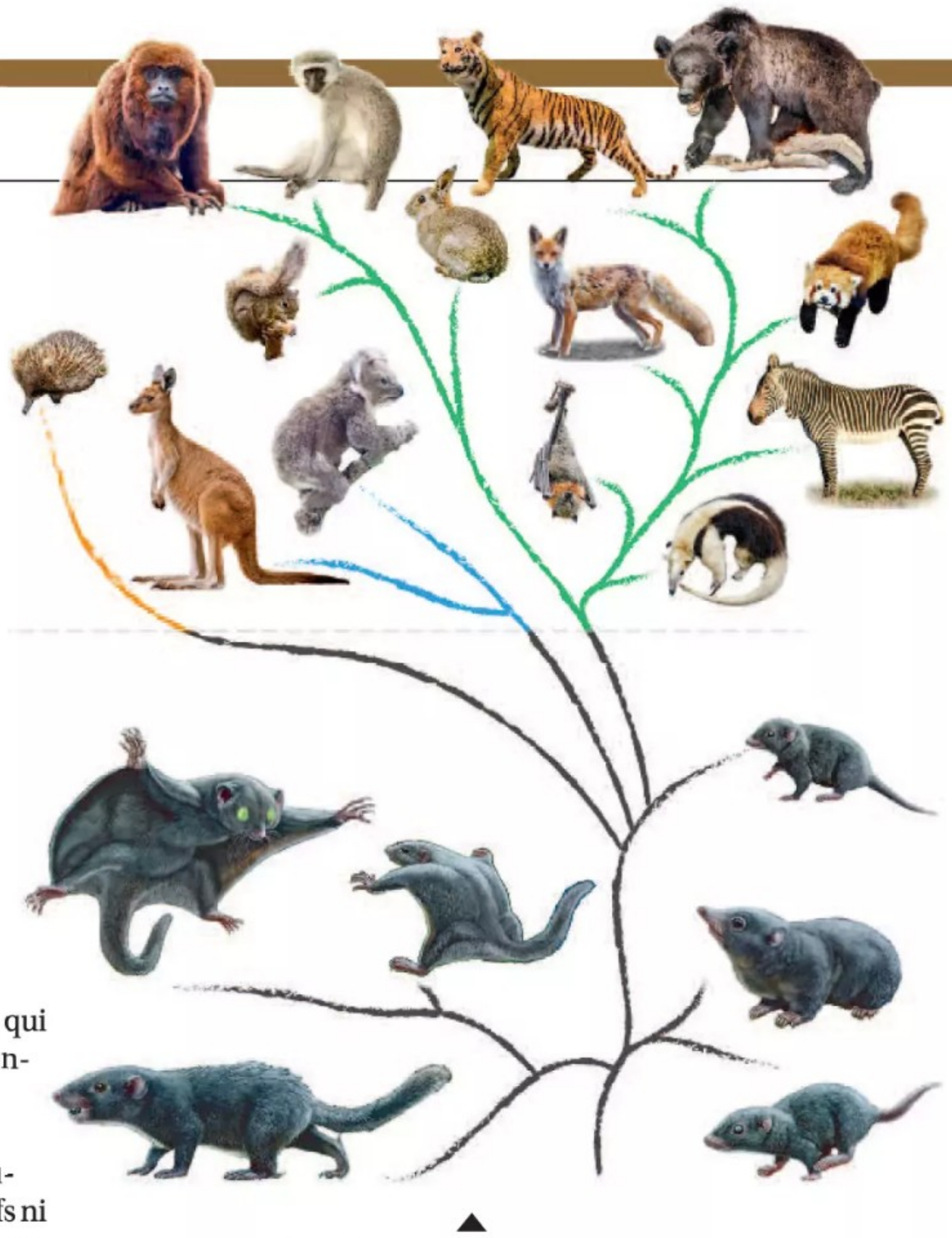
Zuccarin 60 cp et 120 cp, Zuccarin Extra Fort 45 cp et 90 cp codes ACL 608 742 7, 608 743 3, 514 351 4 et 514 350 8.

Des conseils ?
Les experts New Nordic vous répondent au **01 85 50 31 82** ou sur www.vitalco.com

Les sombres mammifères du crétacé

Les premiers petits mammifères arboraient une fourrure brun foncé ou grisâtre pour éviter de se faire dévorer par les dinosaures.

Dans un monde dominé par les dinosaures, mieux valait rester discret! Les premiers mammifères sont apparus il y a plus de 170 millions d'années et ont donc vécu en compagnie des dinosaures des dizaines de millions d'années, jusqu'à leur disparition il y a 66 millions d'années. Pour éviter de se faire croquer, ces petites créatures avaient adopté un mode de vie nocturne et arboraient une fourrure brun foncé ou grisâtre, idéale pour se fondre dans l'obscurité. C'est l'analyse des mélanosomes fossiles (de petites structures intracellulaires contenant un pigment appelé mélanine) de six espèces éteintes de mammifères qui a abouti à cette conclusion dans une étude parue dans *Science*. Ils se sont révélés étonnamment uniformes, contrairement à ceux des dinosaures à plumes qui possédaient tout un éventail de couleurs. Ainsi, les mammifères avaient adopté une palette de couleurs sombres, sans motifs ni nuances marquées, permettant un meilleur camouflage.



Après l'extinction des dinosaures, à la fin du crétacé, la couleur du pelage des mammifères se diversifie.

ANDRÉ ZAMBOLLI; MICHAEL NICOLAÏ.

La plupart avaient la taille de gros rongeurs

En adoptant un mode de vie nocturne et la plupart du temps perché dans les arbres, ces petites créatures — la plupart avaient la taille de gros rongeurs — évitaient ainsi les mauvaises rencontres. Certains lointains ancêtres des marsupiaux s'aventuraient toutefois plus fréquemment au sol. Ces derniers ont profité de la montée en puissance des plantes à fleurs pour évoluer à terre tout en restant à l'abri. Leurs feuilles plus grandes ont généré *« une transpiration accrue et la création d'un micro-habitat plus humide qui a favorisé la croissance d'un sous-bois plus dense »*, résume Christine Janis, paléontologue qui a dirigé cette étude. Après la disparition des dinosaures non aviens, ces premiers aventuriers ont été rejoints par de nombreux congénères qui pouvaient désormais se promener sur la terre ferme, y compris de jour, en arborant une gamme chromatique bien plus étendue. ■ **J. I.**

L'ascétisme extrême d'une femme à Jérusalem

ANTHROPOLOGIE La première preuve archéologique d'un ascétisme extrême pratiqué par une femme au début du christianisme vient d'être confirmée sur une dépouille exhumée sur le site de Khirbat el-Masani, un ancien monastère byzantin à trois kilomètres de Jérusalem. Il y a environ 1600 ans, elle s'infligeait le port de lourds anneaux métalliques comme châtiment corporel. **M. B.**

ISRAEL ANTIQUITIES AUTHORITY

De lourds anneaux métalliques entravaient ses mouvements.

SOURCE : PAULA KOTLI, INSTITUT WEIZMANN DES SCIENCES, ISRAËL.

129 Le nombre de soldats romains inhumés dans une fosse en Autriche

ARCHÉOLOGIE Le musée de Vienne (Autriche) a annoncé la découverte d'une fosse datant de la fin du Ier siècle contenant les restes d'au moins 129 soldats romains. Les dépouilles présentent diverses blessures d'épée, de lance et d'objets contondants, indices d'une mort sur le champ de bataille aux frontières de l'Empire. Une découverte rare puisque les Romains avaient adopté la crémation comme rituel funéraire. Mais ceux-là ont vraisemblablement été enterrés à la va-vite. **S. de L.**

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.

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

institut Curie

ENSEMBLE, PRENONS LE CANCER DE VITESSE

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 : |_|_|_|_|_|

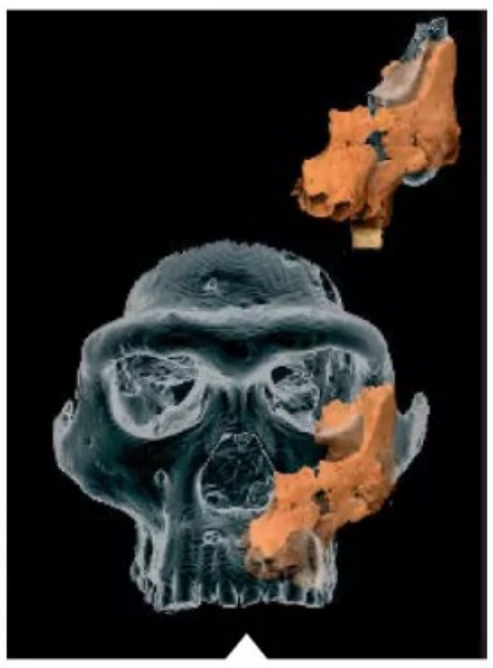
Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

S&A0525

Vaste opération pour sauver l'épave du « Vasa »

PATRIMOINE Une structure métallique est en cours d'installation pour soutenir la coque du Vasa, majestueux trois-mâts coulé en 1628 dans les eaux de Stockholm (Suède) le jour de son voyage inaugural. Le navire, exposé au musée Vasa de la capitale suédoise, est au cœur d'un vaste projet de restauration. Objectif : sauver l'épave de sa détérioration naturelle : son bois rétrécit au fil des ans et sa structure ne cesse de s'affaisser. **M. B.**



R. HUGUET ET AL.

Le fragment (en rouge) du maxillaire de Pink.

Pink, le plus vieux visage d'Europe de l'Ouest

ANTHROPOLOGIE Le plus ancien visage connu en Europe de l'Ouest est désormais celui d'un fossile vieux d'au moins 1,1 million d'années. Surnommé « Pink », il a été reconstitué à partir d'un fragment de maxillaire découvert dans une couche géologique profonde de la Sima del Elefante, l'un des gisements d'ossements humains les plus riches au monde situé à Atapuerca, en Espagne. Il détrône *Homo antecessor* (âgé de -800 000 à -900 000 ans). **M. B.**

SOURCE : ROSA HUGUET, UNIVERSITÉ ROVIRA I VIRGILI, ESPAGNE.

CAMBRIDGE UNIVERSITY LIBRARY, B. MIKUŁA, A. DEBLAUWE

Le texte médiéval, racontant en vieux français l'histoire de Merlin et le début du règne du roi Arthur, a été identifié grâce à des techniques d'imagerie 3D.

Un manuscrit de la légende du roi Arthur refait surface

Il était dissimulé dans la reliure d'un ouvrage du XVIe siècle archivé à la bibliothèque de Cambridge, au Royaume-Uni.

Depuis plus de 400 ans, il reposait dans la reliure d'un registre de titres de propriété d'un manoir anglais. Un manuscrit de la légende du roi Arthur, rédigé entre 1275 et 1315 par un scribe inconnu, a été découvert à la bibliothèque de Cambridge (Royaume-Uni). Le texte écrit vers 1230 dans un dialecte du nord de la France et sans doute recyclé vers la fin du XVIe siècle, encore plié et cousu, avait jusqu'ici échappé au regard des archivistes. Il s'agit de l'une des copies de la *Suite Vulgate* du *Merlin*, également appelée « Suite du Merlin », qui est une partie du *Cycle Vulgate*, un ensemble d'œuvres médiévales en prose qui forment l'une des plus vastes sagas liées à la légende arthurienne. C'est notamment grâce à elle que l'histoire du Graal et la place qu'y occupe Merlin ont pu être racontées de manière cohérente du début à la fin. La trouvaille est rare : il existe moins de 40 exemplaires de la suite de la Vulgate, et aucun n'est identique à l'autre. ■ **M. B.**

8000 km

L'odyssée de l'iguane des Fidji

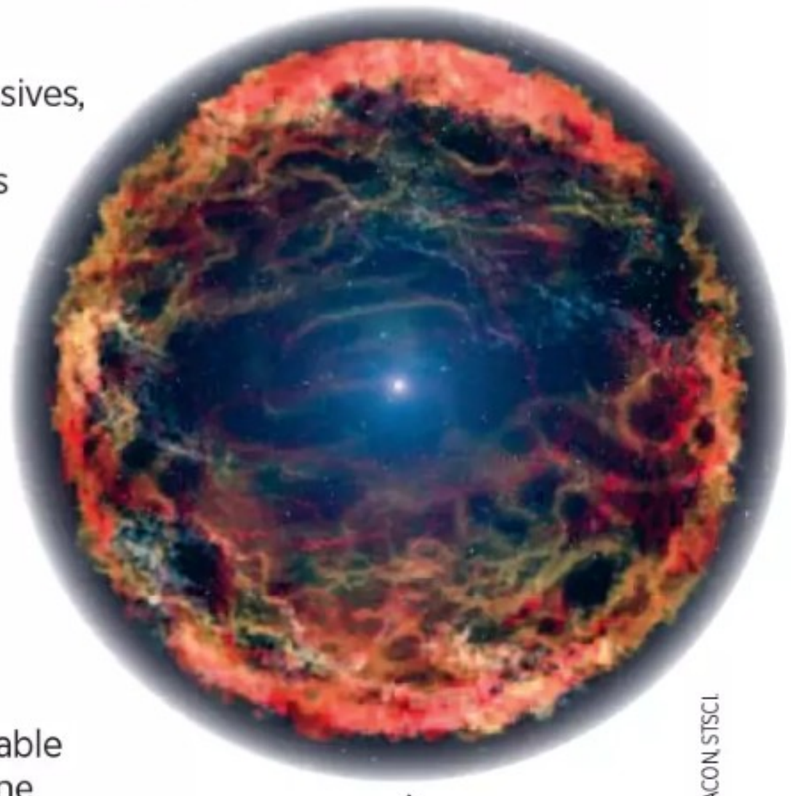
PHYLOGÉNÉTIQUE Pour s'implanter aux îles Fidji, dans le sud-ouest de l'océan Pacifique, des iguanes ont dû faire une traversée record il y a 34 millions d'années, selon une étude qui montre que le plus proche parent génétique de ce reptile s'avère vivre dans les déserts du sud des États-Unis. L'espèce aurait parcouru quelque 8000 km sur des débris végétaux, dérivant cent jours durant au fil des courants marins. **P. K.**

SOURCE : SIMON SCARPETTA, UNIVERSITÉ DE SAN FRANCISCO, ÉTATS-UNIS.

Des supernovae ont pu provoquer deux extinctions massives

PALÉOZOÏQUE Les deux premières extinctions massives, à la fin de l'ordovicien il y a 445 millions d'années et au dévonien il y a 372 millions d'années, ont pu être provoquées par des supernovae, selon un calcul de probabilité qu'un tel événement puisse se produire dans un rayon de 65 années-lumière du Soleil. Ces explosions d'étoiles massives ont pu engendrer un sursaut de rayonnement gamma capable d'éliminer la couche d'ozone protégeant les êtres vivants des rayons solaires. **P. K.**

SOURCE : ALEXIS QUINTANA, UNIVERSITÉ D'ALICANTE, ESPAGNE.



NASA/ESA/G. BACON, STSCI

Vue d'artiste d'une supernova, explosion d'une étoile massive en fin de vie.

Une forme de vie inconnue

GÉOARCHÉOLOGIE Dans le marbre et le calcaire des environnements désertiques de Namibie, d'Oman et d'Arabie saoudite, des recherches ont révélé des structures inhabituelles, probablement dues à l'activité d'une forme de vie microbienne inconnue. Décrites pour la première fois, ces mini-galeries de moins d'un millimètre de large traversent la roche de haut en bas selon une disposition parallèle. **H. J.**

SOURCE : CEES PASSCHIER, UNIVERSITÉ JOHANNES-GUTENBERG, ALLEMAGNE.

SAPIENZA UNIVERSITY OF ROME

Momie de -7000 ans mise au jour en Libye, sur laquelle l'ADN a été prélevé.

L'ADN ancien du « Sahara vert »

ANTHROPOLOGIE Pour la première fois, de l'ADN datant d'une époque où le désert du Sahara était encore constellé de grands lacs et verdoyant a pu être séquencé. Il a été prélevé sur une dent de l'un des deux corps naturellement momifiés depuis 7000 ans retrouvés sur le site de Takarkori, un abri-sous-roche des montagnes Tadrart Acacus, au sud-ouest de la Libye. **C. L.**

SOURCE : NADA SALE, INSTITUT MAX-PLANCK, ALLEMAGNE.

QIONG WU

« Sirenobethylus charybdis », insecte parasitoïde emprisonné dans un échantillon d'ambre vieux de 99 millions d'années.

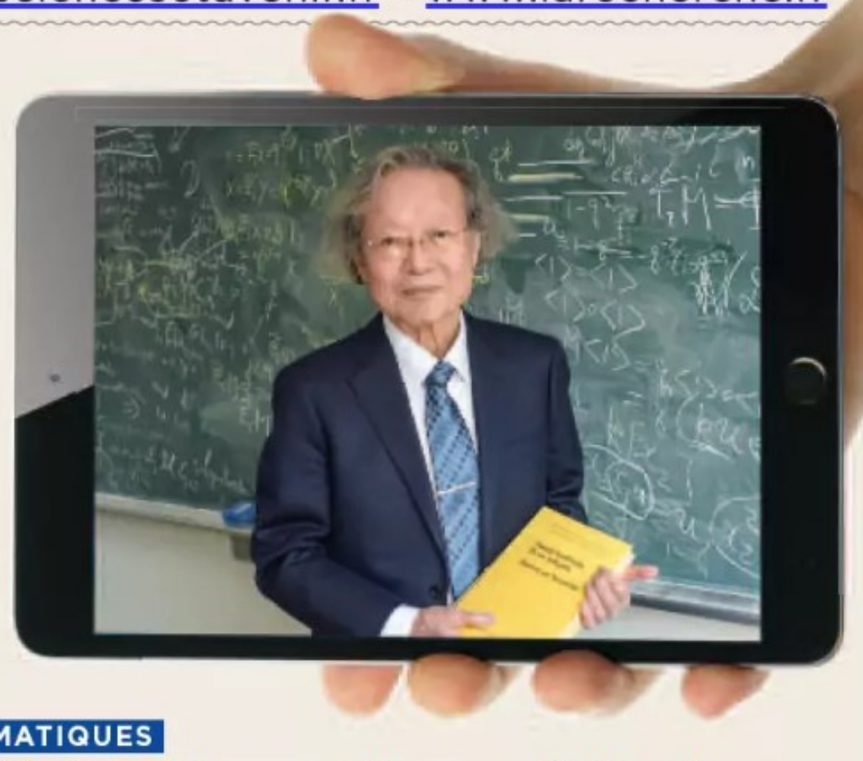
Cette guêpe piégeait ses proies comme une plante carnivore

PALÉOENTOMOLOGIE Un abdomen d'insecte qui se termine en forme de dionée attrape-mouche pour capturer et immobiliser des proies… En matière d'innovation, *Sirenobethylus charybdis* a fait fort ! Découverte dans de l'ambre de Birmanie vieux de 99 millions d'années, elle utilisait son piège pour capturer de petits insectes, le temps d'y pondre ses œufs. Ce mécanisme unique, sans équivalent connu, justifie la création d'une nouvelle famille de parasitoïdes : les *Sirenobethylidae*. **J. I.**

SOURCE : QIONG WU, UNIVERSITÉ NORMALE DE LA CAPITALE, CHINE.

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr



MATHÉMATIQUES

Le « Nobel des maths » attribué au Japonais Masaki Kashiwara

Le prix Abel 2025 a été décerné à Masaki Kashiwara. De l'analyse algébrique à la théorie des représentations en passant par les groupes quantiques, ses travaux ont redessiné le paysage mathématique contemporain. À lire sur le site de *La Recherche*. https://bit.ly/939abel

ALIMENTATION

Tout savoir sur le Nutri-Score

L'épidémiologiste et nutritionniste Serge Hercberg, dont les travaux sont à la base du Nutri-Score, était en ligne sur la chaîne Twitch de *Sciences et Avenir* pour répondre à vos questions sur la nouvelle version du Nutri-Score. sciav.fr/939nutri

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ…

2 minutes

Le top des biophobies humaines

En sondant plus de 17 000 personnes, des chercheurs ont dressé le classement des animaux les plus craints par les humains, avec quelques surprises à découvrir en diaporama. sciav.fr/939phobie

5 minutes

Des bras robots contrôlés par la pensée

Un implant cérébral qui capte l'activité du cortex moteur et l'interprète à l'aide de l'intelligence artificielle a permis à deux personnes paralysées de contrôler un bras robotique pendant plusieurs semaines. sciav.fr/939tetra

10 minutes

De nouveaux objets du « Titanic »

Reportage vidéo à la Cité de la mer à Cherbourg, où une quarantaine de nouveaux objets de l'épave du célèbre paquebot sont exposés pour raconter l'histoire des passagers et de l'équipage. sciav.fr/939titanic

PETER BAGDE / TYPOSI / THE ABEL PRIZE; AFP; NOAH BERGER; RMS TITANIC, INC.

Vous êtes plus de 2 millions à nous suivre sur Facebook

La nouvelle course à l'armement

La guerre en Ukraine et les revirements de l'allié américain entraînent la France et l'Europe dans une politique de réarmement accéléré. Un effort technologique et scientifique sans précédent pour développer des armes performantes : missiles hypersoniques, sous-marins et avions furtifs, lasers anti-drones, satellites espions… « Sciences et Avenir » passe en revue ces ambiteux programmes militaires.

Dossier réalisé par Helen Chachaty, Franck Daninos, Arnaud Devillard, Vincent Lamigeon, Fabrice Nicot et Sylvie Rouat

ENTRETIEN
Patrick Aufort, directeur de l'Agence de l'innovation de défense p. 28

LA MER
Des sous-marins nucléaires toujours plus furtifs p. 31

LES AIRS
Les ambitions du futur avion de combat p. 34

L'ESPACE
La défense spatiale européenne sur orbite p. 38

ENTRETIEN
Bruno Tertrais, directeur adjoint de la Fondation pour la recherche stratégique p. 41

DIRECTION GÉNÉRALE DE L'ARMEMENT-DÉFENSE - DASSAULT AVIATION - FRANÇOIS GUENET / DIVERGENCE

Dans l'espace, les satellites patrouilleurs du programme Yoda auront pour mission d'identifier tout satellite aux intentions « suspectes ».

Dans l'air, l'avion de combat du futur NGF sera connecté avec d'autres avions, des drones, des troupes au sol ou des bâtiments en mer.

En mer, la nouvelle génération de sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE) aura une signature acoustique encore plus réduite (ici l'appareillage de « L'Inflexible » dans la rade de Brest).

PATRICK AUFORT
DIRECTEUR DE L'AGENCE DE L'INNOVATION DE DÉFENSE

« La technologie militaire évolue à une vitesse incroyable »

Innover, vite et bien. C'est la mission de l'ingénieur général de l'armement Patrick Aufort, à la tête de l'Agence de l'innovation de défense (AID) depuis 2023. Pour « Sciences et Avenir », il fait le point sur les grands chantiers.

Quels sont les grands enseignements de la guerre en Ukraine sur l'innovation de défense ?

Le premier enseignement, c'est l'utilisation massive d'équipements issus du civil. C'est vrai dans le domaine des télécommunications par satellite, avec l'utilisation de Starlink, du renseignement, avec l'utilisation de satellites civils, ou des applications sur smartphone, pour faire du ciblage. L'autre leçon, c'est le tempo de la guerre. Ce que l'on voit, c'est que dès que les positions des belligérants se stabilisent, ce qui permet de reprendre l'initiative, c'est soit de la technologie, soit de la masse, c'est-à-dire un gros volume d'équipements. Très souvent, les Ukrainiens reprennent l'avantage avec de l'innovation technologique qui, en quelques mois ou semaines, est contrée par les Russes qui, dotés de plus de moyens, prennent l'ascendant.

Un exemple ?

Les drones. On a beaucoup parlé, au début du conflit, des drones de combat turcs TB2. Ils ont rapidement été contrés et ne volent quasiment plus. On a ensuite vu entrer en scène les drones FPV (First Person View, pilotés en immersion à distance par un opérateur doté d'un casque), dont les belligérants essaient de brouiller la liaison de données. Pour contourner ce brouillage, les Russes utilisent désormais des drones filaires, reliés par une fibre optique. Sur le champ de bataille, la technologie évolue chaque semaine, à une vitesse incroyable.

L'AID

Forte d'une équipe de 130 civils et militaires et d'un budget de plus d'un milliard d'euros, l'Agence de l'innovation de défense, créée en 2018, est en première ligne pour muscler les capacités des armées françaises sur les grands sujets technologiques du moment : drones, armes hypervéloces, armes laser, action de l'espace, quantique, IA, guerre électronique.

La France doit-elle, comme les Ukrainiens, fabriquer des centaines de milliers de drones par an pour se remettre au niveau ?

Pas forcément : même si nous ne sommes plus vraiment en paix, nous ne sommes pas en guerre. Il ne servirait à rien d'acheter tout de suite des milliers de drones : on devrait les stocker, et dans six mois ou dans un an, vu la rapidité d'évolution des technologies, ils seraient obsolètes. Ce dont nous avons besoin, c'est d'avoir une base industrielle capable de produire massivement des drones en cas de besoin. Il faut aussi être capable d'améliorer rapidement ces drones, car on sait bien qu'ils seront vite contrés par nos compétiteurs. Cela veut dire que les engins livrés doivent avoir une architecture ouverte, qui permette d'intégrer de nouveaux capteurs, de nouveaux développements logiciels, sans avoir besoin de mois de requalification.

L'AID a lancé il y a trois ans deux programmes de drones suicides (munitions téléopérées), Colibri et Larinae, censés incarner une procédure de développement plus agile et plus rapide. La mission a-t-elle été réussie ?

Absolument. Rappelons quelques éléments de calendrier. En 2021, la Direction générale de l'armement (DGA) lance une demande d'information pour voir s'il existe des munitions téléopérées (MTO) souveraines françaises. La réponse est non : on doit acheter en urgence des Switchblade américains. En 2022, L'AID lance donc l'appel à projets Colibri, en essayant de donner le moins de

RÉMY CORTIN

> « Nous avons besoin d'une base industrielle capable de produire massivement des drones à l'architecture ouverte, permettant d'intégrer rapidement de nouveaux capteurs ou logiciels »

contraintes possible aux industriels. Les spécifications tiennent sur une page et demie : on veut une munition téléopérée de 5 kilomètres de portée, de 30 minutes d'autonomie, capable de détruire un blindé léger avec une précision de l'ordre du mètre, le tout avec une première démonstration en douze mois et un coût unitaire de moins de 20 000 euros. L'appel à projets est publié en mai 2022. Les offres sont reçues en juillet, les deux gagnants sélectionnés en septembre, et le contrat est signé en décembre. Onze mois plus tard, les premières démonstrations avaient lieu.

La France a donc désormais des drones suicides opérationnels ?

Absolument. Les munitions téléopérées Oskar, dérivées de Colibri, ont été livrées en Ukraine fin 2024, et seront livrées à la France cette année. Lors du dernier appel d'offres de la DGA pour des MTO de courte portée (CP), on avait quatre candidats français, contre aucun en 2021. C'est la preuve qu'on a réussi à stimuler l'écosystème.

La feuille de route de l'AID prévoit le développement de nombreux démonstrateurs technologiques. Quels sont les projets majeurs ?

Des démonstrateurs d'armes à énergie dirigée (laser et électromagnétique) ont été livrés l'année dernière : le démonstrateur de laser anti-drones, le Helma-P de la société Cilas, a été déployé durant les jeux Olympiques de Paris pour protéger le Stade de France. Fin 2024, nous avons lancé un appel à candidatures pour des drones navals de surface armés, qui seront testés en 2027. Nous travaillons aussi sur des démonstrateurs d'essaims de drones. L'objectif de ces démonstrateurs, c'est de ne pas se contenter de tester des briques technologiques, mais de s'attaquer le plus vite possible à l'intégration dans un système complexe, testable rapidement par les armées. On ne répondra peut-être pas à 100 % du besoin, plutôt à 80 % ou 90 %, mais on aura vite un retour d'expérience, ce qui permettra d'améliorer rapidement les équipements.

Comment la France s'arme-t-elle dans le quantique ?

Nous travaillons depuis des années sur les capteurs quantiques, comme des

PROGRAMME

Avec Droïde, la France se convertit aux robots armés

Nom de code : Droïde. Le 30 décembre 2024, la Direction générale de l'armement a confié à KNDS France (ex-Nexter) et Safran Electronics & Defense un contrat-cadre pour le développement de robots terrestres pour les forces françaises. L'objectif est notamment de travailler sur un robot de combat, qui serait testé par l'armée de terre à l'horizon 2027-2028. KNDS France s'appuie sur le Centurio X20, engin de près de 3 tonnes équipé d'une mitrailleuse de 20 mm, voire 30 mm. *« Ces robots seront dotés de capacités de déplacement autonomes : l'idée est qu'un opérateur puisse, à terme, en contrôler plusieurs à la fois »*, indique Joël Morillon, directeur général délégué de KNDS France Robotics. Des tests sont prévus en Ukraine. Les forces ukrainiennes bricolent déjà des robots terrestres d'une tonne environ, dotés de mitrailleuses de 12,7 mm. À terme, KNDS et Safran ambitionnent de « droniser » des engins plus lourds, de 10 à 30 tonnes.

V. LAMIGEON

Le prototype autonome Centurio X20, doté d'une mitrailleuse de 20 mm, sera bientôt testé en Ukraine.

Vous avez lancé l'année dernière un programme de satellites capables d'agir en orbite, Toutatis. En quoi consisteront ces engins ?
Toutatis, confié à la start-up U-Space et au missilier MBDA, intègre deux objets, un satellite guetteur (Lisa 1) et un satellite d'action (Splinter), qui seront lancés vers l'orbite basse (quelques centaines de kilomètres) dès 2026. Ce dernier sera capable de manœuvrer, de s'interposer face à un intrus, mais aussi de l'illuminer avec un laser. À terme, ces technologies auront aussi des applications civiles, sur le marché des services en orbite : ravitaillement en carburant, maintenance de satellites…

Après des années d'oubli, les technologies de guerre électronique (brouillage…) reviennent sur le devant de la scène. La France est-elle assez armée sur ce segment ?
C'est effectivement un domaine qui avait perdu sa place sur le devant de la scène. Il figure désormais dans les dix technologies critiques identifiées dans notre feuille de route. Nous travaillons notamment sur la miniaturisation des charges de guerre électronique : alors qu'elles étaient intégrées sur des porteurs lourds (avions, navires, véhicules terrestres), on peut aujourd'hui les embarquer sur des petits drones.

- horloges quantiques embarquées sur drone, qui permettent une précision inégalée de navigation, sans recours au GPS.

Un autre axe d'effort est la cryptographie post-quantique. L'objectif est d'être robuste au cassage de données chiffrées sensibles par un ordinateur quantique. Il y a urgence : certains de nos compétiteurs stockent et enregistrent certaines de nos données chiffrées stratégiques pour pouvoir casser le chiffrage plus tard. La loi de programmation militaire 2024-2030 a ajouté à cette feuille de route le développement, absolument essentiel, d'un calculateur quantique.

Quand un tel calculateur est-il envisageable ?
La DGA a signé un partenariat d'innovation de quinze ans, Proqcima, avec les cinq start-up françaises qui travaillent à la conception d'un calculateur quantique : Pasqal, Alice & Bob, Quandela, C12 et Quobly. Il doit aboutir, à l'horizon 2030-2032, à la création de deux prototypes de calculateur quantique de 128 qubits tolérants aux erreurs. Nous avons la chance d'avoir un écosystème français, aussi bien académique qu'industriel, à la pointe sur le segment, avec des prix Nobel (Alain Aspect, Anne L'Huillier), des laboratoires et des industriels au meilleur niveau mondial.

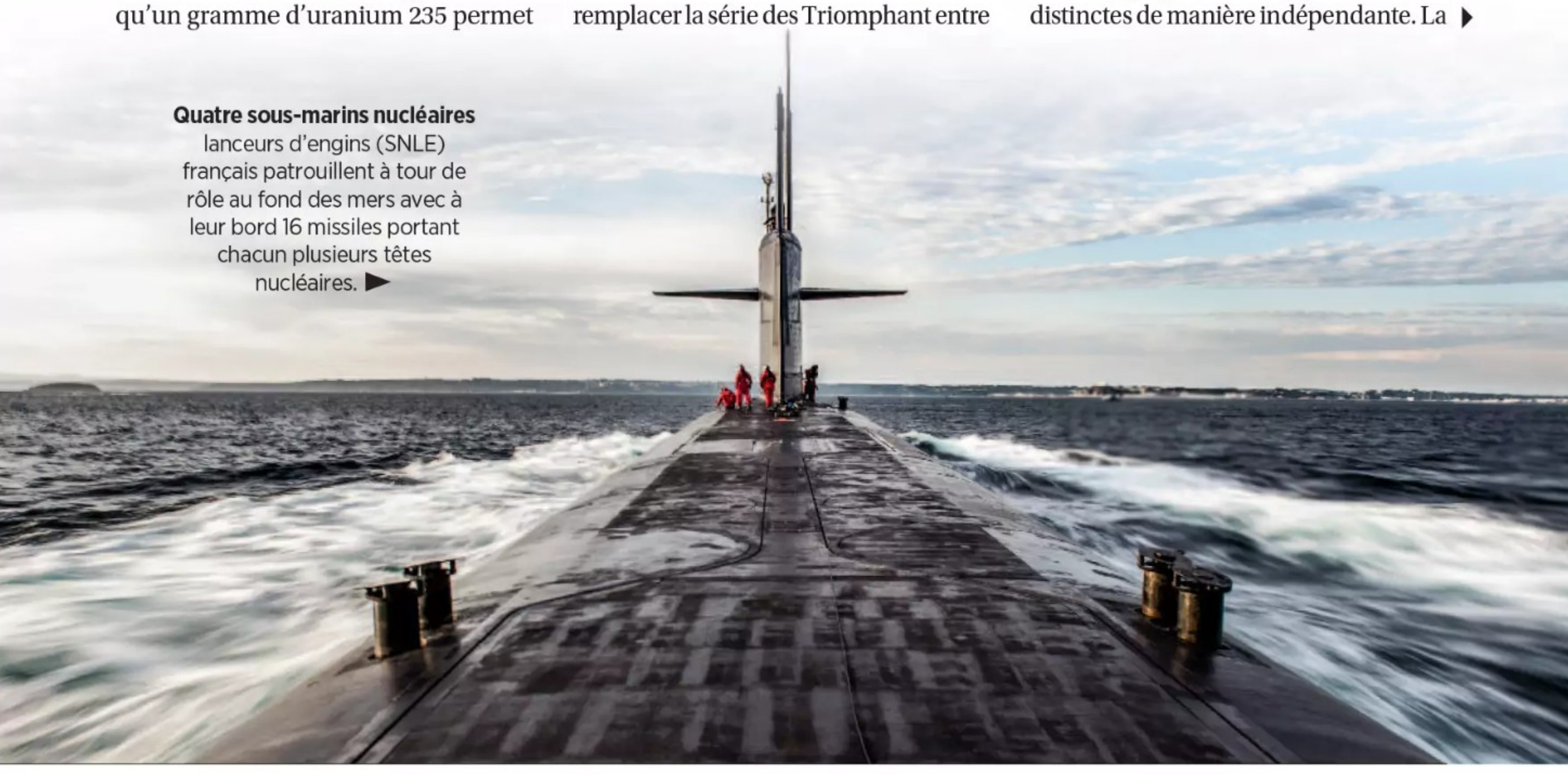
Comment contourner les immenses capacités de brouillage russes ?
Il y a des solutions très basiques, comme les drones filaires. Nous développons aussi des antennes capables de rejeter le brouillage, c'est-à-dire de savoir distinguer et isoler la partie utile de l'onde, et d'occulter la partie brouillée. Nous travaillons également sur des solutions à base d'intelligence artificielle et de modèles numériques de terrain, où le drone, en environnement brouillé, se repère sur quelques points du terrain. Il est enfin possible de durcir les liaisons de données, avec des composants plus robustes, mais qui sont aussi plus chers. ■ **Propos recueillis par V. L.**

LA MER

Des sous-marins nucléaires toujours plus furtifs

Nouveaux sous-marins nucléaires, porte-avions de nouvelle génération et drones performants : la Marine nationale accélère sa modernisation pour garantir jusqu'à la fin du siècle une dissuasion crédible face aux nouvelles menaces.

À Cherbourg débutait il y a un an la construction de la coque du premier sous-marin nucléaire lanceur d'engin (SNLE) de troisième génération, tandis qu'en aval de Nantes étaient produits les composants principaux du réacteur nucléaire nécessaire à sa propulsion et à sa fourniture d'énergie. Sachant qu'un gramme d'uranium 235 permet de produire plus d'énergie qu'une tonne d'hydrocarbures, et que la production d'énergie nucléaire ne nécessite aucun apport d'oxygène, ce type de propulsion confère au sous-marin une autonomie de plus de deux mois en immersion sans besoin de remonter à la surface. Ces nouveaux submersibles sont destinés à remplacer la série des Triomphant entre 2035 et 2050 pour assurer jusqu'à la fin du siècle la composante océanique de la dissuasion. Aujourd'hui, le dispositif repose sur quatre engins qui patrouillent à tour de rôle dans le fond des mers, avec à leur bord 16 missiles conçus pour emporter chacun jusqu'à dix têtes thermonucléaires, qui peuvent frapper des cibles distinctes de manière indépendante. La ▶



JP.PONS/MARINENATIONALE

Quatre sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE) français patrouillent à tour de rôle au fond des mers avec à leur bord 16 missiles portant chacun plusieurs têtes nucléaires. ▶

présence permanente d'un SNLE en mer garantit la possibilité d'exécuter à tout moment une frappe nucléaire.
Ce nouveau sous-marin sera le plus gros jamais construit en France, avec une longueur de 150 mètres et 15 000 tonnes de déplacement en plongée. Il nécessitera l'assemblage de plus d'un million de pièces et, pour assurer sa discrétion, d'isoler de la coque épaisse les aménagements et équipements intérieurs à l'aide de supports en matière synthétique qui jouent un rôle de barrière acoustique. Il sera doté de barres de plongée arrière en forme de croix de Saint-André — soit en « × » au lieu de « + » — adoptées pour la première fois en France pour un SNLE. Cette disposition permet des corrections plus précises d'assiette et de roulis et un pilotage plus efficace en eaux peu profondes, ou à faible vitesse. En outre, cela réduit le risque de formation de bulles et diminue donc la signature acoustique du sous-marin. Conçue pour résister à une pression de plus de 500 tonnes/m² grâce à un acier possédant une certaine « élasticité », la coque sera revêtue de carreaux en caoutchouc ou en polymère synthétique destinés à diluer les ondes sonores des sonars actifs ennemis et réduire le bruit rayonné par le sous-marin. Comme leurs prédécesseurs, les SNLE de 3e génération emporteront 16 missiles dotés de têtes nucléaires océaniques d'une puissance estimée à 100 kilotonnes — contre 15 kilotonnes d'équivalent TNT pour la bombe d'Hiroshima. Les nouveaux missiles M51.3 qui l'équiperont ont une portée de quelque 10 000 km contre environ 9000 km pour la précédente version.

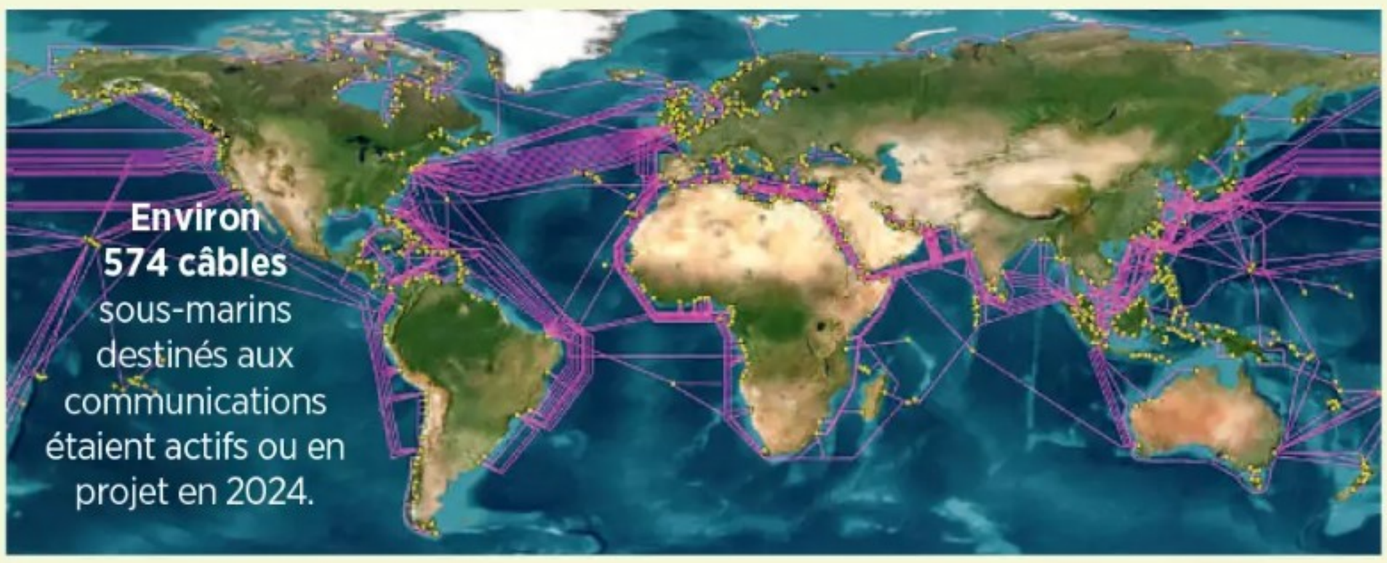
Un deuxième porte-avions sera construit à partir de 2031

Un autre volet de la dissuasion nucléaire océanique a été lancé en 2020 par le président Emmanuel Macron. Il s'agit du programme de porte-avions de nouvelle génération, également dotés d'une propulsion nucléaire. Depuis la vente du *Foch* à la Marine brésilienne en novembre 2000, la France ne dispose plus en effet que d'un seul porte-avions, le *Charles-de-Gaulle*. Or, sa maintenance nécessite de le mettre en cale sèche tous les dix ans, ce qui induit une perte de capacité pour l'aéronavale, notamment pour le déploiement des Rafale, qui assurent une part importante du volet aérien de la dissuasion nucléaire. D'où la nécessité de se doter d'au moins un deuxième porte-avions. Le 27 avril 2024, le ministre des Armées Sébastien Lecornu a ainsi annoncé la commande des premiers composants, en amont de la construction du vaisseau qui devrait débuter en 2031. La définition du projet doit être livrée d'ici à la fin de cette année. Le nouveau porte-avions devrait disposer d'un pont d'envol de 17 000 m², contre 12 000 pour le *Charles-de-Gaulle*, afin d'y faire décoller au moins 40 aéronefs, dont plus de 30 avions de chasse successeurs du Rafale (*lire p. 38*). L'énergie nucléaire fournira assez de puissance pour mettre en œuvre des armes à énergie dirigée, de type laser ou brouilleur par micro-ondes.

CÂBLES

Les fonds marins, nouvel espace de conflictualité

Aujourd'hui, 99 % des flux d'informations intercontinentaux transitent par des câbles sous-marins : en 2024, environ 574 de ces câbles étaient actifs ou en projet. Aussi l'annonce, en février, par le *South China Morning Post* de la mise au point d'un outil chinois de découpe de ces câbles en haute mer et jusqu'à 4000 m de profondeur a de quoi inquiéter. D'autant que *« Pékin dispose de la flotte de submersibles la plus importante du monde »*, souligne le quotidien hongkongais. La multiplication des drones sous-marins capables de mener des opérations militaires ou de sabotage transforme les fonds océaniques en un nouvel espace de conflictualité.
Dans sa loi de programmation militaire 2024-2030, la France — qui doit veiller sur le deuxième plus grand domaine maritime au monde —, prévoit de se doter *« des moyens d'intervention (robots et drones) jusqu'à une profondeur de 6000 m. »* D'ici à 2030 devraient être livrés à la Marine nationale huit drones autonomes destinés à la lutte anti-mines, un démonstrateur de drone de combat sans équipage ainsi qu'un drone sous-marin autonome et un robot téléopéré évoluant aux plus grandes profondeurs.



Environ 574 câbles sous-marins destinés aux communications étaient actifs ou en projet en 2024.

GEOTEL

MARINE NATIONALE

COURTESY LOCKHEED MARTIN

Si les drones tactiques navals sont en plein essor (en haut, l'engin léger Aliaca transmettant des données dans un rayon de 50 km), la riposte anti-drone s'organise : en bas, l'arme laser Helios peut abattre une cible volante depuis un destroyer (vue d'artiste).

Outre des avions de guet et des hélicoptères, le bâtiment accueillera des drones. La « dronisation » des armées est en effet une priorité de la loi de programmation militaire 2024-2030. Aujourd'hui, la Marine nationale déploie sur ses frégates de surveillance et les patrouilleurs de haute mer des mini-drones aériens développés par Survey Copter, filiale d'Airbus. Baptisés Aliaca, ces engins tactiques légers d'une envergure de 3,5 m pour une longueur de 2,1 m sont lancés par une petite catapulte depuis le pont du bateau et récupérés à l'aide d'un filet sur la plage arrière, à la manière d'un insecte piégé dans une toile d'araignée. Grâce à leur caméra optique et infrarouge, ces drones volants transmettent en temps réel images et données collectées dans un rayon d'environ 50 km, ce qui permet d'identifier des bâtiments à des distances supérieures aux portées radar. Le 1er avril, en ouverture du salon Sofins (Special operations forces innovation network seminar) au camp de Souge en Gironde, Survey Copter a présenté une nouvelle version du drone Aliaca, capable, cette fois, de décoller et d'atterrir verticalement grâce à quatre hélices fixées sur ses ailes, *« tout en conservant sa propulsion en mode voilure fixe pendant la mission »*, précise l'industriel. Cette nouvelle fonction va faciliter son déploiement en mer comme sur terre. En outre, la nouvelle version est dotée d'une motorisation hybride qui lui permet de rester en vol durant six heures — contre trois heures pour la version uniquement électrique —, avec une portée de 80 km. La Marine nationale prévoit d'équiper de drones Aliaca l'ensemble de ses 21 navires de second rang en 2026.

Des aéronefs pouvant repérer les sous-marins

Pour équiper ceux du premier rang, à savoir les vaisseaux de combat dotés d'une puissance de feu, d'une taille ou de capacités de projection, Airbus Helicopters a présenté au salon Euronaval 2024 le VSR700, un drone tactique naval de nouvelle génération. Dérivé d'un hélicoptère civil habité, il a été autonomisé et doté de systèmes destinés à la lutte anti-sous-marins. Pour cela, l'aéronef comporte deux paniers latéraux pouvant embarquer jusqu'à quatre bouées acoustiques ou grenades de lutte sous-marine. S'y ajoute un système de détection d'anomalie magnétique, utilisé pour repérer les sous-marins *via* leur signature métallique. L'engin, doté d'une autonomie de six heures, peut fonctionner seul pour des missions logistiques ou s'associer aux hélicoptères habités pour étendre leur pouvoir de chasse au sous-marin et d'action. Selon la loi de programmation militaire 2024-2030, dix systèmes de ce type devraient être livrés à la Marine nationale d'ici à 2030.

Mais la riposte anti-drone s'organise déjà. Un rapport américain publié en janvier a dévoilé l'utilisation par l'US Navy, la marine de guerre américaine, d'une arme laser Helios (High energy laser with integrated optical dazzler and Surveillance) déclenchée depuis un destroyer pour détruire, avec 60 à 120 kilowatts d'énergie dirigée, une cible volante, notamment des drones ennemis, jusqu'à 8 km de distance. Dans un contexte de tensions géopolitiques croissantes, le développement de ces technologies toujours plus pointues vise à préparer nos forces de dissuasion à préserver la paix. ■

S. R.

La présence permanente d'au moins un SNLE en mer garantit la possibilité d'exécuter à tout moment une frappe nucléaire

LES AIRS

Les ambitions du futur avion de combat

La nouvelle version du célèbre Rafale décollera en 2035, en attendant son successeur, le NGF, qui se démarquera par une furtivité accrue aux radars, une automatisation de certaines tâches en vol et dont l'action sera augmentée d'un essaim de drones.

Le futur Rafale F5 de Dassault Aviation, équipé de systèmes de leurrage, de brouillage et d'autoprotection, volera accompagné du drone de combat Neuron (illustration).

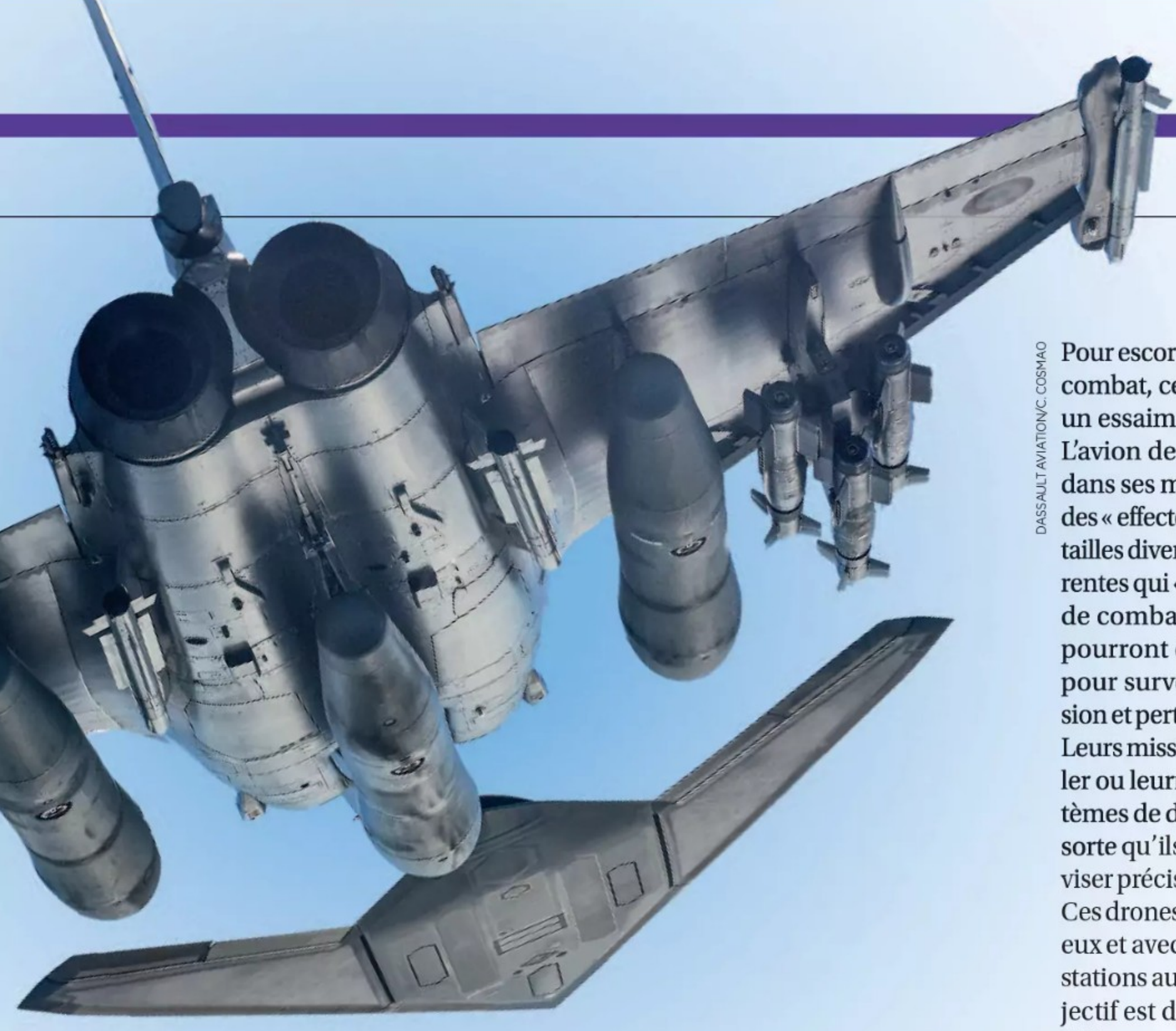
Le célèbre Rafale se prépare à une deuxième vie. Le futur modèle F5 de l'avion de combat de Dassault Aviation devrait entrer en service avec son missile nucléaire hypersonique en 2035, comme l'a annoncé le 18 mars Emmanuel Macron. La base aérienne 116 à Luxeuil-Saint-Sauveur (Haute-Saône) sera la première à l'accueillir (*lire p. 41*). *« Le Rafale actuel fonctionne, mais il faut le mettre au goût du jour des menaces de demain »*, explique un bon connaisseur de l'aéronautique militaire qui tient à rester anonyme. Entré en service en 2004 dans la Marine nationale, en 2006 au sein de l'armée de l'air et de l'espace, il doit voler jusque dans les années 2060-2070. Il est donc nécessaire de le faire évoluer, pour conserver une force de frappe sur le champ de bataille et assurer la mission de dissuasion nucléaire, en attendant son successeur, l'avion de combat de prochaine génération (NGF — next generation fighter). Ce dernier sera intégré au Système de combat aérien du futur (Scaf), qui englobe l'ensemble des moyens dédiés à la guerre aérienne (avions, drones, cloud de combat, etc.). Développé dans les années 1980, le Rafale présente une forme de « delta canard » : *« Compacte, très solide et rigide, elle permet l'emport d'une grande variété d'armements,* explique le spécialiste de l'aéronautique militaire. *Cette configuration rend l'avion très manœuvrable et permet, par exemple, de réaliser des vols à basse vitesse, avec un angle d'attaque important. L'objectif était d'en faire un avion polyvalent et multirôle, un concentré de technologies, à un prix abordable. Le fait qu'il soit bimoteur lui confère plus de puissance et de sécurité. »*

Les missions du Rafale F5 seront de pénétrer les défenses adverses, leurrer des radars, déjouer une attaque de missile...

Les missions qui seront dévolues au futur Rafale seront de pénétrer les défenses adverses, leurrer et brouiller des radars, déjouer une attaque de missile... L'ensemble des missions de neutralisation ou de destruction des défenses adverses est regroupé sous l'acronyme anglo-saxon Sead (pour Suppression of enemy air defenses). Ce concept requiert de disposer d'un ensemble d'équipements (avions, radars, drones, missiles, défense aérienne...) dotés de systèmes de leurrage, de brouillage et d'autoprotection. Pour ce faire, il faut améliorer les systèmes déjà existants et en développer de nouveaux.

La « dronisation » du ciel, une tendance majeure

Les attaques seront conduites non pas de façon isolée mais dans une approche collaborative : l'avion de combat, que ce soit le Rafale au standard F5 ou le NGF, communiquera avec d'autres avions, des troupes au sol, des frégates en mer... Concrètement, le pilote gère sa mission en étant connecté au sol,



DASSAULT AVIATION/C. COSMAO

en vol avec d'autres avions, mais aussi avec des drones, qui seront, eux, pilotés à distance. *« La connectivité sera au cœur du combat aérien »*, confirme le spécialiste. C'est cette interconnexion qui fait du programme européen Scaf un « système de systèmes » construit en réseau.

La « dronisation » du ciel est une tendance majeure pour l'aviation militaire du XXIe siècle. C'est pourquoi le Rafale F5 sera accompagné d'un drone de combat dérivé du programme Neuron. Développé par Dassault Aviation en coopération européenne depuis le début des années 2000, celui-ci a servi à prouver la pertinence de certaines technologies (furtivité, emport d'armement…). Il sera équipé, autant que faire se peut, de systèmes communs au Rafale F5 : optronique, systèmes de contremesures, servocommandes, moteur… Ainsi, l'avion et le drone de combat formeront un binôme d'attaque plus efficace face aux défenses adverses.

Pour escorter le futur NGF et le drone de combat, ce n'est pas un seul, mais tout un essaim de drones qui interviendra. L'avion de combat futur sera secondé dans ses missions par ce qu'on appelle des « effecteurs déportés ». Des drones de tailles diverses et avec des missions différentes qui « ouvriront la voie » de l'avion de combat. Ces aéronefs « low cost » pourront être largués par des avions pour surveiller une zone, faire diversion et perturber les défenses ennemies. Leurs missions seront multiples : brouiller ou leurrer les radars, saturer les systèmes de défense aérienne adverses de sorte qu'ils ne sachent plus quelle cible viser précisément, désigner des cibles… Ces drones seront interconnectés, entre eux et avec les autres systèmes (avions, stations au sol, bâtiments en mer). L'objectif est de neutraliser ou détruire les défenses adverses pour faciliter la mission de l'avion de combat, qui pourra alors tirer sur sa cible dans un espace aérien « sécurisé », accompagné « d'ailiers » sans pilote à bord.

Rendre l'avion le plus discret possible

Si une maquette de NGF a été présentée lors du Salon aéronautique du Bourget en 2019, l'aspect extérieur définitif n'est pas encore connu. Il dépendra des travaux industriels qui sont en cours entre l'Allemagne, l'Espagne et la France. Mais il sera sans doute plus lourd que le Rafale F5, parce qu'il devra pouvoir emporter plus d'armement tout en ayant une autonomie de vol importante. L'intégration de davantage de technologies de furtivité contribuera également à augmenter son poids, ne serait-ce que parce qu'il faudra le doter de soutes pour emporter les missiles et les rendre moins facilement détectables.

Sa conception sera en effet dictée par la nécessité d'une furtivité accrue. Il faut réduire au maximum la signature électromagnétique, acoustique et thermique de l'avion, pour le rendre le plus discret possible face à des systèmes adverses de plus en plus performants.

ÉTATS-UNIS

Le F-47, l'avion de combat de Boeing

Donald Trump a dévoilé le nom du grand gagnant le 21 mars : c'est Boeing qui construira le prochain avion de combat des États-Unis. Baptisé F-47, l'aéronef succédera au F-22 Raptor pour les missions de supériorité aérienne. À l'image du programme européen Scaf, le programme américain NGAD (Next generation air dominance) est un « système de systèmes », composé d'aéronefs de combat accompagnés par des effecteurs déportés (drones). La conception du F-47, présenté comme un avion de « 6e génération », intégrera des capacités améliorées en matière de furtivité, de fusion de capteurs et de frappe à longue portée, dans une architecture modulaire et adaptable. Le calendrier affiché est ambitieux : l'objectif est d'en disposer dès les années 2030.

La forme des planeurs hypersoniques est conçue pour exploiter efficacement les phénomènes aérodynamiques à des vitesses extrêmes (ici le projet de planeur américain HTV-2).

AP PHOTO/DARPA/SIPA

HYPERSONIQUE

Des armes plus véloces et plus furtives

Le 26 juin 2023, la France est entrée dans le cercle très restreint des pays dotés d'armes hypersoniques en testant avec succès le planeur V-MaX (véhicule manœuvrant expérimental). Ces armes se caractérisent par leur vitesse — allant de 6000 km/h à 25 000 km/h environ — et se déclinent en missiles de croisière ou en planeurs. À la différence des missiles balistiques, les premiers évoluent dans l'atmosphère à une altitude de 20 à 30 kilomètres : ils sont ainsi difficilement repérables par les radars de longue distance qui ont une visée plus haute. Les planeurs, quant à eux, sont d'abord propulsés par un lanceur qui leur confère une vitesse supersonique les conduisant hors de l'atmosphère où ils franchissent de longues distances sans frottement. Une fois séparés du lanceur, ils rentrent dans l'atmosphère. À ce stade, l'appareil plane sans propulsion, en utilisant uniquement son énergie cinétique et les forces aérodynamiques. Sa forme plate et profilée génère de la portance et il peut effectuer des rebonds dans l'atmosphère, similaires à des montagnes russes : il plonge, prend de la vitesse, puis remonte en altitude en transformant sa vitesse en énergie potentielle. Ses capacités à manœuvrer lui permettent également de changer de direction à grande vitesse, ce qui rend son interception difficile. La précision de ces armes est redoutable : selon une note de l'Institut français des relations internationales (Ifri), un essai du planeur américain C-HGB en 2020 aurait permis de frapper à 15 cm du point visé après un vol de 4000 kilomètres. L'une des difficultés physiques rencontrées pour la mise au point de ces armes est celle du « mur de la chaleur » : les frottements de l'air échauffent les véhicules jusqu'à plus de 700 °C à Mach 5, et 3700 °C à Mach 12 ! Cela nécessite d'utiliser des matériaux avancés comme les céramiques composites ou des systèmes de réfraction ou de refroidissement actif. D'autant que cette chaleur excessive les rend détectables par les capteurs infrarouges de satellites ou d'avions. Très coûteuses, ces nouvelles armes pourraient être seulement utilisées pour des cibles stratégiques comme des porte-avions ou des boucliers antimissiles. **S. R.**

Pour y parvenir, on peut privilégier des surfaces planes et des formes anguleuses, qui dispersent les ondes radar, mais aussi utiliser des peintures spécifiques qui absorbent ces mêmes ondes. La furtivité consiste à réduire au maximum la « surface équivalente radar » (SER) : une mesure qui quantifie la réflectivité d'un engin face aux ondes. Minimiser cette surface revient à minimiser la quantité d'énergie radar qui sera renvoyée vers les systèmes de détection adverses.

Pouvoir se protéger des attaques électroniques

Autre enjeu de l'avion de combat : sa capacité à se défendre en matière de guerre électronique. Celle-ci revêt plusieurs aspects : détection des émissions radar, interception des signaux électromagnétiques ou des communications ennemies, perturbation par brouillage, etc. Il s'agit de savoir qui émet, ce qui est émis, qui tente de brouiller, et de pouvoir se protéger de ces attaques. L'Europe et les États-Unis restent en pointe en matière de guerre électronique, mais des pays comme la Russie ou la Corée du Nord développent par exemple des technologies de brouillage GPS, voire des brouilleurs de fusées de missiles afin de les empêcher de détoner. L'objectif est donc d'assurer la résilience et la performance des systèmes de protection pour mener les missions aériennes. Enfin, la puissance de calcul embarquée et l'intelligence artificielle vont libérer le pilote de certaines tâches qui pourront être automatisées. L'un des enjeux est d'avoir des sortes d'assistants virtuels, à qui le pilote pourra déléguer des missions. Ainsi, intégrée au radar, l'IA pourra par exemple établir une cartographie pour détecter automatiquement des zones à surveiller, des bâtiments à détruire… à la place du pilote. En revanche, c'est toujours ce dernier qui prendra la décision de tirer.

Dans ce contexte, le développement des avions de combat du futur ne peut s'envisager sans le renouvellement de la composante nucléaire aéroportée. Le missile actuel, l'ASMPA (air-sol moyenne portée améliorée), sera remplacé à court terme par l'ASMPA-R (rénové), avant de laisser la place, à l'horizon 2035, à l'ASN4G, le missile air-sol nucléaire de 4e génération, conçu lui aussi par le missilier européen MBDA (*lire p. 28*). Il sera hypersonique et assurera à l'avion de combat une capacité de frappe dans la profondeur — c'est-à-dire au-delà des défenses ennemies. ■ **H. C.**

DASSAULT AVIATION

Le démonstrateur du NGF, le futur avion de combat voué à remplacer le Rafale, emportera davantage d'armements tout en ayant une autonomie plus grande (illustration).

NUMÉRIQUE

Le cyberespace sous la menace

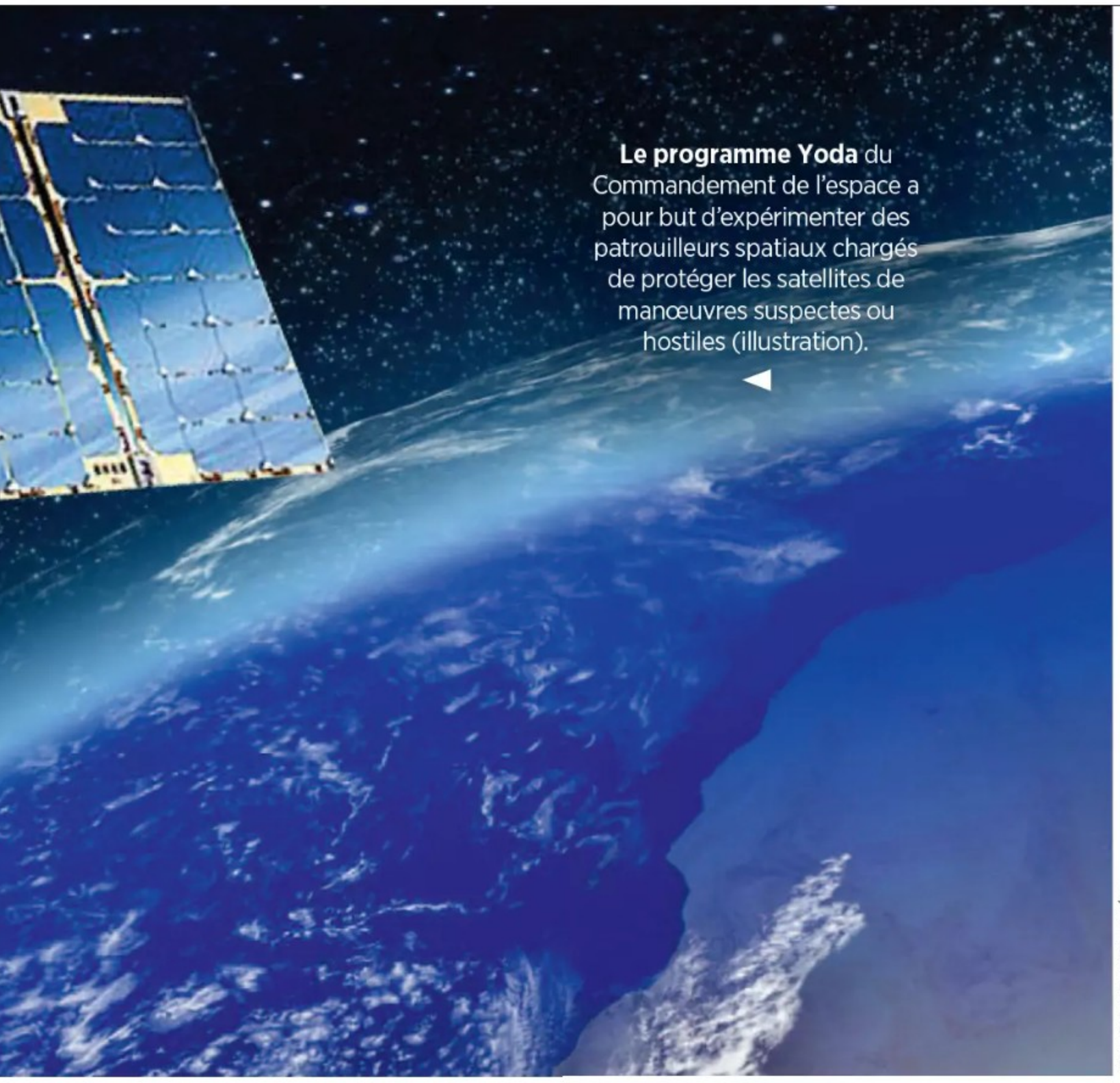
Air, terre, mer… et cyber. Aucun conflit ne peut faire l'impasse sur la défense des réseaux informatiques, de communication mobile, de l'Internet des objets, de tous ces systèmes connectés désormais omniprésents. *« Des capacités cyber, aussi bien défensives qu'offensives, sont nécessaires pour assurer la protection et la liberté de manœuvre dans le cyberespace »*, note le Livre blanc sur la défense européenne à l'horizon 2030, publié le 19 mars par la Commission européenne. Tous les théâtres d'opérations sont concernés, y compris l'espace, et pas seulement pour protéger les systèmes d'armes et autres équipements militaires. Virus informatiques, brouillage des réseaux, blocage d'applications, toutes ces techniques peuvent aussi servir à désorganiser l'ennemi en visant les réseaux de transports, les services publics, l'approvisionnement en eau et en énergie. La France a créé en 2017 le Commandement de la cyberdéfense (ComCyber). Sous son pilotage, 15 000 militaires ont participé fin mars à l'exercice annuel Defnet, mettant en scène deux pays fictifs s'affrontant par le biais du numérique. Parmi les cibles figuraient, par exemple, un avion, une frégate de la marine, un système de lutte anti-drone ou un blindé. Des opérations de désinformation par les réseaux sociaux pour saper le moral et discréditer l'armée étaient aussi au programme. Hors Union européenne, fin février, l'armée britannique menait un exercice similaire, le Defence Cyber Marvel. Impliquant militaires et industriels, il combinait cyberattaques et tests de résilience. Cette année, le scénario concernait les réseaux ferroviaires et les hôpitaux d'un pays en guerre. **A. D.**

L'ESPACE

La défense spatiale européenne sur orbite

Depuis l'attaque contre le satellite KA-SAT au début de la guerre en Ukraine, l'espace s'impose comme un lieu d'affrontement à part entière. Dans la foulée de la France qui a créé son Commandement de l'espace, l'Europe tente de bâtir sa souveraineté orbitale.

L'invasion de l'Ukraine par la Russie a débuté par une attaque invisible. Dans la nuit du 23 au 24 février 2022, le réseau satellitaire KA-SAT, opéré par l'entreprise américaine Viasat, est frappé par une cyberattaque. Des dizaines de milliers de modems au sol — utilisés pour les communications civiles et militaires — sont mis hors service. En paralysant cet accès à Internet par satellite, la Russie désorganise les capacités de commandement ukrainiennes, coupe les flux d'information et sème la confusion dès les premiers instants du conflit. Cette offensive illustre à quel point l'espace est devenu un théâtre d'opérations où se jouent des équilibres militaires et civils. *« L'ensemble de nos sociétés repose aujourd'hui sur des systèmes spatiaux omniprésents et pourtant peu visibles,* détaille Philippe Steininger, conseiller militaire du P-DG du Centre national d'études spatiales (Cnes). *Géolocalisation, communications mobiles, opérations bancaires… Tout cela est géré depuis l'espace par quelque 10 000 satellites actifs, dix fois plus qu'en 2010.* »
Cette dépendance fait de l'espace une cible stratégique. *« Il n'y a plus d'espace sans défense, ni de défense sans espace »,* résume l'expert.
Rien à voir avec l'époque de la guerre froide entre l'Est et l'Ouest, où l'orbite terrestre était le lieu d'observations à distance, réservé au renseignement stratégique. *« Les satellites surveillaient les missiles balistiques et les arsenaux nucléaires,* explique Xavier Pasco, directeur de la Fondation pour la recherche stratégique *. *L'espace était presque sanctuarisé car la neutralisation d'un satellite d'observation aurait été perçue comme une escalade majeure.* »
Ce *statu quo* cesse lors de la première guerre du Golfe en 1991 : les États-Unis utilisent massivement les satellites pour la détection de tirs de missiles, les communications tactiques, le guidage de munitions. L'espace se met au service du champ de bataille, ce qui en fait un terrain d'affrontement possible.
Dans la foulée, les États-Unis lancent leur « révolution des affaires militaires » fondée sur l'intégration massive des nouvelles technologies de l'information et de la communication dans la conduite des opérations armées. Il s'agit de maî-



ARIANESPACE - CNES - KINÉIS

Le programme Yoda du Commandement de l'espace a pour but d'expérimenter des patrouilleurs spatiaux chargés de protéger les satellites de manœuvres suspectes ou hostiles (illustration).

triser toute la chaîne de données issues des satellites — collecte, transmission, traitement. En parallèle, le gouvernement ouvre le secteur au privé, autorisant dès 1994 la commercialisation d'imagerie satellitaire, puis le développement des télécoms. *« Dans les années 2000, à mesure que les technologies progressent et que leur coût diminue, des gens venus de la tech, comme Elon Musk ou Jeff Bezos, comprennent que le spatial devient accessible et que ses usages se connectent à l'économie de l'information. Ils se lancent. Tout accélère avec l'émergence d'entreprises comme SpaceX, qui va transformer les satellites en plateformes de services civils, commerciaux et militaires »*, conclut Xavier Pasco.

L'exemple de Starlink, une constellation de satellites développée par SpaceX pour fournir un accès Internet partout dans le monde, est emblématique durant la crise ukrainienne. Dans un premier temps, Starlink pallie la défaillance de KA-SAT après la cyberattaque russe. Mais lorsqu'en septembre 2022, les forces ukrainiennes planifient une attaque contre des navires russes à Sébastopol *via* des drones sous-marins guidés par Starlink, Elon Musk, informé de l'opération, désactive — ou refuse d'activer — le réseau dans la zone, craignant une escalade… Cette nouvelle donne pousse les États européens à reconsidérer leur autonomie stratégique spatiale. En France, la prise de conscience s'affirme dès 2019, avec l'élaboration d'une stratégie spatiale de défense par le ministère des Armées. Il est créé un Commandement de l'espace pour surveiller, protéger et défendre les intérêts spatiaux de la France face aux puissances comme les États-Unis, la Chine ou la Russie qui développent des capacités anti-satellites. *« Cela marque une rupture stratégique,* note Philippe Steininger. *Jusqu'alors, les opérations spatiales soutenaient celles au sol. Depuis 2019, la France reconnaît l'espace comme un théâtre d'opérations militaires, où la donnée, la "data", devient la cible principale. »*

CNES/PEUS CHRISTOPHE, 2021

« Depuis 2019, la France reconnaît l'espace comme un théâtre d'opérations militaires, où la "data" devient la cible principale »

Philippe Steininger, conseiller militaire du P-DG du Centre national d'études spatiales (Cnes)

Une nouvelle constellation européenne de satellites

L'offensive se porte sur les télécommunications. *« On ne peut connecter un théâtre d'opérations* via *une infrastructure privée, sans garantie de continuité »*, tranche Jean-Pierre Diris, ex-Cnes, aujourd'hui coordinateur interministériel Iris² et Govsatcom (versant communication du programme spatial de l'Union européenne). D'où Iris² justement, première constellation européenne de télécommunications sécurisées en orbite basse, officialisée en décembre 2024. Doté de 10,6 milliards d'euros, le programme doit fournir une connectivité sécurisée et chiffrée aux institutions européennes, aux forces armées, services de secours et de sécurité, et offrir à terme des services commerciaux. Le consortium SpaceRise, piloté par Airbus, Thales Alenia Space et Eutelsat, devrait livrer une pleine capacité en 2030, avec 300 satellites.

Le programme Yoda (Yeux en orbite pour un démonstrateur agile) incarne

SIMULATION

Répondre à une attaque dans l'espace

C'est une partie de Risk, mais en version spatiale et de dimension XXL, qui s'est déroulée à Toulouse du 17 au 28 mars. AsterX est un exercice spatial militaire organisé chaque année par le Commandement de l'espace. L'édition 2025 a réuni 170 participants (dont 24 étrangers de 11 pays différents), civils et militaires, au cœur d'un scénario virtuel. Pendant dix jours, dans une vaste salle aux allures de *showroom* d'ordinateurs, ils ont été confrontés à une série de situations critiques — brouillage, cyberattaques, manœuvres suspectes de satellites — regroupées en 18 événements hostiles et impliquant 4000 objets spatiaux. *« Un scénario très dynamique et inconfortable pour les opérateurs les a poussés à explorer leurs limites »*, précise le ministère de la Défense. Objectif: s'entraîner à identifier les menaces en orbite et à protéger les infrastructures sensibles, civiles comme militaires. Cette année, l'accent était mis sur les liens entre les différents milieux: air, terre, mer et, bien sûr, espace.

ASTERX 2025

Les participants civils et militaires se sont coordonnés pour faire face en temps réel à différents scénarios d'événements hostiles.

aussi ce virage stratégique. Il prévoit deux satellites en orbite géostationnaire (36 000 km) capables de surveiller des satellites aux intentions « suspectes ». Exemple : le satellite russe Luch/Olymp K-2, lancé en 2023, est soupçonné de s'être approché de satellites comme Astra ou Intelsat-39 pour intercepter leurs communications. *« Yoda est la réponse française à ces actions,* explique Jean-Pierre Diris, initiateur du projet au Cnes. *Ces satellites doivent prouver qu'on peut se déplacer précisément en orbite et observer ce qu'il s'y passe. »* Surveillance, *via* l'utilisation de radars ou de caméras thermiques donc, mais aussi capacité d'action. Va-t-on équiper les satellites de lasers destructeurs façon Étoile de la mort de *Star Wars* ? *« La Défense ne révèle pas ses moyens d'action pour éviter les contre-mesures »*, glisse en souriant Jean-Pierre Diris.

Néanmoins, ce genre d'actions, qui multiplierait les débris en orbite — déjà trop abondants —, n'est pas une priorité. D'autant que, comme le rappelle Xavier Pasco, *« il existe d'autres moyens de neutraliser un satellite, par le brouillage par exemple, qui le rend momentanément inopérant sans le détruire pour autant. »*
Côté orbite basse (entre 200 et 2000 kilomètres), le programme lancé en 2023 s'intitule Toutatis. Il testera des capacités de protection active avec deux nanosatellites (jusqu'à 25 kg) : un satellite d'action manœuvrant (Splinter), doté d'un laser pour aveugler les capteurs ennemis, et un satellite d'observation (Lisa1), chargé de cataloguer quelque 60 000 objets en orbite. Lancement prévu en 2025 ou 2026.

Une stratégie qui reste à affiner

Ces programmes auraient-ils pu aider l'Ukraine en 2022 ? Xavier Pasco reste prudent. *« Iris² aura bien moins de satellites que Starlink (300 contre 12 000), ses usages seront donc différents. Pour le renseignement optique, les Ukrainiens s'appuient sur la National Geospatial-Intelligence Agency américaine, qui fournit des images commerciales en temps réel. L'Europe, elle, manque de volume. Un programme français comme CSO* [constitué de trois satellites militaires en orbite, dont le dernier a été lancé en mars] *offre des images d'une précision remarquable. Mais si la qualité est importante en opération, on cherche aussi du continu. »*
La stratégie reste à affiner, mais un consensus se dégage depuis la crise ukrainienne : la nécessité pour l'Europe de disposer d'une vraie souveraineté dans l'espace. *« En France, nous en sommes conscients depuis longtemps, mais certains de nos partenaires européens en doutaient. Avec la crise ukrainienne, ces doutes s'estompent. Cela va nous permettre d'avancer »*, conclut Jean-Pierre Diris. ■ **F. N.**

* Auteur de « La Ruée vers l'espace », Tallandier, 2024.

BRUNO TERTRAIS
DIRECTEUR ADJOINT DE LA FONDATION POUR LA RECHERCHE STRATÉGIQUE

« La France poursuit la pérennisation de sa dissuasion nucléaire »

Bruno Tertrais détaille les trois composantes de l'arsenal nucléaire français et explique pourquoi une nouvelle génération d'avions, de missiles et de sous-marins furtifs est essentielle à notre politique de dissuasion.

« Une étape importante pour la dissuasion nucléaire française » a été annoncée le 18 mars sur la base de Luxeuil-Saint-Sauveur, près de la frontière allemande, par le président Emmanuel Macron : la mise en service, sur ce même aérodrome, d'une nouvelle base aérienne à vocation nucléaire, « à l'horizon 2035 ». Quelle est la portée militaire et politique de cette annonce ?
D'ici à dix ans, la base de Luxeuil accueillera donc deux escadrons des futurs avions de chasse Rafale, soit une quarantaine d'appareils au dernier standard F5, pouvant emporter des missiles nucléaires *(lire p. 34)*. Elle s'ajoutera aux trois autres bases à vocation nucléaire de Saint-Dizier, d'Istres et d'Avord. Et renforcera ainsi les Forces aériennes stratégiques (FAS) dont les chasseurs-bombardiers interviennent aussi pour des missions de combat conventionnelles, comme en Syrie en 2018. La base de Luxeuil avait déjà été, dès le milieu des années 1960, un des piliers des FAS. Elle avait perdu cette fonction en 2011, notamment pour des raisons budgétaires, et retrouvera donc ce rang dans le cadre d'une réorganisation actuelle des FAS. Une telle décision se planifie sur le long terme : elle était en gestation depuis quelques années. Mais le fait que le président ait tenu à l'annoncer en personne, à Luxeuil, transmet un message qui ne s'adresse pas uniquement à l'armée de l'air et à la zone est du pays. Il affirme la détermination de la France à poursuivre la pérennisation de sa dissuasion nucléaire, clé de voûte du système militaire français, dans un environnement changeant et dans les années à venir.

A. JOCARD/AFP

BIO EXPRESS

- **1994** Thèse de doctorat à l'Institut d'études politiques de Paris : « La stratégie nucléaire de l'Otan : dissuasion élargie et rôle des armes nucléaires américaines en Europe, 1949-1992 ».
- **2001** Il rejoint la Fondation pour la recherche stratégique après avoir travaillé à la direction des Affaires stratégiques du ministère de la Défense.
- **2024** Parution de « Pax atomica ? Théorie, pratique et limites de la dissuasion » (Odile Jacob).

Les Rafale déployés en 2035 à Luxeuil seront les premiers à embarquer des missiles nucléaires hypersoniques, a précisé Emmanuel Macron. Une technologie déterminante ?
En développement, ces missiles dits ASN4G (air-sol nucléaire de 4e génération) remplaceront les ASMPA équipant depuis 2010 les FAS et récemment rénovés. Alors que ces derniers filent à Mach 3 — soit près de 3600 km/h — pour une portée d'environ 500 km, les nouveaux dépasseront Mach 5 grâce à la technologie des superstatoréacteurs : un système de propulsion par réaction où la combustion du carburant peut s'effectuer à des vitesses hypersoniques. Avec une portée de 1000 km, ils pourront être tirés de beaucoup plus loin par les Rafale. Mais ▸

Le programme Simulation, conduit par la direction des affaires militaires du CEA, permet de tester la fiabilité des armes nucléaires sans essais (ici simulation 3D d'instabilités hydrodynamiques intervenant lors des réactions de fusion).

P. STROPPA / CEA

la véritable nouveauté — et leur atout majeur — sera moins la vitesse qu'une très grande manœuvrabilité. Très difficiles à intercepter, ils accroîtront la probabilité qu'un nombre important de têtes nucléaires atteignent leurs cibles. Et déjoueront ainsi — estime-t-on — ce que seront les défenses antiaériennes d'un grand pays industrialisé dans dix à vingt ans.

Quelles sont les autres composantes de l'arsenal français ?

Outre les FAS, il comprend quatre sous-marins nucléaires lanceurs d'engins (SNLE) qui composent la Force océanique stratégique et assurent la permanence à la mer de la dissuasion. De la classe du *Triomphant* mis en service en 1997, ils sont non seulement à propulsion nucléaire, mais munis aussi de 16 missiles balistiques de type M51 d'une portée intercontinentale, dotés eux-mêmes de têtes nucléaires multiples dont le nombre n'est pas spécifié et la puissance sans doute variable. À partir de 2035, ces navires seront remplacés par des SNLE de 3e génération, encore plus performants. Mais les bâtiments actuels disposent déjà d'une discrétion acoustique exceptionnelle : ils produisent moins de sons que le bruit ambiant du fond de la mer ! Créée en 1978, la Force aéronavale nucléaire constitue enfin une troisième composante, celle-ci non permanente, avec son escadrille de Rafale équipés de missiles nucléaires pouvant être embarqués sur le porte-avions *Charles-de-Gaulle*. À cet ensemble, il faut ajouter la flotte d'avions ravitailleurs Phénix rendant possibles des raids nucléaires à longue distance. Sans oublier les systèmes de transmissions nucléaires qui permettent de communiquer les ordres aux forces océaniques et aéroportées : un dispositif peu visible mais essentiel de la dissuasion.

Comment la France se positionne-t-elle par rapport aux autres États dotés de l'arme nucléaire que sont les États-Unis, la Russie, le Royaume-Uni, l'Inde, le Pakistan, Israël et la Corée du Nord ?

Disposant de quelque 300 têtes nucléaires, la France est une puissance moyenne en matière d'arsenal. Suffisamment pour être prise au sérieux par tout adversaire potentiel, mais loin derrière la Russie et les États-Unis qui possèdent des milliers d'ogives. Elle se situe quelque part entre le Royaume-Uni et la Chine, sachant que celle-ci accélère depuis quelques années le développement de son arsenal, tandis que le Royaume-Uni reste dans une logique de dissuasion

minimale — très dépendante des États-Unis, au moindre coût et avec des moyens limités se cantonnant à quatre SNLE.
La France est la seule puissance à avoir renoncé aux missiles balistiques sol-sol, positionnés jusqu'en 1996 sur le plateau d'Albion. Elle avait alors fait savoir, et c'est une autre particularité française, que toutes ses armes devaient désormais être considérées comme « stratégiques ». En clair, une arme nucléaire est une arme nucléaire. Il n'y a pas de distinction à faire entre différents types d'armes, au regard de leur portée ou leur énergie, la composante aérienne n'étant pas nécessairement destinée à un usage limité et les SNLE à un usage massif. Il existe une diversité de plans possibles et chaque composante y participe. Cela fait d'ailleurs plus de vingt ans que la France n'a pas communiqué de chiffres officiels sur l'énergie de ses armes, même si elle a tenu à signaler, à la fin des années 1990, que son arsenal avait été « adapté » et comprenait donc une gamme d'énergies.

Existe-t-il d'autres spécificités françaises ?
La France a été le premier pays, lors de ce tournant des années 1990, à passer à ce qu'on pourrait appeler un nouvel âge nucléaire — en tout cas un deuxième âge de la dissuasion. Elle a alors définitivement stoppé ses essais nucléaires ainsi que la production de matière fissile à des fins explosives, le stock existant devant depuis lors être recyclé. La France a également très tôt investi dans son programme Simulation, qui n'a d'équivalent qu'aux États-Unis par sa diversité et surtout sa capacité à produire et garantir la fiabilité des armes sans essais. Conduit par la direction des affaires militaires du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), il comporte trois volets. Le Laser mégajoule (LMJ) tout d'abord, près de Bordeaux (Gironde). Il utilise des faisceaux laser pouvant engendrer des températures qui se chiffrent en dizaines de millions de degrés et des pressions de plusieurs milliards d'atmosphères afin de réaliser des expériences de fusion, phénomène à la base des armes thermonucléaires. À Bruyères-le-Châtel (Essonne), des supercalculateurs résolvent ensuite les équations modélisant des processus d'une très grande complexité, notamment chaotiques, à l'œuvre lors du fonctionnement des armes. Dénommée EXA1 et inauguré en 2022, le dernier en date affiche une puissance de calcul de 36 pétaflops, soit 36 millions de milliards d'opérations par seconde ! Le troisième élément est une installation de radiographie à rayons X située au CEA de Valduc (Côte-d'Or), en partie conjointe avec le Royaume-Uni. Elle étudie le comportement des matières non nucléaires soumises à des vitesses de déformation extrêmes, de l'ordre de plusieurs milliers de kilomètres par seconde.

> « Avec quelque 300 têtes nucléaires, la France est une puissance moyenne en matière d'arsenal. Suffisamment pour être prise au sérieux par tout adversaire potentiel »

Pour quels résultats ?
Même si les supercalculateurs sont montés progressivement en capacité et que le LMJ n'utilise pas encore tous ses faisceaux — 176 dans la configuration finale —, le programme Simulation est exploité avec succès depuis plus de vingt ans. Il a permis, dès 2009, de concevoir la tête nucléaire aéroportée (TNA) installée dans les missiles ASMP, première arme nucléaire au monde dont la sûreté et la fiabilité ont été garanties par la simulation. Puis en 2015, les têtes nucléaires océaniques (TNO) équipant les missiles M51 des SLNE. Dans les années 2030-2040, la deuxième génération d'armes conçues par la simulation produira peut-être des systèmes de taille et de masse plus réduites, dès lors que la simulation sera mieux maîtrisée. Davantage d'armes pourraient être emportées alors dans les missiles intercontinentaux, ce qui permettrait un plus grand panachage des charges et une diversification de la planification. Non pas pour mieux se préparer à une guerre nucléaire, mais pour maximiser la liberté d'action du chef de l'État.

L'intelligence artificielle affectera-t-elle la dissuasion nucléaire ?
L'IA infuse tous les secteurs d'activité, notamment militaires, et il n'y a pas de raison que la dissuasion fasse exception. Son impact global devrait être toutefois assez neutre, comme c'est le cas, au bout du compte, pour la plupart des technologies. Il ne me semble pas, ainsi, que l'IA sera forcément un problème pour la stabilité stratégique et les risques de guerre nucléaire. Il faut bien sûr distinguer les utilisations possibles. Pour le ciblage — et pour définir par exemple la probabilité que se trouve tel ou tel objectif mobile sur un site donné —, l'IA offrira certes de nouvelles possibilités. Elle facilitera sans doute aussi la détection de certains dispositifs nucléaires. Mais je suis très dubitatif à l'égard des scénarios estimant que l'IA, combinée à des observations spatiales et des calculateurs quantiques, rendra les océans transparents et qu'on pourra savoir où se situent les sous-marins nucléaires. Concernant la caractérisation des menaces, j'estime que l'IA aura un effet plutôt stabilisant, en permettant, en particulier, de mieux évaluer la probabilité d'une fausse alerte. Dernier point : la décision. Et à cet égard, il y a un consensus total sur le fait que l'IA ne doit pas entrer dans les systèmes de commandement et de communication de la dissuasion. ■

Propos recueillis par F. D.

SMS GROUP; SSAB; J. NACKSTRAND/AFP

Une usine pilote en Suède fabrique déjà de l'acier sans charbon (au centre). Il est obtenu dans un four à arc électrique (en haut) à partir de briques de fer (en bas) préalablement transformé avec de l'hydrogène.

Sidérurgie

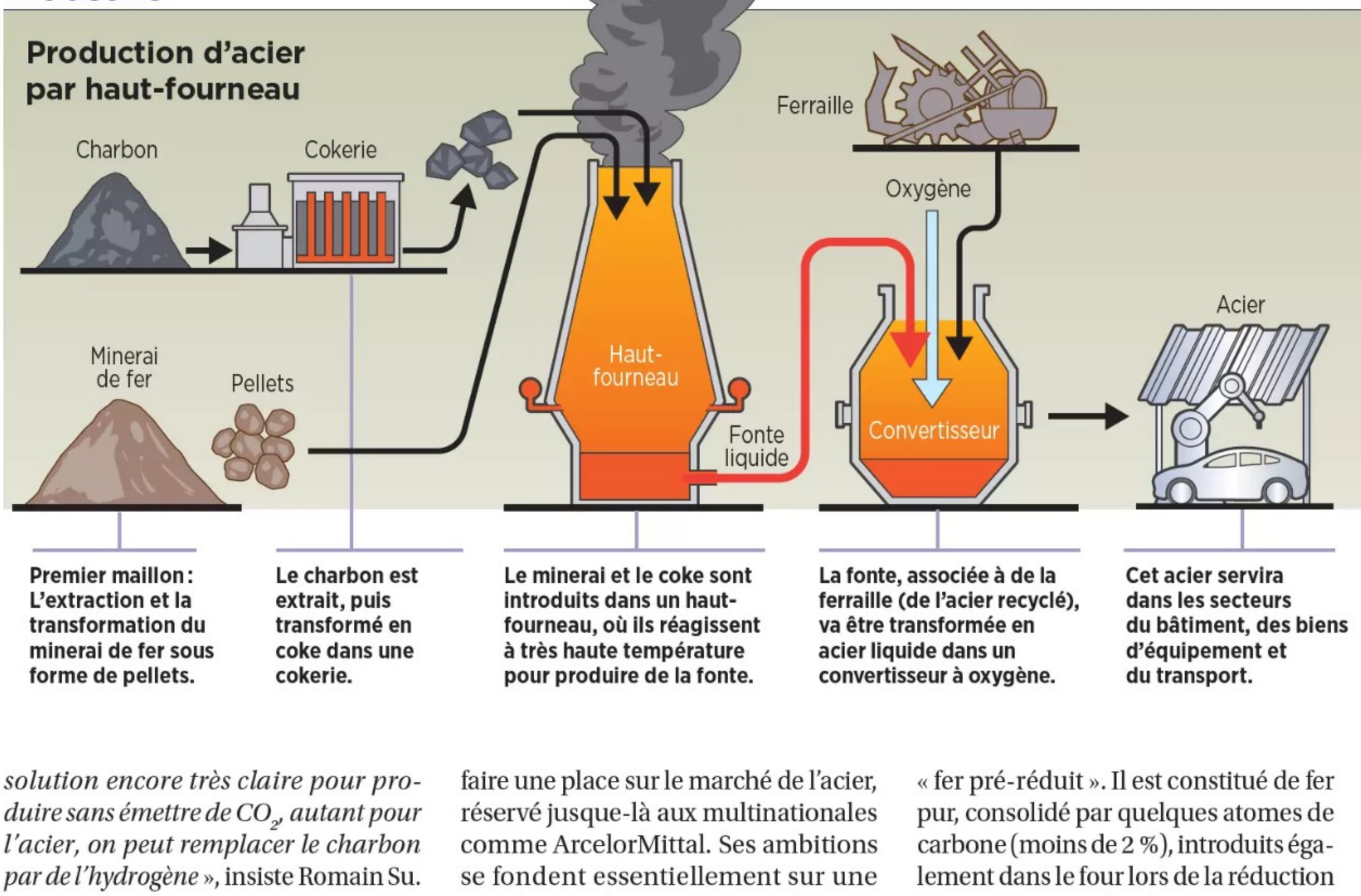
L'hydrogène ouvre l'ère de l'acier décarboné

En supprimant le charbon dans les hauts-fourneaux, le secteur sidérurgique pourrait réduire son empreinte carbone de 90 %. Une start-up française propose une technologie innovante, la réduction directe par hydrogène. Un site industriel à Fos-sur-Mer est même en projet. Mais les défis restent nombreux car la production d'hydrogène est très gourmande en électricité. Décryptage.

Par Élise Hulata

Bâtiments, machines à laver, robots industriels, voitures ou ustensiles de cuisine, l'acier est partout. Sa production dans le monde a été multipliée par dix depuis 1950. Or, la conception de cet alliage de fer et de carbone pollue énormément. À elle seule, la sidérurgie compte pour 5 % des émissions françaises de gaz à effet de serre. À l'échelle de la planète, c'est encore plus, l'acier pesant 7 % des émissions mondiales, soit autant que tous les pays de l'Union européenne réunis. En France, c'est de loin le secteur le plus polluant de l'industrie, avec des rejets annuels de 20 mégatonnes d'équivalent CO_2, quand les secteurs du ciment ou de l'éthylène pour le plastique en rejettent respectivement autour de 10. Les émissions françaises sont concentrées sur six hauts-fourneaux, dont cinq appartiennent à la multinationale ArcelorMittal, deuxième producteur d'acier au monde. *« Dans le classement des 50 sites industriels français les plus émetteurs de CO_2, les deux aciéries ArcelorMittal à Dunkerque et à Fos-sur-Mer sont les deux plus gros pollueurs en site unique »*, précise Romain Su, analyste pour l'ONG SteelWatch, une association qui milite en faveur de la décarbonation de la sidérurgie.

Si la production d'acier pollue autant, c'est à cause du charbon, nécessaire à la fois pour l'énergie qu'il apporte quand il est brûlé et pour ses atomes de carbone qui renforcent le fer. *« Autant dans d'autres industries, typiquement le ciment, on n'a pas de*



solution encore très claire pour produire sans émettre de CO_2, autant pour l'acier, on peut remplacer le charbon par de l'hydrogène », insiste Romain Su. Ainsi, en se tournant vers de nouvelles technologies, l'acier français pourrait réduire son empreinte carbone de plus de 90 %, selon l'Agence de la transition écologique (Ademe). Mais pour l'heure, aucun acier neuf décarboné ne sort encore des aciéries françaises. En Suède, une usine pilote du projet Hybrit est déjà capable de produire de l'acier sans charbon grâce à la réduction directe par hydrogène. Si ce projet est piloté par de grandes entreprises des secteurs sidérurgiques (SSAB), miniers et énergétiques suédois, en France, la révolution pourrait plutôt venir d'une start-up, nouvelle sur le marché.

GravitHy projette de construire un site industriel de 75 hectares à Fos-sur-Mer, dans le sud de la France. Le chantier devrait commencer dans trois ans. Avec à peine 20 salariés et pas encore trois années d'existence, la start-up veut se faire une place sur le marché de l'acier, réservé jusque-là aux multinationales comme ArcelorMittal. Ses ambitions se fondent essentiellement sur une grande tour de 130 mètres de haut, le cœur du réacteur : c'est là que se trouve le four qui fabriquera de l'acier, avec un processus reposant entièrement sur l'hydrogène. Autour d'elle, d'énormes électrolyseurs, tels des containers alignés, produiront l'hydrogène nécessaire.

Ce four dit à réduction directe est le petit frère des hauts-fourneaux de la filière traditionnelle. Retour aux fondamentaux : aujourd'hui, pour fabriquer de l'acier, le minerai de fer est mélangé à du charbon à haute température dans un haut-fourneau. La réaction entre le carbone du charbon et le minerai de fer permet d'obtenir de la fonte, dont une partie du carbone est ensuite retirée pour obtenir l'acier (*voir l'infographie*). Dans un four à réduction directe, ce n'est pas l'atome de carbone du charbon qui réagit avec le minerai de fer, mais l'atome d'hydrogène. Le produit qui sortira du four est appelé « fer pré-réduit ». Il est constitué de fer pur, consolidé par quelques atomes de carbone (moins de 2 %), introduits également dans le four lors de la réduction directe. Il pourra être fondu pour devenir de l'acier. Plus aucune trace de charbon dans ce procédé. Et au lieu de rejeter du CO_2 comme dans un haut-fourneau traditionnel, la réaction chimique entre l'hydrogène et le minerai de fer dans le four à réduction directe produira seulement de l'eau.

15 millions de tonnes
La production annuelle d'acier français.

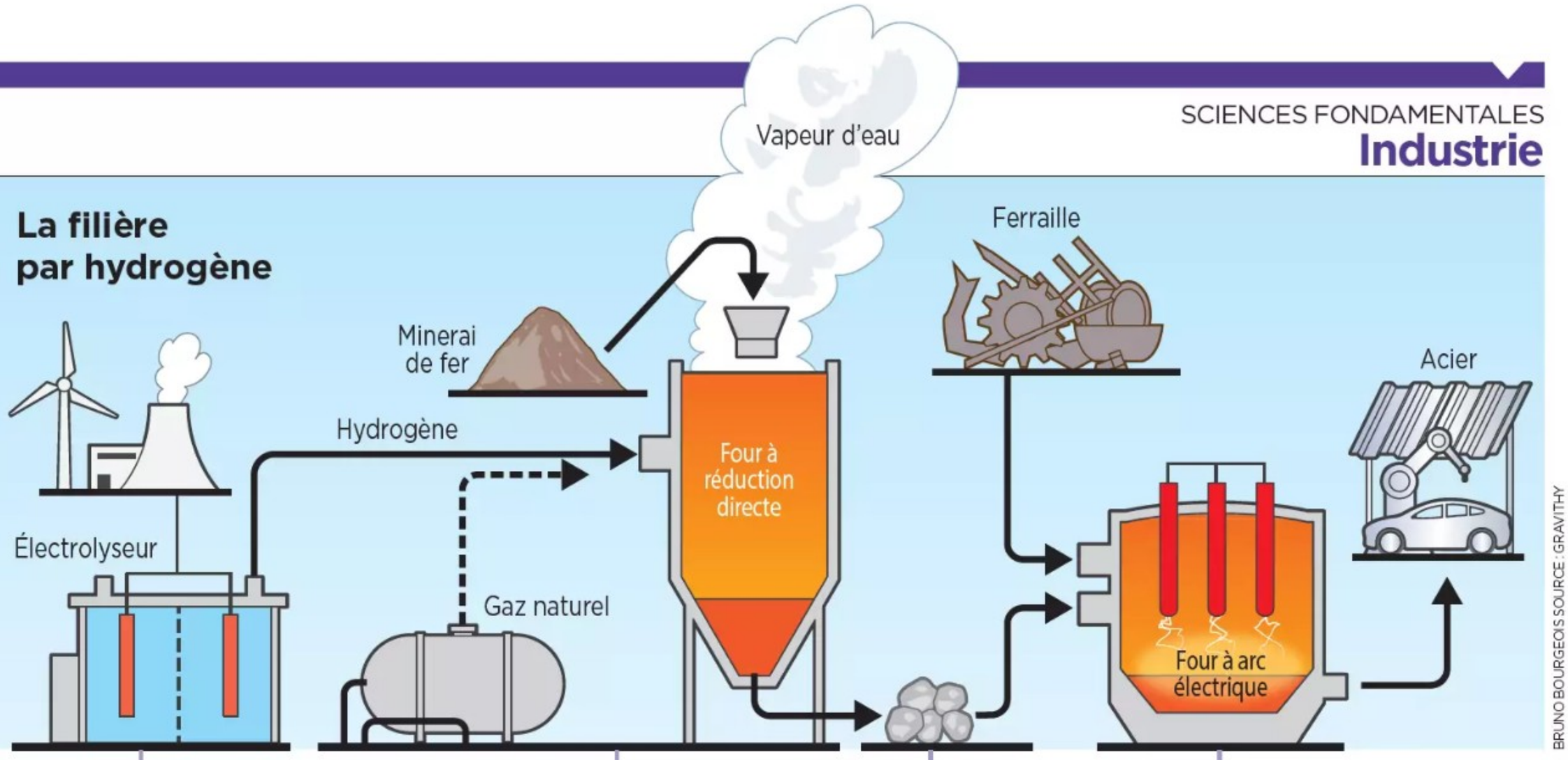
16,5 millions de tonnes
La consommation française d'acier.

20 $MteqCO_2$
(mégatonnes d'équivalent CO_2). Les émissions annuelles de la sidérurgie.

SOURCE : ADEME (MOYENNE 2015-2019).

Le problème : se procurer de l'hydrogène

« Le réacteur de réduction directe n'est pas nouveau en soi, concède José Noldin, le P-DG de GravitHy. *Mais aujourd'hui, les entreprises qui l'utilisent injectent une proportion de 70 % d'hydrogène et de 30 % de gaz naturel. Nous, nous allons passer à 100 % d'hydrogène.* » Selon les chiffres du comité international LeadIT (Leadership Group for Industry Transition), créé pendant la COP28 à Dubaï (Émirats arabes unis) en 2023, GravitHy fait partie des 17 projets dans le monde qui cherchent à utiliser 100 % d'hydrogène dans leurs procédés pour atteindre une production d'acier complètement décarbonée. Six usines sont en construction en Europe, en Asie et en Afrique.



Pendant ce temps, le géant ArcelorMittal fait marche arrière : fin novembre 2024, il a annoncé suspendre son plus grand projet de décarbonation à Dunkerque. L'objectif était de construire un four de réduction directe qui utiliserait dans un premier temps du méthane (CH_4), dont l'atome de carbone aurait servi à réduire le minerai de fer. De quoi, déjà, diviser par deux les émissions (de 1,8 à 0,95 tonne de CO_2 pour une tonne d'acier). Par la suite, le méthane serait remplacé par un mélange composé de 70 % de gaz naturel et de 30 % d'hydrogène dans le même four à réduction directe. Il aurait fallu alors ajuster les paramètres de température et de vitesse d'écoulement des gaz et du minerai de fer, mais cela aurait permis une nouvelle division par deux des émissions (0,5 tonne). L'usage de l'hydrogène pur ne serait arrivé que dans un troisième temps, six à sept ans après la première mise en service du four à réduction directe, selon Daniel Haffner, en charge du financement des projets de décarbonation chez ArcelorMittal. Les installations auraient dû démarrer fin 2028 et permettre de remplacer l'un des deux hauts-fourneaux en fonctionnement sur ce site. Invoquant un marché en berne, notamment à cause de la concurrence chinoise, la direction a finalement gelé ce projet à 1,8 milliard d'euros, dont 850 millions d'aides de l'État.

Au-delà des financements, le problème pour tous les acteurs ambitionnant de produire un acier sans charbon reste l'hydrogène lui-même. *« Les besoins de GravitHy, 100 000 tonnes d'hydrogène par an, ça n'existe pas »*, admet José Noldin. Il n'y a pas d'hydrogène à acheter sur le marché mondial. Selon l'Agence internationale de l'énergie, la quasi-totalité de l'hydrogène utilisé dans l'industrie, soit 53 millions de tonnes en 2022, est produite sur site par les entreprises qui en font usage. Certains projets, notamment en Espagne, cherchent à produire de l'hydrogène vert (à base d'énergies renouvelables) pour la vente, mais aucun ne devrait être sur le marché avant 2030. HyDeal España devrait par exemple construire des pipelines qui viendront irriguer la France depuis Barcelone avec de l'hydrogène produit à l'énergie solaire. La solution est donc toute trouvée. GravitHy va produire son propre hydrogène sur le site de l'usine de Fos-sur-Mer à l'aide de dizaines d'électrolyseurs.

Il faut s'attendre à une hausse du prix de l'acier

« Même s'il est vrai qu'il faut s'attendre à un prix légèrement au-dessus de celui de l'acier fabriqué de manière traditionnelle, il reste raisonnable », indique le responsable de la communication de GravitHy, refusant de dévoiler les chiffres exacts. L'Ademe a calculé que si la production d'acier française opérait une transition complète vers une filière hydrogène, le prix de production d'une tonne d'acier doublerait presque. Dans son rapport, elle précise que *« ces hausses doivent néanmoins être mises au regard d'une multiplication par 1,9 à 3,1 du coût de production si les installations de la filière hauts-fourneaux se maintenaient*

GRAVITHY COMMUNICATION

« Le réacteur de réduction directe n'est pas nouveau en soi, mais nous, nous allons l'utiliser avec 100 % d'hydrogène »
José Noldin, P-DG de GravitHy

RESSOURCE

Les limites du recyclage de l'acier

« *Le recyclage reste le levier le plus efficace pour décarboner l'acier.* » Adeline Pillet, spécialiste de la décarbonation à l'Ademe, insiste sur les économies d'énergie et de matière qu'offre la filière secondaire. « *Mais on ne pourrait pas passer à 100 % d'acier recyclé* », précise Romain Su, analyste pour l'ONG SteelWatch. La ferraille — c'est-à-dire les déchets d'acier ou de fonte — qui alimente les fours à arc électrique, « *c'est l'acier produit il y a dix ans pour les voitures et il y a quarante ans pour le bâtiment. Comme la consommation augmente, notamment dans des pays comme la Chine et l'Inde, la ferraille collectée ne suffit pas à couvrir les besoins mondiaux actuels* », estime-t-il. Outre la quantité, la qualité limite aussi les possibilités de recyclage. « *Les câbles en cuivre ne sont pas séparés de la carrosserie quand les voitures sont broyées en casse. Et ce cuivre rend l'acier plus fragile* », explique Romain Su. Cet acier recyclé ne convient donc pas à certains cahiers des charges, ceux de l'industrie automobile ou des emballages alimentaires par exemple. Les clients des recycleurs sont plutôt à trouver du côté du bâtiment ou des rails de chemin de fer. Mais la ferraille de bonne qualité est une ressource prisée. « *Aujourd'hui, une partie de notre ferraille de bonne qualité est exportée parce que ça peut être plus intéressant économiquement d'aller recycler notre matière dans d'autres pays plutôt que chez nos recycleurs français. Donc le premier défi, c'est déjà de pouvoir garder nos déchets sur le territoire national* », analyse Adeline Pillet.

JEAN MARIE HOSATTE/REA

La qualité de l'acier récupéré peut réduire la capacité de recyclage (ici, la casse automobile GPA, dans la Drôme).

▸ *jusqu'en 2050, du fait de la hausse du prix du CO_2* », faisant référence à la taxe carbone sur les émissions des entreprises. Mais pour effectuer cette transition vers l'hydrogène, il faut de l'énergie, beaucoup d'énergie. Pour produire les deux millions de tonnes de fer pré-réduit ambitionnées par GravitHy, l'électrolyse devrait consommer plus de 6 térawattheures (TWh) d'électricité chaque année. Ajoutez 2 TWh notamment pour chauffer l'hydrogène avant son entrée dans le four, et vous obtenez une consommation annuelle de l'ordre de 8 TWh, soit… celle d'une ville de 3,6 millions d'habitants ! José Noldin a déjà signé des accords entre GravitHy et RTE, la société en charge du réseau électrique français, pour alimenter ses électrolyseurs en électricité : « *Il y a deux projets. D'abord, RTE va renforcer la ligne à haute tension existante, puis elle va en construire une nouvelle. Nous sommes dépendants de ces travaux parce qu'aujourd'hui, il n'y a pas la capacité électrique dont nous aurions besoin.* » La start-up a aussi signé un contrat avec EDF pour garantir une partie importante du volume qui va être consommé.

Construire un écosystème avec les infrastructures nécessaires

Plus que les quantités d'électricité nécessaires, ce sont surtout les concentrations des besoins qui vont poser problème, selon Adeline Pillet, experte à l'Ademe. « *Si on se dirigeait vers une filière de l'acier fondée sur les technologies hydrogène, on multiplierait par 5,2 la consommation d'électricité, et cette consommation serait très localisée.* » Or, il faut compter une dizaine d'années pour créer une nouvelle ligne à haute tension. « *Si je prends l'exemple de la zone industrielle de Fos-sur-Mer, on a d'autres industriels comme des raffineries, des vapocraqueurs dans l'industrie pétrochimique, etc., et l'électrification est aussi un levier pour décarboner ces industries-là. Donc on ne peut pas regarder à l'échelle d'un seul site industriel, il faut que tout l'écosystème travaille ensemble pour construire les infrastructures nécessaires* », constate Adeline Pillet. L'Ademe estime qu'il faudra planifier et prioriser les demandes de raccordement pour des projets de décarbonation. Diversifier et répartir les sites de production est aussi une piste pour que le secteur de l'acier sans charbon soit viable.

L'experte de l'Ademe suggère de ne pas négliger une autre technologie, certes moins à la mode, mais prometteuse : l'électrolyse du fer, qui consiste à dissoudre le minerai dans un bain conducteur où circule un courant électrique pour obtenir du fer pur. Bien que son développement en laboratoire soit moins avancé que celui de la réduction directe par hydrogène, cette technologie a l'avantage de requérir des modules de production plus compacts, pouvant être répartis sur le territoire afin de décentraliser la demande en électricité. ■

En charge d'étudier les effets de l'énergie noire sur l'expansion de l'Univers, la mission DESI fournit la carte en 3D la plus précise du cosmos. La Terre se situe au centre de l'image, entre ces deux éventails de données dont chaque point représente une galaxie.

L'énergie noire ébranle la cosmologie

Les dernières données de la mission DESI révèlent que, loin d'être une constante, l'énergie noire semble évoluer au fil du temps. Une découverte majeure qui pourrait éclairer d'autres énigmes cosmologiques, comme la masse des neutrinos, la mesure de l'expansion de l'Univers et, pourquoi pas, l'antimatière.

DESI COLLABORATION/DOE/KPNO/NOIRLAB/NSF/AURA/R. PROCTOR

L'énergie noire livre enfin quelques-uns de ses secrets sous le regard de DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument). La collaboration internationale vient de publier un deuxième lot de données, quatre ans après la mise en route de l'instrument installé à l'Observatoire de Kitt Peak, en Arizona (États-Unis). Ces résultats confirment une tendance déjà observée en avril 2024 : l'énergie noire, responsable de l'accélération de l'expansion cosmique, ne serait pas une constante, mais une force en évolution. « *Ce que nous avions détecté il y a un an maintenant est confirmé, avec presque trois fois plus de mesures* [14 millions de galaxies contre 6 millions en 2024], s'enthousiasme Nathalie Palanque-Delabrouille, astrophysicienne et porte-parole de la collaboration DESI de 2018 à 2024. *Il ne s'agit pas d'un simple effet statistique. L'énergie noire semble bel et bien évoluer dans le temps, ce qui constitue un changement majeur de paradigme en cosmologie.* » DESI a pour objectif final de répertorier 40 millions de galaxies situées entre 1 et 12 milliards d'années-lumière de nous. De quoi constituer la carte la plus précise de l'Univers, de sa composition, et ▶

de son évolution. Or, justement, l'Univers est en expansion accélérée, un phénomène découvert en 1998 et attribué à cette mystérieuse force qualifiée — faute de mieux — d'« énergie noire ». Jusqu'à présent, les observations semblaient compatibles avec une interprétation simple : cette énergie serait une constante cosmologique, une propriété intrinsèque de l'espace-temps, une pression du vide répulsive et répartie de manière uniforme. Les nouveaux résultats du projet DESI bouleversent cette vision…

Ils s'appuient sur l'étude des oscillations acoustiques des baryons (catégorie de particules comprenant les neutrons et les protons), un phénomène moins complexe que ne le suggère leur nom. *« Ces oscillations sont le résultat d'ondes de pression qui ont parcouru l'Univers primordial avant que la lumière puisse s'en échapper, 380 000 ans après le Big Bang* [pour constituer le fond diffus cosmologique], explique l'astrophysicienne. *Ces ondes ont créé des endroits plus denses que d'autres en matière et énergie. Cela a constitué une empreinte caractéristique dans la distribution des galaxies que nous pouvons encore observer aujourd'hui. »*

En effet, l'écart qui sépare les amas de galaxies, environ 450 millions d'années-lumière, est la conséquence directe de ces inhomogénéités qui ont grandi avec l'Univers. *« Les oscillations acoustiques des baryons n'évoluent que sous l'effet de l'expansion,* renchérit la chercheuse. *En mesurant la distribution des galaxies à différentes époques, et en déduisant la signature de ces oscillations, nous retraçons la manière dont l'Univers s'est dilaté. Cela en fait l'un des outils les plus puissants dont disposent les cosmologistes pour mesurer l'expansion et contraindre la nature de l'énergie noire. Grâce à DESI, nous avons la capacité de le faire avec une précision inégalée. »*

L'énergie noire n'est ni une constante, ni une illusion

Les mesures révélées indiquent que l'énergie noire n'est pas une constante… Alors, qu'est-elle ? La question est d'autant plus cruciale que DESI fermerait la porte à des théories excluant l'énergie noire, et selon lesquelles l'accélération de l'expansion de l'Univers s'expliquerait uniquement par une modification des lois de la gravitation. Pour tester cette hypothèse, les scientifiques ont étudié en détail la manière dont les galaxies se regroupent sous l'effet de la gravité. Jusqu'à présent, aucune anomalie n'a été détectée : la gravité semble bien suivre les prévisions de la relativité générale d'Einstein, même à des échelles colossales de plusieurs milliards d'années-lumière. *« Nos données confirment que la gravité fonctionne comme prévu, ce qui renforce l'idée que l'accélération de l'expansion est bel et bien due à une composante énergétique supplémentaire* [l'énergie noire] », conclut la chercheuse.

Si l'énergie noire n'est pas une constante cosmologique, ni une illusion due à la gravitation, il faut envisager d'autres hypothèses, qui sont sur la table depuis des années déjà. L'une des plus étudiées suppose que l'énergie noire serait por-

AUDOIN DESFORGES / PASCO&CO

TROIS QUESTIONS À

DAVID ELBAZ

DIRECTEUR DE RECHERCHE AU CEA PARIS-SACLAY

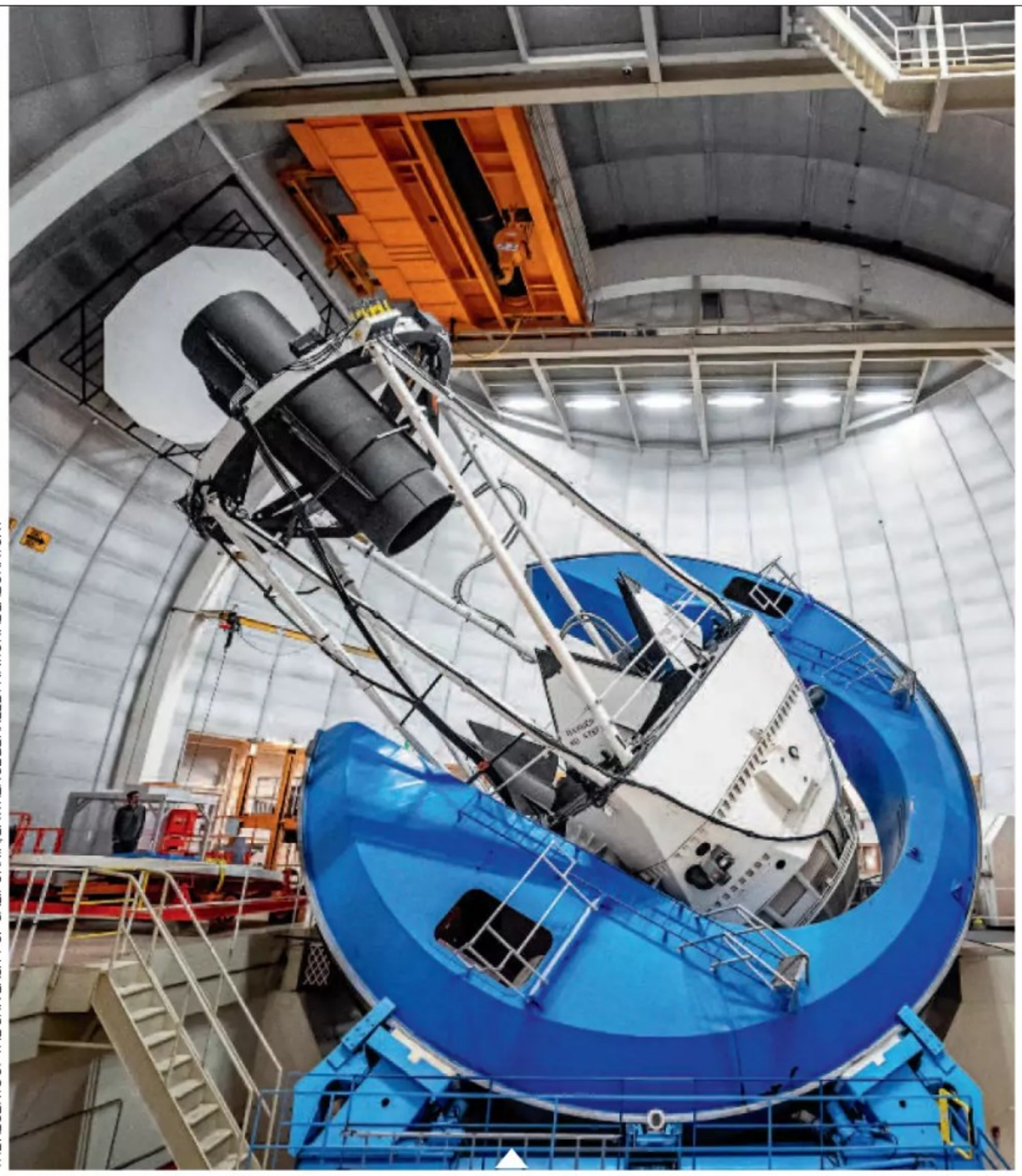
« Cela promet l'avènement d'une nouvelle physique »

Comment réagissez-vous aux premiers résultats de DESI ?
Ils montrent un écart avec ce qui était attendu, c'est extraordinaire ! Ils peuvent être affectés d'incertitudes, mais le niveau de confiance de ces mesures est déjà impressionnant. Ils suggèrent que l'énergie noire a eu une phase de croissance puis de décroissance. C'est un résultat majeur, qui promet l'avènement d'une nouvelle physique. À quel point ? Cela reste à définir.

Cette fluctuation de l'énergie noire pourrait-elle expliquer d'autres phénomènes mystérieux de l'Univers ?
La fluctuation de l'énergie noire pourrait être liée à des champs scalaires *[lire ci-contre]*. Il y a plusieurs candidats. Par exemple, les axions, des particules inventées pour briser certaines symétries fondamentales entre particules, notamment en fonction de leur charge. Ils pourraient non seulement expliquer l'énergie noire, mais aussi l'absence d'antimatière dans l'Univers.

Euclid, la mission de l'ESA qui étudie l'énergie noire et la matière noire depuis l'espace, vient également de publier de premiers résultats. Confirment-ils ceux de DESI ?
Il est trop tôt pour le dire. Ces articles valident la qualité des observations, mais l'objectif d'Euclid est d'établir des cartes précises de la répartition de la densité de matière dans l'Univers à différentes époques. Pour cela, il est nécessaire de collecter une très grande quantité de données sur de vastes régions du ciel. Cela prendra au moins un an avant de pouvoir comparer avec DESI. ■

Propos recueillis par Sylvie Rouat


THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA, LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY

L'instrument DESI, situé dans le télescope Mayall de l'Observatoire de Kitt Peak (États-Unis), fournit le spectre optique de millions de galaxies dans l'Univers.

tée par un champ scalaire dynamique. Ce concept délicat revient à considérer que les particules se trouvent uniquement sous la forme d'un champ d'énergie. C'est un peu comme lorsque l'on verse des gouttes d'eau dans un verre : elles cessent d'exister sous la forme de gouttes pour se diluer dans le contenu du verre, constituant en quelque sorte « un champ de gouttes d'eau ». L'avantage de la théorie des champs, c'est que l'on peut trouver des configurations où la pression exercée par le champ est effectivement répulsive, une caractéristique fondamentale de l'énergie noire. Par ailleurs, ces champs scalaires existent : le boson de Higgs par exemple, responsable de la masse des particules, est la particule associée au champ scalaire de Higgs. Mais il reste à trouver quel est le champ responsable de l'énergie noire… Cette énergie noire fluctuante pourrait aussi avoir un impact sur la constante de Hubble, qui mesure le taux d'expansion de l'Univers. *« Nos résultats sont une piste prometteuse pour comprendre pourquoi les différentes méthodes de mesure de la constante de Hubble ne s'accordent pas parfaitement »*, précise Nathalie Palanque-Delabrouille. DESI montre que, dans le cadre d'un modèle d'énergie noire statique (constante cosmologique), l'évaluation de la constante de Hubble varie selon les sondes exploitées, ce qui pourrait expliquer en partie un désaccord entre les mesures de l'expansion obtenues à partir du fond diffus cosmologique et celles issues de l'observation des galaxies bien plus proches de nous dans l'espace et le temps.

Autre énigme de la physique concernée par les résultats de DESI, la masse des neutrinos, ces particules élémentaires qui interfèrent peu avec la matière, et dont la masse exacte, très faible, demeure inconnue. DESI établit une limite supérieure encore plus contraignante que les précédentes : la somme des masses des trois espèces de neutrinos existantes doit être inférieure à 0,064 eV/c^2 (électron-volt divisé par la vitesse de la lumière élevée au carré) si l'on suppose une énergie noire sous la forme d'une constante cosmologique. Or, on sait par d'autres méthodes que cette masse ne peut pas être inférieure à 0,059 eV/c^2.

Des données seront collectées jusqu'en 2026, voire 2028

« L'intervalle [0,005 eV/c^2] *se réduit beaucoup et cela attire inévitablement l'attention,* remarque Nathalie Palanque-Delabrouille. *Les neutrinos n'ont plus beaucoup d'espace pour exister, cela exclut même certains modèles. Or, si l'on considère une énergie noire dynamique, nous trouvons cette fois une limite supérieure de 0,16 eV/c^2. Hubble, neutrinos… C'est comme si l'hypothèse d'une énergie noire dynamique permettait à différentes pièces d'un puzzle de se mettre en place. »*

La mission, qui doit encore collecter des données jusqu'en 2026, voire 2028 si la prolongation est validée, prévoit d'atteindre un total de plus de 40 millions de galaxies et quasars observés. De quoi affiner encore les contraintes sur l'énergie noire et la structure de l'Univers. Parallèlement, d'autres expériences comme la mission spatiale Euclid, qui a récemment commencé ses observations, viendront compléter ces résultats et offrir une vision encore plus détaillée de l'histoire cosmique (*lire l'entretien ci-contre*). *« Nous atteignons une précision inégalée en cosmologie. Cela nous permet de tester des modèles avec un niveau de détails jamais atteint. Et ce n'est que le début… »*, conclut, impatiente, Nathalie Palanque-Delabrouille. ■

Fabrice Nicot

ANTOINE MOREAU/DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR

IA contre IA, ou comment traquer les « deepfakes »

L'apprentissage automatique permet de générer de fausses images, mais peut aussi servir à détecter ces dernières. Depuis les premiers « deepfakes », les méthodes ont beaucoup évolué.

L'apparition des *deepfakes*, contenus (photos, vidéos, voix) créés par apprentissage automatique, a fait émerger un champ de recherche à part entière : celui de leur détection, utilisant aussi l'apprentissage automatique. Au début, certaines techniques débusquaient diverses incohérences dans les images générées : des reflets de lumière, les mouvements labiaux, les clignements d'œil, les couleurs, la résolution, etc. Une équipe du laboratoire CortAIx de Thales a poussé bien plus loin cette approche en novembre 2024, dans le cadre d'un concours de l'Agence de l'innovation de défense (AID), un service de la direction générale des Armées (*lire aussi p. 28*). Elle a mis au point un méta-détecteur qui combine les performances des cinq meilleurs détecteurs du monde académique.

5
Le nombre de méthodes de détection de « deepfakes » combinées par le méta-modèle de Thales.

« Par exemple, si les modèles 1 et 2 ont quasiment tout le temps raison, notre méta-modèle va apprendre à leur faire confiance quand ils sont d'accord, explique Rodolphe Lampe, « data scientist » au sein de l'équipe. *En revanche, si les deux sont en désaccord mais que le modèle 4 donne le même verdict que l'un des deux,*

on va regarder pourquoi. Le méta-modèle apprend ainsi différentes règles. » Chacun des détecteurs analyse des choses différentes dans la structure mathématique des images. Par exemple, un modèle de diffusion fonctionne sur une logique de bruitage/débruitage d'images (*lire l'encadré*). Or, ce mécanisme crée des motifs, plus ou moins réguliers, dans ce bruit. Un réseau de neurones peut apprendre à repérer cette régularité pour identifier l'image comme générée ou non. D'autres détecteurs examinent les « fréquences » d'une image, c'est-à-dire le niveau d'homogénéité (un ciel bleu) ou de variabilité (de nombreux objets disparates).

Une invraisemblance mathématique

Or, à visuel similaire, les *deepfakes* ont une distribution de fréquences qui n'est pas du tout celle des images réelles. Autrement dit, si une IA peut produire une image vraisemblable, elle ne sait pas lui donner une vraisemblance mathématique. *« Bien sûr, un attaquant peut tenter de faire en sorte que les fréquences dans l'image générée ne soient plus si caractéristiques,* reconnaît Christophe Meyer, directeur technique de CortAIx. *Mais, ce faisant, il va provoquer autre chose que l'on va pouvoir découvrir.* »

LE MOT DU MOIS

Modèle de diffusion

Cette catégorie de réseaux de neurones sert de base à des logiciels de génération d'images à partir de descriptions textuelles, comme Dall-E 2, Midjourney ou Stable Diffusion. Le fonctionnement, décrit dans un article de 2020 de l'université de Californie à Berkeley (États-Unis), est inspiré de principes de la thermodynamique. Le modèle part d'images ayant servi à son entraînement pour les bruiter peu à peu, c'est-à-dire qu'il y ajoute des données parasites de manière aléatoire (*forward diffusion*), jusqu'à rendre illisible le contenu. Ensuite, un algorithme d'apprentissage procède à un débruitage progressif (*reverse diffusion*) pour revenir à une image cohérente, soit celle d'origine, soit une création guidée par du texte, voire d'autres images.

Preuve de la sensibilité du sujet, l'Agence de l'innovation de défense s'est associée à l'Agence nationale de la recherche dans un appel à projets sur la guerre cognitive, incluant la lutte contre les *deepfakes*. Jean-Luc Dugelay, enseignant-chercheur à l'école d'ingénieurs Eurecom, et son doctorant Alexandre Libourel y ont répondu par DeTox, une méthode inédite exploitant la biométrie comportementale de personnalités précises (politiques, économiques, militaires). *« Nous nous intéressons à la dynamique faciale,* explique Alexandre Libourel. *Chacun a une façon bien à lui de froncer les sourcils, de hocher la tête, d'osciller la tête, et ces informations peuvent être exploitées pour savoir si, dans une vidéo, les mouvements sont ceux de la vraie personne.* » Pour cela, un algorithme de détection apprend à partir de vidéos authentiques et en tire une signature comportementale faciale qui sera ensuite comparée à un contenu suspect. Délaissant les caractéristiques intrinsèques d'un *deepfake,* il fonctionne sur toute vidéo synthétique, quelle que soit l'IA générative utilisée. Lors des tests, la technique donne de très bons résultats, mais ils s'avèrent meilleurs quand le *deepfake* est un *faceswap* (substitution d'un visage par un autre) plutôt qu'un *reenactment* (animation d'un visage par un tiers).

Il faut cependant réentraîner l'algorithme sur un nouveau corpus d'images dès que l'on veut l'appliquer à une nouvelle personne. *« Mais notre atout est de pouvoir proposer à une personnalité de tourner des vidéos privées spécifiquement pour notre détecteur, en lui demandant des mouvements de tête qui nous arrangent, des expressions, des sourires, avec ou sans lunettes, tout ce que l'on veut pour un meilleur apprentissage des mimiques faciales,* souligne Jean-Luc Dugelay. *Les attaquants n'auront pas ces contenus pour faire leurs* deepfakes, *ce qui nous donne un avantage.* » Dans un contexte où la défense est généralement à la traîne, c'est toujours bon à prendre. ■

Arnaud Devillard

POUR EN SAVOIR PLUS

L'appel à projets Astrid sur la guerre cognitive, incluant la lutte contre les « deepfakes » : **sciav.fr/939astrid**

A. LIBOUREL

> **“ Chacun à une façon bien à lui de froncer les sourcils, de hocher la tête, d'osciller la tête, et ces informations peuvent être exploitées pour savoir si, dans une vidéo, les mouvements sont ceux de la vraie personne ”**
>
> **Alexandre Libourel**, doctorant à Eurecom

BAYWA R.E.

Agrivoltaïsme

Le solaire se met au vert

Environ 200 projets de panneaux photovoltaïques sont en cours de réalisation sur des surfaces agricoles en France. Une aubaine pour certains agriculteurs en mal de rentabilité. Mais les pouvoirs publics ont posé des bornes : les installations ne doivent pas couvrir plus de 40 % de la surface d'un champ et les rendements des cultures ne doivent pas diminuer de plus de 10 %. Les agronomes sélectionnent les plantes les mieux adaptées à cet ombrage artificiel.

Par Loïc Chauveau

L'installation de parcs photovoltaïques sur des terres agricoles se développe en Europe, en association parfois avec de l'élevage (ici à Reichertshofen, en Allemagne).

Quand on est une plante, peut-on raisonnablement envisager de partager son soleil ? La question est existentielle : le végétal a besoin du rayonnement de l'astre pour croître et prospérer. Avec un taux de conversion de 0,2 % de l'énergie solaire seulement, les plantes réussissent l'exploit de produire 82 % de la biomasse totale présente sur Terre. Élément de base de la chaîne alimentaire de tous les autres êtres vivants, leur accès au soleil ne peut être discuté. Pourtant, depuis une dizaine d'années, partout dans le monde, les humains envisagent de les couvrir de panneaux solaires, au rendement de conversion de près de 20 %. Hérésie ?

Les 35 agriculteurs réunis au sein de l'association Pujo Arbouts Territoire Agrivoltaïsme (Patav) ne se voient pas en hérétiques. Plutôt en pionniers. Pujo et Arbouts sont les noms de deux captages d'eau potable alimentant les communes limitrophes de Mont-de-Marsan, la préfecture des Landes. En 2013, à la suite de mesures de pollution dépassant le seuil de potabilité, les agriculteurs cultivant les terres sur le bassin-versant se sont vu interdire tout recours aux pesticides. Plus de maïs, ou alors avec des rendements bien plus faibles. « *Ça nous a mis en colère et on a pensé un temps s'opposer à cette décision qui nous mettait en péril* », reconnaît Jean-Michel Lamothe, agriculteur et producteur d'Armagnac. Mais les 35 exploitants concernés décident plutôt de faire corps. « *Nous nous connaissions plus ou moins car nous étions adhérents de la même coopérative d'utilisation du matériel agricole,* poursuit Jean-Marc Gourdon, membre de Patav. *Nous avons cherché des solutions pour pérenniser nos fermes et c'est ainsi que nous avons pensé aux panneaux solaires.* » Contact ▸

STRATÉGIE

Un important potentiel européen

Quel potentiel pour l'agrivoltaïsme à l'échelle des 27 États membres ? Selon le Centre commun de recherche européen, en installant un térawatt de capacité sur 1 % de la surface agricole utile de l'Union européenne, il serait possible de tripler les 590 GW de puissance installée du photovoltaïque prévus par la Stratégie européenne pour le solaire pour 2030. Tous les pays européens ont aujourd'hui des projets plus ou moins avancés. La recommandation du centre de recherche est de créer une législation renforcée à l'exemple de la France.

est noué avec une filiale d'EDF Renouvelables, Green Lighthouse Développement (GLHD), un développeur de photovoltaïque en milieu rural qui se revendique *« cultivateur d'énergie »*. *« Nous nous positionnons comme des acteurs du développement de territoires ruraux où l'agriculture vit difficilement sur des terres peu riches,* pose Jean-Marc Fabius, cofondateur de l'entreprise qui emploie 50 personnes dans la banlieue de Bordeaux. *L'énergie photovoltaïque intervient comme un complément de revenu qui va permettre de maintenir l'activité agricole et faciliter la transmission des exploitations.* »

En 2025, le projet prend corps. Il est faramineux. Au total, 56 « îlots » ont été définis sur 700 hectares d'emprise du bassin-versant, pour 220 hectares réellement couverts. Le projet représente la pose de 732 000 panneaux, pour un budget global de 260 millions d'euros. C'est le plus gros projet de centrale solaire en France. La production est estimée à 650 gigawattheures (GWh) par an, soit la consommation de 140 000 foyers. Les retombées sont estimées à 1,8 million d'euros par an, auxquels s'ajoutent 1,6 million de revenus fiscaux pour les communes du territoire.

Une rentabilité réservée aux grandes surfaces rurales

Mais les agriculteurs ne se sont pas pour autant transformés en électriciens. Leurs terres doivent rester productives. C'est le contrat imposé par la loi d'accélération des énergies renouvelables de 2023. Le texte définit ainsi le terme désormais consacré d'agrivoltaïsme : *« Installation de production d'électricité utilisant l'énergie radiative du soleil et dont les modules sont situés sur une parcelle agricole où ils contribuent durablement à l'installation, au maintien ou au développement d'une production agricole. »*

Les panneaux ne doivent pas couvrir plus de 40 % de la surface d'un champ et les rendements des cultures ne doivent pas diminuer de plus de 10 %. Ce qui implique que les panneaux se mettent en position verticale pour laisser passer le soleil quand les plantes en ont besoin. Toute installation doit par ailleurs être démontable facilement.

La production d'électricité est donc moins importante que pour des panneaux fixés sur les toits ou pour les centrales occupant des friches incultes. Un frein à l'installation de l'agrivoltaïsme. Et ce n'est pas le seul. De très nombreux terrains n'ont ni l'orientation, ni la topographie qui permet

EXPÉRIMENTATION

Le photovoltaïque est-il bon pour les cultures ?

Comment les plantes réagissent-elles à l'ombrage des panneaux solaires ? Depuis une dizaine d'années, dans le cadre d'appels à expérimentations, l'agrivoltaïsme fait l'objet de recherches en collaboration notamment avec l'Institut national de recherche sur l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (Inrae). Les scientifiques vérifient que les plantes ne pâtissent pas de la proximité de panneaux qui font de l'ombre et établissent un écran pour l'eau, qu'elle vienne du ciel ou qu'elle y reparte par évapotranspiration des cultures. Car la lumière est un facteur limitant pour les plantes et l'ombrage a donc des effets négatifs. Mais les panneaux peuvent aussi retenir l'eau au sol et par conséquent améliorer sa captation par les végétaux. Ainsi, l'agrivoltaïsme peut-il à la fois améliorer les rendements des cultures et procurer une adaptation au changement climatique, notamment en protégeant les plantes des températures excessives et des précipitations tempétueuses. Avant de produire de l'électricité.

Pionnière du secteur depuis 2009, l'entreprise Sun'Agri mesure la croissance d'arbres fruitiers et de vignes sous panneaux dans des sites pilotes. Les derniers résultats, publiés en octobre 2023, indiquent une

MANUEL BLONDEAU/AOP PRESS/MAXPPP

L'ombrage des panneaux solaires sur le domaine expérimental de Nidolères à Tresserre (Pyrénées-Orientales) a permis une augmentation des rendements de la vigne.

GHLD

« C'est un complément de revenu qui va permettre de maintenir l'activité agricole et faciliter la transmission des exploitations »

Jean-Marc Fabius, cofondateur de Green Lighthouse Développement (GLHD)

d'installer des panneaux. Par ailleurs, par définition, les projets se situent dans des zones rurales, donc éloignées des postes transformateurs de RTE, le gestionnaire du réseau électrique. Or, tirer une ligne à haute tension coûte extrêmement cher et rend nombre de projets non rentables. C'est pourquoi GLHD vise de grandes surfaces pour une production importante. *« Nous faisons ainsi des économies d'échelle sur l'achat, l'implantation des panneaux et le raccordement de la production au réseau RTE »*, explique Jean-Marc Fabius. Le raccordement du projet Arbouts se fera par un câble enterré de 225 000 volts sur 23 kilomètres. Coût de l'opération : 29 millions d'euros.

Il est interdit à la manne du solaire de provoquer l'artificialisation de sols fertiles, ce qui est très souvent redouté par les riverains. Les agriculteurs de Patav sont contraints d'adapter leurs cultures. La cameline *Camelina sativa* pourrait être une solution. Cette plante productrice d'huiles servirait d'aliment pour les truites des fermes aquacoles voisines qui cherchent à se passer de la farine de poissons provenant du Pérou. Parmi les autres pistes figure le chia, plante dont les graines sont consommées en alimentation humaine, mais aussi le lin et le chanvre qui, n'ayant pas de ravageurs, n'ont pas besoin de pesticides. Pour tester les interactions entre les panneaux solaires et ces nouvelles cultures, GLHD a créé une plateforme pilote d'un hectare près de Mont-de-Marsan, où ces cultures cohabitent avec huit tables à tracker solaire (qui suivent la courbe du soleil) à deux hauteurs différentes — 1,7 mètre et 2,5 mètres — afin de déterminer la configuration la plus favorable aux plantations. L'espacement entre deux rangées de panneaux est également étudié pour permettre le passage des engins agricoles. En 2024, pour la deuxième année d'expérimentation, le chia, l'asperge blanche, l'asperge verte, le chanvre et la menthe poivrée ont été testés en condition de cohabitation avec les panneaux en relation avec les chercheurs de l'Inrae (*lire l'encadré ci-contre*). Reste que la démarche est contestée.

L'Autorité environnementale (AE), qui donne son avis sur l'impact des projets d'aménagement sur la nature et le climat, s'est déplacée dans les Landes. Si ses conclusions ne condamnent pas le projet, elle a émis cependant des recommandations. Pour l'AE, *« les principaux enjeux environnementaux sont les risques de dégradation de qualité et de fonctionnalité des sols agricoles, la gestion qualitative et quantitative de la ressource en eau sur le long terme, en particulier dans le contexte du changement climatique, l'insertion paysagère du projet, le maintien des continuités écologiques et le recyclage des panneaux photovoltaïques en fin de vie »*. Des points sur lesquels elle demande des assurances.

Des projets contestés par les riverains et les associations

La position de la Sepanso, fédération d'associations de protection de la nature de Nouvelle-Aquitaine, est nettement plus critique. Lors de l'enquête d'utilité publique qui s'est terminée le 7 mai 2024, elle a contesté le fait que l'emprise des panneaux ne constitue pas une artificialisation de ces zones. Pour la Sepanso, au contraire, ces sols se voient retirer leur rôle de pompe à carbone, le projet photovoltaïque ayant alors un effet contraire à son but : lutter contre le changement climatique. Par ailleurs, de nombreuses oppositions de riverains craignant pour les risques d'incendie et l'altération de leur paysage ont été enregistrées. Pour vérifier qu'il n'y a pas de vices cachés dans ces projets, la loi impose que les Commissions départementales de préservation des espaces naturels, agricoles et forestiers (CDPENAF) donnent un avis qui s'impose aux préfets délivrant les autorisations d'exploiter.

Dans les Landes, le projet a franchi ces procédures et devrait entrer cette année dans la phase active de réalisation. Il n'est pas le seul. De très nombreux industriels du secteur photovoltaïque se sont lancés dans cette aventure. C'est qu'en moyenne, en France, chaque hectare de terrain pourrait produire tous les ans ▸

augmentation des rendements de 10 à 45 % selon les cépages et une baisse des besoins en irrigation de 30 à 60 % par rapport aux parcelles témoins sur le domaine viticole expérimental des Nidolères, à Tresserre (Pyrénées-Orientales). En arboriculture, les essais menés sur des cerisiers, sur le site expérimental de Piolenc (Vaucluse), montrent une augmentation de rendement de 15 %. Pour élargir le panel des cultures étudiées, l'Inrae a créé un pôle agrivoltaïque en Charente. *« Nous avons passé des contrats de recherche avec plus de 25 sites pour mesurer finement la réaction des différentes cultures »*, explique Théo Gerardin, chercheur en charge du dossier à l'Inrae. Les premiers résultats montrent bien qu'ombrage et rendement sont intimement liés. Ce qui implique un pilotage très fin des panneaux, au plus près des besoins des plantes.

1140 mégawattheures (MWh). En théorie, les 27 millions d'hectares de surface agricole utile pourraient ainsi remplir plus de 100 fois les besoins en énergie primaire du pays. On compte aujourd'hui environ 200 projets en cours de réalisation et un millier sont en instruction auprès de l'administration. *« Pour atteindre l'objectif de 100 GW de production solaire installée en France en 2050, les sites dégradés ou sans autre utilisation (comme les bords d'autoroute), les toits, les parkings risquent de ne pas suffire, aussi les implantations en zone agricole peuvent constituer une solution complémentaire »*, assure David Gréau, du syndicat des entreprises du solaire Enerplan. Les besoins estimés de l'agrivoltaïsme sur le plan national sont de 60 000 hectares pour une surface agricole utile de 29 millions d'hectares. Dans une étude remise en 2022, l'Ademe (Agence de la transition écologique) souligne la grande diversité des projets, s'appliquant à des territoires très différents habités par des populations plus ou moins sensibles au sujet.

Des reconversions de terrains opportunistes

Voisinent ainsi des initiatives individuelles d'agriculteurs, des démarchages forcenés de développeurs pas toujours scrupuleux, des plans ambitieux concoctés par des coopératives. Par exemple, Dijon Céréales (3400 agriculteurs adhérents, 580 millions d'euros de chiffre d'affaires) a inauguré en avril 2024 une « canopée agricole » sur la commune du Verdonnet, en Côte-d'Or. Cette installation s'étend sur trois hectares de grandes cultures en bio (blé, colza) pour une puissance de 2,4 mégawatts (MW), couvrant les besoins de 1450 personnes. Sans dommage pour la culture. *« Les résultats pour la première campagne sont encourageants, avec, pour les variétés de blés semés en production bio, une levée en hausse de 14 % par rapport à la parcelle témoin voisine de la centrale agrivoltaïque »*, affirme la coopérative.

On trouve aussi de très opportunistes reconversions de terrains. À Fontenet, commune de Charente-Maritime près de Saint-Jean d'Angely, ce sont 81 hectares d'un ancien terrain militaire qui ont été reconvertis en trois centrales solaires d'une puissance de 66 MW après 15 ans de dépollution d'engins explosifs. *« Plutôt que de recourir à des machines pour débroussailler ces grands espaces, nous avons choisi d'installer un éleveur de moutons de race locale,* détaille Renaud Chevallaz-Perrier, développeur de projets chez l'industriel allemand du solaire BayWA r.e. *Mais cette démarche va au-delà d'une prestation d'entretien écologique. C'est une vraie activité agricole. »* Judickaël Richard a pu ainsi doubler son cheptel pour atteindre 250 moutons charolais. *« L'herbe sous les panneaux est protégée du soleil sans que sa croissance soit affectée. Les pâtures ne sont pas grillées l'été, si bien que je n'ai plus besoin de leur apporter du fourrage »*, se réjouit le berger.

Jusqu'où iront les fiançailles entre les mondes si différents de l'agriculture et de l'énergie ? Si la loi de 2023 met bien des garde-fous pour éviter que la terre ne soit plus nourricière et ne serve qu'à produire de l'électricité, les énormes difficultés économiques des agriculteurs pourraient tenter certains de franchir les limites. Et tomber dans l'hérésie. ■

2023 GIANTS SOFTWARE GMBH

La simulation virtuelle « Farming simulator », développée par GLHD, permet notamment aux agriculteurs de tester la circulation des machines dans un système agrivoltaïque.

INNOVATION

Des panneaux transparents pour un meilleur rendement

Une étude italienne parue dans *Nature communications* le 11 mars dernier vient de démontrer l'efficacité de panneaux solaires transparents fabriqués à partir de pérovskite. Menée sur des serres de laboratoire, l'expérience a montré que la filtration des rayons UV sans formation d'ombre sur les cultures donnait des résultats probants sur la culture d'endives *Cichorium intybus var. latifolium*. Les endives sous panneaux ont poussé plus vite et produit des feuilles plus larges que des plantes témoins, malgré une moindre exposition à la lumière.

Du lait et de la viande sans vache

Des techniques innovantes de fermentation permettent de produire des protéines de lait, d'œuf ou des substituts de viande. Des recettes alternatives qui pourraient séduire afin de réduire l'empreinte carbone de l'élevage. Explications.

ONEGOBIO

Ces protéines de blanc d'œuf en poudre (ou ovalbumine) sont obtenues sans faire appel à une poule, par un procédé appelé « fermentation de précision ».

Une mozzarella fabriquée sans vache. Voilà la prouesse réalisée par des chercheurs de l'université de Wageningue (Pays-Bas) grâce au pouvoir naturel de la levure *Pichia pastoris* de la classe des *Saccharomycetes*, capable de synthétiser des protéines en se nourrissant de sucre. *« Cette levure est efficace pour produire les protéines de soie et la gélatine. Et celles-ci ont une certaine ressemblance avec les caséines du lait »*, explique Etske Bijl, la responsable du projet et scientifique des produits alimentaires.

Mais comment une simple levure peut-elle produire des protéines de lait de vache ? Elle est génétiquement modifiée : un fragment d'ADN codant la caséine est intégré dans le génome de la levure. Dans un bioréacteur, les levures sont nourries de carbone et d'azote — apportés dans la nature par l'herbe broutée. Elles se développent alors et produisent des protéines de caséine, qui sont séparées du reste du milieu. *« Cette étape est importante pour ne pas se retrouver avec des résidus de levures génétiquement modifiées dans l'aliment »*, signale Etske Bijl. La poudre obtenue est mélangée à de l'eau, de la graisse végétale et du sel. Le « cocktail » est enfin versé dans des moules mis au réfrigérateur pendant une heure pour obtenir le fromage.

Ce procédé appelé « fermentation de précision » est connu depuis les années 1980 pour fabriquer l'insuline,

des vitamines ou des arômes. Mais c'est depuis moins d'une décennie qu'il a suscité l'intérêt des chercheurs et des entreprises pour produire des protéines de lait telles que la caséine, la bêta-lactoglobuline ou la lactoferrine pour répondre, entre autres, à la nécessité de réduire l'empreinte carbone de l'agriculture, dont l'élevage représente 12 % des émissions de gaz à effet de serre anthropiques. Cette technique est aussi développée pour obtenir des protéines du blanc d'œuf de poule (l'ovalbumine) ou de la myoglobine, une protéine contenant du fer présente dans les muscles des vertébrés et utilisée pour améliorer le goût, l'odeur et l'apparence des substituts de poisson et de viande. « *Il s'agit d'une technologie largement testée dont l'efficacité est reconnue et qui est devenue économiquement compétitive* », déclare Stella Child, responsable Europe de la recherche et des subventions au Good Food Institute.

GFI EUROPE

« Il s'agit d'une technologie largement testée dont l'efficacité est reconnue et qui est devenue économiquement compétitive »

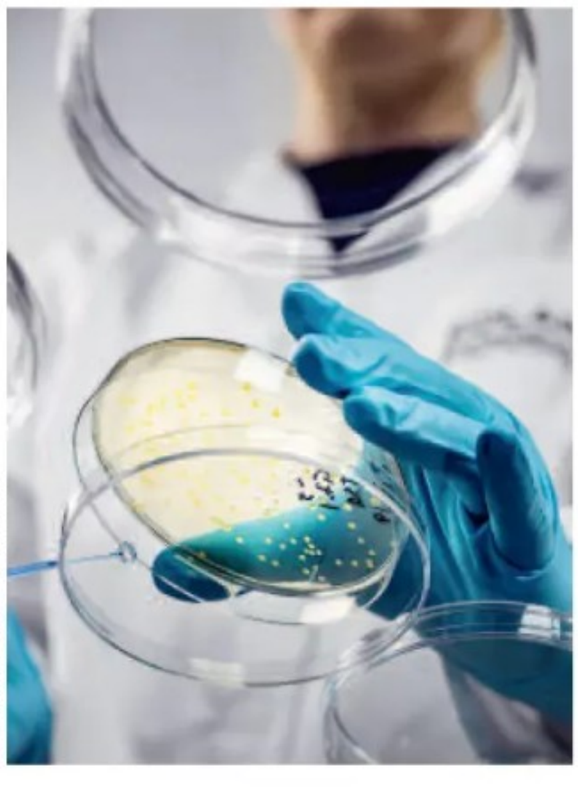
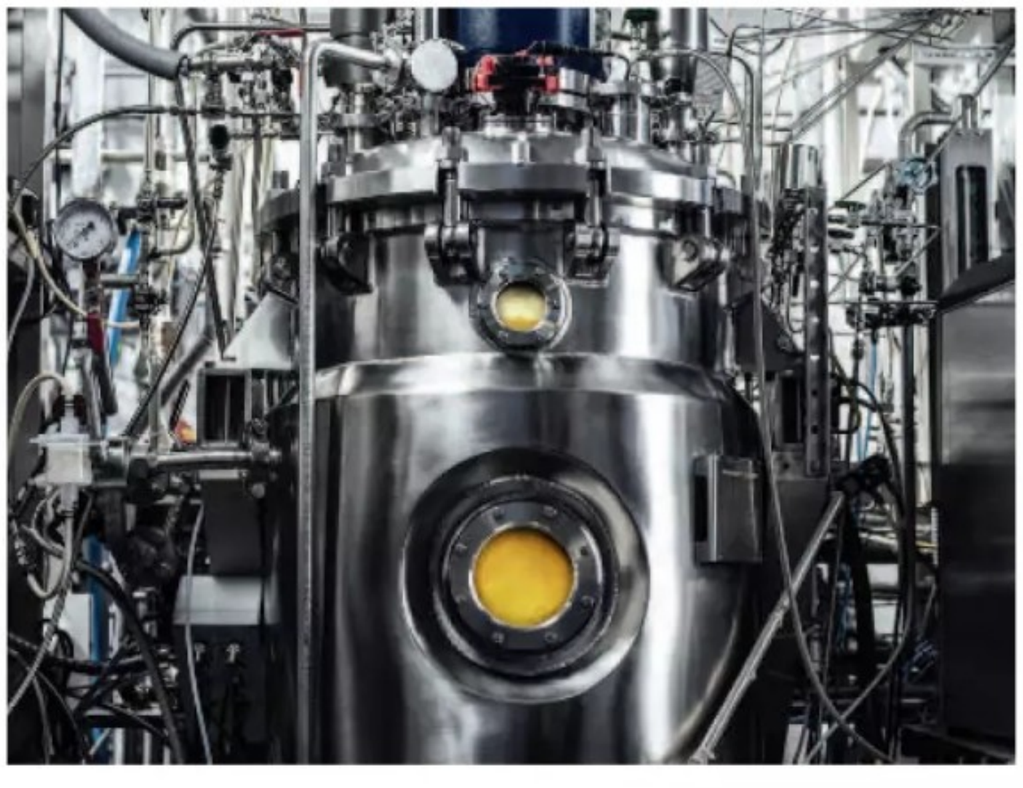
Stella Child, responsable Europe de la recherche et des subventions au Good Food Institute

D'après cette organisation à but non lucratif qui se consacre à la promotion des protéines alternatives, il existerait aujourd'hui une trentaine de start-up spécialisées dans la production de protéines de lait par fermentation de précision, dont la pionnière, l'américaine Perfect Day, et les françaises Verley, Standing Ovation et Nutropy. Les protéines de bêta-lactoglobuline bovine fabriquées par Perfect Day ont reçu le statut Gras (« généralement reconnu comme sûr »), puis l'approbation de la Food and Drug Administration dès 2020 aux États-Unis. Elles y sont commercialisées sous forme de crèmes glacées, de fromage frais à tartiner ou encore de laits aromatisés au chocolat, à la fraise ou à la vanille.

Des substituts de viande à partir de champignons

En revanche, « *aucun produit laitier issu de la fermentation de précision n'a encore été autorisé à la vente sur le marché de l'Union européenne* », assure l'Autorité européenne de sécurité des aliments (Efsa). Celle-ci a néanmoins autorisé la mise en vente de substituts de viande issus d'une autre technique de fermentation, dite de biomasse, qui repose cette fois sur des champignons, microalgues ou bactéries rendus *in fine* comestibles. Le précurseur dans le domaine est le britannique Quorn, qui produit des mycoprotéines à l'aide des champignons *Fusarium venenatum*, en les cultivant dans des fermenteurs à air comprimé. Du glucose, de l'oxygène, de l'ammonium, du potassium, du magnésium, du phosphore et des oligo-éléments y sont ajoutés pour permettre aux champignons de se développer en continu. Des acides aminés sont formés à partir de l'azote présent dans l'ammonium, qui vont à leur tour former des protéines. Le bouillon fermenté obtenu après cinq semaines est passé dans un extracteur où il est chauffé, puis séché et refroidi pour éliminer l'eau. On obtient ainsi des mycoprotéines.

« *Cette technique aboutit à des bactéries ou des levures qui sont consommées dans leur intégralité, contrairement à la fermentation de précision, où les cellules modifiées sont retirées pour ne conserver que les protéines recherchées* », détaille Julia Keppler, de l'université de Wageningue (Pays-Bas). Si l'on prend l'exemple d'un fromage, le produit issu de la fermentation de précision contiendra les protéines originelles du lait, alors que pour celui fabriqué avec la biomasse, les protéines seront complètement différentes et le produit ressemblera davantage à un fromage végétal. Mais la fermentation de biomasse, associée à la technologie

TUUKKA KOSKI/ SOLAR FOODS

NOUVELLES PROTÉINES

Les consommateurs prêts à tenter l'expérience

Selon une étude publiée en 2021 sur l'acceptation par les consommateurs des produits laitiers issus d'une fermentation de précision en Allemagne, Inde, États-Unis, Royaume-Uni et Brésil, *« 78,8 % des consommateurs se sont déclarés susceptibles ou tout à fait susceptibles d'essayer un tel produit, et 70,5 % ont probablement ou tout à fait l'intention de l'acheter. »*
« Parmi les facteurs qui influencent l'acceptation ou le rejet de ces nouveaux aliments, les réactions phobiques et émotionnelles (le dégoût par exemple), ainsi que les préoccupations relatives au goût, au prix et à la santé, jouent un rôle essentiel », énumère Pericle Raverta, doctorant en sciences de la consommation à l'université de Turin (Italie), dont la thèse porte sur l'acceptation des protéines alternatives. Selon des travaux publiés en 2023 dans *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, présenter la fermentation de précision comme naturelle plutôt que durable suscite des attitudes plus positives auprès des consommateurs. *« De nombreux consommateurs ne savent pas que des produits tels que la présure microbienne, utilisée dans certains fromages, le chocolat ou le thé, impliquent une fermentation »*, rappelle le chercheur.

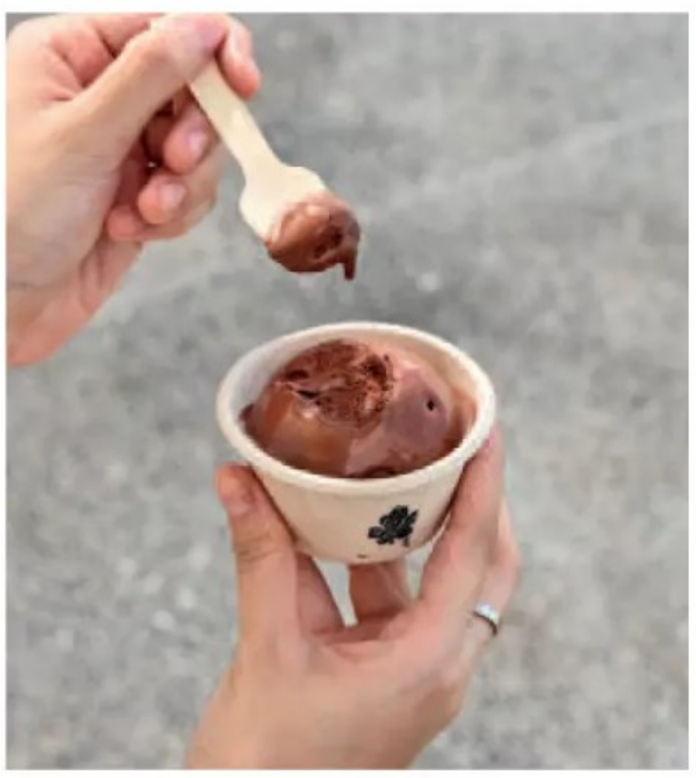
d'extrusion à haute teneur en humidité (qui modifie la forme, la couleur, la texture et l'apparence pour obtenir quelque chose ressemblant à de la vraie viande), permet de fabriquer des *« morceaux de poulet assez proches du vrai poulet »*, assure la scientifique. Avec l'avantage de ne pas contenir de méthylcellulose, un liant et un agent texturant souvent présent dans les substituts de viande actuels pour y ajouter de la jutosité, mais qui est aussi un additif alimentaire marqueur d'ultratransformation.
Les techniques de fermentation de précision et de biomasse font face aujourd'hui à des défis d'ordre technique : passage à l'échelle industrielle, coûts de production, risques de contamination, etc.

En Europe, le principal frein est la réglementation Novel Food (nouveaux aliments), qui nécessite un niveau de preuves important avant toute mise sur le marché. *« C'est l'éléphant dans la pièce »*, soutient Olivier Tomat, directeur du département Entreprises de Genopole, premier centre consacré aux biotechnologies en France. *« Beaucoup de questions demeurent, que ce soit sur la digestibilité de ces produits ou leurs effets sur la santé, et les régulateurs ont besoin d'être certains de leur sûreté »*, confirme Karen Polizzi, professeure de biotechnologie à l'Imperial College de Londres (Royaume-Uni) et codirectrice du Centre national d'innovation en protéines alternatives (Napic). Philip Howard, membre d'Ipes-Food et professeur spécialiste des changements dans les systèmes alimentaires à l'université d'État du Michigan (États-Unis), évoque ainsi les réactions allergiques et gastro-intestinales, potentiellement mortelles. Celles-ci avaient été constatées chez des personnes ayant consommé la mycoprotéine de Quorn dans une étude publiée en 2018, soit plus de trente ans après la commercialisation du premier produit de la marque.

Ne pas s'attendre à une copie identique

Reste enfin à observer l'accueil que réserveront les consommateurs à ces nouvelles protéines *(lire l'encadré)*. Pasi Vainikka, cofondateur de l'entreprise finlandaise Solar Foods, qui concocte par fermentation de biomasse une poudre jaunâtre baptisée Solein et contenant 75 % de protéines, espère que *« la curiosité l'emportera sur la suspicion »*, avançant que neuf clients sur dix ont testé la glace au chocolat faite à partir de Solein dans le restaurant étoilé Fico, à Singapour — premier pays à avoir autorisé cette poudre en octobre 2022. *« Il suffit probablement de nous exposer plus souvent à des solutions alternatives et de ne pas nous attendre à une copie identique pour que ces produits deviennent un choix acceptable »*, conclut Julia Keppler. ■

Chisato Goya



◀ **À partir de l'air ambiant et de microbes** prélevés dans les sols proches de la mer Baltique et placés dans des cuves, la société finlandaise Solar Foods fabrique par fermentation de biomasse une poudre, le Solein, contenant 75 % de protéines, qui se substituent à celles du lait dans cette glace au chocolat.

La station polaire Tara à l'assaut des glaces

Le navire en aluminium de forme ovale a été conçu pour résister aux fortes pressions de la banquise. L'an prochain, la première dérive dans les glaces du Grand Nord de ce laboratoire polaire sera centrée sur l'analyse des écosystèmes arctiques.

Ce 4 avril, Romain Troublé, directeur général de la fondation Tara, quitte le port de Cherbourg le cœur gonflé d'émotion. La veille a eu lieu le « transfert de propriété », une sorte de remise des clés de la nouvelle station polaire par les Constructions mécaniques de Normandie (CMN). Le soir même, l'équipage se prépare à passer sa première nuit à bord. Dans quelques jours, le navire aux allures de soucoupe flottante prendra la mer pour sa première navigation vers Lorient, son port d'attache. « *Voici venu le temps de l'apprivoiser, de comprendre comment il se comporte en mer. La prise en main est toujours un moment délicat* », explique Romain Troublé.

Après un chantier de près de deux ans, c'est la concrétisation d'une esquisse réalisée en 2014 par Romain Troublé et Étienne Bourgois, président de la fondation Tara. Conscients que l'Arctique est à l'avant-poste du changement climatique, les deux hommes s'interrogeaient sur la nécessité de revenir dans la région pour documenter les bouleversements en cours et leur impact sur la biodiversité. À l'issue de la dérive transpolaire accélérée de la goélette *Tara* en 2008 (*lire l'encadré*), les scientifiques avaient en effet constaté qu'un nouveau régime des glaces, plus jeunes, fines et donc susceptibles de fondre l'été, était en train de se mettre en place. Mais en 2013, lorsque *Tara* était revenue dans les eaux boréales pour des analyses biologiques, il était apparu que les prélèvements réalisés sur un pont balayé par des vents polaires étaient excessivement difficiles. D'où l'idée d'un nouveau vaisseau qui reprendrait le dessin de la coque arrondie et aplatie de *Tara*, conçue pour échapper à la pression des glaces en étant soulevée en surface par ces forces puissantes. Et puisqu'il s'agit de se laisser porter par la banquise et non de s'y frayer un chemin, nul besoin d'une étrave. Germe alors l'idée d'un vaisseau rond.

Au fil des réflexions avec l'architecte naval Olivier Petit, il deviendra ovale afin de garder la manœuvrabilité d'un bateau pour ses transits en mer. Aujourd'hui achevée, la station polaire Tara mesure 26 mètres de long pour un poids à vide de 233 tonnes. Sa coque en aluminium a une épaisseur de 20 millimètres — trois fois plus que celle d'un bateau classique —, ce matériau ayant été choisi pour sa résistance aux basses températures, contrairement à l'acier qui peut devenir cassant. « *La partie immergée contient une structure alvéolée de 5000 pièces qui rigidifie la coque* », détaille Ludovic Marie, chargé du programme Tara aux CMN. Pour maintenir

EXPÉDITION

La goélette « Tara », témoin de la dérive transpolaire accélérée

En 1881, la *Jeannette*, un navire américain qui tentait d'atteindre le pôle Nord, s'est disloquée sous la pression des glaces dans le détroit de Béring. Des débris du bateau retrouvés quelques années plus tard au large du Groenland laissaient penser qu'il existait un courant marin à l'œuvre sous la banquise. En 1893, le Norvégien Fridtjof Nansen explora cette hypothèse avec son navire, le *Fram*, dont l'architecture a inspiré celle de la goélette *Tara*. Le *Fram* dérivera dans les glaces trois ans durant. En 2006, *Tara* se laissa à son tour dériver dans la banquise, un voyage qui durera 507 jours — deux fois plus rapide que celui du *Fram*. Cette dérive a mis en lumière les bouleversements en cours dans la région : 70 % du volume de sa banquise a disparu en quarante ans…

Le vaisseau ovale de 26 mètres de long et 16 mètres de large, prêt à quitter le port de Cherbourg le 4 avril. Pourvu de cinq laboratoires, il embarquera des scientifiques du monde entier au cours de plusieurs missions de dérive polaire jusqu'en 2045.

MAEVA BARDY-FONDATION TARA OCEAN

l'intérieur de la station à environ 20 °C quand il règne à l'extérieur des températures de -20 °C à -40 °C, les parois sont couvertes de laine de roche et de feuilles d'aluminium, atteignant par endroits une épaisseur de 30 centimètres.

La mission Polaris 1 devrait durer 18 mois

Le cœur de la station est occupé par la « Moon Pool », un cylindre creux fermé par une trappe, qui plonge sous la banquise. Les scientifiques y descendront une rosette, un dispositif conçu pour mesurer les paramètres physico-chimiques de l'océan et prélever des échantillons d'eau. À terme, ils y plongeront des drones sous-marins. Équipée d'éoliennes et de panneaux solaires, la station recycle également les huiles de cuisson usagées pour la fourniture d'énergie. Outre les espaces de vie — dont 12 cabines, un sauna et une salle médicalisée —, elle dispose de cinq laboratoires spacieux, notamment une chambre froide consacrée à l'étude des carottes de glace. Des capteurs sont fixés à la coque et à la quille. Des expériences seront également menées en aérien, à l'aide par exemple de ballons-sondes, en vue de mieux comprendre les interactions entre océan, glace et atmosphère. L'équipage de 12 personnes en hiver et 18 en été sera composé de scientifiques, marins et médecin.

Après des semaines d'aménagement de ces espaces, la station quittera Lorient début juin pour mettre le cap sur Longyearbyen, en Islande. Elle y a rendez-vous le 7 juillet avec le brise-glace allemand *Polarstern*, qui doit lui frayer un chemin dans les glaces. Si tout se passe bien, la station devrait ensuite remonter au sud du Groenland. La première dérive transpolaire, nommée Polaris 1, est prévue à partir d'août 2026. Elle devrait durer dix-huit mois, dont quatorze dans les glaces, *« à raison d'environ 10 kilomètres par jour sous l'action du courant transpolaire et des vents,* indique Martin Hertau, premier capitaine du bateau au départ de Cherbourg. *Mais aujourd'hui on prévoit que l'océan Arctique sera libre de glaces estivales à l'horizon 2035 : les dérives seront sans doute de plus en plus rapides.* » Pendant vingt ans, une nouvelle mission transpolaire devrait ainsi avoir lieu tous les deux ans.

« La mission Polaris 1 sera centrée sur les écosystèmes arctiques, souligne Chris Bowler, biologiste à l'École normale supérieure et coordinateur scientifique du projet. *Car le climat et la biologie sont intimement liés : certains micro-organismes arctiques jouent un rôle clé dans la formation des nuages et la régulation du climat. Comprendre ces processus est crucial pour anticiper les changements à venir.* » ■ **Sylvie Rouat**

Hypertension
Le tueur silencieux

55 000 personnes décèdent chaque année en France des conséquences d'une tension artérielle élevée et près d'un adulte sur trois en souffre. Des mesures d'hygiène de vie, comme une meilleure alimentation, peuvent prévenir cette affection le plus souvent silencieuse. Pour les formes les plus sévères, outre les traitements actuels, des thérapeutiques plus performantes sont à l'étude.

Par Sylvie Riou-Milliot

Faites-vous partie de ces hypertendus qui s'ignorent (huit millions de personnes en France) ou bien connaissez-vous précisément vos chiffres de tension artérielle (TA) ? 12/7, 13/9 ou 15/10… Exprimés en millimètres de mercure (soit 120/70 mmHg, mais on dit 12/7), ils reflètent les mesures de pression dites systolique et diastolique *(voir l'infographie ci-contre)* qui s'exercent sur les parois des artères, à chaque battement du cœur. Avant l'automne 2024, tout était simple (ou presque). Soit on avait 120/70 et l'on était « normo-tendu », soit on avait plus, 140/90 et au-delà, et l'on était « hypertendu » — comme 17 millions de personnes en France, soit un adulte sur trois. Désormais, selon les dernières recommandations, la Société européenne de cardiologie a associé la zone grise des chiffres intermédiaires, ceux compris entre 120 et 139, à la notion de « pression artérielle élevée ». Par conséquent, vous êtes peut-être désormais un pré-hypertendu qui s'ignore. *« On ne devient pas hypertendu du jour au lendemain,* assure la Pr Béatrice Duly-Bouhanick, endocrinologue au CHU de Toulouse et ancienne présidente de la Société française d'hypertension artérielle (SFHTA). *C'est justement le message de ce concept de pré-hypertension pour faire mieux comprendre que le risque cardio-vasculaire est continu et s'élève précocement. »*

La mesure de la tension artérielle est composée de deux chiffres qui reflètent la pression exercée par le sang sur les parois des artères

- Le premier chiffre indique la **pression systolique** quand le cœur se contracte et éjecte le sang
- Le second chiffre indique la **pression diastolique** quand le cœur se relâche et se remplit de sang

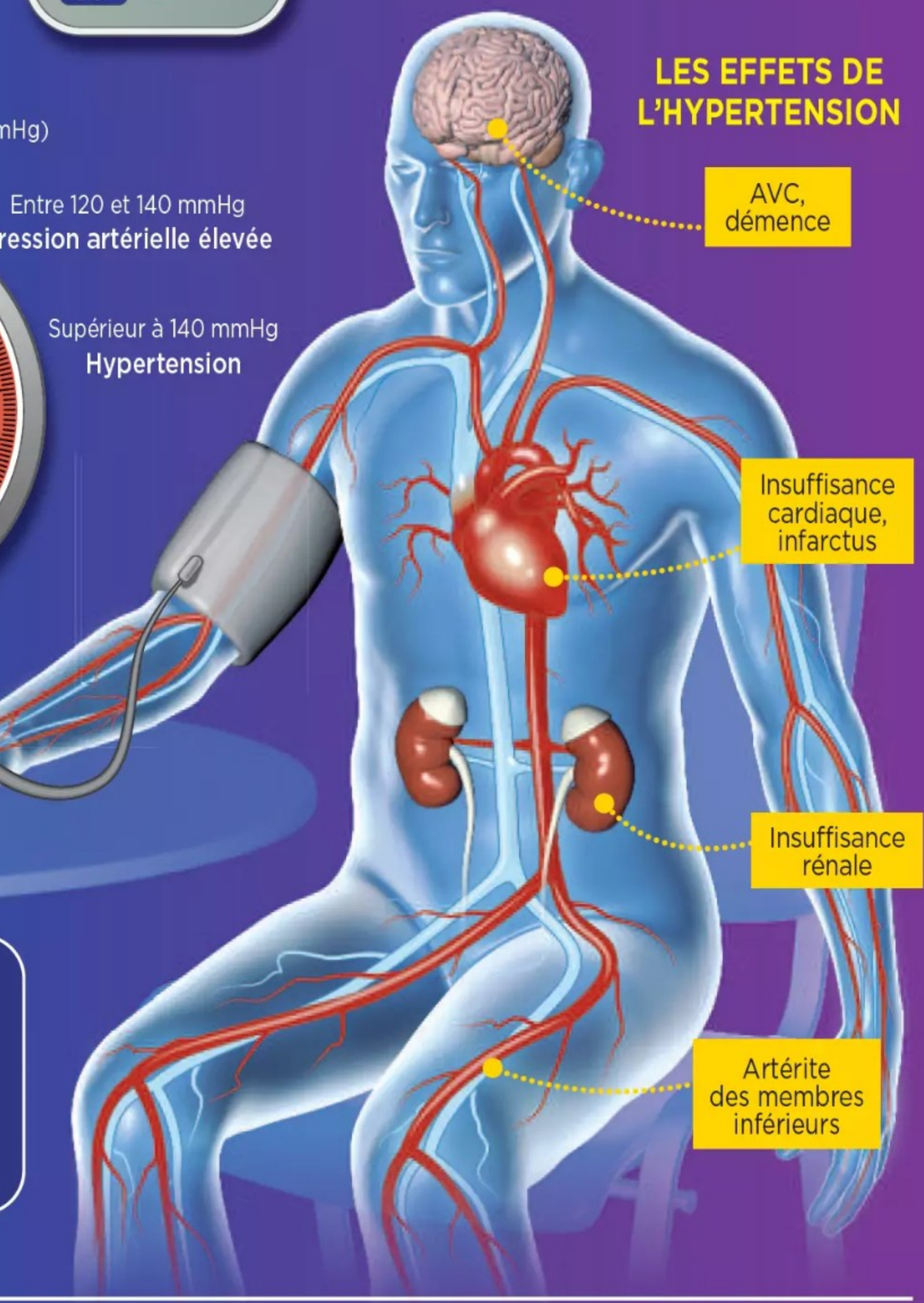
LES NOUVELLES RECOMMANDATIONS

Inférieur à 120 millimètres de mercure (mmHg)
Pression artérielle normale

Entre 120 et 140 mmHg
Pression artérielle élevée

Supérieur à 140 mmHg
Hypertension

LES EFFETS DE L'HYPERTENSION



LES SYMPTÔMES

- Vertiges
- Maux de tête
- Troubles de la vision
- Saignements de nez

CHIFFRES

17 millions d'adultes souffrent d'hypertension en France

50 % des personnes hypertendues ne savent pas qu'elles le sont

25 % des personnes hypertendues ont une pression artérielle contrôlée

11 % des hypertendus sont suivis par un cardiologue

60 % des hypertendus suivant un traitement ont une monothérapie

BRUNO BOURGEOIS - SOURCE : SANTÉ PUBLIQUE FRANCE

On connaît bien aujourd'hui les facteurs de risque de l'hypertension artérielle (HTA) : poids, alcool, alimentation trop salée. Sans compter les antécédents familiaux, le sexe *(lire l'encadré p. 69)*, mais aussi l'environnement *(lire l'encadré ci-contre)*. On sait aussi que l'élévation progressive des chiffres de tension artérielle s'explique par la diminution de la souplesse des parois des artères qui, avec le temps, se rigidifient. C'est la raison pour laquelle, à terme, l'hypertension est responsable d'accidents vasculaires cérébraux, de démence, d'infarctus, d'insuffisances cardiaque, rénale… Bref, l'HTA est un fléau que l'Organisation mondiale de la santé a justement nommé « *le tueur silencieux* ». Le premier qualificatif n'est pas du tout usurpé car « *chaque année en France, l'hypertension est responsable de 55 000 morts, soit 8,5 % de l'ensemble des décès, et de 500 000 hospitalisations* », pose le Dr Clémence Grave, de Santé Publique France. Quant au silence, il est lié à cette particularité de la maladie à avancer longtemps « masquée », sans symptôme hormis des crises hypertensives quand les chiffres s'envolent à plus de 200 mmHg *(voir l'infographie p. 65)*. Mais aujourd'hui, entre des patients traités de façon non optimale, un dépistage très insuffisant et des mesures pas toujours fiables, la prise en charge de l'hypertension en France tend à se dégrader, déploraient unanimes les spécialistes lors de leur dernier congrès. « *Cette affection chronique, la plus fréquente de toutes, est une véritable maladie et non un simple facteur de risque,* analyse le Dr Marilucy Lopez-Sublet, de l'hôpital Avicenne à Bobigny, aux manettes de l'organisation scientifique des dernières journées de la SFHTA. *Or, personne ne prend vraiment le temps ni de la dépister, ni de bien la traiter, ni de l'expliquer aux patients. Résultat : tout le monde la banalise.* »

Au fil du temps, les spécialistes ont appris à décrypter les mécanismes de régulation de la tension artérielle. Ceux-ci sont sous l'emprise d'un complexe système dit rénine-angiotensine-aldostérone (SRAA), dont l'objectif est de préserver l'équilibre dans l'organisme entre le sel et l'eau. En résumé, une cascade d'enzymes et d'hormones qui agit par l'intermédiaire du foie sur le rein, le cœur et les artères. Quand, pour des raisons multiples, il se met à dysfonctionner, les chiffres s'élèvent et il faut agir. D'abord en suivant les mesures hygiéno-diététiques *(lire ci-dessous)*. Perdre du poids, manger moins salé, bouger… Autant d'actions qui, combinées, permettent d'aider à perdre les millimètres de mercure en excès. Moins un kilo sur la balance, c'est en moyenne moins un mmHg. Moins un gramme de sel par jour égale moins ▸

ENVIRONNEMENT

Le bruit, un facteur à risque

Mal connue, l'exposition au bruit fait régulièrement l'objet de recherches. Une étude française, conduite auprès de 1200 personnes vivant près d'aéroports (Paris, Toulouse et Lyon) et publiée dans la revue *British Medical Journal* en 2017, a démontré que, pour chaque augmentation de 10 décibels dans l'environnement sonore nocturne, le risque d'hypertension grimpait de 34 %, mais seulement chez les hommes. Un travail britannique plus récent, effectué cette fois auprès de 240 000 personnes pendant huit ans, a relevé une augmentation de 7 % du risque de développer une HTA. Si les mécanismes physiologiques fins en lien avec une probable inflammation chronique sont à élucider, d'autres études prenant en compte le cocktail bruit-polluants atmosphériques restent à mener.

PRÉVENTION

Cinq conseils pour faire baisser la tension

Être actif

Il est recommandé de pratiquer au moins 2 heures 30 minutes d'activité physique modérée par semaine ou 1 heure 15 minutes d'activité physique vigoureuse répartie sur trois jours, l'important étant de bouger.

Manger moins salé

La consommation moyenne de sel est supérieure à 7 g par jour, quand elle devrait être de moins de 5 g. Elle provient à 80 % du sel caché (pain, plats préparés) et à 20 % du sel ajouté (cuisson, assiettes).

Plus de fruits et légumes

C'est l'un des piliers du régime dit Dash (Dietary approaches to stop hypertension) mis au point et promu par les Instituts nationaux de la santé aux États-Unis (National Institutes of Health).

Arrêter le tabac

Chaque cigarette entraîne une élévation de la tension artérielle durant une période de 20 à 40 minutes, ainsi qu'une augmentation du rythme cardiaque d'environ 40 %.

Limiter l'alcool

De nombreuses études ont démontré l'augmentation de la pression artérielle due à l'alcool, même avec des niveaux de consommation standard.

SOURCE : FEDERATION CARDIOLOGIQUE

GARO/PHANIE

Prendre soi-même sa tension à domicile en respectant un protocole permet une meilleure prise en charge de la pathologie.

PRISE EN CHARGE

Comment bien effectuer l'automesure

« Aujourd'hui, la pierre angulaire d'une bonne prise en charge de la tension artérielle repose sur l'automesure, la prise de la tension par le patient lui-même, à son domicile », insiste le Pr Jean-Marc Boivin, à Nancy. Dans ce cas, le protocole à respecter est le suivant : s'asseoir sur une chaise au calme pendant cinq minutes, dos calé et jambes non croisées, ne pas parler, ni fumer, ni bouger, et poser un bras à l'horizontale devant soi, sur une table. Puis se munir d'un tensiomètre « moderne », c'est-à-dire automatisé, adapté à sa corpulence, avec un brassard en accord avec la circonférence de son bras. Et enfin suivre la recommandation de « la règle dite des 3 », trois mesures le matin, trois autres le soir pendant trois jours minimum. Il ne reste plus qu'à reporter les mesures sur une fiche remise par le médecin ou recourir à des applications comme Hy-Result, un algorithme de mesure de pression artérielle scientifiquement validé sur le plan international par une équipe française qui croise les mesures avec les données personnelles. Avant l'acquisition du matériel (environ 40 euros), et pour tenter de s'orienter dans la jungle des modèles disponibles à ce jour et qui ne sont pas tous validés, il sera utile de consulter le site Stride BP* (en anglais). Cette organisation sans but lucratif, créée en 2019 par des spécialistes de l'hypertension artérielle, travaille en lien avec différentes sociétés savantes internationales et recommande les appareils après validation par son comité scientifique. Mais tout va très vite dans le monde de la tension artérielle. Si la méthode auscultatoire (celle où le médecin glisse son stéthoscope sous le brassard) — peu fiable — a été détrônée il y a déjà plus de vingt ans par celle dite oscillométrique (les brassards autogonflables), une autre approche se profile. Il s'agit de la photopléthysmographie, une technique de lecture optique qui détecte les variations de flux sanguin sous la peau grâce à des capteurs infrarouges. Différents modèles (bracelets, bagues, patchs…) permettront d'ici peu des prises sans limites, en mouvement, la nuit… bref, dans la vraie vie. Patience, néanmoins, car ils ne sont pas encore validés à ce jour, leurs algorithmes n'étant pas considérés comme suffisamment fiables par les sociétés savantes.

De nouveaux modèles de tensiomètres permettront d'ici peu des prises sans limites, en mouvement, la nuit…

* sciav.fr/939stride

A. PEREZ

« Les médecins utilisent encore trop souvent par habitude des molécules anciennes, moins efficaces »

Pr Jean-Jacques Mourad, Hôpital franco-britannique, Levallois-Perret

THÉRAPEUTIQUE

La promesse de seulement deux doses sous-cutanées par an

Révolution en vue dans le traitement de l'hypertension. Des essais prometteurs en cours de phase 2 avec de nouvelles molécules (zilebesiran, laboratoires Alnylam, ION 904, Ionis) prévoient un changement radical de stratégie thérapeutique : passer à un traitement semestriel avec simplement deux injections sous la peau par an ! Cette avancée n'aurait pas vu le jour sans les travaux de deux Américains, Craig Mello et Andrew Fire, menés dans les années 1990 et récompensés par le prix Nobel de médecine en 2006. Ils ont révélé un mécanisme qui a permis le développement d'une technologie reposant sur les ARN dits interférents, capables d'agir en bloquant en amont la production d'une protéine. Ici, c'est une protéine synthétisée par le foie, l'angiotensinogène, qui est inactivée. Or, celle-ci intervient de manière incontournable dans le système majeur de régulation de la pression artérielle appelé système rénine-angiotensine-aldostérone, une cascade complexe agissant sur le rein. En bloquant ainsi le système à sa source, l'action antihypertensive s'avère puissante et durable, jusqu'à 24 semaines avec une seule injection ! Les travaux à ce jour les plus avancés ont été menés avec le zilebesiran. Après une première publication en 2023 dans la revue *New England Journal of Medicine,* les essais cliniques se poursuivent aux États-Unis et en Grande-Bretagne. En avril 2024, les résultats présentés lors du prestigieux congrès de l'American College of Cardiology ont enthousiasmé les cardiologues, même s'il n'est pas encore assuré que deux injections annuelles permettent aux patients de s'affranchir totalement de la prise d'autres médicaments. Quant aux essais de toxicité, ils sont toujours en cours. Les hypertendus seront-ils tentés par la technologie ARN ? Quel sera le prix de ces médicaments ? Autant de questions pour l'instant sans réponses. Mais certains prévoient déjà que, dans le futur, ces molécules soient associées à d'autres traitements injectables, destinés, eux, à faire baisser le cholestérol.

5 mmHg. Très efficaces, elles permettent parfois un retour à la normale. Mais si au bout de six mois les chiffres sont toujours élevés, le recours aux médicaments s'impose. « *Développés depuis les années 1960, les antihypertenseurs se répartissent aujourd'hui en plus d'une centaine de molécules appartenant à plusieurs classes thérapeutiques comme les diurétiques, les bêtabloquants, les inhibiteurs de l'enzyme de conversion, les inhibiteurs calciques et les antagonistes de l'angiotensine 2* », détaille le Pr Jean-Jacques Mourad de l'Hôpital franco-britannique, à Levallois-Perret. Sans oublier les associations fixes, comme dans le cas du sida et de la tuberculose, et d'autres médicaments à venir, qui s'administreront non plus oralement comme aujourd'hui mais par voie injectable *(lire l'encadré ci-contre). « Mais toutes les molécules ne se valent pas en efficacité,* insiste Jean-Jacques Mourad. *Or, les médecins utilisent encore trop souvent par habitude des molécules anciennes, moins efficaces.* »

Seul un hypertendu sur quatre est contrôlé

« *C'est tout le problème de l'inertie thérapeutique due à une grande méconnaissance des traitements,* martèle le Pr Jean-Marc Boivin, à Nancy, responsable de l'un des 20 pôles d'excellence en France de l'HTA*. *Certains médecins se contentent ainsi de renouveler de trois mois en trois mois, voire tous les mois, des traitements souvent inadaptés, prescrits à des posologies très faibles et peu actifs.* » Le spécialiste poursuit : « *De plus, face à des chiffres élevés trouvés en consultation et attribués à l'effet "blouse blanche", aucun contrôle n'est demandé ultérieurement avec une automesure* [lire l'encadré p. 67] *ou une mesure ambulatoire pendant 24 heures* [dite Holter ou Mapa]. »
Résultat : comme l'a établi en 2023 l'étude Esteban, menée par Valérie Olié de Santé Publique France, seul un hypertendu sur quatre est contrôlé. Ce vaste travail, estimant également que seuls

40 % des patients étaient observants, révèle que dans 60 % des cas, le traitement prescrit ne repose que sur une seule molécule, une monothérapie. Or, de multiples études cliniques, toutes publiées dans des revues internationales de référence, ont démontré depuis dix ans que l'efficacité est meilleure avec des associations de deux, trois ou même quatre molécules, comme dans les cas d'hypertension sévère et résistante. En outre, *« l'adhésion thérapeutique est alors bien meilleure, le nombre de comprimés étant réduit »*, note Béatrice Duly-Bouhanick.

Des mécanismes complexes et intriqués

Cette vision actuelle — bien différente de la conception des années 1970, qui a pu un temps laisser croire qu'une seule molécule permettrait de traiter l'HTA — semble avoir du mal à passer dans la communauté médicale. Pourtant, les recommandations de la Haute Autorité de santé, datant de 2016, précisent bien que si *« une monothérapie peut suffire à contrôler la tension, la plupart des HTA nécessitent sur le long terme une plurithérapie »*. *Idem* avec les recommandations européennes et internationales les plus récentes. *« Évidemment, il ne s'agit pas de traiter médicalement tout le monde,* précise Jean-Marc Boivin, *mais si on combinait mieux les classes thérapeutiques, 90 % des patients seraient contrôlés. » « Il faut bien comprendre que les mécanismes de l'HTA sont complexes, intriqués et que chaque classe thérapeutique n'agit que sur l'un d'entre eux,* détaille Jean-Jacques Mourad. *Or, on ne sait jamais à l'avance chez tel ou tel patient quel système est responsable de l'élévation de la tension. Comme, de surcroît, les mécanismes évoluent avec le temps de manière sournoise, le médicament initialement choisi peut perdre en efficacité. Il faudrait alors revoir sa prescription, la modifier et savoir trouver la combinaison qui agira sur plusieurs systèmes de régulation de manière efficace et pérenne. »* Malheureusement, *« l'enseignement de l'HTA en France au cours des études médicales, c'est moins de trois heures au total ! »*, déplore le Pr Sébastien Rubin du CHU de Bordeaux, secrétaire général du Comité de lutte contre l'hypertension artérielle. De plus, *« il ne faut pas oublier les campagnes de désinformation sur la non-efficacité des antihypertenseurs, l'absence de soutien des pouvoirs publics qui ont supprimé en 2011 l'HTA de la liste des affections dites de longue durée (ALD) et le manque d'intérêt général pour la prévention »*, détaille le spécialiste.

Face à cet état des lieux un peu désespérant, si vous croyez que tout va bien se passer avec un « petit 13/8 » pris entre deux portes chez votre médecin, vous avez tout faux. S'il est une certitude en 2025, c'est que rien ne vaut l'automesure. Les nouvelles recommandations sont à cet égard très claires : *« Pas de prise de*

DÉPISTAGE

Chez les femmes, des périodes charnières à surveiller

La prévalence de l'hypertension diffère selon les sexes. Protégées par leurs hormones sexuelles pendant leur vie reproductive (avant 50 ans), les femmes sont moins touchées que les hommes, mais après la ménopause (après 55 ans), le risque s'élève chez elles et devient supérieur au leur. Avec l'âge, les HTA des femmes sont aussi plus résistantes. On ne sait pas encore s'il s'agit de formes plus sévères ou d'une moindre efficacité des traitements. En attendant, il faut au moins se faire dépister à trois étapes de la vie : la mise en route d'une contraception, la grossesse et la ménopause. Malheureusement, *« la prise en charge des femmes entre 44 et 75 ans se dégrade »*, insiste le Pr Jacques Blacher, de l'Hôtel-Dieu, à Paris. D'où l'importance d'initiatives comme celle des Bus du Cœur des femmes.

ANNE-SOPHIE NIVAL / HANS LUCAS.

Les Bus du Cœur des femmes se rendent chaque année dans différentes villes françaises afin de proposer un dépistage cardio-vasculaire (prise de tension…) et gynécologique.

tension au cabinet médical pour le diagnostic et le suivi de la tension ». À cela deux raisons : éviter d'une part le classique effet « blouse blanche », ce stress de l'examen induit par la présence du médecin, qui peut majorer les chiffres de plusieurs millimètres de mercure (jusqu'à plus 40 mmHg), d'autre part les mesures peu fiables réalisées à la va-vite, avec des équipements dits anéroïdes, quand le médecin glisse son stéthoscope sous le brassard. « *Notre étude menée auprès de 500 généralistes a montré que 78 % d'entre eux utilisaient encore ces appareils jugés obsolètes depuis vingt ans* », détaille Jean-Marc Boivin. Quant à l'automesure, là encore certains médecins hésitent à la proposer. Une enquête conduite par l'équipe nancéenne de Jean-Marc Boivin, parue dans *Plos One* en 2019, s'est ainsi intéressée aux arguments rapportés (anonymement) par une cinquantaine de médecins : « *Les patients n'ont pas besoin de connaître leurs chiffres* », « *cela va les stresser* », « *calculer la moyenne, c'est fastidieux* », « *je n'ai pas confiance dans les brassards automatisés* ».

Dès lors, comment parvenir à bouger les lignes ? « *En élargissant le dépistage aux pharmaciens, aux infirmiers de pratique avancée et en nous inspirant de l'expérience québécoise, où la mobilisation très efficace de tous les soignants permet à chacun, dans des lieux dédiés et aisément accessibles, de connaître très facilement ses chiffres de tension artérielle* », propose Jean-Marc Boivin. « *Nous avons besoin des pouvoirs publics pour le lancement de campagnes d'information nationale, comme "Know your numbers" menée outre-Manche, et que chacun connaisse enfin ses chiffres de tension, son taux sanguin de sucre et de cholestérol* », renchérit le Pr Jacques Blacher de l'hôpital Hôtel-Dieu, à Paris. Sans oublier d'inciter les médecins à actualiser leurs connaissances, tout en améliorant l'enseignement des futurs soignants. « *Mais nous soignons encore l'HTA comme si tous les patients étaient identiques,* pointe

A. GILBERT

« Grâce aux avancées de l'IA, des big data et de la génétique, on pourra donner à chaque hypertendu le bon conseil au bon moment »

Pr Sébastien Rubin, CHU de Bordeaux, secrétaire général du Comité de lutte contre l'hypertension artérielle

Sébastien Rubin. *Or, grâce aux avancées de l'intelligence artificielle, du big data, de la génétique et des technologies omiques, on pourra à l'avenir personnaliser nos approches et donner à chaque hypertendu des informations adaptées à son profil, soit le bon conseil et le bon traitement au bon moment.* »

Une campagne de dépistage dans des lieux publics

Sébastien Rubin entame ce printemps, avec le soutien de la Fondation de recherche sur l'hypertension artérielle, l'analyse de dix études dites Flahs (French League Against Hypertension Survey), soit des données concernant au total 40 000 personnes. En attendant les résultats, voici venir le mois de mai, un temps classiquement dévolu au dépistage dans la population avec la campagne MMM (May Measurement Month). Lancée en 2017 dans plus de 100 pays par la Société internationale d'hypertension, elle a permis de sensibiliser près de 5 millions de personnes. En pratique, il s'agit de prises de tension proposées par des bénévoles dans des lieux aussi variés que des pharmacies, des supermarchés, des parkings… Démarrée en France en 2019, elle n'a pour l'instant concerné que 5000 personnes, faute de personnels motivés. Selon les premiers résultats, plus de 30 % d'entre elles avaient des chiffres élevés et 7 % n'avaient même jamais eu de prise de tension ! Cette année, l'opération se poursuivra jusqu'en juillet dans différents lieux en France : il suffira de tendre le bras pour connaître ses propres chiffres. ■

* sciav.fr/939centresSFHTA

RECOMMANDATIONS

Une alimentation riche en potassium

SCIENTIFICA/BSIP

Moins de sel (pas plus de 5 g par jour) mais aussi plus de potassium pour les hypertendus. Tel est l'un des récents messages validés par la SFHTA dans sa mise au point début 2025. « *Plusieurs études et méta-analyses récentes ont confirmé l'intérêt d'une supplémentation en potassium* [photo] *pour abaisser la tension artérielle* », souligne la Pr Théodora Bejan-Angoulvant (Tours), coauteure de ces recommandations et présidente de la Société française d'hypertension artérielle (SFHTA). En pratique, privilégier le régime Dash (Dietary approaches to stop hypertension) avec plus de légumes (brocolis, légumineuses), de fruits (bananes, abricots secs, fruits à coque non salés), de laitages allégés, de viande maigre, de poisson. Sans oublier, mais toujours sous suivi médical, le recours aux sels dits de régime enrichis en potassium pour les patients présentant une insuffisance rénale ou prenant plusieurs médicaments.

EBRAHIM HAMID / AFP

83 % des programmes d'aide humanitaire financés par l'Agence des États-Unis pour le développement international (Usaid) ont été stoppés (ici des ONG réceptionnent des vaccins contre le Covid-19 en 2021 à l'aéroport de Khartoum, au Soudan).

Trump met en péril la santé mondiale

Sortie des États-Unis de l'OMS, suppression des aides à l'étranger pour lutter contre des maladies telles que la tuberculose et le sida, ou des épidémies comme Ebola… Le désengagement américain pourrait entraîner une flambée des cas et des décès.

La santé mondiale comme cible ? Dès le premier jour de son mandat, le 20 janvier 2025, le président des États-Unis Donald Trump a ordonné la mise en pause de toute l'aide américaine au développement à l'étranger, ainsi que la sortie des États-Unis de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Des paroles suivies immédiatement d'actes, notamment le démantèlement presque total de l'Agence des États-Unis pour le développement international (Usaid), dont 83 % des programmes ont été stoppés. *« C'est dévastateur, beaucoup de personnes vont mourir à cause de maladies évitables ou traitables,* se désole Nicole Hassoun, professeure de philosophie sociale et politique à l'université de Binghamton (États-Unis) et présidente du Global Health Impact Project, qui évalue les retombées des initiatives de santé dans le monde. *Cela s'aligne avec son approche de "l'Amérique d'abord", mais c'est incroyable-*

ment myope, même du point de vue strictement égoïste : aucun pays ne sera jamais sûr si des maladies infectieuses courent sans contrôle autour du globe ! On ne peut pas prétendre que le monde n'est pas globalisé. »

Une grande partie des programmes annulés concerne en effet des maladies infectieuses, telles que le paludisme. Selon l'OMS, l'aide américaine a contribué à éviter plus de 2 milliards de cas lors des deux dernières décennies et plus de 12 millions de décès. Dès cette année, on pourrait compter plus de 15 millions de cas supplémentaires de paludisme et plus de 100 000 décès. « *L'aide contre la tuberculose a aussi sauvé plus de 79 millions de vies en vingt ans, principalement grâce à l'Usaid* », révèle Margaret Harris, épidémiologiste et porte-parole de l'OMS.

Au total, selon une étude publiée en 2022 par l'université américaine Johns-Hopkins dans *Population Health Metrics*, les programmes financés par l'Usaid permettaient d'épargner environ 29 vies toutes les 1000 naissances, notamment chez des enfants en bas âge. Une étude de la même équipe, publiée le 21 mars dans le *Journal of Global Health*, estime que ces financements auraient sauvé plus d'un million de femmes entre 2009 et 2019. En 2023, le budget des États-Unis pour cette aide était autour de 16 milliards de dollars (ce qui correspond à moins de 0,3 % de leur budget annuel). Une partie importante de cette aide visait à contenir des épidémies, ce qui sera beaucoup plus dur à faire sans l'Usaid. Comme l'illustre le cas de la flambée d'Ebola qui a débuté le 30 janvier dans la capitale d'Ouganda, Kampala. Les experts sur le terrain alertent des difficultés pour détecter tous les cas contacts en raison des coupes budgétaires entraînées par la disparition de l'aide américaine. « *Le risque est que les épidémies ne soient pas contenues et deviennent des pandémies* », met en garde Nicole Hassoun.

AFP

« L'aide contre la tuberculose a sauvé plus de 79 millions de vies en vingt ans, principalement grâce à l'Usaid »

Margaret Harris, épidémiologiste et porte-parole de l'Organisation mondiale de la santé

Pas de signature pour l'accord mondial contre les pandémies

La décision de quitter l'OMS ne fait qu'empirer la situation. Pour rappel, les États-Unis étaient le principal contributeur de cette agence des Nations unies. Leur retrait entraîne un manque à gagner de près de 600 millions de dollars en 2025, forçant l'OMS à réduire son budget d'un cinquième. « *Le désengagement des États-Unis affecte la réponse mondiale contre un grand nombre de maladies telles que la poliomyélite, le Mpox ou la rougeole,* résume Margaret Harris. *Par exemple, le Réseau global de laboratoires sur la rougeole et la rubéole, géré par l'OMS, était financé entièrement par l'aide américaine. Ce réseau, crucial dans notre effort pour contrôler et éliminer la rougeole, pourrait s'effondrer si d'autres financements ne sont pas trouvés rapidement.* »

En plus de son retrait de l'OMS, le gouvernement de Trump a décidé de ne pas signer l'accord mondial contre les pandémies, qui permettrait au monde entier de répondre de façon coordonnée dans l'éventualité d'une nouvelle pandémie.

DÉSINFORMATION

Robert Kennedy, un « antivax » au ministère de la Santé

Une épidémie de rougeole fait rage aux États-Unis depuis le début de l'année, à cause d'une baisse de la couverture vaccinale contre cette maladie infectieuse. Situation qui pourrait empirer avec le nouveau ministre de la Santé, Robert Kennedy, connu pour ses positions très critiques envers les vaccins. Poussé par la recrudescence des cas, il a fini par conseiller la vaccination, tout en vantant de fausses pistes telles que la vitamine A ou l'huile de foie de morue. Et allant jusqu'à affirmer qu'attraper la rougeole pourrait être bénéfique pour la santé. Parallèlement, il poursuit ses attaques contre la vaccination : d'abord, en ordonnant l'annulation de toute recherche sur l'hésitation vaccinale et les façons de la combattre. Puis, en mettant en place un groupe de recherche sur le lien, maintes fois démenti, entre vaccination et autisme. Des décisions qui ont poussé le plus haut responsable de la sécurité vaccinale, Peter Marks, à quitter ses fonctions le 28 mars. Dans sa lettre de démission, il fulmine : « *Il est devenu évident que la vérité et la transparence ne sont pas souhaitées par le ministre, qui désire plutôt trouver des arguments pour confirmer sa désinformation et ses mensonges.* »

BRAM JANSSEN/AP/SIPA

Avec la fin de l'aide américaine dans la lutte contre le sida, le nombre de décès dus au virus pourrait tripler dès cette année (ici une consultation à Ngodwana, en Afrique du Sud).

Éventualité rendue de plus en plus probable à cause de la gestion de la grippe aviaire aux États-Unis : le ministre de la Santé, Robert Kennedy, propose ainsi de laisser courir le virus librement dans les élevages de volaille, exposant davantage de travailleurs.

Enterré aussi, l'un des programmes d'aide les plus efficaces de l'histoire, le President's Emergency Plan for Aids Relief (Pepfar). Dédié à la lutte contre le sida dans le monde, il représentait 70 % du budget total consacré à cette lutte. Depuis sa création en 2003 par George W. Bush, le nombre de décès liés au VIH a chuté de 50 %, sauvant environ 26 millions de vies. Une étude publiée en février dans *Annals of Internal Medicine* estime que l'arrêt de Pepfar en Afrique du Sud (où environ 13 % de la population vit avec le virus) causera plus de 500 000 infections supplémentaires durant la prochaine décennie. Si l'on prend l'ensemble des pays qui recevaient cette aide, le nombre d'infections supplémentaires en cinq ans s'établirait entre 4 et 10 millions, avec jusqu'à 3 millions de décès en plus, selon une étude publiée dans *The Lancet HIV* le 26 mars. Le directeur général de l'OMS, Tedros Adhanom Ghebreyesus, estime, quant à lui, que le nombre de décès liés au virus pourrait tripler dès cette année. *« Tout le monde a été surpris, car Pepfar était un programme très efficace,* se désole Michael Jennings, professeur de développement à l'École des études orientales et africaines (SOAS) de l'université de Londres (Royaume-Uni). *Lorsque j'ai commencé à travailler sur l'Afrique subsaharienne, le VIH y était une peine de mort. Grâce à ces aides, nous l'avons transformé en une maladie chronique.* »

Sur le terrain, les conséquences sont déjà visibles. Selon une enquête de la Fondation pour la recherche sur le sida (Amfar), réalisée dans 26 pays recevant l'aide de Pepfar et présentée le 17 mars, deux tiers des organisations interrogées déclarent avoir dû licencier leurs employés, et un tiers avait déjà dû fermer. *« Ces aides n'étaient pas seulement destinées à traiter les personnes infectées, mais aussi à éviter de nouvelles infections »*, enrage Michael Jennings. *« Nous voyons déjà des personnes qui ne peuvent pas accéder à leur traitement, cela brise le lien de confiance qui existait entre la communauté et le système de santé »*, ajoute Mumbi Chola, chercheur au Centre de recherche sur les maladies infectieuses en Zambie.

Des milliers de personnes licenciées

Ces décisions ont déclenché une cascade d'actions judiciaires tentant d'atténuer les dégâts. La Cour suprême des États-Unis a, par exemple, obligé le gouvernement à payer tous les contrats de l'Usaid déjà en cours. Mais cela ne s'applique pas à tout nouveau contrat de cette agence, ni à Pepfar, ni au retrait de l'OMS. *« Je pense que ces actions judiciaires n'auront pas un grand impact,* se désole Michael Jennings. *Et même si elles annulaient toutes les décisions, le mal est déjà fait : des milliers de personnes ont été licenciées, des programmes ont fermé, la logistique a été brisée, cela prendrait très longtemps à tout remettre en place.* »

Les autres grands donateurs de l'aide globale prendront-ils le relais ? Au contraire, certains commencent également à se retirer. C'est notamment le cas du Royaume-Uni, qui a décidé en février de diminuer son budget d'aide publique au développement de 0,5 % du revenu national brut à 0,3 % d'ici à 2027. En France, le budget validé en début d'année a diminué d'un tiers la part consacrée aux aides au développement, baisse proche de celle observée en Belgique et dans les Pays-Bas. Cette diminution de l'aide internationale est donc une nouvelle réalité. *« Nous devons commencer à regarder vers l'intérieur pour trouver des ressources, et améliorer l'efficacité avec laquelle ces ressources sont utilisées »*, se résigne Mumbi Chola. La santé globale devra faire plus avec moins. Est-ce possible ? ■

Nicolas Gutierrez C.

L'oculométrie prédit les risques de Parkinson

Cette technologie d'imagerie infrarouge permet d'analyser les déplacements saccadés des yeux. Une start-up l'utilise pour dépister des affections neurologiques comme Parkinson. Explication de cet étonnant « stéthoscope du cerveau ».

Suivre le regard d'une personne pour dépister en quelques minutes une maladie neurologique cinq ans avant que les troubles n'apparaissent. Science-fiction ? Graal de neurologues ? C'est en tout cas l'objectif de la start-up franco-belge Neuroclues, qui développe un dispositif reposant sur l'analyse des mouvements oculaires. Voilà des décennies que, pour réaliser un examen clinique neurologique, les médecins ne disposent en effet que d'un marteau à réflexes et de leur sens de l'observation. Sans oublier la traditionnelle consigne : *« Suivez mon doigt, en haut en bas, à droite, à gauche. »* C'est ainsi qu'ils évaluent la présence de différents réflexes et l'existence de mouvements d'yeux des patients. Mais examiner l'oculomotricité à l'œil nu est un exercice très difficile. Les saccades oculaires, ces mouvements physiologiques entre deux positions stables, sont très brèves (avec une durée inférieure à 50 millisecondes) et très rapides (avec une vitesse angulaire de 400 à 800° par seconde), ce qui les rend souvent imperceptibles. Or, depuis plus d'un demi-siècle, des dizaines de milliers d'articles scientifiques ont mis en relation certaines modifications de ces mouvements oculaires (vitesse, amplitude, sens de déplacement, fixation, poursuite…) avec des affections neurologiques (Parkinson, Alzheimer, sclérose en plaques, traumatisme crânien…) et psychiatriques.

Une aide au diagnostic adaptée à la médecine de ville

D'autres travaux ont établi des liens directs entre différentes structures cérébrales et la réalisation des mouvements. Des anomalies débutantes dans telle ou telle zone du cerveau se traduisent par de subtiles variations dans les paramètres mesurés. *« Nos yeux se déplacent trois fois par seconde et mobilisent 60 % de nos structures neuronales »*, explique Antoine Pouppez, P-DG et cofondateur de Neuroclues avec Pierre Pouget et Pierre Daye, deux chercheurs respectivement passés par l'Institut du cerveau (ICM, Paris) et l'université catholique de Louvain (Belgique). Cela fait déjà plusieurs années que le trio vise la précocité dans le repérage des affections neurologiques. *« Face à la pandémie silencieuse de maladies neurodégénératives, le diagnostic de Parkinson est encore trop tardif,* alerte Antoine Pouppez. *On estime que lorsqu'il est posé, il ne reste déjà plus que 30 % des neurones, la plasticité du cerveau ayant pu compenser et masquer l'évolution de la maladie pendant plusieurs années. »* D'où l'idée de gagner en précision et en temps avec une technologie d'oculométrie adaptée ici à la médecine de ville, portable et connectée.

Ce « stéthoscope du cerveau » n'a pas vocation à être porté autour du cou ni glissé dans une poche de blouse : il se présente sous la forme d'un masque de réalité virtuelle piloté par une interface qui permet d'enregistrer avec l'aide de deux caméras (une par œil)

NEUROCLUES

Le patient suit un point qui se déplace sur l'écran. Le dispositif de capture des mouvements oculaires de Neuroclues peut enregistrer jusqu'à 800 images infrarouges par œil et par seconde durant un examen.

jusqu'à 800 images infrarouges par œil et par seconde. Le patient suit pendant quelques minutes un point qui se déplace sur l'écran pendant que la machine effectue les mesures. À ce jour, il ne s'agit encore que d'une aide au diagnostic uniquement utilisée dans des protocoles de recherche. Si le médecin suspecte une pathologie, il peut choisir, aidé par un résumé de la littérature fourni par Neuroclues, un protocole d'examen évaluant certains types de déplacements oculaires (horizontalité, verticalité, fixation, poursuite…) pour affiner son examen. Dans le futur, ce dispositif pourrait aussi permettre de discriminer certaines formes de Parkinson par des analyses plus fines. La start-up envisage également à terme de le proposer pour un large dépistage dans la population.

Un marqueur révélateur du contrôle de la posture

Des travaux publiés dans la revue *Brain* en 2021 par des équipes de l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière (AP-HP), à Paris, et de l'ICM ont montré que l'allongement du temps de réaction des « antisaccades » (quand on demande aux patients de regarder dans le sens opposé de la cible) pourrait constituer un marqueur pronostique du contrôle de la posture, c'est-à-dire de la statique et de l'équilibre, dans la maladie de Parkinson. L'idée est de repérer cette anomalie au plus tôt pour mettre en place un programme de rééducation spécifique avec des détecteurs anti-chute.

Environ 6000 personnes, toutes atteintes de Parkinson et issus de la cohorte Iceberg à l'ICM, ont pu tester les prototypes dans le cadre de protocoles de recherche. Forte de l'obtention du marquage CE en janvier, Neuroclues vise à obtenir en 2026 l'équivalent américain, avec le feu vert de la Food and Drug Administration. En attendant, des essais vont être déployés à plus grande échelle en Europe, aux États-Unis et, bien sûr, en France, avec la cohorte Constances composée de 22 000 participants âgés de 55 ans et plus. À l'horizon 2030, la start-up espère proposer aux médecins généralistes un dispositif encore plus simple. Et si d'autres concurrents (Eyebrain, Innodem, Bulbitech…) sont aussi dans la course, Neuroclues revendique une plus grande précision des données avec ses 800 images/seconde, ainsi qu'un usage simplifié, sans besoin de calibrer l'appareil à chaque patient. ■

Sylvie Riou-Milliot

DIAGNOSTIC

De l'autisme à la schizophrénie

C'est au milieu du XIXe siècle que débute l'histoire de cette technique non invasive, quand un ophtalmologue français, Louis Émile Javal, remarque des mouvements oculaires rapides et saccadés chez certains de ses patients. Avec le perfectionnement des mesures, les liens avec les pathologies se sont multipliés. Dans l'autisme, par exemple, où la technique est utilisée pour mesurer l'efficacité de la prise en charge. Selon des travaux parus en 2023 dans la revue *Nature*, elle pourrait aider au diagnostic de la schizophrénie.

Kéfir, lassi, kombucha… Les nouveaux élixirs santé

Ces boissons fermentées, acidulées et légèrement effervescentes contiennent des bactéries bénéfiques pour le microbiote intestinal.

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

Gingerale, kombucha, Jun… Consommées depuis des millénaires dans le monde, les boissons fermentées inondent le rayon frais, portées par l'attrait croissant pour leurs effets sur le microbiote. Préparées à partir de gingembre (Ginger ale), seigle (Kvas), millet (Boza), grains de kéfir (kéfir de lait), yaourt (lassi), thé (kombucha) ou légumes (betterave, carottes…), ces boissons acidulées et légèrement effervescentes sont une alternative aux sodas artificiellement gazéifiés et trop sucrés. À condition de ne pas en abuser.

Elles apportent des probiotiques

Tout part d'une culture symbiotique (**Scoby**) pour le kombucha ou de grains de kéfir. En pratique, une association de bactéries lactiques (*Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus casei*, etc.), acétiques (*Acetobacter*) et de **levures** (*Saccharomyces cerevisiae*, *Saccharomyces boulardii*) qui, une fois plongée dans un liquide (thé, lait, eau, etc.) sucré, y fermente plusieurs jours à température ambiante. Une partie des micro-organismes restent dans la boisson fermentée (20 % pour le kéfir de lait) (1) et agissent comme des probiotiques avec de multiples effets sur le **microbiote** et la muqueuse intestinale (amélioration de l'intégrité de la barrière intestinale, modulation du système immunitaire, etc.) (2). Par ailleurs, le kéfir de lait est intéressant pour les personnes intolérantes au lactose, transformé lors de la fermentation en glucose et en galactose, plus digestes.

Une source de nutriments

Le kéfir produit à partir de lait de vache fournit 6 % de glucides, 3,5 % de matières grasses et 3 %

SCOBY (Symbiotic culture of bacteria and yeast). il s'agit d'un disque visqueux de plusieurs centimètres d'épaisseur servant de culture « mère ». Ce tapis microbien flottant à l'interface air-liquide du produit se procure auprès d'amateurs ou sur des sites Web spécialisés.

LEVURES Champignons unicellulaires provoquant la fermentation des matières organiques animales ou végétales. Les levures servent à la fabrication du vin, de la bière, des alcools industriels, des pâtes levées et des antibiotiques.

MICROBIOTE Ensemble de micro-organismes (bactéries, levures, champignons...) colonisant le tube digestif, où ils vivent en symbiose avec l'organisme. La composition du microbiote est unique pour chaque individu.

de protéines pour 100 ml. Il est également riche en vitamines du groupe B (B1, B2, B12) et apporte 127 mg de calcium et 155 mg de potassium pour 100 ml (3). Le kombucha renferme lui aussi divers minéraux (potassium, manganèse) et des vitamines (B, C, E et K) (4), principalement dérivés du thé noir ou vert. Par ailleurs, en comparaison avec un jus de légumes classique, la lactofermentation augmente la teneur en vitamines des boissons de légumes fermentées, par exemple celle de la vitamine B pour le jus de betteraves fermenté.

35 %
La progression des ventes de kéfir et de kombucha en un an (entre 2023 et 2024) dans les supermarchés et hypermarchés de France.
(SOURCE : OBSERVATOIRE NIELSEN.)

La fermentation augmente le pouvoir antioxydant

Après fermentation, le pouvoir antioxydant du kombucha est amélioré par rapport à celui du thé, grâce aux actions microbiennes du Scoby. Les bactéries et les levures libèrent des enzymes qui favorisent la conversion des polyphénols du thé (catéchines pour le thé vert ; théaflavines et théarubigines pour le thé noir) en molécules antioxydantes plus petites (acides phénoliques, composés phénoliques, flavonoïdes) dont les effets sont encore renforcés grâce à un acide organique (le GlcUA), produit par le Scoby. Le kéfir possède également des polyphénols (isoflavones, tocophérols, saponines, acide chlorogénique, acide caféique) et du kéfiran (exopolysaccharide), un antioxydant typique libéré par les grains (2).

Potentiellement anti-hypertensifs et anti-inflammatoires

Boire une tasse par jour de kombucha pendant quatre semaines pourrait contribuer à réduire la glycémie moyenne à jeun (116 milligrammes par dl contre 164/dl pour une boisson placebo) chez les personnes atteintes d'un diabète de type 2, en complément des traitements standard (5). Toutefois, les résultats de cette étude pilote (sur 12 patients) doivent donner lieu à des essais plus larges pour confirmer les avantages métaboliques de ce thé fermenté. Des études *in vitro* montrent par ailleurs des propriétés anti-hypertensives, hypocholestérolémiantes, anti-inflammatoires et immunomodulatrices du kombucha et du kéfir, qui devront être confirmées par des travaux *in vivo*. L'activité antimicrobienne du kombucha contre les micro-organismes pathogènes serait principalement attribuée à l'action de l'acide acétique produit lors de la fermentation (6).

Attention à l'étiquetage

Selon les marques, les quantités de sucre peuvent parfois être équivalentes à celles d'un soda. Prudence aussi car certains kéfirs industriels ne respectent pas la recette traditionnelle mais sont élaborés à partir de simples ferments lactiques ajoutés tels que ceux présents dans les yaourts ou un lait fermenté ribot, pour un prix parfois multiplié par deux ou trois ! De plus, certains produits désormais proposés en canettes au rayon des boissons non réfrigérées ont été pasteurisés, c'est-à-dire chauffés pour détruire les micro-organismes. Ils ne présentent donc plus d'intérêt pour renforcer le microbiote intestinal. Les boissons fermentées peuvent aussi contenir une faible proportion d'alcool (1 %). ■ **SylvieBoistard**

VANESSA GOUYOT Diététicienne-nutritionniste à Levallois-Perret (92)

Bien doser sa consommation

« Bien que les boissons fermentées soient riches en probiotiques bénéfiques pour le microbiote intestinal, une introduction trop brutale dans l'alimentation peut provoquer des ballonnements ou un inconfort digestif (diarrhées, éructations) temporaire. On commence donc par boire de petites quantités, pas plus d'un verre de 100 ml par jour, puis on augmente progressivement les doses selon la tolérance, jusqu'à 150 ml. Leur consommation reste peu conseillée aux jeunes enfants et aux personnes immunodéprimées. »

(1) Invited review: Milk kefir microbiota-Direct and indirect antimicrobial effects, González-Orozco B. D. et al, *Journal of Dairy Science*, 2022.

(2) Fermented Beverage Benefits: A Comprehensive Review and Comparison of Kombucha and Kefir Microbiome, Qi Chong A. et al, *Microorganisms*, 2023.

(3) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(4) Kombucha Beverages Produced from Fruits, Vegetables, and Plants: A Review on Their Pharmacological Activities and Health Benefits, Anantachoke N. et al, *Foods*, 2023.

(5) Kombucha tea as an anti-hyperglycemic agent in humans with diabetes, a randomized controlled pilot investigation, Mendelson C. et al, *Frontiers in Nutrition*, 2023.

(6) Kombucha: Production and Microbiological Research, Wang B. et al, *Foods*, 2022.

PATRICE NOR MAND/OPALE/LEEXTRA POUR SCIENCES ET AVENIR

Depuis son bureau universitaire de Montigny-le-Bretonneux (Yvelines), entouré d'objets venus de loin, le paléopathologiste détaille pour « Sciences et Avenir » son projet de musée de la médecine légale ancienne, qui devrait ouvrir d'ici à 2028 en région parisienne.

Philippe Charlier

Le médecin qui escorte la mort au musée

Le chercheur s'est rendu célèbre par l'étude des restes de personnages historiques de premier plan. Il s'attelle aujourd'hui au projet de création d'un musée dédié aux corps anciens. Rencontre avec ce médecin légiste et paléopathologiste dans son laboratoire universitaire, où il revient sur quelques « cold cases » fascinants, de Henri IV à Picasso en passant par Robespierre et Napoléon.

Par Marine Benoit

Franchir la porte de son bureau revient à passer d'un monde à un autre. De celui des universités françaises avec leurs dédales de couloirs qui évoquent ceux des hôpitaux, à la chaleur et l'étrangeté d'un capharnaüm de livres, sculptures, masques, fétiches et autres objets venus du lointain. « *Voici mon monde* », lance Philippe Charlier, 47 ans, médecin légiste et paléopathologiste, en nous tendant un café. « *Je passe pas mal de temps dans ce bureau de l'université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines* [UVSQ], *surtout depuis que je ne suis plus à Branly.* » À l'automne dernier, celui qui a acquis la notoriété grâce à des publications originales dans des revues scientifiques, des ouvrages grand public et des participations à des documentaires scientifico-historiques a en effet quitté son poste de directeur du département de la recherche et de l'enseignement au musée du Quai-Branly-Jacques-Chirac — qu'il occupait depuis 2018 —, pour se consacrer pleinement au plus grand projet de sa carrière : la création et l'ouverture, d'ici à 2028 en région parisienne, d'un vaste musée dédié aux corps anciens. Un établissement dans lequel l'étude des restes des personnages célèbres offrira une autre perspective sur l'histoire de France. « *On pourra le définir comme l'Institut médico-légal des personnalités historiques* », précise le légiste, qui a vu passer sur sa table d'autopsie et sous son microscope plus de restes d'illustres personnages que n'importe quel autre scientifique français.

▸ On lui doit notamment l'étude médicale du fossile de l'australopithèque Lucy, des enfants mort-nés de Toutankhamon, du cœur et des viscères de Saint-Louis, des restes de Richard Cœur de Lion, de l'urne funéraire d'Agnès Sorel et même du morceau de crâne et de la mâchoire d'Hitler. *« Les restes humains nous transmettent des informations cruciales sur la vie des individus et, par extension, sur notre propre histoire. L'idée de partager le savoir qu'ils nous livrent avec le grand public dans un contexte muséographique m'anime depuis de nombreuses années. »*

Démêler le vrai du faux

Philippe Charlier nous conduit dans une salle adjacente. *« Nous sommes ici dans ce que l'on appelle le chantier des collections. On y inventorie les objets collectés à travers le monde et on les numérise en 3D lorsque c'est nécessaire. »* Par « *on* », comprendre lui et son équipe du Laboratoire anthropologie, archéologie, biologie (Laab), qu'il dirige depuis 2014 à l'UVSQ. Sur une étagère, on aperçoit une tête réduite de Jivaro. Posé le long d'une armoire, un bouclier en bois bicolore venu de Papouasie-Nouvelle-Guinée. *« La tradition rapporte que le pigment blanc est de la poussière d'ossements humains et le rouge du sang, humain également. Notre travail : dire si ceci est vrai ou faux »*, explique-t-il. Près de l'entrée, plié dans un carton, gît un costume de « revenant » du Bénin (*egungun*) qui a servi lors de cérémonies en mémoire de défunts. *« Celui qui le porte devient littéralement le fantôme du mort et distribue des fruits aux vivants. Comme tous les objets présents ici, il aura sa place dans le futur musée, parce qu'il est en rapport avec la maladie et la mort. »* **Suite p. 82**

HENRI IV

Faire parler la tête du roi

Le projet est ambitieux. *« Nous voulons reconstituer la voix d'Henri IV »*, lance Philippe Charlier. Autrement dit, faire résonner à nouveau les cordes vocales d'un roi de France assassiné il y a plus de quatre siècles. Il faut remonter en 2010 pour comprendre d'où part cette idée. Cette année-là, le légiste, à la tête d'une équipe interdisciplinaire, annonce que la tête embaumée retrouvée chez un particulier est bien celle du Vert Galant. Celle-ci aurait été séparée du reste du corps du roi à la Révolution, marquée par les profanations de tombes royales. Elle aurait ensuite été acquise en 1919 par un brocanteur, Joseph-Émile Bourdais, persuadé qu'il s'agissait bien de la tête d'Henri IV, avant que sa trace ne soit une nouvelle fois perdue. Après analyses, Philippe Charlier et ses collaborateurs l'assurent : le crâne est bien celui du « Bon Roi », avec *« 99,99 % de certitude »*. Mais cette authentification se voit vite contestée par des chercheurs. Depuis, la superposition virtuelle du masque mortuaire sur la tête momifiée laisse entendre que l'ensemble correspond à un seul et même individu. Philippe Charlier avec son équipe s'est donc attelé à reconstruire en 3D les cavités sinusales et mastoïdiennes du défunt, motivé par une belle conservation du larynx ou encore des cavités résonnantes supérieures, éléments clés pour comprendre le timbre vocal.

Des particularités anatomiques inhabituelles

L'imagerie scanner a aussi révélé *« plusieurs particularités anatomiques inhabituelles »*, laissant entendre qu'il souffrait d'une double aplasie sinusale. *« Il ne possédait ni sinus sphénoïdal gauche* [situé à l'arrière du nez] *ni sinus frontal gauche, une configuration rare qui concerne moins de 0,1 % de la population »*, note le paléopathologiste. Bénigne, cette anomalie a pu jouer sur le son de sa voix. *« À l'inverse, ses mastoïdes* [structures osseuses à l'arrière des pavillons d'oreilles qui contribuent notamment à amortir les vibrations] *étaient extrêmement développées, signe d'une excellente santé otologique. »* Contrairement à nombre de ses contemporains victimes d'otites chroniques, la dépouille ne présente pas de trace de pathologie sinusale ou auriculaire. Pour Philippe Charlier, l'excellent état de ces oreilles pourrait s'expliquer par le fait qu'Henri IV, élevé au grand air du Béarn, a bénéficié d'une enfance éloignée des conditions insalubres de la cour royale. *« L'étape suivante du projet consistera à intégrer ces données dans un modèle de synthèse vocale pour reconstituer la voix du roi, qui était dotée d'un fort accent du Béarn,* indique-t-il. *C'est une résurrection scientifique inédite. »* ■

BELLET-GABET / VISUAL FORENSIC / AFP ; COLL. CHRISTOPHEL

◀ **La tête embaumée** du « Bon Roi » a montré qu'il souffrait d'une double aplasie sinusale qui a dû jouer sur le son de sa voix.

Les résidus collectés dans la baignoire dans laquelle l'empereur s'immergeait plusieurs heures par jour à Sainte-Hélène (Royaume-Uni) ont permis de reconstruire son microbiome cutané (ici lors d'une exposition au musée de l'Armée).

RODOLPHE PAYS

NAPOLÉON

La baignoire, élément de preuve de sa maladie de peau

« *Comment voulez-vous qu'une femme s'attachât à un homme qui avait la gale ?* », auraient lancé les défenseurs de Joséphine et autres commentateurs moqueurs après la mort de Napoléon. Si l'empereur a souffert toute sa vie d'importants problèmes rénaux et urinaires, on sait qu'il fut aussi durement affecté par une maladie de peau qu'il contracta sans doute lors du siège de Toulon, en 1793. Décrite par ses médecins comme une gale eczématisée, celle-ci le poussa lors des derniers mois de sa vie à passer plusieurs heures par jour dans sa baignoire du domaine de Longwood, sur l'île Sainte-Hélène (Royaume-Uni), où il fut exilé pendant six ans jusqu'à sa mort en 1821. Conservée au sein de la collection de Longwood House, sous l'autorité du ministère français des Affaires étrangères, cette baignoire a fait l'objet en 2023 d'investigations de la part de chercheurs du Laboratoire anthropologie, archéologie, biologie (UVSQ), de l'Assistance publique-Hôpitaux de Paris et du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives). « *Nous avons collecté des résidus métalliques et minéraux encore présents dans les joints de la baignoire en métal* », explique Philippe Charlier. « *Mais comme il n'existe aucune description clinique précise des lésions dermatologiques de Napoléon, nous n'avons pas recherché d'agent infectieux spécifique et avons préféré reconstruire de la façon la plus complète possible son microbiome cutané.* » Après une série de dosages toxicologiques et élémentaires et des analyses métaprotéomiques (analyses destinées à étudier toutes les protéines dans les communautés microbiennes), l'équipe a ainsi pu déterminer qu'une bactérie présente dans les fosses septiques — *Bacillus idriensis* — pouvait être impliquée dans l'infection dermatologique chronique de l'empereur. « *La présence de cette bactérie dans la baignoire pourrait alors indiquer qu'une infection ou une surinfection cutanée l'a affecté au moment de sa mort, le 5 mai 1821, à l'âge de 51 ans* », suggère le légiste.

Du soufre, de l'arsenic et des bactéries marines

L'étude vient également fournir un certain nombre d'informations dignes d'intérêt pour tout historien de la période napoléonienne. Elle indique d'abord la présence de nombreuses bactéries marines ou de bactéries des mines de sels qui confirment que de l'eau de mer (ou du sel des marais salants) a été utilisée à des fins thérapeutiques, probablement en combinaison avec d'autres matériaux médicinaux tels que la tourbe, la boue, l'orge ou encore le thé noir. Elle montre aussi que de l'arsenic et du soufre ont pu être ajoutés à cette même eau salée, « *ces éléments étant, dans la pharmacopée du premier quart du XIXe siècle, utilisés comme médicaments pour les maladies dermatologiques* », précise Philippe Charlier. Gare toutefois à la surinterprétation : cette observation ne signifie en rien que Napoléon a été empoisonné à l'arsenic, théorie qui a circulé après sa mort chez certains de ses partisans, et qui perdure aujourd'hui. ■

Suite de la p. 80 Financé par des fonds publics et privés, celui qui pour le moment se nomme le « Musée anthropologie, archéologie, biologie (Maab) » devrait être installé *« dans un bâtiment historique du Grand Paris »*. Là encore, le suspense est de mise, plusieurs emplacements étant à l'étude.

Un musée doublé d'un pôle de recherche

Mais plus on l'interroge, plus on constate que Philippe Charlier en connaît déjà le contenu aussi bien que l'anatomie humaine. *« Pour sûr, le parcours sera chronologique car c'est à mon sens la manière la plus vivante et efficace d'aborder l'histoire. »* Par le biais de la médecine légale, le visiteur remontera ainsi le temps et découvrira *« tant des portraits de personnages célèbres que l'histoire des grandes épidémies, de la nutrition, de l'hygiène, de la petite enfance ou encore des rites funéraires »*. Plus qu'un espace d'exposition, le « Maab » aura surtout pour vocation de devenir *« un pôle de recherche en paléopathologie à part entière »*, complète le chercheur. Il devrait abriter un laboratoire équipé de son propre scanner, *« bien utile lorsqu'il s'agit de faire parler les patients du passé, momies, reliques ou squelettes »*, à commencer par les échantillons osseux des Catacombes de Paris, qui devraient nous renseigner sur l'état sanitaire des Franciliens d'autrefois ; des logements pour les jeunes chercheurs français ou internationaux, une bibliothèque de plus de 120 000 ouvrages dédiée exclusivement à l'anthropologie, et même… un restaurant étoilé.

En attendant l'achèvement de ce projet soutenu par l'UVSQ et l'Académie de médecine, Philippe Charlier poursuit ses enquêtes de légiste. Avec, cette fois, l'idée que les résultats de nombre d'entre elles puissent enrichir les salles du futur musée. ■

ROBESPIERRE

Le sang sur le bureau atteste de la blessure par balle

C'est sur un élégant bureau exécuté à l'origine pour le cabinet du roi Louis XV qu'a été signé, le 10 février 1947, le traité de paix entre la France et l'Italie. C'est sur ce même bureau, aujourd'hui conservé aux Archives nationales à Paris, que Maximilien Robespierre, figure centrale de la Révolution et fervent partisan de la Terreur (1793-1794), passa les dernières heures de sa vie, dans la nuit du 27 au 28 juillet 1794, avant d'être guillotiné. *« La rumeur a toujours voulu que le célèbre tribun, blessé au visage par un projectile à balle d'arme à feu, ait été allongé dessus cette nuit-là »*, raconte Philippe Charlier. *« En lien avec Pierre Fournié, le chef du département de l'action culturelle des Archives nationales, nous avons voulu savoir si cette légende était vraie. »* Dans la journée du 27 juillet, Robespierre prononce un discours à la

PICASSO

L'intrigante révélation d'un ongle

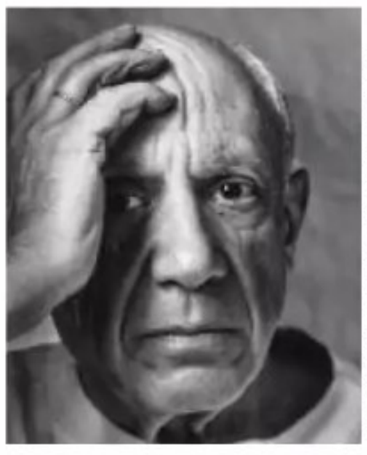
Jean Cocteau avait surnommé Picasso « le roi des chiffonniers » parce qu'il conservait, par superstition, absolument tout : de vieux papiers, des vêtements usés et même ses propres cheveux et ongles. *« Pour le peintre, ce genre de restes organiques étaient susceptibles de contenir l'âme de l'individu,* explique le paléopathologiste. *Il les donnait à la seule personne en qui il avait confiance, Marie-Thérèse Walter, sa compagne rencontrée en 1927, qui les conservait dans des enveloppes avec une date. »* C'est grâce à cette drôle de croyance qu'un ongle de son pouce est cette fois parvenu jusqu'à lui, par l'intermédiaire de la petite fille du peintre, Diana Widmaier-Picasso. Soumis à une étude toxicologique à l'AP-HP, le morceau de kératine a révélé un certain nombre d'informations. D'abord, que Picasso avait bel et bien une très forte consommation de

Le tribun passa sa dernière nuit dans ce bureau, blessé d'une balle au visage. Au matin du 28 juillet 1794, il était exécuté. Incrustées sur le cuir de la table, les taches de sang provenant de sa plaie ont pu être analysées (ci-dessus).

LEONARD DE SELVA / BRIDGEMAN IMAGES ; CAPA / TOUS DROITS RÉSERVÉS

Convention où il menace implicitement les « *traîtres* » au sein du gouvernement sans les nommer. Se sentant menacés, de nombreux députés décrètent son arrestation. L'avocat et homme politique se réfugie à l'Hôtel de Ville mais, lâché par la Garde nationale, s'y retrouve blessé à la mâchoire (sans doute à la suite d'un tir de Charles-André Merda, le gendarme chargé de son arrestation). Il sera alors allongé sur le bureau Louis XV et transporté dessus aux Tuileries. À en croire l'expertise médico-légale, rédigée par deux officiers de santé chargés de le maintenir en vie jusqu'à son exécution en place publique, la balle aurait pénétré par la bouche et serait sortie au-dessus de sa joue, créant un épanchement de matière organique. Ce sont les taches laissées par cette grave plaie, que l'on distingue encore à l'heure actuelle sur le cuir, que Philippe Charlier a analysées. Avec, pour objectif premier, de savoir s'il s'agissait bien de sang et non de café, de chocolat, de thé ou encore d'encre. À l'issue d'une étude paléoprotéomique (c'est-à-dire d'une analyse des ensembles de protéines encore présentes sur le cuir) au CEA, le chercheur a ainsi pu établir qu'il s'agissait non seulement de sang humain, mais encore de sang provenant de différents organes cranio-faciaux. « *De quoi confirmer l'anecdote historique autour de ce bureau et l'importance des lésions balistiques contemporaines de la veille de la mort de Robespierre* », s'enthousiasme Philippe Charlier. « *On a même découvert qu'au sein de cette tache se trouvaient des résidus de… larmes, qui avaient coulé sur le plateau.* » Les souffrances de Robespierre furent finalement abrégées sur l'échafaud au petit matin, vers 7 heures. ■

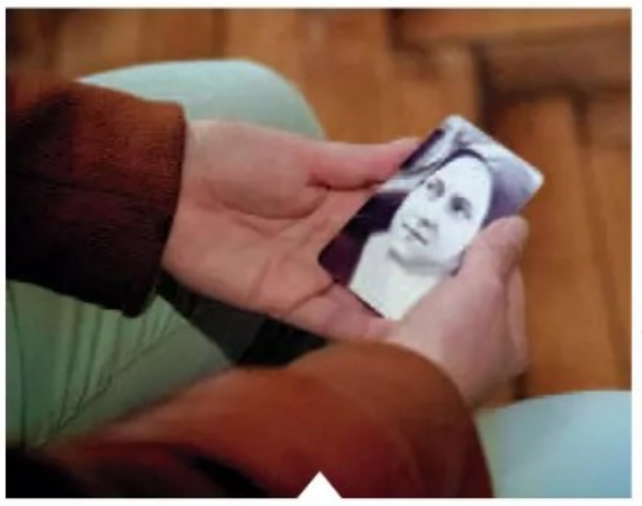
tabac (il fumait des Gitanes sans filtre à la chaîne) et une consommation très modérée de café ; ensuite, qu'il avait été exposé, à l'époque où l'ongle a été coupé (entre 1935 et 1940), à l'atropine, un antispasmodique qui neutralise l'action du système nerveux parasympathique et qui peut être injecté pour accélérer un cœur qui bat trop lentement. « *On peut se demander s'il avait consommé de la belladone, du datura, de la jusquiame ou de la mandragore de son jardin de Trem-blay-sur-Mauldre* », avance Philippe Charlier. Mais aussi pour quelle raison. Était-ce à des fins médicales, pour un examen ophtalmologique ? « *Nous savons qu'à l'époque, il avait consulté Geneviève Valroff, la sœur de Marie-Thérèse, qui était ophtalmologue.* » Ou peut-être pour traiter un malaise vagal ? Pour le légiste, une utilisation à des fins artistiques de cette substance active est en revanche très improbable. « *L'artiste avait déjà son propre style, qui ne nécessitait nulle prise de toxique.* » ■



CHRISTIE'S / ARTOTHEK / LA COLLECTION

THÉRÈSE DE LISIEUX

Un cheveu en analyse pour établir son bilan de santé



CORINNE SIMON / HANS LUCAS

La religieuse canonisée est morte de la tuberculose à 24 ans, en 1897.

Depuis 1925, l'église de Herbitzheim (Bas-Rhin) possède un ensemble de reliques exceptionnel de sainte Thérèse de Lisieux (1873-1897), considérée comme l'une des plus grandes mystiques du XIXe siècle. Ces reliques, constituées d'un morceau du premier cercueil de la carmélite, de la terre de sa tombe, de quelques-uns de ses cheveux et d'un minuscule morceau de son corps, font depuis un siècle l'objet d'un important pèlerinage à Herbitzheim, au point que la ville a été surnommée « le petit Lisieux alsacien ». En 2025, à l'occasion du centenaire de ce pèlerinage, Philippe Charlier a été chargé d'authentifier et d'étudier les reliques de la jeune sainte, décédée de la tuberculose à seulement 24 ans. Le légiste a notamment été autorisé à prélever l'un de ses cheveux, qui devrait lui permettre de connaître la nature des traitements dont la religieuse a bénéficié contre la tuberculose, mais aussi de savoir si elle souffrait d'autres maux ou d'une éventuelle exposition à des toxiques. ■

La « Joconde du Cambodge » en majesté à Paris

Le Grand Vishnou du Mebon occidental, chef-d'œuvre en bronze de l'art khmer, est exposé au musée Guimet après une série d'analyses de son état de conservation et une campagne de restauration.

Allongé sur l'océan de l'éternité. Ainsi, il y a des siècles, se laissait-il contempler par les fidèles : la tête doucement inclinée reposant sur l'un de ses quatre bras, un sourire ineffable aux lèvres, dans le temple qui lui était consacré au milieu du Baray, le plus grand réservoir d'eau d'Angkor, au Cambodge. Le Grand Vishnou du Mebon occidental, exposé au musée Guimet à Paris après une campagne de restauration, devait approcher à l'époque de sa réalisation les 6 mètres de long. Des dimensions hors norme pour une façon rare de représenter cette divinité, couchée, et dont on pouvait faire le tour et admirer les trois dimensions (en ronde-bosse). Ce chef-d'œuvre en bronze de l'art khmer du XI[e] siècle rayonnait de sa puissance protectrice associée au cycle perpétuel de l'Univers au sein du panthéon hindou, aux côtés de Brahma le créateur et de Shiva le destructeur. Son buste et une quarantaine d'importants fragments avaient été découverts en 1936 lors de fouilles sur le site d'Angkor par Henri Marchal et Maurice Glaize, tous deux conservateurs et membres de l'École française d'Extrême-Orient (Efeo). Depuis 1950, le vestige du dieu couché sur son flanc était exposé tel un trésor par le Musée national du Cambodge, tandis que ses nombreux autres morceaux restaient à l'abri dans les réserves.

Il y a un an, en mai 2024, cette sculpture exceptionnelle aussi bien au regard de ses qualités techniques et esthétiques que de son importance spirituelle quittait l'écrin muséal pour rejoindre la France : *« Le Grand Vishnou est une œuvre artistique majeure, complètement empreinte du divin, elle protégeait notre pays. Nous l'avons donc honoré par une cérémonie religieuse et des offrandes avant son départ »*, raconte Chay Visoth, directeur du Musée national du Cambodge. La statue que la présidente du musée Guimet à Paris, Yannick Lintz, n'hésite pas à comparer à *La Joconde*, embarquait en effet pour une longue aventure. Elle ferait l'objet d'une enquête inédite : une série d'analyses de son état de conservation, effectuée par le Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF), suivie d'une intervention de restauration.

Un complexe minier et métallurgique

Pour comprendre ce projet de décryptage des secrets de fabrication d'une œuvre aussi emblématique, et de sa restauration, il faut le resituer dans le contexte d'une collaboration mise en place en 2017 entre le musée Guimet, l'Efeo et le C2RMF, autour d'un programme de recherche nommé Langau, d'après un mot de vieux khmer désignant le cuivre. L'archéologue de l'Efeo Brice Vincent avait commencé dès 2016 une série d'études autour de la métallurgie à Angkor entre le IX[e] et le XV[e] siècle, en lien avec l'Autorité pour la protection du site et l'aménagement de

EXPOSITION

Les bronzes royaux d'Angkor

Le Vishnou couché du Mebon sera visible pour la première fois avec ses fragments dans le cadre de l'exposition « Bronzes royaux d'Angkor, un art du divin », qui se tiendra au musée Guimet à Paris, du 30 avril au 8 septembre. La pièce maîtresse de cet événement, dont le fil rouge est le rôle du souverain d'Angkor en tant que commanditaire, sera entourée de plus de 200 œuvres provenant en grande partie du Musée national du Cambodge.

La sculpture monumentale de la divinité couchée, découverte à Angkor en 1936, mesurait à l'origine près de 6 mètres de long (ici lors d'une séance photo au Centre de recherche et de restauration des musées de France, C2RMF).

la région d'Angkor (Apsara). Les fouilles réalisées dans le cadre de ces missions, orientées sur les sites de fonte des métaux et les réseaux d'extraction, lui ont permis d'identifier une « fonderie royale » située près du palais royal d'Angkor Thom. Une découverte de taille, car il s'agit de la seule du Cambodge à cette époque.

Le travail du cuivre et de ses alliages, dont le bronze (cuivre et étain), s'était développé près du cœur battant de la capitale khmer. Cet artisanat précieux issu de commandes royales était en effet destiné à asseoir symboliquement le pouvoir politique, à conférer du prestige aux élites religieuses et à fournir des objets de culte et des représentations des divinités. La présence, parmi les objets exhumés par les équipes des missions Langau, de moules très épais de grandes dimensions conduit à localiser dans ces ateliers la fabrication d'imposantes statues en bronze. Dont le Grand Vishnou ? Brice Vincent précise que *« l'identification à Chhaep, à 180 kilomètres au nord-est d'Angkor, d'un complexe minier et métallurgique où s'organisait toute la chaîne du cuivre, de l'extraction à la transformation, permet de l'envisager »*.

Le buste en bronze a été analysé en microscopie 3D numérique au C2RMF.

Passé au crible des instruments du C2RMF lors d'une suite d'opérations pilotées par l'archéométallurgiste David Bourgarit, le dieu allongé a livré ses arcanes : les résultats d'analyse au spectrographe de masse convergent vers une coïncidence entre le cuivre des échantillons du Vishnou et celui extrait dans la mine de Chhaep. Moulé à la cire perdue, l'imposant buste de 500 kg a été par ailleurs soumis à la radiographie gamma, ce qui a permis de constater que le mortier injecté dans un des bras afin de le sécuriser, lors d'une précédente intervention, était stable. De la cartographie chimique de sa surface, très corrodée, on déduit l'aspect d'origine : entièrement doré au mercure, des lèvres peintes en rouge au cinabre, avec des effets polychromes autour des yeux, de la fine moustache et de la barbe.

Au laboratoire Arc'Antique de Nantes, en charge de la restauration du Grand Vishnou et de la fabrication du soclage sur lequel la statue va reposer lors des expositions successives, la spécialiste de conservation préventive Jane Échinard confie qu'il n'a jamais été question de redonner à cette œuvre son aspect d'origine, mais de prendre en compte l'équilibre global afin d'améliorer la lisibilité de la statue. *« Il fallait gérer le mille-feuille de corrosion qui a englouti la dorure, auquel il aurait été nuisible de toucher, et éliminer les poussières et les dépôts par une projection à basse pression d'un léger abrasif d'origine végétale. Le but était de souligner l'harmonie d'ensemble de ce chef-d'œuvre et de conserver ses informations pour les générations futures. »* Une intention que le sourire immuable du Grand Vishnou semble partager. ■

Andreina De Bei

C2RMF/HUGO PLUMEL; C2RMF/DAVID BOURGARIT

La pionnière de la biologie marine

Expatriée avec son époux en Sicile, la Française Jeanne Villepreux-Power (1794-1871) découvre avec émerveillement les richesses des rivages de l'île et se passionne pour les mystères des animaux marins. Son travail amateur devient rapidement la base d'une véritable activité scientifique, reconnue par la communauté savante. Pour étudier mollusques et poissons, elle invente même les premiers aquariums.

Par Denis Guthleben

Le temps aux abords de la Sicile paraît suffisamment clément, en cette fin janvier 1838, pour autoriser l'équipage du *Bramley* à prendre la mer. On ignore cependant si ce navire anglais devant relier Messine à Londres est jamais parvenu à quitter les eaux parfois capricieuses de la Méditerranée. Aperçu une dernière fois au large de la province andalouse d'Almeria le 5 février, il disparaît ensuite corps et biens. *« Chaque vague en passant d'un butin s'est chargée ; l'une a saisi l'esquif, l'autre les matelots »*, a écrit quelques mois plus tôt Victor Hugo dans *Oceano Nox*. Cette fois, les flots ont dérobé un trésor supplémentaire : les collections que la naturaliste Jeanne Villepreux-Power a rassemblées au fil d'une vingtaine d'années d'études acharnées sur la grande île italienne.

La vie de Jeanne Villepreux-Power aurait pu inspirer l'une de ces romances littéraires qui ont rencontré un public croissant à la même époque. Cette indication préalable, pour une femme de science, n'est-elle pas stéréotypée ? Qu'on en juge. Née à Juillac le 25 septembre 1794, Jeanne est la fille aînée de Pierre Villepreux, qui exerce différents emplois dans ce bourg de Corrèze — gendarme, salpêtrier, garde champêtre et cordonnier —, et de Jeanne Nicot, originaire de Limoges, qui donne naissance à trois autres enfants mais disparaît prématurément en 1805 à l'âge de 31 ans. En somme, une famille modeste et souvent frappée par le deuil — l'une des cadettes de Jeanne meurt en septembre 1804 avant de fêter ses 5 ans — comme il en existe alors tant et plus en France : la Sicile est très loin encore, et son chemin passe d'abord par Paris.

C. FRÉSILLON/CNRS

Docteur en histoire, Denis Guthleben est directeur délégué du Comité pour l'histoire du CNRS.

Jeanne Villepreux s'y rend en effet en avril 1812, en compagnie d'un cousin qui convoie des troupeaux vers les abattoirs de la capitale, et y décroche un emploi de petite main dans un atelier de couture. Elle est ainsi aux premières loges pour assister aux événements qui se bousculent deux ans plus tard : l'abdication de Napoléon Ier, le retour des Bourbons, les Cents-Jours et le rétablissement d'une monarchie qui lui apporte une notoriété inattendue. En 1816, faisant de toute évidence des merveilles une aiguille à la main, la jeune femme participe à la confection de la robe que porte Marie-Caroline de Bourbon-Sicile lors de

GRANDPALAISRMN (MUSÉE D'ORSAY) / TONY QUERREC

La naturaliste Jeanne Villepreux-Power (ici en 1861) a parcouru durant plus de vingt ans la Sicile, décrivant et répertoriant autant la faune et la flore que des fossiles et minéraux collectés.

son mariage avec le duc de Berry, Charles-Ferdinand d'Artois, le fils cadet du futur roi Charles X. À cette occasion, elle rencontre un riche commerçant d'origine irlandaise, James Power, qui tient négoce en Sicile. Jeanne et James tombent amoureux et partent à Messine, où ils se marient en 1818. Parler de romance n'était donc pas abusif! La suite de l'idylle prend cependant un tour inattendu. La jeune femme aurait parfaitement pu profiter des affaires florissantes de son mari pour couler une vie doucereuse parmi la bonne société insulaire. Mais elle ne tarde pas à se choisir une autre compagnie, celle de la flore et de la faune sauvages, notamment des animaux marins qui pullulent sur les côtes siciliennes. Les origines de cette passion pour l'histoire naturelle demeurent énigmatiques. Bien sûr, l'émerveillement devant cette contrée inconnue et pour la mer qu'elle n'avait jamais contemplée jusqu'alors, a dû être déterminant. Le besoin de trouver une activité n'y a sans doute pas été pour rien non plus : si Jeanne Villepreux a dû travailler pour vivre, Jeanne Villepreux-Power n'envisage pas de vivre sans travailler. Mais ce qui n'aurait pu être qu'un passe-temps personnel et amateur devient la base d'une véritable activité scientifique, reconnue par la communauté savante.

Ses ouvrages sont des références pour les naturalistes de l'époque

Pour Jeanne Villepreux-Power, l'apprentissage des langues apparaît comme un préalable nécessaire. Rapidement, elle maîtrise l'anglais aussi bien que l'italien. Ce dernier idiome lui permet d'arpenter sans relâche toutes les provinces de la Sicile et de rassembler une foule d'informations qui nourriront la rédaction ultérieure de deux ouvrages : un *Itinerario della Sicilia riguardante tutt'i rami di storia naturale e parecchi di antichità che essa contiene (Itinéraire de la Sicile concernant toutes les branches de l'histoire naturelle et plusieurs des antiquités qu'elle contient)* et un *Guida per la Sicilia* (*Guide de la Sicile),* qui sont considérés comme des références par les naturalistes de l'époque. Le *Guide*, surtout, révèle *a posteriori* le travail colossal accompli par son auteure, et son ambition de mieux faire connaître l'île pour laquelle elle s'est prise de passion : *« À celui qui se prépare à visiter la Sicile, île classique, supérieure à toute autre en richesses naturelles et artistiques, je dois l'avertir malheureusement d'un manque de guide exact et complet. Je reconnus précisément cette lacune traitant des recherches en histoire naturelle en parcourant en tous sens l'aventureuse contrée. Il me vint alors l'idée de fournir aux voyageurs l'aide que je n'avais pas trouvée. »*

Cette « rubrique des sciences naturelles », Jeanne Villepreux-Power annonce en effet l'avoir traitée *« avec diligence »* : *« En plus des objets indiqués dans le texte de l'œuvre, j'ai voulu y ajouter en appendice quelques catalogues se rapportant à la Conchyliologie, à l'Éthologie, à l'Ornithologie, à la Botanique, etc. »* Plusieurs centaines de minéraux et de fossiles qu'elle a collectés, entre autres sur les pentes de l'Etna, et qui forment peu à peu l'une des collections les plus abondantes de

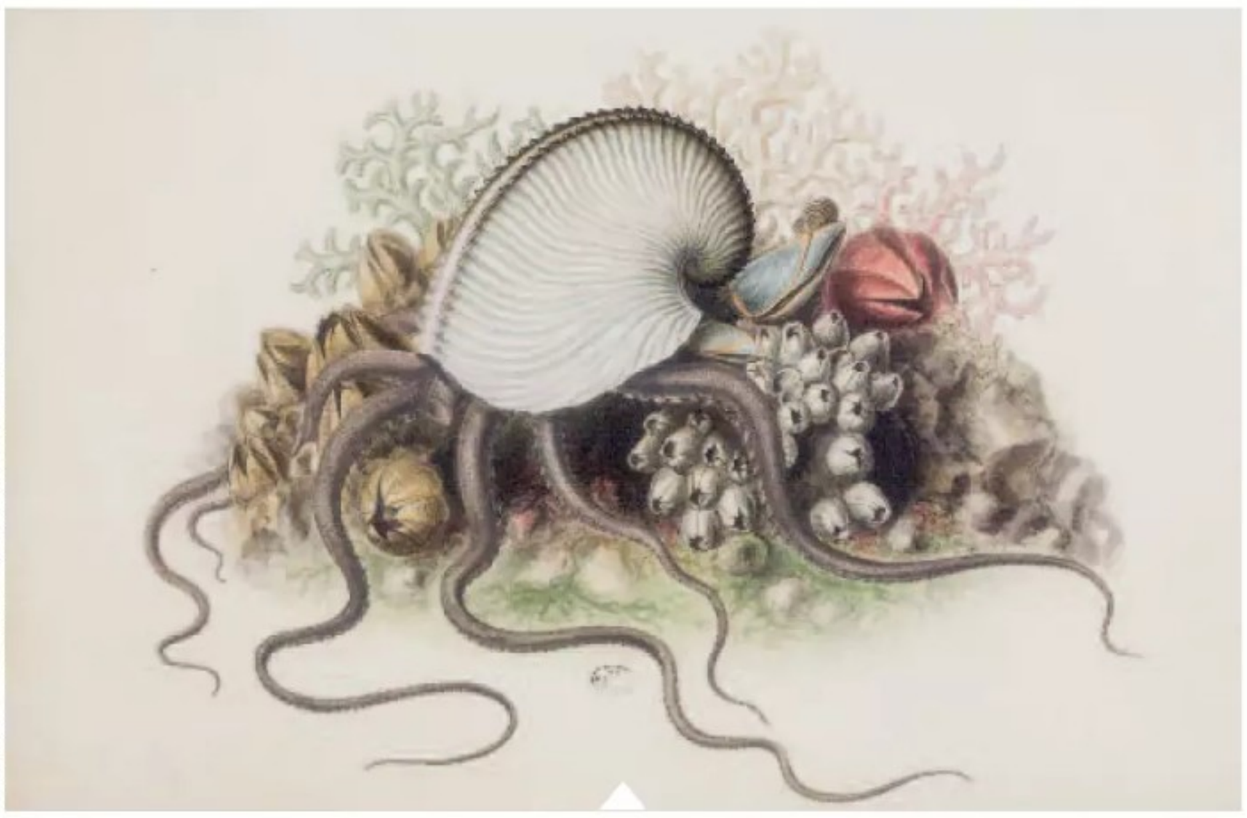
Elle conçoit différents modèles de « cages », en bois et en verre, permettant d'observer des êtres bien vivants, dans des conditions proches de leur environnement naturel

l'île, y sont répertoriés et décrits. On y trouve aussi près de 700 plantes et 300 espèces d'oiseaux, de même qu'un catalogue détaillé de crustacés, de poissons et de mollusques. Et c'est dans ce dernier domaine, celui de la biologie marine, que Jeanne Villepreux-Power fait figure de pionnière, en introduisant des techniques nouvelles qui vont contribuer à révolutionner ce champ de recherche. Si l'étude des êtres marins connaît en cette première moitié du XIXe siècle un développement inédit, elle continue pour l'essentiel, comme la zoologie dans son ensemble, d'être une activité de cabinet : savants et étudiants travaillent sur des collections de spécimens conservés et souvent détériorés dans l'alcool, sans aucun contact avec leurs milieux. Vouloir comprendre la vie en scrutant des animaux morts qui macèrent dans des bocaux ? Une aberration aux yeux de Jeanne Villepreux-Power, qui conçoit à partir de 1832 différents modèles de « cages », en bois et en verre, permettant d'observer des êtres bien vivants, dans des conditions proches de leur environnement naturel. Les *Gabbioline alla Power* — cages à la Power — préfigurent nos aquariums modernes, dont la naturaliste peut à bon droit être considérée comme l'inventeuse. Elles lui permettent entre autres de gagner en 1839 la « bataille de l'argonaute » *(lire l'encadré ci-contre)*, une controverse scientifique qui l'oppose au zoologiste parisien Henri-Marie Ducrotay de Blainville, élève de Georges Cuvier et successeur de Jean-Baptiste de Lamarck au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

CONTROVERSE

La bataille de l'argonaute

L'argonaute est un mollusque céphalopode qui renferme son abdomen dans une coquille, et utilise en permanence deux de ses tentacules pour la maintenir. Les spécimens conservés au Muséum national d'histoire naturelle à Paris inspirent une explication au zoologiste Henri-Marie Ducrotay de Blainville : dans la mesure où il n'existe aucune attache entre l'animal et cette carapace, l'argonaute est un parasite qui s'empare de la coquille d'une autre espèce, à l'image d'un bernard-l'ermite. Reste donc à trouver la victime de ce squatter… Jeanne Villepreux-Power conteste cette interprétation. Elle constate dans ses aquariums que les argonautes se positionnent toujours de la même manière dans leur coquille. Après avoir cassé des morceaux de celle-ci, elle relève surtout que les mollusques la réparent eux-mêmes, grâce aux sécrétions de leurs tentacules. Cette preuve est décisive. Elle est défendue par Richard Owen devant la Zoological Society de Londres, et finit par emporter l'adhésion de la communauté. Outre la reconnaissance de ses travaux, Jeanne Villepreux-Power vient de souligner l'importance capitale de l'expérimentation pour les sciences du vivant.



BIBLIOTHÈQUE DU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE

Aquarelle représentant un argonaute avec sa coquille, réalisée par Jeanne Villepreux-Power en 1839.

Ses travaux sont redécouverts plus d'un siècle après sa disparition

La perte tragique de la majeure partie de ses collections lors du naufrage du *Bramley*, puis son installation à Londres et son retour à Paris avec James Power, qui a rejoint entre-temps la Société du câble télégraphique sous-marin entre la France et l'Angleterre, marquent un tournant dans l'œuvre de Jeanne Villepreux-Power. La naturaliste continue en effet de publier quelques travaux scientifiques, mais elle cesse toute activité expérimentale. Réfugiée dans sa commune natale en 1870, afin de fuir le siège de Paris par les troupes de Guillaume Ier et de Bismarck, elle s'éteint à Juillac le 25 janvier 1871, une semaine après la proclamation de l'Empire allemand au château de Versailles. Elle sombre ensuite dans l'oubli pendant plus d'un siècle, jusqu'à la redécouverte de ses travaux par un habitant de Juillac, Claude Arnal, qui parvient à lui rendre sa place dans l'histoire des sciences. En 1995, son précieux *Guide de la Sicile* fait l'objet d'une réédition avec le soutien de la British Library, et deux ans plus tard l'Union astronomique internationale décide de donner son nom à un cratère de la planète Vénus. Une allée Jeanne-Villepreux-Power a aussi été inaugurée en 2019 dans le bois de Vincennes à Paris. Elle est située face à l'aquarium de la Porte-Dorée. La grande naturaliste y est donc proche de son élément. ■

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

4,6 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

2,7 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

La Recherche

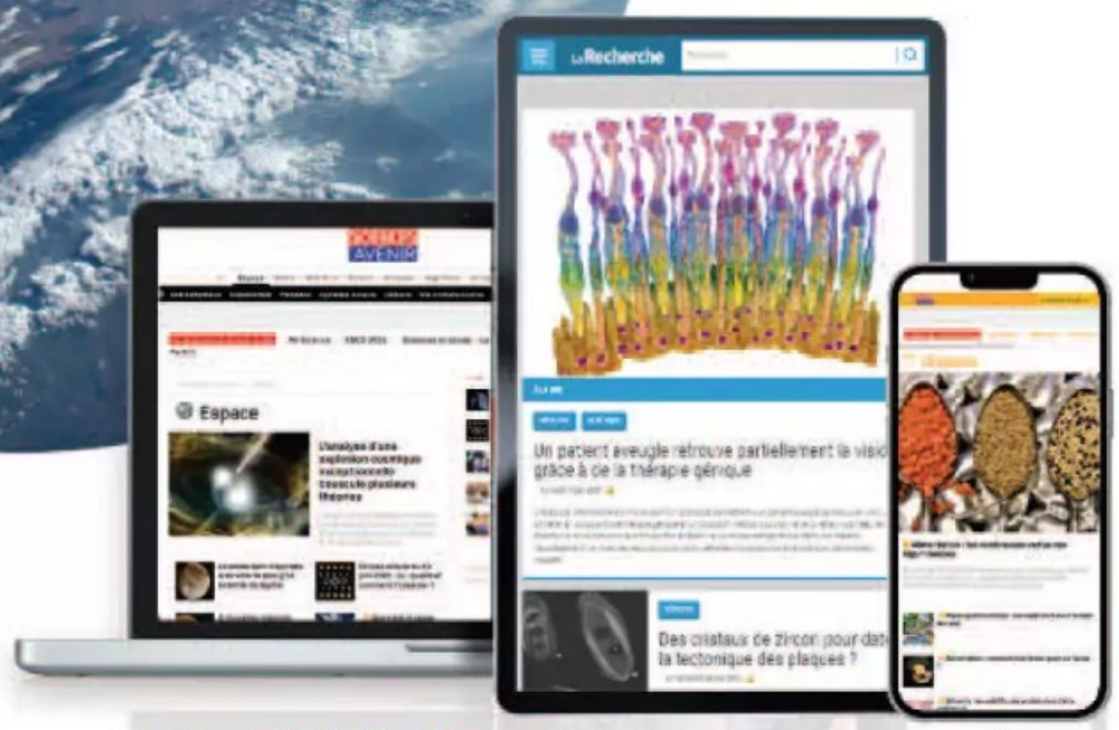
LE TRIMESTRIEL

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 millions de fans !	plus de 303 000 followers	plus de 165 000 instagrammeurs	Plus de 67 000 abonnés professionnels	plus de 23 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

TRANSVERSALES

PATRICE TOUZEAU

Zafar, le dauphin mâle solitaire, a fréquenté durant trois ans les eaux finistériennes en allant au contact des humains.

Rencontres avec des mammifères marins

Au travers de biographies marines, l'anthropologue Fabien Clouette analyse notre comportement à l'égard du monde sauvage.

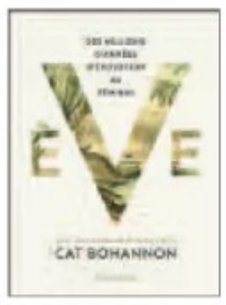
PORTRAITS You est un phoque célèbre sur le littoral atlantique français pour avoir grandi parmi les surfeurs de Gironde. Considéré par les scientifiques comme à la « *limite de la domestication* », il sera « *réensauvagé* » et mènera finalement « *une vie de phoque* » auprès de ses congénères. Zafar est un grand dauphin, dont le squelette est aujourd'hui exposé aux Pays-Bas, alors que sa renommée s'est faite dans les eaux du Finistère. L'animal solitaire venait régulièrement au contact des humains et rudoyait parfois les embarcations. En 2020, lorsque les humains se confinent, il perd son public. Pour tromper son ennui, il suivra alors un brick-goélette qui, après avoir mouillé à Douarnenez, met le cap sur les côtes néerlandaises, où s'arrête tragiquement son parcours. Kalon est le nom donné à un jeune rorqual échoué par une ONG soucieuse de créer de l'empathie sur les réseaux sociaux. Le souffle et le regard de l'animal encore vivant troublent les humains qui l'entourent et divergent sur la marche à suivre. Faut-il assister sans intervenir à l'agonie de la baleine ou remettre à l'eau coûte que coûte un animal peut-être malade ?

De même, scientifiques et plaisanciers interprètent différemment les agissements des orques du clan Gladis, qui attaquent les plaisanciers dans le golfe de Gascogne. Est-ce pour se venger des humains ? Ou un jeu à la mode chez ces animaux hautement sociaux ? Au travers de ces biographies singulières d'animaux « déviants », l'anthropologue Fabien Clouette nous donne à voir en miroir les réactions des humains et notre incompréhension fondamentale de ces destins marins. ■ **Sylvie Rouat**

Des vies océaniques, Fabien Clouette, Seuil, 240 p., 22 €

SOMMAIRE

▶ C'est à lire p. 90
▶ C'est à voir p. 92
▶ Chroniques p. 94
▶ Questions de lecteurs p. 96
▶ Le ciel du mois p. 97
▶ Jeux p. 98



L'évolution au féminin

BIOLOGIE Ce livre revisite 200 millions d'années de l'histoire de la biologie de l'évolution en plaçant les femmes au centre. Examinant comment celles-ci ont évolué différemment des hommes — une problématique longtemps éludée, avec des effets négatifs par exemple sur les soins —, l'auteure montre que l'on peut apporter des réponses à des questions essentielles que les femmes se posent sur leur corps. Bien documenté, plein de références à la littérature ou au cinéma, il reste grand public, volontiers irrévérencieux dans le ton et provocateur dans ses hypothèses. **V. G.**

Ève. 200 millions d'années d'évolution au féminin, Cat Bohannon, Flammarion, 640 p., 25 €

Ce que révèle l'ADN environnemental

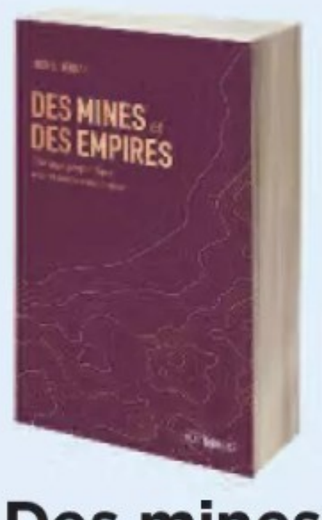
BIODIVERSITÉ Imaginez l'ébahissement des naturalistes des siècles passés : plus besoin de capturer au péril de sa vie des spécimens, de prélever leurs tissus, pour évaluer la biodiversité d'un lieu donné. On peut aujourd'hui cribler les sols et l'océan à la recherche des traces d'ADN laissées par des êtres vivants. C'est ainsi qu'on a retrouvé la trace de mastodontes au Groenland. Un monde jusqu'alors invisible se révèle grâce aux nouvelles techniques de biologie moléculaire, raconte l'auteur, lui-même naturaliste. **R. M.**

L'ADN fantôme. Quand l'invisible laisse des traces, Benjamin Allegrini, Les Liens qui libèrent, 278 p., 20 €

La lutte oubliée pour la Loire sauvage

AMÉNAGEMENT Lorsqu'en 1986, l'État valide l'édification de quatre barrages sur la Loire, *« l'ultime fleuve non suraménagé d'Europe »*, des citoyens réunis sous la bannière Loire vivante décident d'occuper le site du projet de barrage à Serre-de-la-Fare (Haute-Loire). Cinq ans durant, ils vont batailler en s'appuyant sur des arguments scientifiques qui démontrent que *« les fleuves [peuvent] mourir sous les assauts d'aménagements trop brutaux »*. Ce livre témoigne de cette lutte, victorieuse, avec poésie et émotion. **S. R.**

Au pied du barrage, Martin Arnould, Actes Sud, 192 p., 22 €



Des mines de conflits millénaires

SAGA *« Qui tient les mers, tient les métaux »*, disaient les *conquistadors*. Depuis 5000 ans, l'humain déterre des minerais et mène des guerres pour s'en emparer. C'est cette saga que raconte cet ouvrage érudit et absorbant, qui résonne avec le conflit en Ukraine, dont les terres rares — essentielles pour nos smartphones ou équipements médicaux — sont aujourd'hui visées. Les besoins en métaux ont façonné frontières, paysages et civilisations, écrit l'auteur, professeur à l'université du Québec (Canada). Les Hittites, inventeurs de la sidérurgie en 2500 ans avant notre ère, ont guerroyé contre les Babyloniens et les Égyptiens pour exporter le fer fondu par la Méditerranée. Rome a provoqué la première crise écologique de l'histoire en faisant du plomb l'un des piliers de l'Empire (monnaie, munitions, canalisations). Quant à l'or, il a provoqué une ruée vers le Far West et participé au rétrécissement des territoires indiens. ■ **Rachel Mulot**

Des mines et des empires, une saga géopolitique des ressources minérales, Michel Jébrak, MultiMondes, 294 p., 22,50 €

Dans l'ombre d'un trou noir

PIONNIER Voilà une exploration du film *Interstellar* (2014) par Jean-Pierre Luminet particulièrement savoureuse. L'astrophysicien est en effet à l'origine de la « star » du film, un trou noir surnommé Gargantua, dont la représentation spectaculaire a marqué les spectateurs. Mais son nom ne figure pas au générique, le conseiller scientifique étant Kip Thorne (prix Nobel de physique 2017). Pourtant, la représentation de Gargantua repose sur les travaux précurseurs de Jean-Pierre Luminet en 1978. C'est donc tout à la fois l'histoire du film et celle de ses propres recherches que l'auteur décrit dans cet ouvrage. La physique des trous noirs y est détaillée avec rigueur et une dose de lyrisme dont il est coutumier. L'astrophysicien explore aussi la frontière entre science et fiction. On y apprendra comment le réalisateur Christopher Nolan a retouché la simulation du trou noir afin de la rendre plus accessible, mais bien moins rigoureuse, comme l'a confié Kip Thorne à Jean-Pierre Luminet lors de la sortie du film. ■ **Fabrice Nicot**

Voyage dans un trou noir avec Interstellar, Jean-Pierre Luminet, Dunod, 208 p., 17,90 €

Récit du vivant

PARCOURS L'un était Suédois, l'autre Français. Le premier offrit à la postérité *Systema naturae*, monumental ouvrage de classification du vivant. Le second consacra sa vie à la gigantesque *Histoire naturelle*. Carl von Linné et Buffon avaient en commun leur date de naissance, 1707, mais leurs théories divergeaient. Ces formidables biographies comparées dévoilent l'essor et l'évolution des sciences naturelles, mais aussi un Buffon convaincu en son temps *« que la présence de l'Homme a déjà affecté définitivement le climat, et que la planète n'est pas une ressource inépuisable »*. **A. De B.**

Tout ce qui vit et respire, Jason Roberts, Paulsen, 528 p., 24,90 €

EXPOSITIONS

Meaux (77)

Des chevaux et des hommes
Près de 1,9 million de chevaux et mulets furent mobilisés dans les armées françaises pendant la Première Guerre mondiale. Ils ont joué un rôle crucial sur lequel revient ce parcours.
Musée de la Grande Guerre, rue Lazare-Ponticelli, jusqu'au 4 janvier 2026. Rens. : 01.60.32.14.18.

Paris (75)

Intelligences animales
Un parcours de visite consacré aux capacités cognitives des animaux, de leurs modes d'apprentissage à leurs stratégies de communication ou de coopération. Animations et rencontres avec des spécialistes permettent de découvrir des aptitudes méconnues.
Parc zoologique de Paris, avenue Daumesnil, jusqu'au 2 novembre. Rens. : www.parczoologiquedeparis.fr

Ce que l'horizon promet
Entre art contemporain, croyances et sciences, 27 œuvres interprètent la propension humaine à vouloir prédire l'avenir face à l'angoisse de l'incertitude. L'IA n'en étant que le dernier exemple.
Fondation EDF, 6, rue Récamier, jusqu'au 28 septembre. Rens. : 01.40.42.35.35.

La fabrique du temps
En une centaine d'objets, du XVIIIe siècle à aujourd'hui, La Poste montre comment elle a contribué à l'harmonisation des horaires en France, à travers ses innovations techniques et son réseau.
Musée de La Poste, 34, boulevard de Vaugirard, jusqu'au 3 novembre. Rens. : www.museedelaposte.fr

Le monde selon l'IA
Cette exposition examine comment l'intelligence artificielle transforme les processus créatifs (art contemporain, photographie, cinéma…). Le fonctionnement de ces technologies comme leur impact matériel sont questionnés.
Jeu de Paume, 1, place de la Concorde, jardin des Tuileries, jusqu'au 21 septembre. Rens. : 01.47.03.12.50.

Rennes (35)

Léonard de Vinci : à la croisée des arts et des sciences
Des maquettes géantes, des vidéos en 3D et des reproductions de ses peintures et dessins font découvrir l'étendue des travaux de Léonard de Vinci, de ses inventions d'ingénieur à ses créations artistiques. Lire notre reportage sur cette exposition à Villeneuve-d'Ascq: sciav.fr/3S7JtvD
Espace des Sciences, 10, cours des Alliés, jusqu'au 31 août. Rens.: 02.23.40.66.00.

Troisième nature
Le photographe Grégoire Eloy présente dix années d'exploration de paysages naturels, des glaciers pyrénéens jusqu'aux côtes finistériennes. Son travail mêle des techniques photographiques documentant la matière en collaboration avec des scientifiques.
Espace des Sciences, 10, cours des Alliés, jusqu'au 21 septembre. Rens. : 02.23.40.66.00.

Vandoncourt (25)

Fourmis à la loupe
Apparues il y a 120 millions d'années, les fourmis sont présentes sur toutes les terres émergées. La diversité des 12 000 espèces connues est détaillée ici, comme certains de leurs étonnants comportements.
La Damassine, 23, rue des Aiges, jusqu'au 23 décembre. Rens. : 03.81.37.78.30.

ALOEST FILMS

Malades d'Alzheimer et soignants sont réunis pour une expérience réjouissante dans un manoir breton, avec pour objectif de monter un spectacle.

Documentaire

SCIENCES ET AVENIR PARTENARIAT

Les esprits libres

La maladie d'Alzheimer comme vous ne l'avez jamais vue, hors des murs des Ehpad. Le documentaire réalisé par Bertrand Hagenmüller relate avec une infinie douceur et beaucoup de poésie un projet unique en son genre : pendant quinze jours, neuf résidents accompagnés de leurs soignants (infirmier, aide-soignant, psychologue, éducateur) se sont retrouvés dans un manoir en Bretagne, entourés d'artistes et de comédiens. Objectif : monter un spectacle fait de théâtre, d'improvisation et de musique afin de le jouer devant quelques spectateurs. 150 heures de tournage plus tard, le documentaire donne à voir une parenthèse de liberté, où les regards se perdent aussi parfois. On pleure, on rit, les malades sont étonnants de justesse, quand ils se retrouvent soignants sous une blouse blanche, face à de jeunes comédiens évoquant la mémoire qui s'enfuit. Le regard porté ici sur la maladie est lumineux et démontre qu'« *un autre accompagnement est possible* ». Ce sera aussi le titre d'un livre à paraître pour poursuivre l'indispensable réflexion collective sur ce à quoi pourraient ressembler les Ehpad de demain. ■ **Sylvie Riou-Milliot**

En salles le 30 avril - Rens. : sciav.fr/939alzheimer

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

en vente en kiosque

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 1.

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec, groupe 3.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CHRISTOPHE CASSOU ET CÉLINE GUIVARCH

Compagnonnage entre arts et sciences de la durabilité

Nous avons participé à une école d'hiver, ou plutôt de début d'été considérant les températures aux Houches, face au mont Blanc, en cette mi-mars. Elle rassemblait artistes et scientifiques, seniors et étudiants, autour des défis posés par le changement climatique et l'effondrement de la biodiversité. Pourquoi les sciences auraient-elles besoin des arts ? Force est de constater que le seul partage des faits scientifiques s'avère impuissant pour déclencher les transformations vers des modes de vie bas carbone. Ce constat d'impuissance est d'autant plus criant que l'héritage des Lumières, sur lequel se fonde la science, est attaqué brutalement par des politiques réactionnaires et autoritaires aujourd'hui aux États-Unis et en Argentine, qui inondent l'espace de fausses informations pour noyer les faits. Il s'agit dès lors de convoquer les valeurs esthétiques, morales et politiques que les arts portent pour s'orienter autrement dans le futur. Sébastien Dutreuil parle de *« compagnonnage visant à une transformation ontologique »*. Faire vivre une expérience sensible ; rire et pleurer ; faire un pas de côté, décaler les regards et surprendre ; mettre en mot, en mouvement pour expérimenter le vivant et l'énergie des interactions. À travers l'art, une pédagogie clandestine crée des imaginaires et des nouveaux récits incarnés de faire-société et de modes de vie durables. Des master class le matin, des ateliers artistiques l'après-midi : cette école aura été inspirante pour partager les valeurs universalistes et progressistes qui lient sciences de la durabilité et arts. Ces liens sont si forts que lorsqu'un fasciste arrive au pouvoir, ce sont les scientifiques et les artistes qui le menacent, et ce sont eux qu'il faut broyer le plus rapidement possible. ■

Directrice de recherche au CNRS, Institut de recherche en informatique fondamentale (CNRS/université Paris Cité).

CLAIRE MATHIEU

MATHS PAR CLAIRE MATHIEU

Assumer une sélection aléatoire

Pour évaluer un dossier de candidature, on attache beaucoup d'importance aux publications dans les conférences ou revues les plus prestigieuses du domaine. Quelle confiance peut-on accorder à cet indicateur ? La prestigieuse conférence NeurIPS a mené à bien à deux reprises l'expérience suivante : le choix des articles à accepter étant fait par un comité de programme formé de chercheurs actifs du domaine et dont la composition varie d'année en année, NeurIPS a fait évaluer un échantillon des articles soumis par, non pas un, mais deux comités de programmes fonctionnant indépendamment. Résultat : parmi les articles sélectionnés par le premier comité de programme, la moitié auraient été refusés par le deuxième comité ! Il y a donc en réalité une grande part d'aléa dans ces sélections, qui sont cependant déterminantes pour les débuts de carrière. Je propose la méthode suivante pour les comités de programme : d'abord, prendre les décisions pour les articles pour lesquels il y a un consensus clair. Puis on entre dans la « zone grise ». Il resterait, par exemple, une centaine d'articles à sélectionner parmi 200 encore en piste. À ce stade, tirer à pile ou face. L'idée choque : comment accepter que des décisions dont les conséquences peuvent être si importantes soient prises par l'aléa ? Et pourtant c'est déjà ce qui se passe, et il s'agirait simplement de l'assumer. ■

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

« Cancel culture » : l'arroseur arrosé à l'ère de la post-vérité

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 : *L'I.A. expliquée aux humains*, Seuil, 2024.

Au seuil de son second mandat, Donald Trump a décidé de suspendre les fonds publics alloués aux projets de recherche jugés contraires à la « neutralité scientifique » et donc néfastes, d'empêcher des chercheurs américains de se rendre à des manifestations internationales, de supprimer les pages Web des sites fédéraux consacrées au réchauffement climatique et de déréférencer de précieux jeux de données publiques provenant d'agences sur l'environnement. Ces attaques contre les sciences répondent aux lignes idéologiques de la Heritage Foundation décrites dans le Project 2025* et sur lesquelles s'est adossé le candidat Trump au cours de sa campagne électorale ; elles les rendent effectives en promettant de suspendre le financement d'environ 3400 projets. Il n'y a là rien de très surprenant. Seule la méthode déconcerte par sa rusticité : la liste des projets déclarés inutiles et donc abandonnés a été établie par filtrage sur le titre et le résumé du projet, à partir d'un ensemble de mots-clés incluant « genre », « race », « inclusion », « diversité », « climat », etc. Ainsi, des projets de physique fondamentale sur la matière noire ou de biologie théorique évoquant la race ou le genre ont-ils été suspendus. Pratiquée depuis une dizaine d'années, la culture de l'effacement (« cancel culture » en anglais) jette l'opprobre sur des personnes, des groupes ou des institutions au regard d'actions ou surtout de paroles jugées inacceptables ou offensantes. Et, au nom de l'« injustice épistémique », on dénie à la science sa neutralité, puisque tous ne sont plus identiquement autorisés à la produire… Par un étrange retour de bâton, les mêmes méthodes s'appliquent désormais à l'encontre des tenants de la culture de l'effacement eux-mêmes en bannissant les mots qu'ils emploient, pour les effacer. Malheureusement, elles mettent aussi en cause la neutralité de certaines recherches, comme celles relevant du prétendu « fanatisme climatique ». Assurément, cette nouvelle version de l'arroseur arrosé n'a rien de cocasse car tous en sont victimes, et pas uniquement l'arroseur ! ■

* sciav.fr/project2025.

BRUNO LÉVY

L'ŒIL DE LASCAR

Des chercheurs de l'université de Californie du Sud (États-Unis) ont observé un comportement étonnant chez des rongeurs : face à un congénère inconscient, des souris tentent de le « ranimer ». Cette attitude « prosociale », étudiée et publiée dans la revue *Science*, suggère l'existence de mécanismes neuronaux d'empathie chez les animaux. **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.

BOTANIQUE

La forêt amazonienne a-t-elle besoin du Sahara pour survivre ?

Makv M.

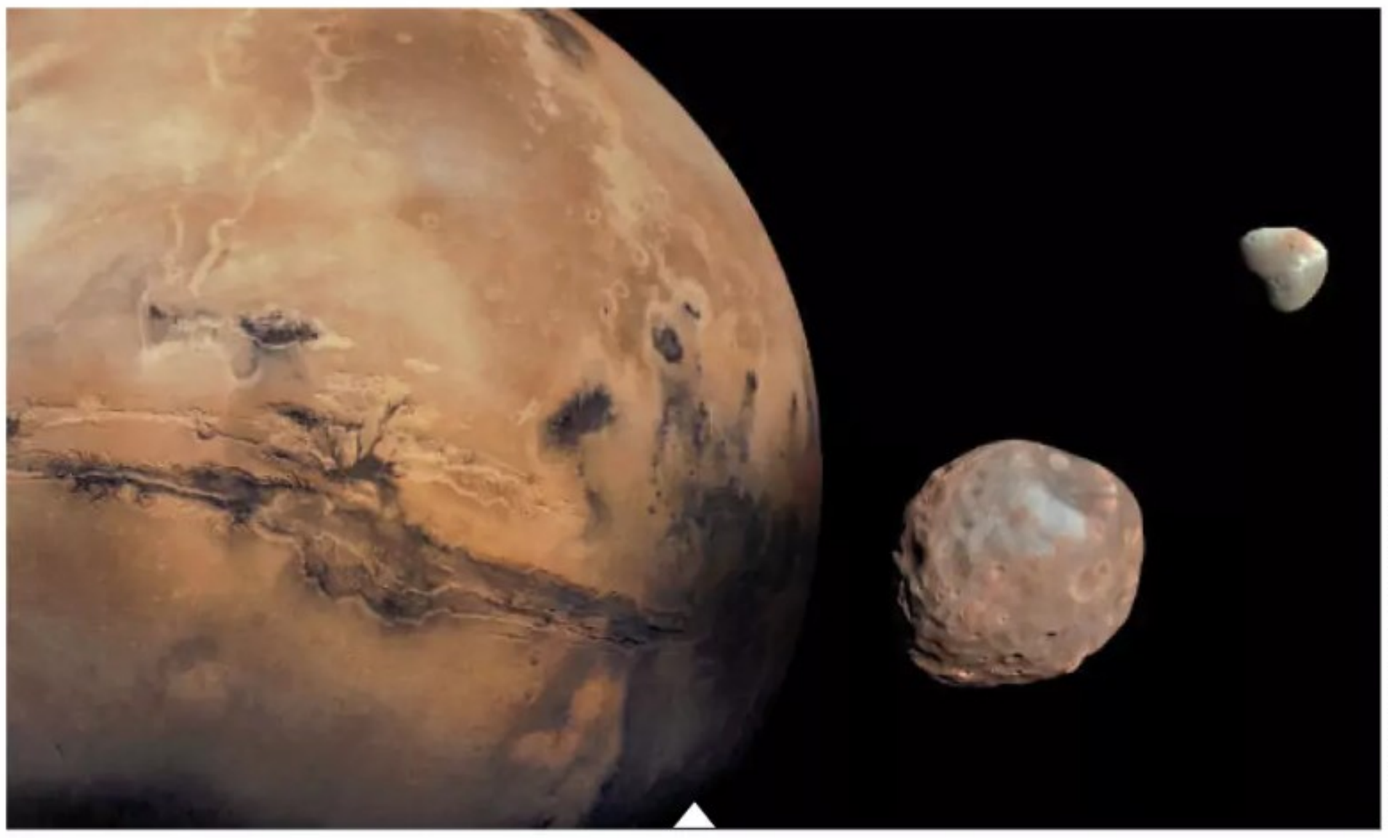
Alors qu'une distance d'environ 5 000 km les sépare, le Sahara nourrit l'Amazonie. Chaque année, sur les 182 millions de tonnes de poussière qui quittent le Sahara, entre 8 et 28 millions traversent l'Atlantique et fertilisent la forêt amazonienne. Cette poussière est riche en phosphore issu des sédiments d'un ancien lac. Or ce nutriment, rare dans la plupart des sols terriens mais essentiel à la croissance des plantes, compense en partie les pertes dues au ruissellement des pluies. Toutefois, les quantités de phosphore varient d'une année à l'autre (jusqu'à 86 %!) et le réchauffement climatique, en modifiant les régimes de pluies en Afrique du Nord, pourrait perturber ce fragile équilibre. ■ **Loïc Chauveau**

DERMATOLOGIE

Peut-on prendre des coups de soleil à l'ombre ?

Tangui B.

On se croit bien à l'abri des coups de soleil à l'ombre et pourtant, ce n'est pas le cas. Certes, l'ombre réduit l'exposition aux rayonnements ultraviolets (UV), mais pas entièrement. Les UV de type B (qui favorisent les coups de soleil mais aussi les cancers de la peau) peuvent frapper indirectement la peau en rebondissant sur des surfaces comme le sable et l'eau, qui réfléchissent 10 à 15 % des rayons du Soleil. Ainsi, à la plage, un parasol ne protège pas totalement : les UV se réfléchissent sur le sable et l'eau à des angles faibles pour atteindre la peau située à l'ombre. Même sous un ciel nuageux ou par temps frais, les UV restent actifs. ■ **Anne-Sophie Tassart**



NASA/JPL-CALTECH/GSFC/UNIV. OF ARIZONA

Phobos et Déimos (à droite), les deux satellites naturels de Mars (montage photo).

ASTRONOMIE

Une lune peut-elle avoir une lune ?

Jeff G.

Personne n'en a encore jamais observé et ce type d'astre n'a même pas de nom officiel. Mais les calculs réalisés en 2018 par Sean Raymond, de l'université de Bordeaux, et Juna Kollmeier, du Carnegie Observatories de Pasadena (États-Unis), indiquent que des lunes de lunes pourraient théoriquement exister. Ils proposent de les appeler « submoons » (sous-lunes), quand d'autres astrophysiciens préfèrent les qualifier de « moonmoons » (lunes de lune). Il serait toutefois extrêmement difficile de les détecter. Et des conditions très strictes doivent être réunies pour qu'un tel astre puisse bel et bien se former. Cela pourrait se produire à la suite d'un impact qui arracherait un morceau de roche à la lune selon une vitesse et un angle bien déterminés. La sous-lune devrait ensuite se trouver à bonne distance de la planète mère pour ne pas être piégée par la force de gravitation. Elle devrait enfin rester proche de la lune pour ne pas quitter son champ de gravité.
L'équilibre d'un tel système serait dans tous les cas fragile et sa durée de vie relativement brève, car l'orbite d'une lune change au cours de son évolution, comme c'est arrivé avec notre satellite naturel. Selon Sean Raymond et Juna Kollmeier, seules des sous-lunes d'environ 10 km de diamètre gravitant autour de lunes de quelques milliers de kilomètres de large, orbitant elles-mêmes à une bonne distance de leur planète, pourraient perdurer. Ils en concluent que quatre lunes pourraient en avoir abrité au cours de leur histoire : Titan et Japet, qui gravitent autour de Saturne, Callisto, deuxième plus gros satellite de Jupiter, et… notre satellite naturel ! ■ **Franck Daninos**

LE CIEL DE MAI

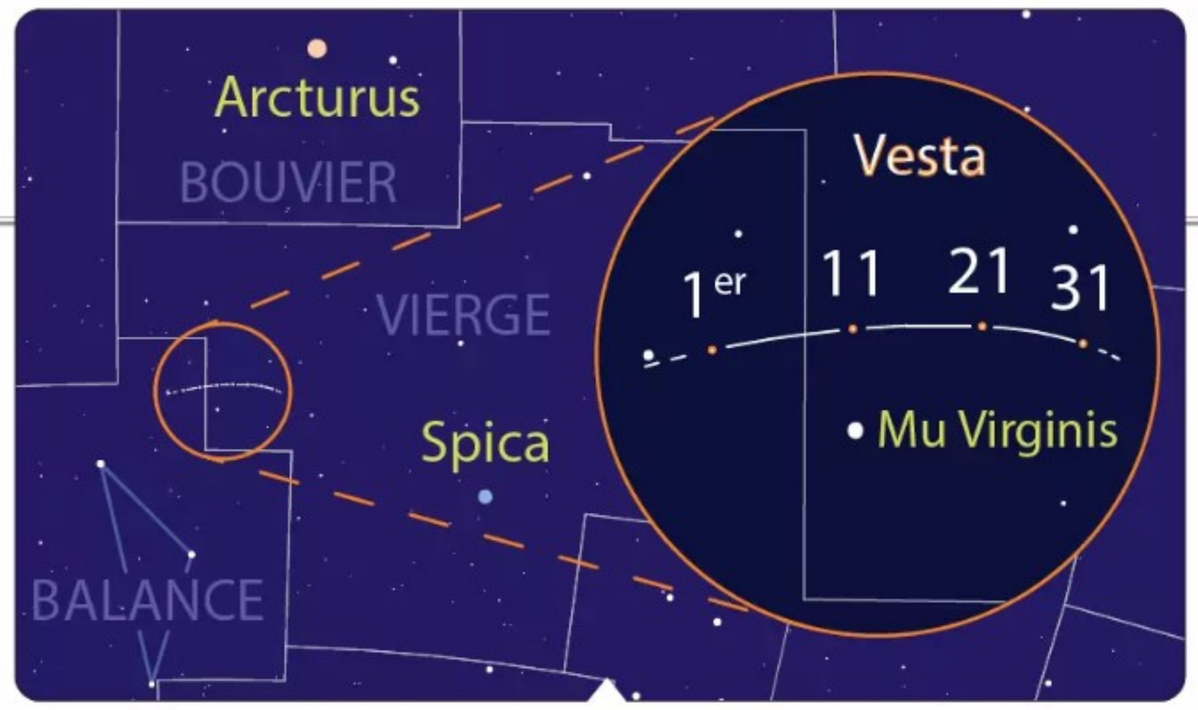
PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

MERCURE
La petite planète est bien trop basse dans les lueurs du levant pour être observable en mai. Elle passe en conjonction supérieure avec le Soleil le 30.

VÉNUS
L'étoile du Berger est visible le matin, assez bas vers l'est. En début de mois, elle se lève 1 h 30 avant l'astre du jour et n'atteint même pas 10° de hauteur une demi-heure avant le lever de notre étoile. En fin de mois, les mêmes données s'élèveront à 1 h 50 et 13°.

MARS
Présente en soirée, la planète Rouge se distingue au sud-ouest à mi-hauteur dans le ciel, bien que son éclat soit en baisse constante depuis son passage à l'opposition de janvier. Elle se couche en seconde moitié de nuit et, le 26, entre dans la constellation du Lion.



Déplacement de Vesta aux confins de la Balance et de la Vierge en mai. Deuxième plus gros astéroïde après Cérès, avec un diamètre moyen d'environ 500 km, c'est aussi le plus lumineux.

À la découverte de l'astéroïde Vesta

LE 2, VESTA PASSE À L'OPPOSITION. Il reste observable toute la nuit ce mois-ci et frôle la limite de visibilité à l'œil nu sous un ciel dénué de pollution lumineuse. Vesta est aisément accessible aux jumelles.

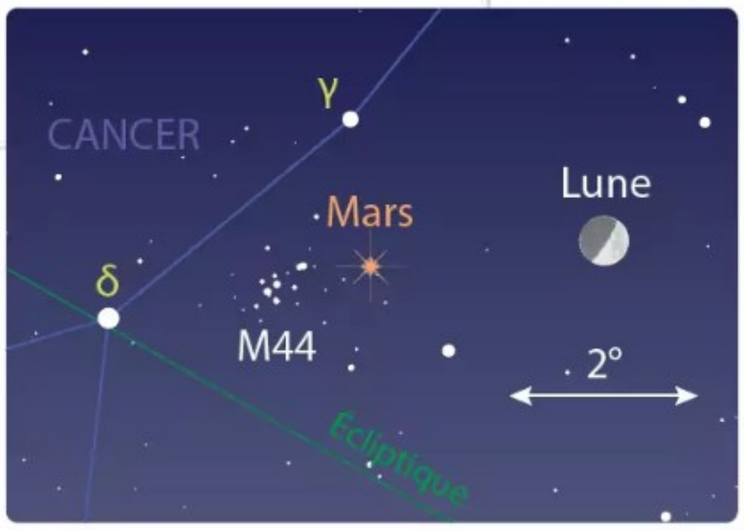
Notre conseil Vers 23 h, repérez la brillante étoile orangée Arcturus, déjà bien haute vers le sud-est. Plus bas, vous trouverez Spica de la Vierge et sur sa gauche, la Balance au tracé triangulaire. Au cœur de cette zone, l'étoile μ (mu) Virginis vous servira de repère pour suivre Vesta et son déplacement nuit après nuit.

JUPITER
La géante gazeuse n'est plus visible qu'en soirée vers l'ouest. En fin de mois, elle disparaît dans les lumières du couchant. Rendez-vous cet été pour son retour en fin de nuit.

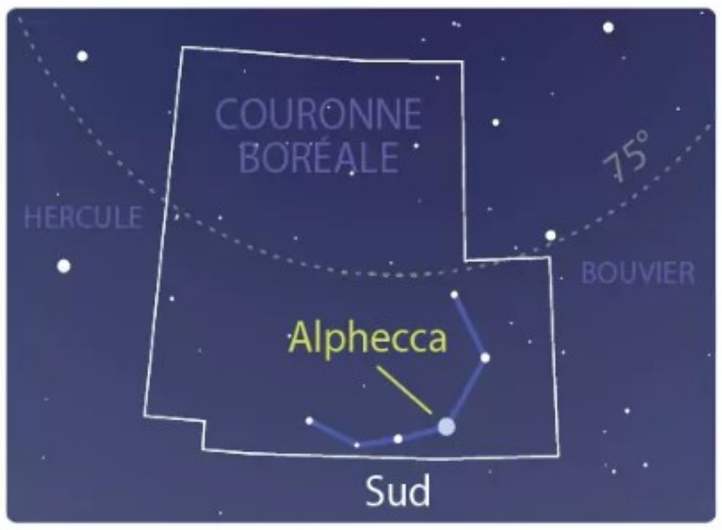
SATURNE
La planète aux anneaux s'éloigne peu à peu des lueurs matinales mais ne gagne que lentement de la hauteur au fil des jours, en raison d'un écliptique encore peu incliné sur l'horizon en cette saison.

L'appli du mois

SKY TONIGHT est une application gratuite (accès premium à 14,99 €), en français, pour iOS et Android. Fluide et intuitive, elle permet d'identifier les astres et de suivre leur trajectoire dans le ciel heure par heure : une fonction précieuse pour préparer ses observations. L'application signale aussi les événements célestes à ne pas manquer.



LE SOIR DU 3, 2 H APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, la Lune, la planète Mars, l'amas de la Crèche M44 et l'étoile δ (delta) du Cancer seront alignés. À observer aux jumelles.



LA COURONNE BORÉALE EST UNE PETITE CONSTELLATION dont les étoiles principales forment un arc de cercle. On la trouve très haut dans le ciel de mai en milieu de nuit.

DU 22 AU 24, 1 H AVANT LE LEVER DU SOLEIL, admirez les jolis rapprochements et les alignements proposés par la Lune et les planètes Vénus et Saturne vers le levant.

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

JEUX

PAR PIERRE BERLOQUIN

SOLUTIONS DANS LE PROCHAIN NUMÉRO

Bon voyage, Madame la Comtesse

À la dernière kermesse du village, la comtesse a gagné le gros lot de la tombola : partir à la découverte de la République de San Marino. Or, sur les mille billets numérotés de 1000 à 1999, la comtesse n'en avait acheté qu'un seul.

Sachant que :
- le nombre ne comporte pas de 8,
- la somme des quatre chiffres de ce nombre est égale à 23,
- la somme du premier et du dernier chiffre est égale au troisième chiffre,
- le numéro est composé de quatre chiffres différents,

saurez-vous déterminer le numéro gagnant ?

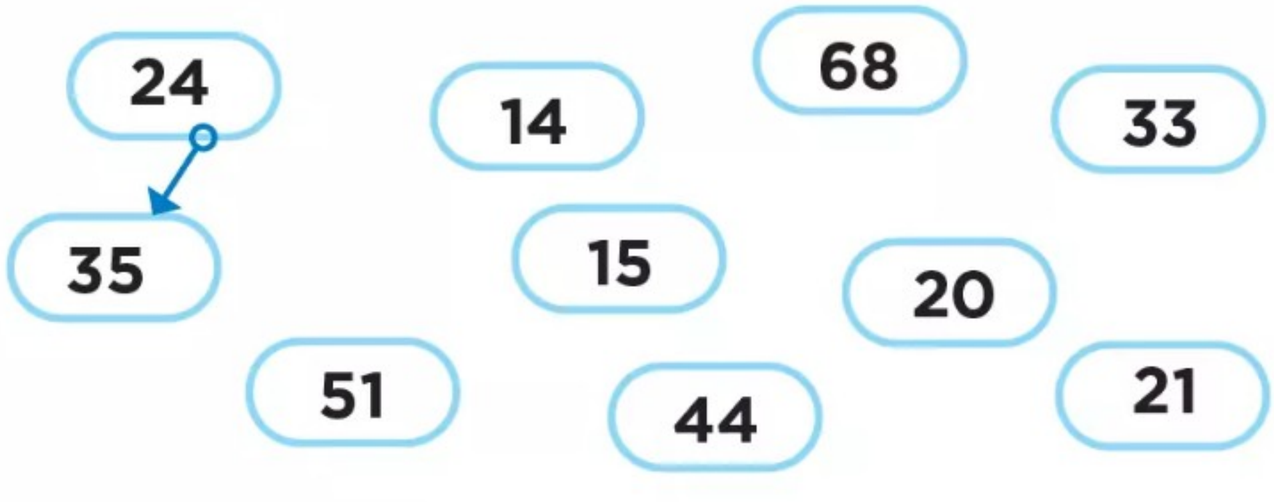
Somme ou produit ?

Ne succombez pas à la maladie du sommeil ! Dans cette opération, chaque lettre représente un chiffre. À vous de retrouver la correspondance lettre-chiffre.

```
  T S E
× T S E
-------
E N D O R T
```

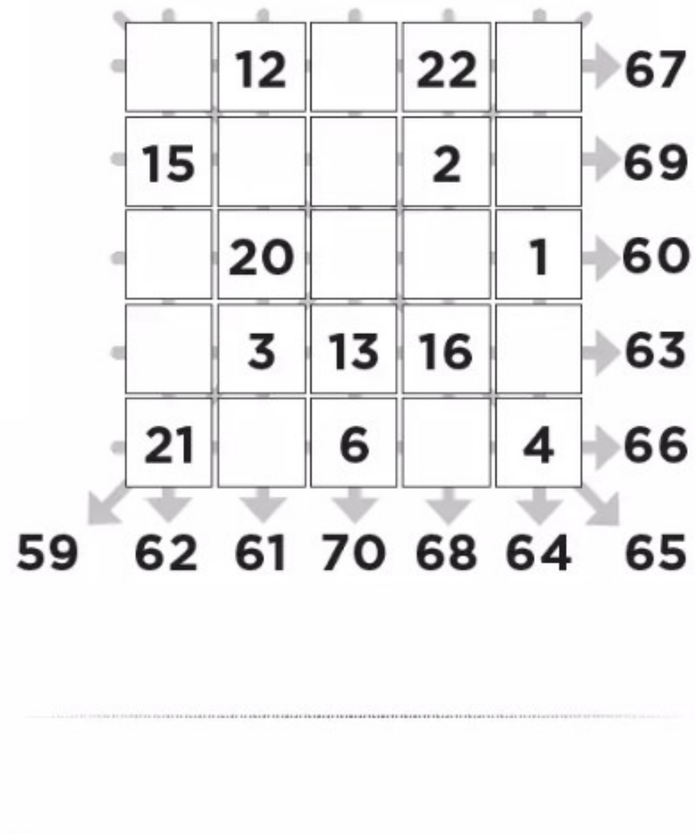
Trajet numérique

Saurez-vous joindre ces dix nombres en partant de 24, sans passer deux fois par le même et sans qu'aucun n'ait de diviseur commun avec le suivant ?



Carré magique

Complétez ce carré magique pour qu'il contienne tous les nombres de 1 à 25 et obtenir les sommes qui se suivent de 59 à 70 sur les lignes, les colonnes et chacune des deux diagonales.



Restaulogique

Dans la logique de ce menu, quel prix devrait être affiché pour les toasts ?

Menu

Confiture	18
Jus d'orange	20
Poire hollandaise	32
Œuf-bacon	18
Pétales de maïs	26
Toasts	?

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir » n° 938, avril 2025

Addition chiffrée

4231 + 4231 = 8462

Parcours fléché

Parc, copie, poêlon, loterie.

Chasse aux signes

- 1 + (2 × 3 × 4 × 5) + 6 − 7 + (8 × 9) = 190

Trajet numérique

112, 57, 68, 35, 99, 43, 119, 30, 53, 34

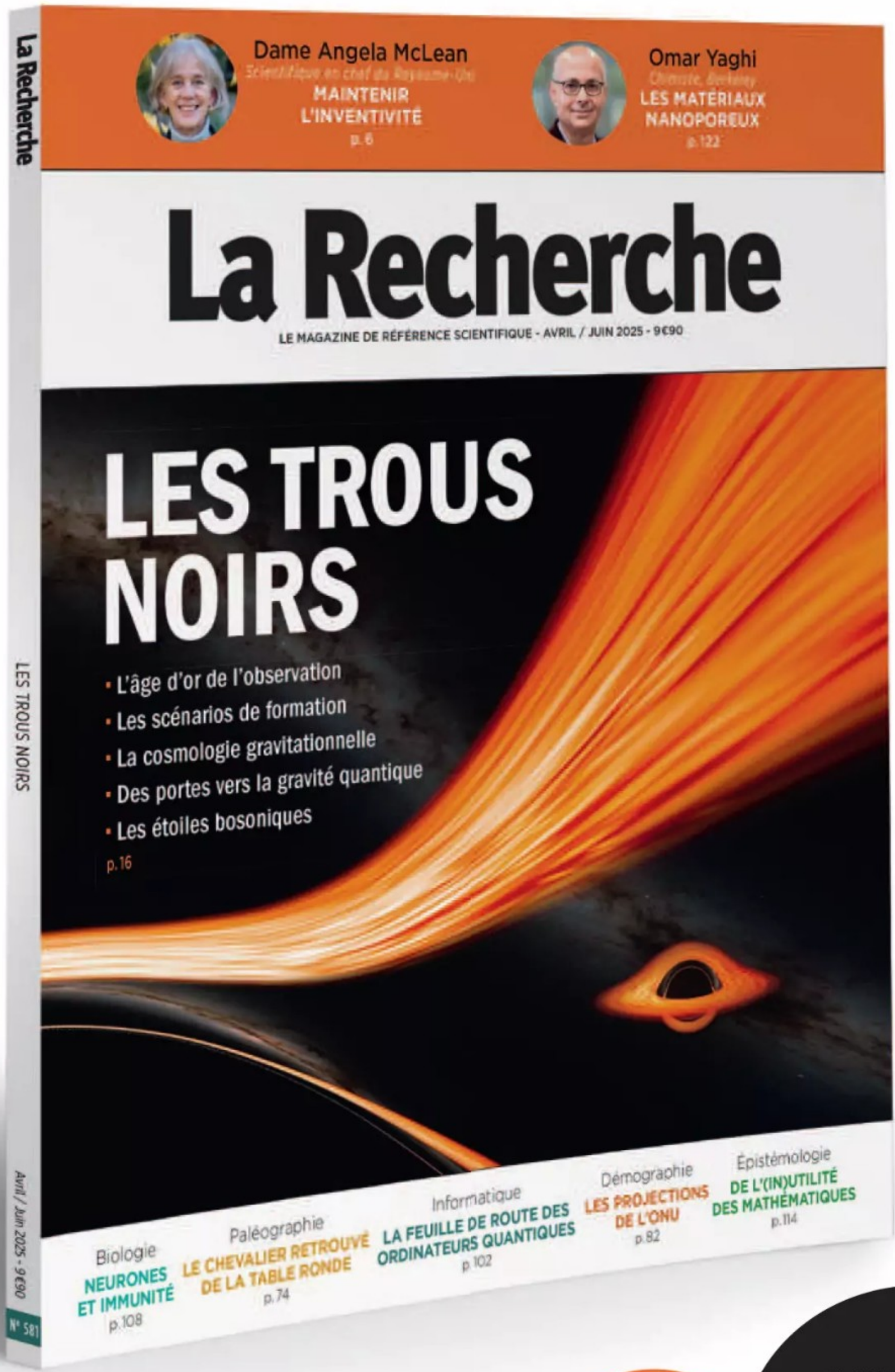
À cloche-lettre

PORTE AVIONS de 3 en 3 dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin

35 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche
LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE



Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

NOUVEAU

C10

REEV

JUSQU'À

970 KM

D'AUTONOMIE

à partir de

329 € / mois*

Il dépasse les bornes.

Parcourez jusqu'à 145 km en 100% électrique et jusqu'à 970 km grâce à son prolongateur d'autonomie pour une expérience de conduite électrique augmentée.

À PARTIR DE 329€/MOIS*. 1ER LOYER DE 4 000€*.
LLD 48 MOIS/40 000KM.

* Exemple pour une location longue durée (LLD) d'une Leapmotor C10 REEV STYLE 158KWH neuve hors option. Offre non cumulable jusqu'au 30/04/2025, réservée aux particuliers dans le réseau participant sous réserve d'acceptation du dossier par CREDIPAR, loueur et SA au capital de 138.517.008 €, RCS Versailles n° 317 425 981, ORIAS 07004921 (www.orias.fr), 2-10 boulevard de l'Europe 78300 Poissy. Montants exprimés en TTC (hors assurances).

Modèle présenté : C10 REEV DESIGN neuf avec option (361€ TTC/mois aux mêmes conditions). Consommation mixte gamme C10 REEV : Consommations min/max (l/100km) : 0,4 ; Émissions de CO2 (g/km) : 10 à l'usage. Jusqu'à 970km d'autonomie combinée en WLTP.

POUR LES TRAJETS COURTS, PRIVILÉGIEZ LA MARCHE OU LE VÉLO #SEDÉPLACERMOINSPOLLUER

LEAPMOTOR

LANCEZ-VOUS