

LE TEMPS

**SOUS L'ŒIL
DE LA
SCIENCE**

**L'horloge optique
redéfinit-elle la seconde?**

**Y a-t-il un temps
quantique?**

**Les trous noirs
arrêtent-ils le temps?**

**L'IA peut-elle
prédire l'avenir?**



MÉDECINE, PALÉONTOLOGIE, ENVIRONNEMENT...

L'information scientifique Mise À Jour
Votre rendez-vous avec l'actualité de la recherche



Nouveauté 2026

ABSOLU OUZBEKISTAN

Sur la Route de la Soie en tout inclus au départ de Paris

DU 11 AU 22 OCTOBRE 2026 (12 JOURS/10 NUITS)

Je découvre ce circuit >>>



Les points forts :

- **Un circuit de 10 jours** au cœur des cités mythiques de la Route de la Soie.
- **Une traversée du pays d'Ouest en Est**, du désert du Kyzyl-Koum aux oasis légendaires en passant par Khiva, Boukhara et Samarcande.
- **Un programme de visites incluses** vous plongera dans un Orient intact, où minarets et mosaïques racontent **mille ans d'histoire** : Oasis préservées, caravansérails, coupoles turquoises, marchés aux épices,
- **Un voyage à partir de 2690 €/pers TOUT INCLUS** au départ de Paris en hôtels de charme avec une expérience de nuit en yourte et en petit groupe, pour en apprécier toute l'essence !



Téléchargez la documentation sur

www.voyages-lecteurs.fr/sv



Informations & réservations

01 41 33 57 48 en précisant **SCIENCE&VIE**

du lundi au vendredi de 9h à 18h30 et le samedi de 9h à 13h30

HORS SÉRIE SCIENCE & VIE



ÉDITEUR
 Reworld Media Magazines SAS
 Siège social: 40 avenue Aristide-Briand, 92220 Bagneux
 Directeur de la publication: Gautier Normand
 Actionnaire: Reworld Media France
 (RCS Nanterre 477 494 371)
 Tél. accueil: 01 41 33 55 00
 www.science-et-vie.com
 SERVICE LECTEURS: sev.lecteurs@reworldmedia.com

RÉDACTION
 DIRECTRICE DE LA RÉDACTION: Danielle McCaffrey
 ASSISTANTE DES RÉDACTIONS SCIENCE & VIE ET SCIENCE & VIE
 HORS-SÉRIE: Christelle Borelli

RÉALISATION SCIENCE & VIE HORS-SÉRIE

COM'Presse, 6 rue Tarnac, 47220 Astaffort. Tél. 05 53 48 17 60
 RÉDACTEUR EN CHEF: Olivier Carpentier
 RÉDACTRICE EN CHEF ADJOINTE: Amanda Schrepf Sanz
 DIRECTEUR ARTISTIQUE: Émilien Guillon
 RÉDACTRICE PHOTO: Géraldine Lafont
 SECRÉTAIRES DE RÉDACTION:
 Lita Doyal, Vincent Ourso, Olivier Vignancour
ONT COLLABORÉ À CE NUMÉRO: Khera Bettayeb, Riva
 Brinet-Spiesser, Armelle Capelin, Mathias Chailot, Adrien
 Denèle, Michael Ducousso, Evard-Ouicem Eljaoui, Lise
 Gougis, Hugo Leroux, Céline Lison, David Marchand, Sandrine
 Mary, Charlotte Mauger, Héloïse Rambert, Natacha
 Scheidauer

DIRECTION-ÉDITION
 ÉDITEUR: Germain Périnet
 ÉDITRICE ADJOINTE: Charlotte Mignerey

PUBLICITÉ
 DIRECTRICE GÉNÉRALE: Élodie Bretaudeau-Fontelles
 DIRECTRICE DU PÔLE COMMERCIAL: Catherine Mireux (19 02)
 DIRECTRICE DE LA PUBLICITÉ: Anne Lefeuve
 DIRECTEUR DE LA PUBLICITÉ: Fabrice Guillemin (06 16 55 55 42)
 PLANNING: Angélique Conso (53 52), Stéphanie Guillard (53 50)
 RESPONSABLE TRAFIC: Catherine Leblanc (43 86)

MARKETING / INTERNATIONAL
 RESPONSABLE MARKETING: Giliane Douls
 DIRECTRICE DE LA COMMUNICATION: Laure Charvert

ABONNEMENTS ET DIFFUSION
 DIRECTRICE MARKETING DIRECT: Catherine Grimaud
 CHEF DE PRODUIT MARKETING DIRECT: Laure Letellier
 RESPONSABLE SERVICE DIFFUSION: Philippe Merrien
 RESPONSABLE DES VENTES: Arthur Marec

RELATIONS CLIENTÈLE ABONNÉS
 Une question sur votre abonnement? Appelez-nous au 01 46 48 48 96
 (de 9 h à 19 h, du lundi au vendredi, et le samedi de 9 h à 18 h, prix d'un
 appel local).
 Pour toute réclamation/modification concernant votre abonnement :
 www.serviceabomag.fr
 Retrouvez toutes nos offres sur www.kiosquemag.com
 Par courrier: Service abonnement Science & Vie,
 59898 LILLE Cedex 9

Prix de vente: 6,90 €
 Prix de l'abonnement annuel: 61,20 € (12 numéros) ou 102,60 €
 (12 numéros + 6 hors-séries)

Pour les États-Unis et le Canada: Express Mag, 8155 rue Larrey,
 Anjou (Québec), H1J 2L5, Tél. 1 800 363-1310 (français)
 et 1 877 363-1310 (anglais); fax (514) 355-3332
 Pour la Suisse: Edigroup Suisse, 022 860 84 50
 reworld@edigroup.ch
 Pour la Belgique: Edigroup Belgique, 070 233 304
 reworld@edigroup.be
 Autres pays: nous consulter.
 Commande d'anciens numéros et de reliures au 01 46 48 48 83

FABRICATION
 DIRECTION DES OPÉRATIONS INDUSTRIELLES: Bruno Matillat
 CREATOPRINT

PRÉPRESSE
 RESPONSABLE DE SERVICE: Sylvain Boularand
 Imprimeur: Maury - France
 N° ISSN: 1966-9437
 N° de commission paritaire: 1025 K 79977
 Dépôt légal: avril 2026



Incertain Chronos

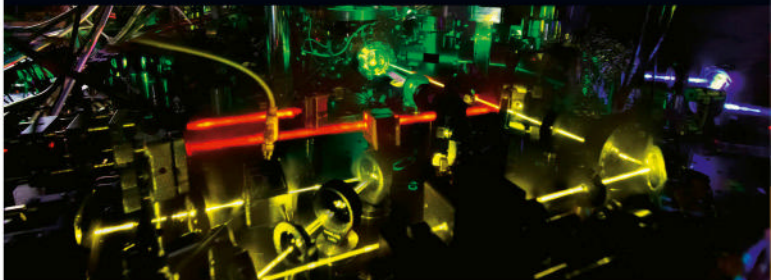
Le temps qui passe est comme le serpent de mer : insaisissable et virtuellement tout-puissant. Pour les scientifiques, sa nature réelle n'est rien moins qu'incertaine. *“Les gens comme nous, qui croient à la physique, écrit Einstein, savent que la distinction entre le passé, le présent et l'avenir n'est qu'une illusion obstinément persistante.”* Ce n'est pas que le temps n'existe pas ; mais il semble avoir plusieurs directions. Ce numéro spécial regorge d'exemples et d'expériences illustrant cet apparent paradoxe. N'empêche, tel le mythique ophidien surgissant des flots, le temps qui passe a le chic pour se rappeler à notre bon souvenir en affleurant de façon inopinée du flux de l'actualité. En témoigne la réapparition inattendue, au début de l'année, d'une épave engloutie depuis les années 1640 dans le port de Stockholm, en Suède. Ses bordages de bois de chêne plutôt bien conservés – il n'y a pas de vers marins xylophages en mer Baltique – pointent désormais à quelques mètres du rivage (photo). Cette apparition est le résultat de la baisse locale du niveau de la mer : –67 cm par rapport aux moyennes enregistrées depuis la fin du XIX^e siècle. Soit 275 milliards de tonnes d'eau disparues dans la nature. Les conditions météorologiques exceptionnelles à l'origine de cet événement spectaculaire sont très certainement la conséquence du réchauffement climatique dans l'Arctique. À Stockholm, comme partout, le temps, dans tous les sens du terme, qu'on le reconnaisse ou pas, est à l'œuvre. Témoin cette épave un peu obscène, un peu effrayante. Tel le spectre du roi dans *Hamlet*, elle dévoile au grand jour une vérité que d'aucuns voudraient occulter. Oui, le climat est en train de changer, et cela fait longtemps que ça dure. Non, contrairement au temps, ce n'est pas une illusion. Oui, il va falloir redoubler d'efforts et d'ingéniosité scientifique pour en atténuer les conséquences. De préférence sans perdre de temps.

Olivier Carpentier

AVANT-PROPOS

06 "Le temps est un enjeu de pouvoir"

Le chercheur Noël Dimarcq et l'historien des sciences Denis Savoie décryptent la révolution des horloges atomiques et optiques, leurs enjeux scientifiques et géopolitiques... et ce que leur précision extrême change déjà dans nos vies.



LE CONCEVOIR

14 Combien y a-t-il de temps?

La physique montre qu'il peut ralentir, se dilater... et même perdre son ordre habituel.

18 Peut-on l'arrêter?

Trous noirs, horloges atomiques, atomes ultra-froids... le temps peut ralentir ou sembler se figer.

20 Attoseconde, l'infiniment bref
Comment des impulsions

laser ultrabrèves permettent d'explorer la matière à l'échelle du milliardième de milliardième de seconde.

26 3 méthodes pour remonter le temps

Temps quantique, multivers, trous de ver... voyager dans le passé est-il toujours de la science-fiction?

28 Qui sont les maîtres des horloges?

Plongée au cœur du système international qui fabrique le Temps universel coordonné (UTC) et garantit l'heure de nos smartphones.



LE VIVRE

56 Notre corps est une horloge

Chronobiologistes et neuroscientifiques dévoilent les rouages de notre horloge interne.

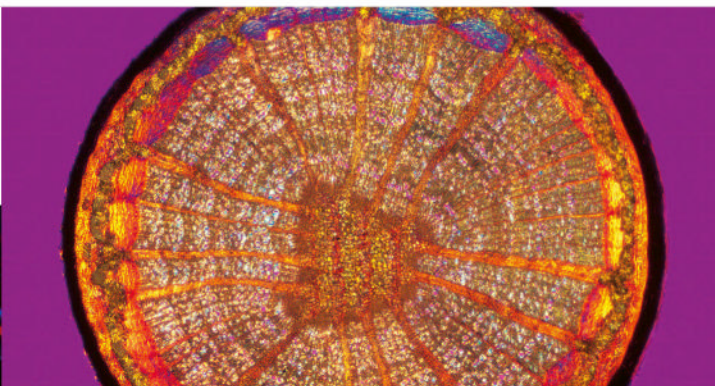
60 Chronoception, mode d'emploi

Pourquoi le temps file-t-il quand on s'amuse et s'étire-t-il quand on s'ennuie? Voici les mécanismes qui modèlent notre perception du temps.

Recevez Science & Vie et ses Hors-Série

Votre bulletin d'abonnement se trouve en p. 25. Pour commander d'anciens numéros, rendez-vous sur www.kiosquemag.com

Vous pouvez aussi vous abonner par téléphone au 01 46 48 47 08 ou par internet sur www.kiosquemag.com



LE COMPTER

34 Douze nuances de temps

De Stonehenge aux horloges atomiques, comment les sociétés ont compté, représenté et maîtrisé le temps.

42 "Tout progrès technologique dégage du temps"

L'économiste Erwann Tison analyse comment la productivité, de la machine à vapeur à l'IA, a transformé notre rapport au travail.

46 TIC TOC BIM !

Clepsydras capricieuses, sabliers humides, temps décimal révolutionnaire ou montre binaire illisible... Florilège d'inventions qui ont tenté de mesurer le temps, avec plus ou moins de succès.

48 "Cerveau et musique se synchronisent"

Le chercheur Benoît Bardy raconte comment les neurones s'accordent au rythme, ouvrant des pistes thérapeutiques.

52 Le casse-tête des fuseaux horaires

62 "Chronobiologie, une science qui a de l'avenir !"

Le neuroscientifique Étienne Challet explique comment nos horloges biologiques influencent jusqu'à l'efficacité des traitements.

66 Notre horloge intime peut-elle dérailler ?

Ces troubles pourraient être des marqueurs précoces de la psychose.

68 La nature, cette archiviste

Carottes de glace, cernes des arbres, isotopes... Les scientifiques décryptent ces archives naturelles.

72 Les animaux sont-ils à l'heure ?

Seiches, geais, singes ou chiens : certaines espèces savent estimer des délais, d'autres s'appuient sur la lumière ou des routines.

74 Quand le vivant ralentit le temps

Fonctionnement et effets de ces horloges internes qui mettent le métabolisme en pause... et inspirent déjà les chercheurs pour de futures missions vers Mars.

78 L'IA peut-elle prédire l'avenir ?

Météo, consommation, santé... Les modèles prédictifs savent anticiper certains futurs proches.

L'ANTICIPER

82 Dans les musées, une lutte acharnée

Conservateurs et chercheurs traquent les moindres menaces pour préserver les œuvres.

86 Le temps, c'est (vraiment) de l'argent

Mesurer le temps coûte cher en énergie. Des physiciens explorent comment réduire cette facture... quitte à repenser notre façon de "lire" le temps.

88 Comment la guerre accélère

Sur le champ de bataille, gagner des secondes devient stratégique. Mais jusqu'où accélérer sans court-circuiter le jugement humain ?

92 Une ressource mal répartie

Temps libre, horaires atypiques, flexibilité imposée... un reflet des inégalités sociales et de genre.

94 "Nous vivons dans un maintenant narcissique"

La géologue Marcia Bjornerud et l'historien François Hartog expliquent pourquoi nous avons du mal à penser en millénaires, ce qui complique la lutte contre le changement climatique.

100 Biblio



PAGE 101

"MÀJ" COMME MISE À JOUR

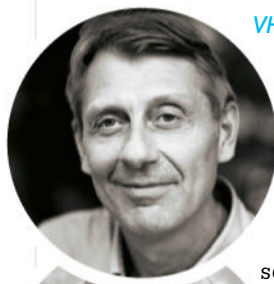
À quel âge les T-rex cessaient-ils de grandir ? Jouer aux jeux vidéo est-il mauvais pour la santé ? Peut-on authentifier une toile de maître grâce à l'ADN ? Douze pages d'actualité scientifique et de questions-réponses pour faire le point sur vos thématiques favorites.

S&V Hors Série n° 5

“Le temps est un enjeu de pouvoir”

La mesure du temps et sa précision présentent, depuis toujours, des enjeux scientifiques et stratégiques. Éclairages de deux spécialistes, le chercheur Noël Dimarcq* et l'historien Denis Savoie**.

PAR SANDRINE MARY



VHS: Où en sommes-nous dans la précision de la mesure du temps?

Noël Dimarcq :

Là où les horloges mécaniques devaient de plusieurs secondes par jour, les horloges atomiques modernes alignent 16 chiffres identiques après la virgule. En termes mathématiques,

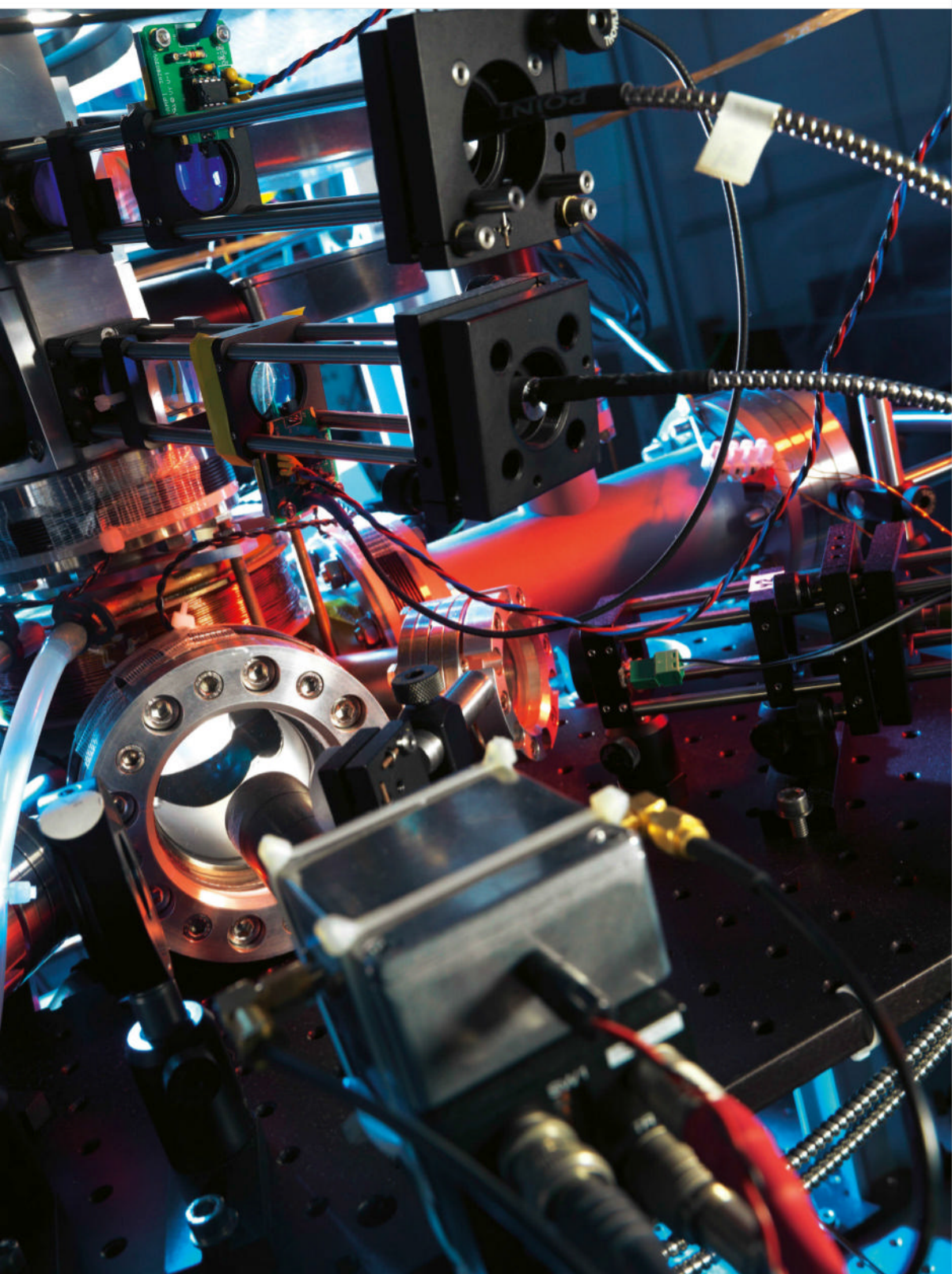
nous avons atteint une précision de l'ordre de 10^{-16} . C'est possible, car les horloges atomiques utilisent les oscillations de l'atome de césium 133 entre deux niveaux d'énergie, soit 9 192 631 770 par seconde. Pour donner une image, imaginez une règle divisée en 9 192 631 770 segments

égaux. C'est exactement ce que nous faisons avec le temps, une seconde en 9 milliards de micro-intervalles. La précision et la stabilité de la mesure sont telles que si une horloge atomique avait été enclenchée à l'époque des dinosaures, il y a 65 millions d'années, elle n'aurait aujourd'hui que 0,2 seconde de décalage!

Denis Savoie : La seconde est aujourd'hui l'unité mesurée avec le plus de précision. Jusqu'en 1957, elle était définie par la rotation de la Terre sur elle-même, puis jusqu'en 1967, elle était basée sur sa rotation autour du Soleil : la précision était alors de l'ordre du millième de seconde par jour. La révolution intervient après 1967, lorsqu'on a adopté la mesure de la seconde à travers des



Les horloges atomiques (photo) ou optiques jouent un rôle essentiel dans la course à la précision temporelle.





phénomènes d'oscillations d'un atome... c'est l'horloge atomique. On est alors passé d'une mesure astronomique du temps à une mesure atomique décorrélée du mouvement de la Terre. Ainsi, on a amélioré la précision de la mesure de la seconde avec un impact sur les autres unités. Par exemple, le mètre est calculé depuis 1983 à partir de la distance parcourue par la lumière sur une fraction de seconde, et le kilogramme est relié à la seconde depuis 2018 quand la valeur de la constante de Planck a été fixée.

SVHS: La course à la précision de la mesure de temps va-t-elle encore se poursuivre ?

N.D. : En effet, la précision de la mesure du temps continue de progresser. Dans la prochaine décennie, nous devrions même assister à une révolution avec le remplacement des horloges atomiques à césium actuelles

par des horloges optiques pour définir l'unité de temps du Système international : la seconde. Contrairement aux horloges atomiques à césium, qui mesurent une transition entre deux niveaux d'énergie de cet atome dans le domaine micro-onde, les horloges optiques exploitent des transitions entre niveaux d'autres espèces atomiques qui se situent, quant à elles, dans le domaine optique. Ces transitions ont une fréquence 10 000 fois plus élevée que celle du césium, ce qui permet d'atteindre aujourd'hui une précision supérieure à 10^{-18} , un bond énorme au regard de la précision actuelle. Pour officialiser cette nouvelle définition, il faudra réunir les 64 États membres et les 36 États associés du Bureau international des poids et mesures. Il y aura une étape décisive à franchir en octobre 2026, au château de Versailles. Tous les États vont alors discuter pour converger

“ Si une horloge atomique avait été enclenchée à l'époque des dinosaures, il y a 65 millions d'années, elle n'aurait aujourd'hui que 0,2 seconde de décalage ! ”

vers un consensus. C'est un processus complexe, mais nécessaire pour garantir une cohérence mondiale.

D.S. : Cette conférence de 2026 sera aussi l'occasion

d'aborder un autre sujet crucial, la suppression de la seconde intercalaire. Aujourd'hui, nous devons ajouter une seconde intercalaire pour recalibrer la rotation terrestre avec le temps atomique mesuré grâce aux horloges atomiques. La dernière fois que nous l'avons fait, c'était le 31 décembre 2016 : à minuit UTC (Temps universel coordonné), une minute a duré 61 secondes. Cette opération a un coût logistique, financier, et présente de gros risques techniques, car elle peut perturber les systèmes informatiques. Il est donc envisagé de supprimer définitivement cette seconde intercalaire et d'autoriser le temps atomique et le temps astronomique à s'écarter jusqu'à 1 heure... ce qui n'arrivera pas avant 4 à 5 millénaires.

SVHS : Comment la mesure du temps influence-t-elle notre vie, au quotidien ?

N.D. : La précision de la mesure du temps a un impact concret et immédiat sur nos vies, surtout à l'ère des nouvelles technologies. Prenez le GPS ou Galileo, pour nous localiser sur Terre. Notre smartphone reçoit des signaux de plusieurs satellites. Une erreur de 1 microseconde conduirait à une détermination de notre position faussée de 300 mètres ! Une microseconde, c'est un millionième de seconde, c'est une erreur infime pour nous, mais colossale pour un système qui repose sur la vitesse de la lumière. Et ce n'est pas tout, les transactions

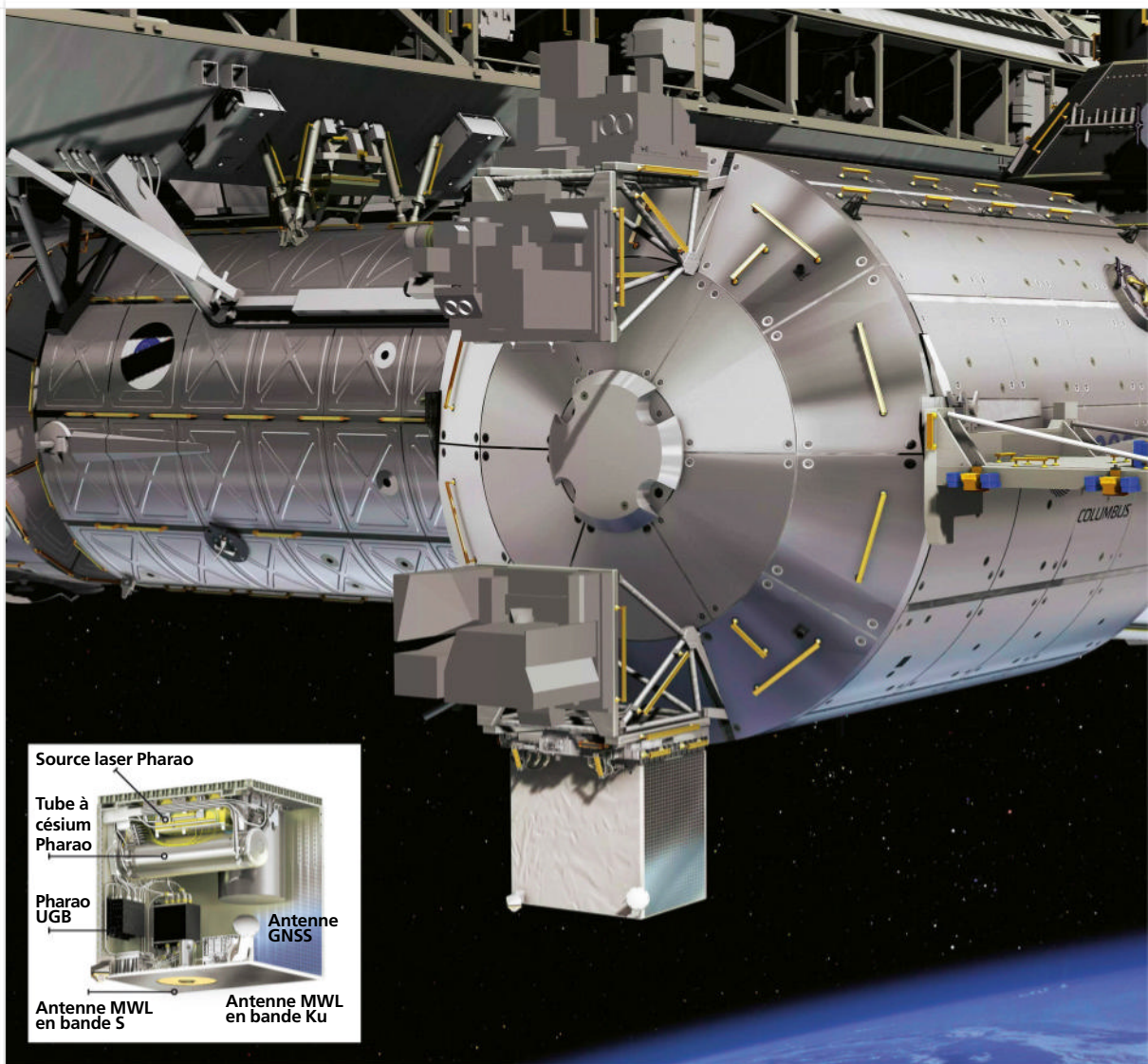


bancaires à haute fréquence exigent aussi une synchronisation très fine, de l'ordre du centième de millièème de seconde. Que vous soyez en Chine ou en Europe, les serveurs doivent être synchronisés pour éviter des erreurs de plusieurs millions d'euros. Sans cette précision, les marchés financiers s'effondreraient en quelques minutes. En somme, le temps n'est plus seulement une question de montre ou de calendrier, c'est le cœur de notre monde hyperconnecté.

D.S. : Dans l'histoire des hommes, on se rend compte

Ci-dessus, Christian Huygens (1629-1695), lors de la construction de la première horloge à pendule cycloïdale, en 1656. En page de gauche, une réplique de l'horloge atomique HP 5061A utilisée notamment à l'Observatoire royal de Greenwich.

que le temps a toujours structuré nos sociétés. Prenez l'Europe médiévale : les cloches des églises rythment la vie quotidienne, comme l'heure des repas, des prières, du travail. Même la date de Pâques, la fête la plus importante du christianisme, a façonné notre calendrier en liant astronomie et religion. Ce n'est donc pas qu'une question d'horaires : le temps est aussi un outil de cohésion



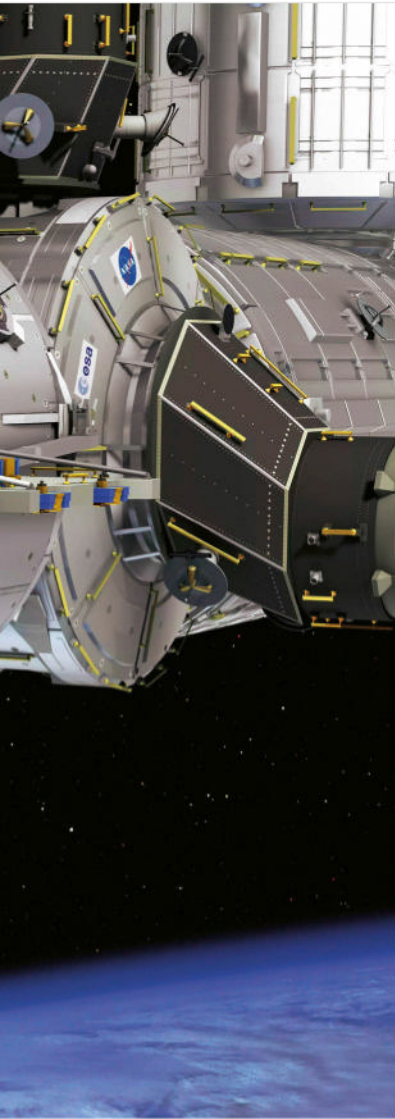
Installée à l'extérieur du module Columbus de l'ISS, l'Atomic Clock Ensemble in Space (ACES), qui inclut l'horloge française Pharaon, est une installation européenne en orbite depuis avril 2025. Elle reliera ses propres horloges de haute précision à celles de la Terre et comparera leurs données afin de mesurer le flux du temps.

sociale. Avec l'invention des horloges à pendule par Huygens en 1656, tout change. Pour la première fois, on mesure le temps non plus à la dizaine de minutes près, mais à la seconde. Les marins peuvent alors calculer leur

longitude avec précision, une révolution qui permet l'ouverture de nouvelles routes commerciales. Au XIX^e siècle, l'essor des chemins de fer impose une synchronisation encore plus stricte, car les villes doivent s'accorder sur une heure commune pour éviter les accidents et fluidifier les échanges. Aujourd'hui, nous ne nous en rendons plus compte, mais le temps régit tout, nos journées de travail, nos communications.

SVHS: Quel rapport la mesure du temps entretient-elle avec le pouvoir ?

D.S. : La mesure du temps a toujours été un enjeu de pouvoir, bien avant d'être une question scientifique. Remontons dans l'histoire avec le calendrier préjulien, utilisé par les Romains avant Jules César. Il comptait 355 jours et se décalait progressivement par rapport aux saisons. Pour le corriger, les pontifes, les chefs



“ *Le temps mesuré par une horloge dans l’ISS à 400 km d’altitude s’écoule plus vite que celui mesuré à la surface de notre planète : c’est le décalage gravitationnel* ”

mesures joue aussi un rôle de démocratisation de la mesure du temps : celle-ci appartient à tous, indépendamment des régimes politiques.

N.D. : En effet, tous les pays membres de la Convention du mètre [traité de 1875 qui a créé le Bureau international des poids et mesures, NDLR] s’accordent sur la définition des unités universelles, qu’il s’agisse du mètre, du kilogramme ou de la seconde. Pour modifier une définition, comme ce sera le cas pour la seconde avec le passage aux horloges optiques, plusieurs conditions doivent être remplies. D’abord, la nouvelle définition doit être plus précise que celle en vigueur. Par exemple, les horloges optiques, avec une précision de l’ordre de 10^{-18} , surpassent les horloges atomiques à césium actuelles. Surtout, et c’est essentiel, tout le monde doit y avoir accès. Cette dernière condition a une portée universelle, car la mesure du temps ne doit pas être monopolisée par une poignée de pays, mais rester un bien commun, accessible à tous.

SVHS : Allons-nous voir apparaître un temps spatial ?

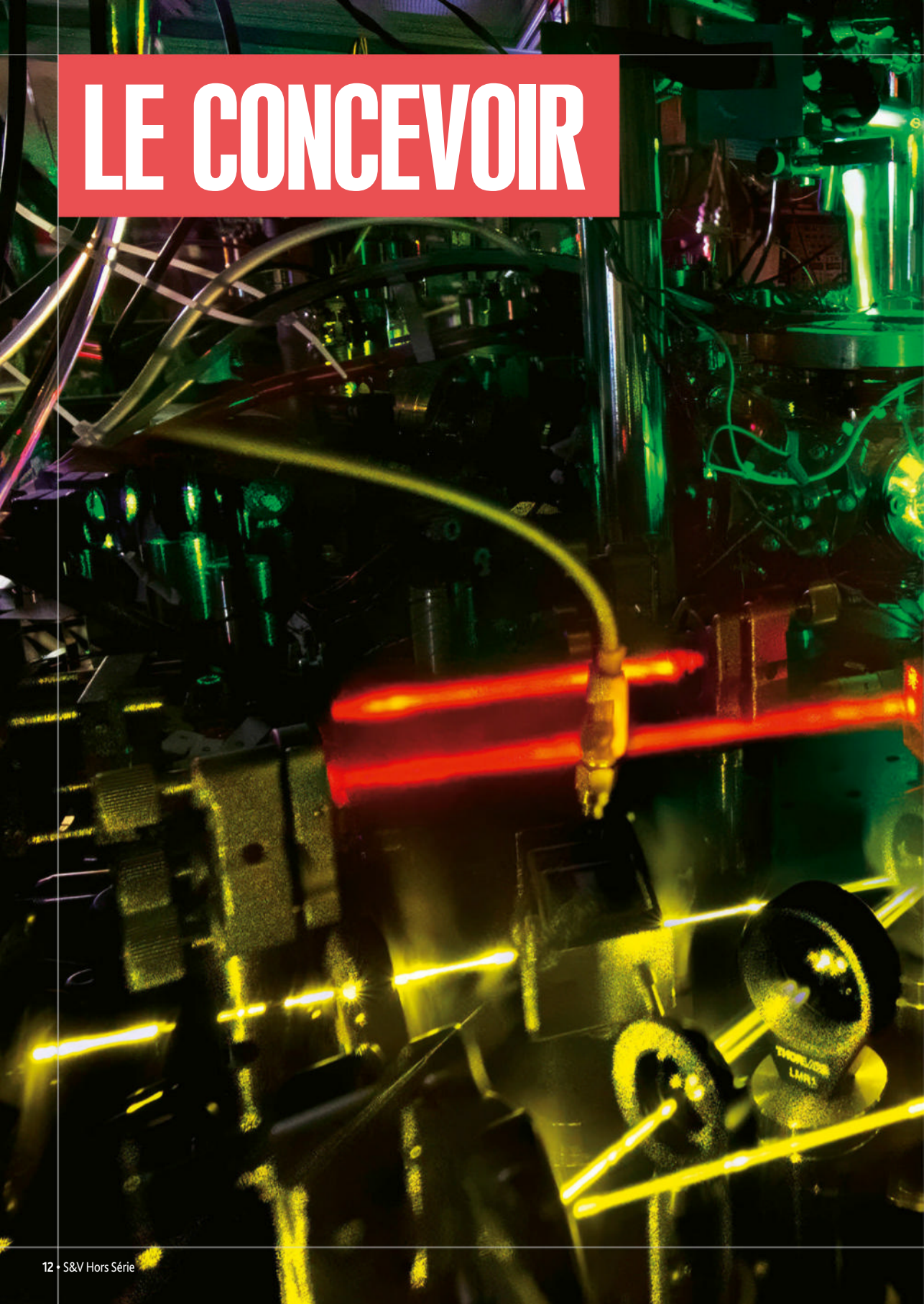
N.D. : Une horloge atomique de dernière génération, appelée Pharaon, a été réalisée en France et installée en avril 2025 dans la Station spatiale internationale, l’ISS, pour pouvoir mesurer avec une précision inédite ce que l’on appelle le décalage gravitationnel, un phénomène prédit par la relativité générale d’Einstein, et qui dépend de l’altitude. Concrètement, comme dit précédemment, le temps mesuré par une horloge dans l’ISS, située à 400 km d’altitude, s’écoule plus vite en comparaison du temps mesuré par une horloge à la surface de notre planète... Il y a aussi une réflexion sur un temps lunaire, pour proposer une même mesure du temps sur la Lune, en prévision d’une augmentation des missions lunaires. ■

* Noël Dimarcq est directeur de recherche au CNRS.

** Denis Savoie est historien des sciences à l’Observatoire de Paris et à Universcience.

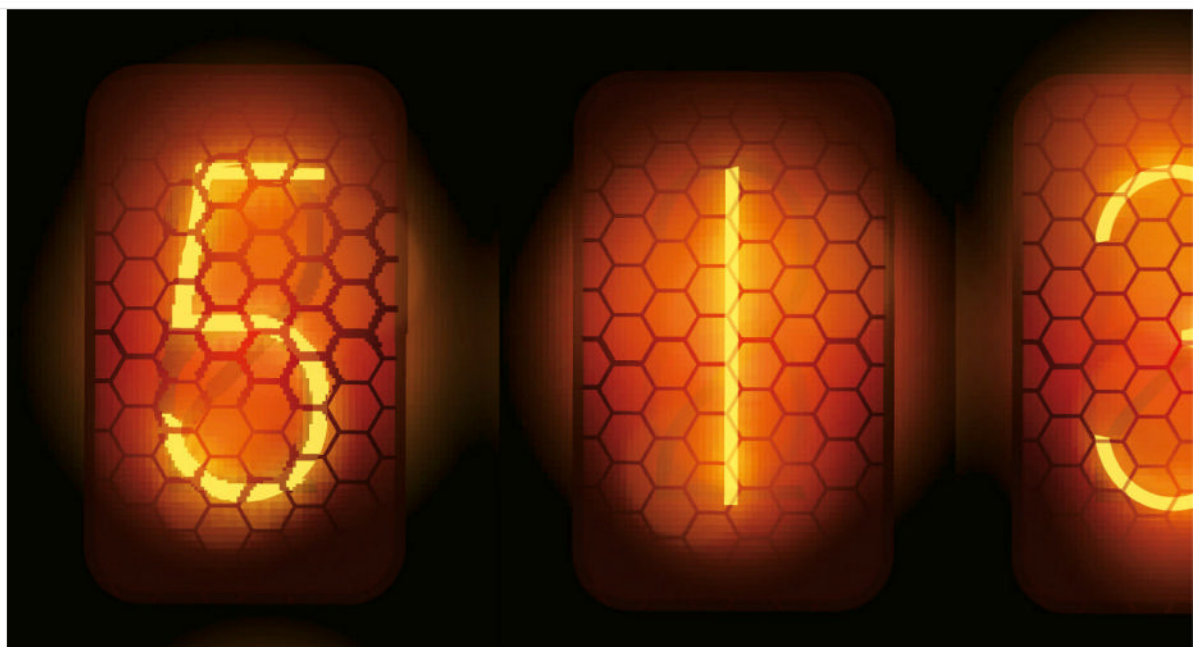
religieux de l’époque, ajoutaient un mois intercalaire selon leur bon vouloir. Ils pouvaient ainsi soutenir un allié ou affaiblir un ennemi selon qu’ils allongeaient ou raccourcissaient l’année. À l’arrivée de Jules César, les vendanges étaient célébrées au printemps ! Le calendrier julien, avec ses années bissextiles, a mis fin à cette manipulation politique. Depuis 1875, le Bureau international des poids et

LE CONCEVOIR

A detailed photograph of a complex industrial machine, likely a laser cutting or welding system. A prominent red laser beam is visible, passing through various mechanical components. Several yellow light paths, possibly from sensors or guides, crisscross the scene. The machine is composed of numerous metal parts, cables, and structural elements, creating a dense and intricate visual. The lighting is dramatic, with strong highlights and deep shadows, emphasizing the metallic textures and the precision of the machinery.



Cette horloge
atomique
définit la
durée d'une
seconde en
comptant les
oscillations
d'un atome de
césium entre
deux niveaux
d'énergie.



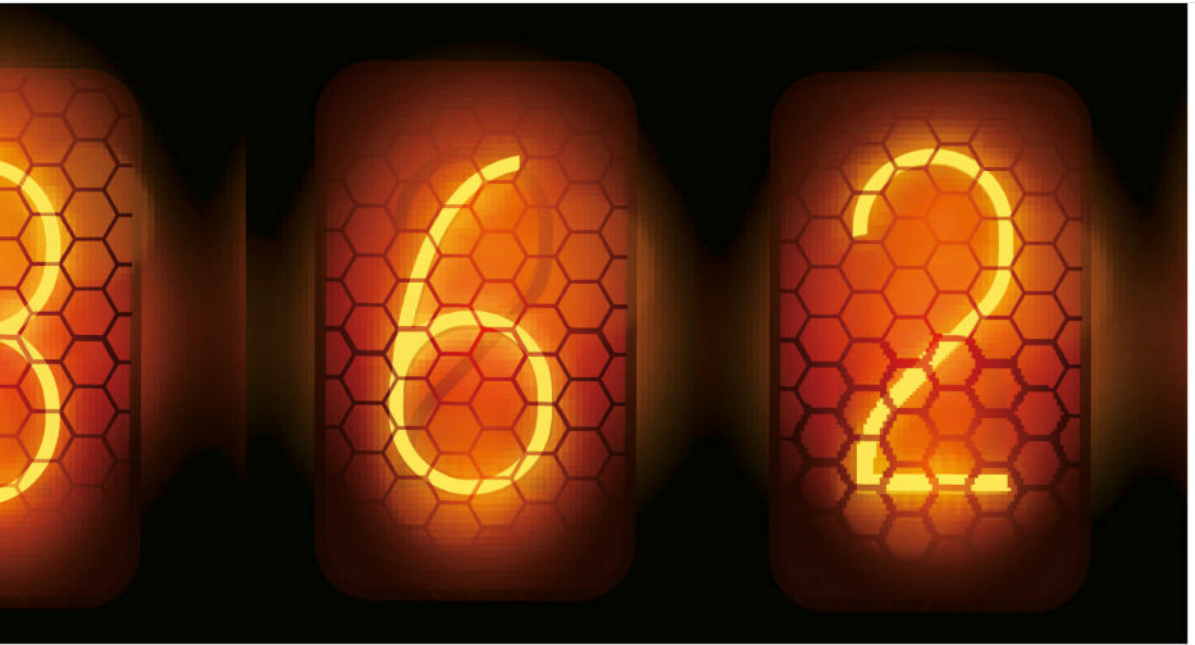
Combien y a-t-il de temps ?

Le temps qui passe existe-t-il ?
Oui, il est réel et absolu, répond l'homme de la rue en haussant les épaules, fort de son expérience. *"Il n'est pas ce que vous croyez"*, contestent les physiciens modernes. Mais alors... Qu'en est-il ?

PAR EVRARD-OUICEM ELJAOUHARI

Avant qu'Einstein ne fasse voler la physique en éclats, celle-ci reposait sur les épaules d'Isaac Newton. Pour le savant anglais, le temps était *"absolu, vrai et mathématique"*. Il le concevait comme un cadre rigide, indépendant de tout ce qu'il s'y passe. Dans ce monde, une seconde sur Terre durait exactement aussi longtemps que n'importe où ailleurs. C'est ce qui nous apparaît le plus intuitif d'après notre expérience quotidienne. L'espace, lui aussi, était perçu comme une scène immuable où les objets se déplaçaient selon des lois déterministes.

Tout bascule à la fin du XIX^e siècle avec les équations de Maxwell sur l'électromagnétisme, qui étudient les interactions entre particules chargées. Contrairement à la gravitation



de Newton ou à la force électrique de Coulomb, qui ne dépendent que de la distance, les équations de Maxwell prédisent que les phénomènes électromagnétiques se propagent à une vitesse bien précise. Pour la première fois, une théorie physique fait apparaître une vitesse imposée par la théorie elle-même. Ce qui soulève une question importante : une vitesse par rapport à quoi ? *“Car si une distance entre deux objets a un sens physique immédiat, une vitesse, elle, n’a pas de sens en soi”*, rappelle Yann Mambrini, directeur de recherche CNRS au laboratoire de physique des deux infinis Irène-Joliot-Curie (IJCLab) de l’université Paris-Saclay. *“Pour parler de vitesse, il faut bouger par rapport à quelque chose d’autre.”* Les physiciens de l’époque invoquent alors l’éther, un milieu mystérieux, sorte de fluide invisible remplissant le vide, censé porter les ondes lumineuses comme l’eau porte les vagues. La vitesse était alors mesurée par rapport à cet éther.

NOTION DE TEMPS UNIQUE

Cependant, l’expérience de Fizeau en 1851 sème le doute. En faisant circuler de la lumière dans des tuyaux où s’écoule de l’eau, le physicien français mesure que la lumière est effectivement entraînée par le mouvement de l’eau, mais seulement de manière partielle.

Ce résultat affaiblit l’hypothèse de l’éther : s’il existe, il devrait être entraîné totalement ou pas du tout. Même constat pour Michelson et Morley qui tentent de mesurer la vitesse de la Terre à travers cet hypothétique éther, mais ne détectent aucun effet. En 1905, Albert Einstein tranche le nœud gordien : l’éther n’existe pas, assure-t-il. *“Pour sauver le principe de relativité de Galilée, qui stipule que ‘le mouvement est comme rien’, donc que les lois de la physique sont identiques pour tous, Einstein postule alors que la vitesse de la lumière est la même pour tous”*, décrit Yann Mambrini.

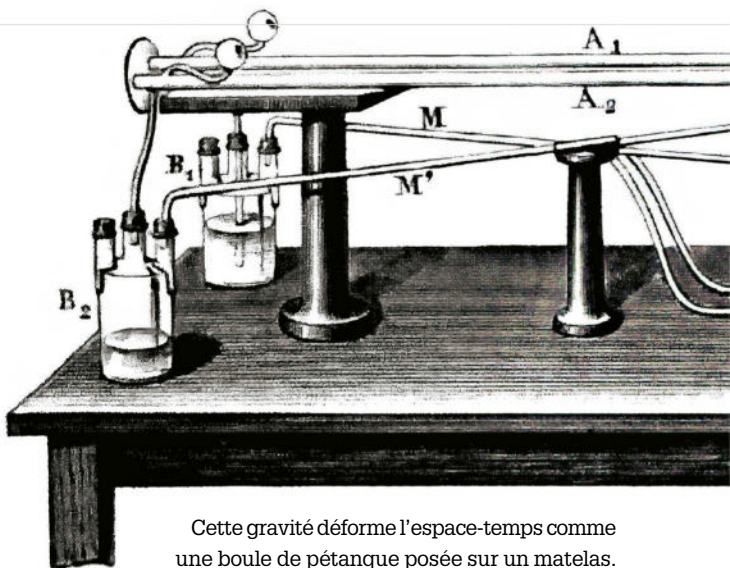
C’est ici que la notion de temps unique s’effondre. Pour le comprendre, imaginons une “horloge” faite d’un photon (une particule de lumière) rebondissant entre deux miroirs séparés d’un mètre. Si l’on est immobile à côté de l’horloge, le temps d’un tic-tac est simplement le temps que met la lumière pour faire l’aller-retour. Si maintenant on place cette horloge dans un train qui avance à une vitesse proche de celle de la lumière, rien ne change pour un voyageur à bord. *“Mais, vu depuis le quai, le photon dans le train doit parcourir une diagonale plus longue que le simple aller-retour. Or, comme la vitesse de la lumière est constante et ne peut pas accélérer pour rattraper son retard, le photon met plus de temps à terminer son trajet”*, conclut Martin Boutelier,

de l'Agence spatiale française (Cnes). La seconde paraît plus longue à l'observateur du quai. Le temps s'est dilaté ! Et puisque la vitesse de la lumière est constante, c'est que le temps est ralenti par le mouvement.

Le paradoxe des jumeaux en rend bien compte : un astronaute part dans l'espace et atteint une vitesse proche de la celle de la lumière, tandis que son frère jumeau reste sur Terre. À son retour, l'astronaute n'a vieilli que de quelques mois alors que son frère a pris des années. Et cette théorie trouve des preuves concrètes partout autour de nous. Les muons, des particules créées en haute atmosphère par les rayons cosmiques, ont une durée de vie normalement trop courte pour atteindre le sol. Pourtant, on en détecte à la surface de la Terre. Pourquoi ? *"Parce qu'ils se déplacent à une vitesse relativiste : vus depuis la Terre, leur temps se dilate, ce qui leur permet d'atteindre le sol"*, expose Martin Boutelier.

En 1915, Einstein va encore plus loin avec sa théorie de la relativité générale. Il comprend que la gravité n'est pas une force attractive, mais une déformation de la géométrie de l'Univers. Il démontre alors le principe d'équivalence : l'accélération est indiscernable de la gravité. *"Imaginez-vous dans un ascenseur fermé au milieu de l'espace. S'il accélère brusquement vers le haut, vous êtes plaqué au sol. Pour vous, cette poussée est indifférenciable du poids que vous ressentiriez si l'ascenseur était immobile à la surface de la Terre, illustre Yann Mambrini. Si l'accélération et la gravité sont une seule et même chose, alors la gravité doit elle aussi influencer le temps, tout comme la vitesse le faisait dans la relativité restreinte."*

“ Pour sauver le principe de relativité de Galilée, Einstein postule que la vitesse de la lumière est la même pour tous ”

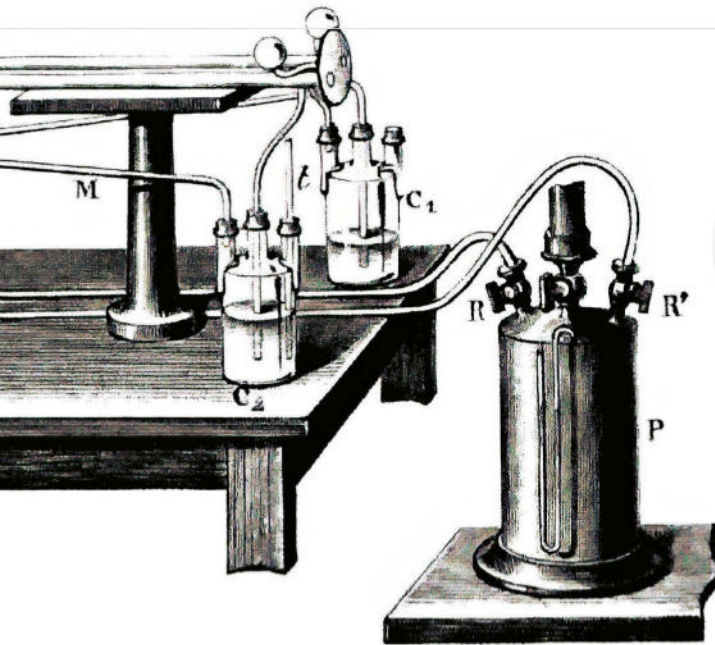


Cette gravité déforme l'espace-temps comme une boule de pétanque posée sur un matelas. Plus la masse d'un objet est grande, plus il "creuse" l'espace autour de lui et plus il ralentit le temps. Près d'un trou noir, la déformation est telle que le temps finit par se figer pour un observateur lointain. Pour lui, un astronaute qui s'en approche semble ralentir, jusqu'à devenir immobile. En revanche, pour l'astronaute, le temps s'écoule normalement et il pourra franchir l'horizon du trou noir. *"Cet effet est mesurable même sur Terre : le temps s'écoule très légèrement plus vite au sommet de l'Everest qu'au niveau de la mer"*, pointe le physicien.

QUANTIQUE ET RELATIVITÉ

Qu'en dit l'infiniment petit ? La mécanique quantique "standard", celle établie dans les années 1920, et qui a théorisé des phénomènes comme la superposition, utilise un temps très classique : celui de Newton. Puis la seconde révolution quantique, construite après la Seconde Guerre mondiale, a permis d'édifier la théorie quantique des champs. Dans ce cadre, une particule n'est pas un petit grain de matière isolé, mais une excitation locale d'un champ qui remplit tout l'espace. Cette théorie concilie la mécanique quantique avec la relativité restreinte, intégrant ainsi les effets de la vitesse et le temps propre des particules. Pour l'heure, mécanique quantique et relativité générale n'ont cependant pas encore été décrits conjointement.

Si le temps classique est en adéquation avec la théorie quantique, cette dernière joue tout de même avec la causalité, c'est-à-dire l'ordre



En observant le trajet de la lumière dans des tuyaux pleins d'eau (ci-contre), Hippolyte Fizeau, physicien français, met à mal la théorie de l'éther censé "porter" les ondes lumineuses.

dans lequel les événements s'influencent. En physique classique, la causalité est protégée par le temps : la cause doit précéder l'effet, et aucune information ne peut voyager plus vite que la lumière. Or, la mécanique quantique semble se moquer de ces barrières, notamment à travers les inégalités de Bell. Ces relations mathématiques doivent être respectées si le monde obéit à une causalité classique, fondée sur des propriétés bien définies et des influences locales. Mais des expériences ont montré que la nature les viole systématiquement. *"Cela signifie que, dans le monde quantique, des particules intriquées présentent des corrélations impossibles à expliquer par des causes locales préexistantes"*, souligne Hippolyte Dourdent, physicien à l'institut des sciences photoniques de Barcelone. Le lien qui les unit n'est pas réductible à des propriétés locales fixées à l'avance : c'est l'intrication quantique, qui signifie que les deux particules forment un seul système, peu importe la distance qui les sépare. Lorsqu'on cherche à décrire ce lien dans le cadre d'une causalité classique, on est alors conduit à parler de non-localité. *"Ce terme désigne le fait que leurs corrélations ne peuvent être expliquées par des causes locales inscrites dans leur passé commun"*, fait savoir le physicien. La relativité reste respectée, mais l'idée d'un ordre causal classique, fondé sur un temps bien défini, ne

suffit plus. *"Certaines interprétations, encore spéculatives, vont plus loin et suggèrent que ces corrélations pourraient impliquer une forme de rétrocausalité."* Des événements futurs participeraient à la définition du passé...

LE QUANTUM SWITCH

Au début des années 2000, le physicien Lucien Hardy, en cherchant une voie vers la gravité quantique, a proposé que, de même que la position d'une particule peut être indéterminée, l'ordre des événements pourrait l'être aussi. Des informaticiens explorant le calcul quantique sont arrivés au même concept : le quantum switch. Le dispositif met en jeu deux photons. *"Le premier, le photon 'cible', doit traverser deux boîtes de transformation, A et B. Le second, le photon 'de contrôle', fixe l'ordre, décrit Hippolyte Dourdent. S'il est dans l'état 0, la transformation se fait selon l'ordre A puis B ; s'il est dans l'état 1, selon l'ordre B puis A. Mais lorsque le photon de contrôle est placé dans une superposition de 0 et de 1, l'ordre temporel lui-même devient superposé."* On n'est alors plus dans une situation où l'ordre est simplement inconnu : il n'existe pas tant qu'aucune mesure n'est effectuée ! La causalité devient indéfinie, et le photon cible traverse A et B dans les deux ordres à la fois. Ce cadre théorique a depuis été réalisé expérimentalement : un photon peut subir deux transformations dans un ordre causal indéterminé, comme s'il suivait le cours du temps... tout en s'en affranchissant. ■



PEUT-ON L'ARRÊTER ?

Figer le chronomètre comme on mettrait une image sur pause... l'idée fascine les amateurs de science-fiction, mais qu'en dit la physique moderne ? Spoiler : le temps ne se laisse pas facilement immobiliser. PAR ADRIEN DENÈLE

Représentation d'un trou noir. Cet objet massif crée un champ gravitationnel puissant qui courbe et étire la "structure" de l'espace-temps.



Depuis Einstein, le temps n'est plus une horloge universelle. Avec la relativité générale, il devient une dimension de l'espace-temps, sensible à la gravité. *“Le temps est réellement complètement différent à différents endroits et pour différents observateurs”,* rappelle la physicienne théoricienne Ruth Durrer, professeure émérite à l'université de Genève. Plus un champ gravitationnel est intense, plus le temps s'y écoule lentement. Un effet infime à notre échelle, mais désormais mesurable : *“Les horloges atomiques détectent aujourd'hui des différences d'écoulement du temps sur quelques millimètres seulement !”,* souligne le physicien Olivier Minazzoli.

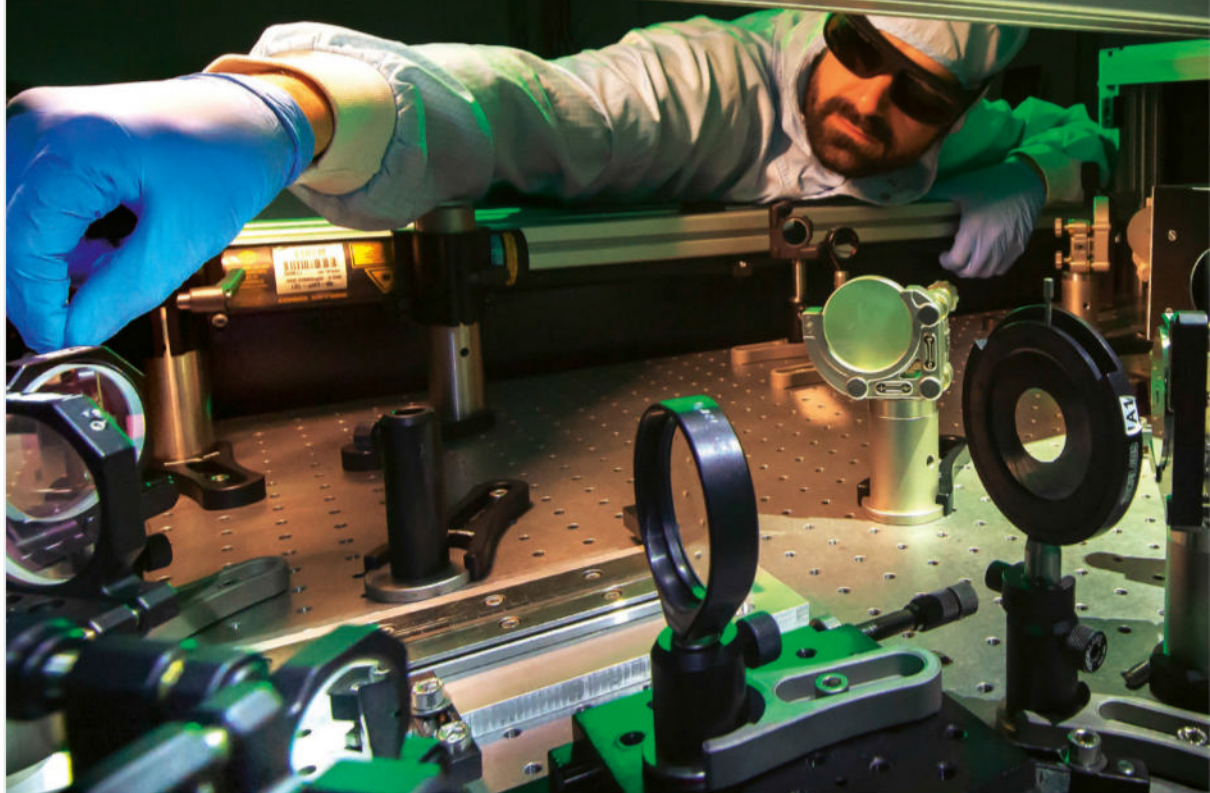
GEL TEMPOREL

L'exemple le plus spectaculaire est celui des trous noirs. Pour un observateur lointain, un objet qui s'en approche semble ralentir, puis se figer à l'horizon. *“Vu de l'extérieur, quelqu'un qui tombe dans un trou noir paraît gelé dans le temps”,* explique Ruth Durrer. Mais ce gel est trompeur. Le temps ne s'arrête jamais réellement : les photons émis sont de plus en plus décalés vers le rouge, perdent de l'énergie et deviennent indétectables. *“On voit la personne à la fois se figer... et disparaître”,* résume Olivier Minazzoli, comme une image qui s'efface peu à peu. Du point de vue de celui qui chute, en revanche, le temps continue de s'écouler normalement. *“Pour la personne elle-même, le temps n'a pas été gelé”,* insiste Ruth Durrer. La traversée de l'horizon se fait en un temps propre fini, avant une destruction brutale sous l'effet des forces de marée.

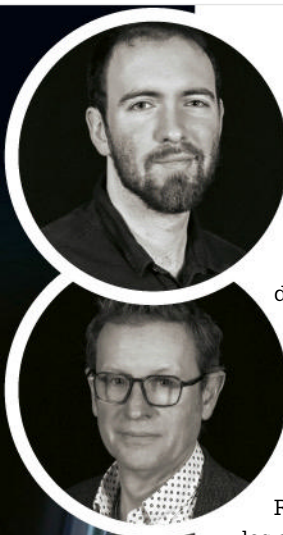
Sur Terre, certaines expériences semblent pourtant flirter avec l'idée d'un temps figé : atomes ultra-froids, lumière piégée, quasi-particules exotiques. Mais là encore, l'illusion guette. *“Dans un atome piégé, l'électron tourne toujours à la même vitesse : on ne change pas la nature du temps pour l'atome”,* explique le physicien Philippe Verkerk, du Laboratoire de physique des lasers, atomes et molécules (PhLAM, Lille). Même dans un atome refroidi à l'extrême, la structure interne reste inchangée. *“C'est comme un poisson au réfrigérateur : tout ralentit, mais le temps continue de s'écouler.”* Le PhLAM travaille sur des microcavités optiques, capables de piéger la lumière avec une efficacité de 99,99 %. Une forme de “gel temporel”. *“On crée des polaritons, des quasi-particules mi-lumière mi-matière, comme des photons avec un sac à dos”,* détaille Philippe Verkerk. Ces entités peuvent s'écouler comme un fluide au ralenti, contourner des obstacles, interagir entre elles, sans jamais arrêter le temps lui-même. *“Une molécule qui ne vibre plus n'est pas l'équivalent d'un temps gelé”,* insiste-t-il. Même les cristaux temporels, parfois présentés comme une révolution, ne font pas exception. *“Ils nécessitent une excitation continue : il y a toujours une dynamique, donc un écoulement du temps”,* rappelle le physicien. ■

Attoseconde, l'infiniment bref

Les lasers de l'ATTOLab du Lidyl permettent d'étudier les phénomènes ultrarapides de la matière. Récompensée par le prix Nobel de physique 2023⁽¹⁾, la physique attoseconde attise le monde scientifique. Explications des chercheurs Pascal Monot et Romain Généaux⁽²⁾. PAR ARMELLE CAMELIN



La plateforme ATTOLab du Laboratoire interactions, dynamiques et lasers (Lidyl), au CEA, dispose d'une chambre à vide de focalisation du faisceau laser attoseconde. Elle contient un miroir de forme torique recouvert d'or, qui permet de focaliser la lumière laser de courte longueur d'onde sur un échantillon.



SVHS: Qu'est-ce qu'une attoseconde ? Une unité de temps ?

Romain Généaux :

Oui. Il y a presque autant d'attosecondes dans une seconde, qu'il y a de secondes qui se sont écoulées depuis la naissance de l'Univers. Une attoseconde dure 10^{-18} seconde.

Rappelons que plus les objets sont petits, plus ils vont vite. C'est le cas à n'importe quelle échelle : entre un atome, une balle ou une planète par exemple. Les objets qui évoluent à l'échelle attoseconde sont donc minuscules : ce sont les électrons.

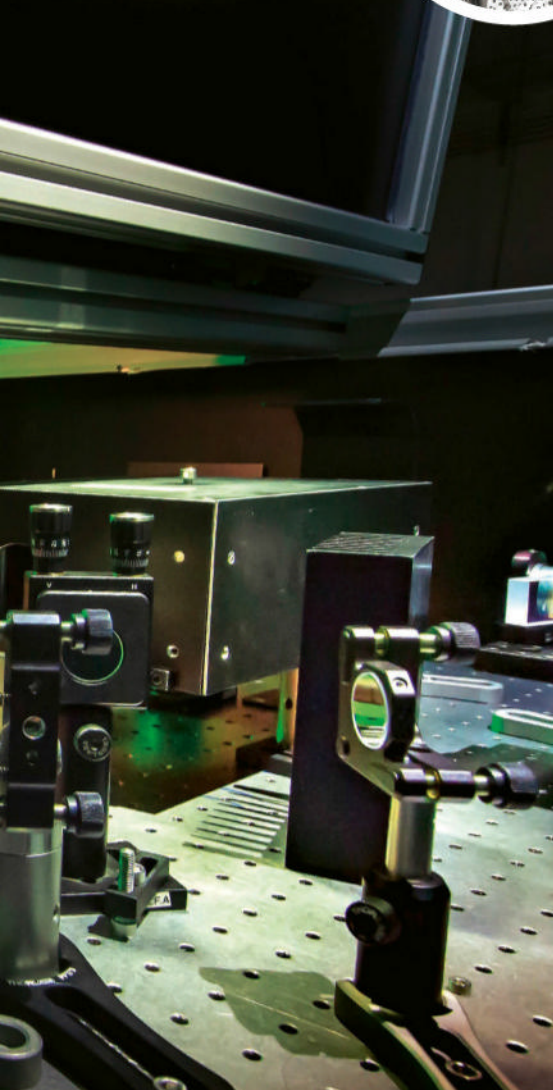
SVHS: À quoi cela sert-il d'accéder à cette échelle de temps et d'observer les dynamiques des électrons ?

R. G. : Au niveau le plus fondamental, grâce à la physique attoseconde, nous affinons les compréhensions théoriques de la physique quantique en ayant une perspective temporelle de ce qui se passe. Prenons l'exemple de l'intrication quantique – le fait que deux particules peuvent être en superposition d'états non classiques. On se demande aujourd'hui combien de temps cette intrication met à s'établir et combien de temps elle peut durer. Nous challengeons les théories. Un autre intérêt, plus appliqué, est par exemple de décortiquer les phénomènes

élémentaires d'une réaction chimique. Si on schématise, une réaction chimique, à l'échelle microscopique, ce sont deux molécules qui se rapprochent pour former une nouvelle molécule. La première étape de cette reformation, c'est l'interaction entre les électrons de chacune de ces deux molécules. Les deux nuages électroniques vont commencer à se sentir, à interagir pour ensuite reformer un nouveau nuage et décaler tous les atomes. Nous sommes capables de "faire des films" de ces nuages électroniques et de leur organisation en fonction du temps.

SVHS: La physique attoseconde trouve également des applications en physique des matériaux...

R. G. : On s'intéresse par exemple au comportement des composants photovoltaïques, qui absorbent la lumière du Soleil. Le principe, c'est qu'un photon, qui vient du Soleil, est absorbé et donne son énergie aux électrons que l'on veut transformer en courant. Sauf que, souvent, les électrons perdent cette énergie avant qu'on puisse la capter et chauffent le matériau : c'est-à-dire qu'ils transforment l'énergie du photon en énergie thermique. Pour optimiser un composant photovoltaïque, on veut garder l'énergie du Soleil le plus longtemps possible. Comprendre pourquoi l'électron perd cette énergie peut nous permettre de réussir à la capturer avant qu'elle ne



“ On se demande combien de temps il faut à une intrication quantique pour se mettre en place et combien de temps elle peut durer ”

soit perdue ! Une autre application est l'électronique : on cherche à contrôler plus rapidement la matière pour activer les courants électriques et passer les bits de 1 à 0 jusqu'à 100 000 fois plus rapidement qu'aujourd'hui.

Pascal Monot : Il y a toujours deux volets dans la physique attoseconde. L'observation, d'abord, qui permet de mieux comprendre et maîtriser la dynamique des électrons dans la matière. Et ensuite le contrôle.

R. G. : Ce n'est qu'une fois qu'on a compris les mécanismes intrinsèques de la matière qu'on peut penser au contrôle. C'est-à-dire comment utiliser un laser pour modifier ces mécanismes. En attochimie, les chercheurs observent ce qui se passe, puis se disent qu'ils pourraient modifier la manière dont deux molécules se mettent ensemble pour rendre une réaction plus efficace.

SVHS : Vous êtes un peu les Frankenstein de la matière ?

R. G. : Il y a quelque chose de ça. C'est assez fantastique ! On est capable de faire des changements importants sur les matériaux et de modifier leurs propriétés

à l'échelle du temps de la lumière. Prenons un solide qui ne conduit pas l'électricité, qui est isolant, comme du verre. Avec la lumière, on peut le rendre métallique de manière transitoire. L'espace de quelques femtosecondes, un millionième de milliardième de seconde, il devient comme un bout de cuivre, avant de redevenir du verre. Toutefois, la difficulté, c'est que contrairement à Frankenstein qui travaille avec finesse, nous, nous utilisons des lasers, lesquels ont tendance à détruire les choses plutôt qu'à les construire... Nous travaillons avec des marteaux quand, lui, utilise des scalpels !

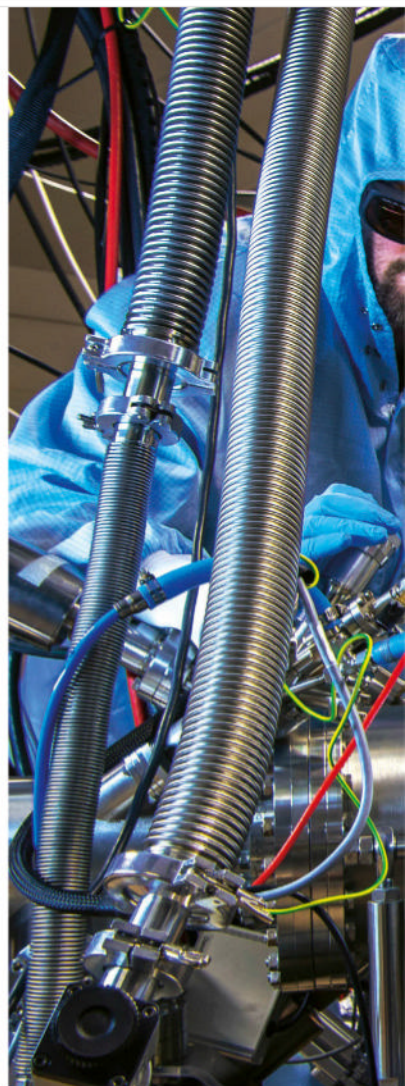
SVHS : Comment accédez-vous à l'échelle de temps attoseconde ?

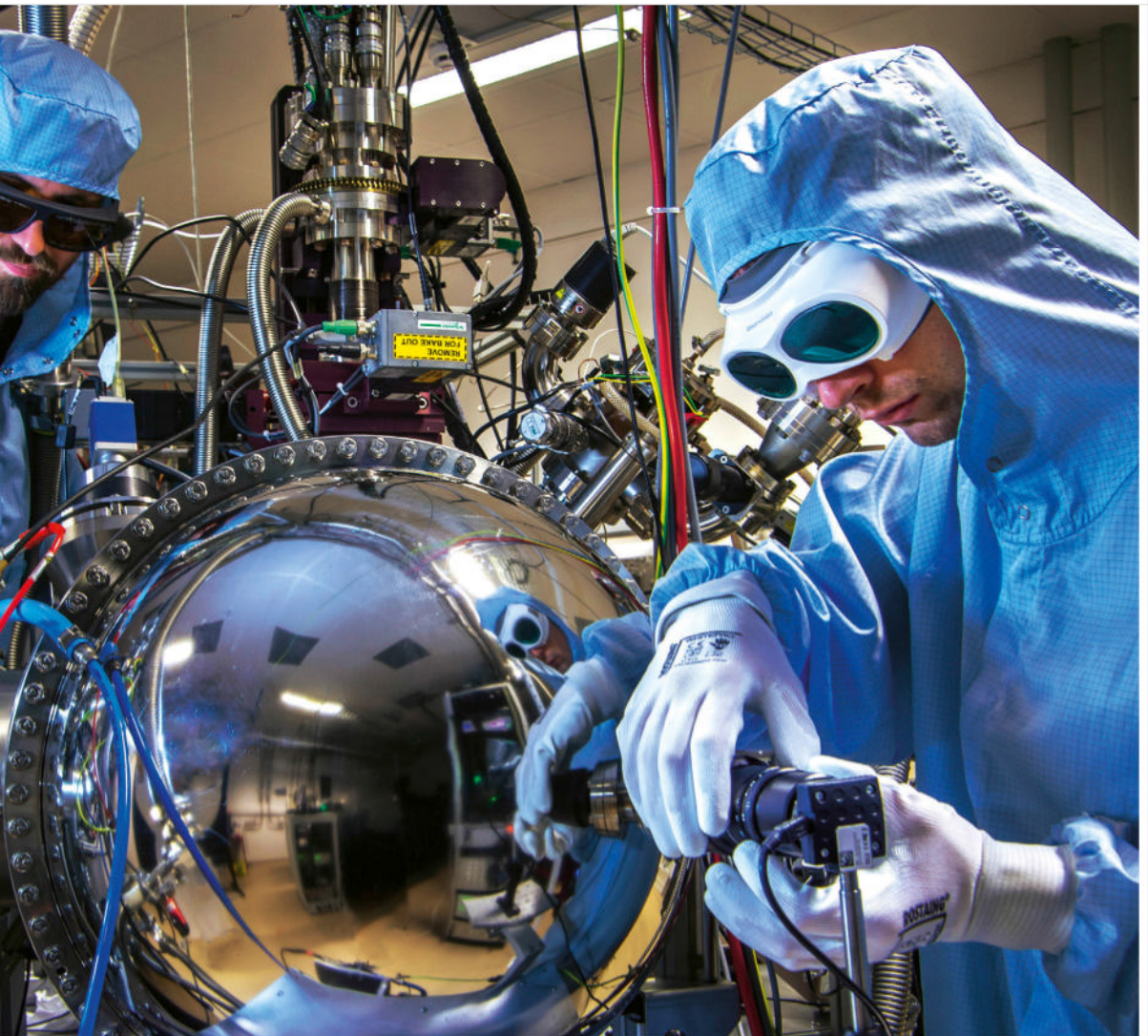
R. G. : En générant des impulsions lumineuses suffisamment courtes. Au départ, créer ces flashes était une science en soi ; désormais, c'est un outil pour comprendre la dynamique de la matière à l'échelle de temps attoseconde.

P. M. : Nous utilisons des lasers femtosecondes qui fonctionnent dans l'infrarouge et, grâce aux travaux

d'Anne L'Huillier puis Pierre Agostini, on a montré qu'on peut convertir ces impulsions lasers infrarouges par le principe de génération d'harmoniques. Le laser interagit avec du gaz, transforme la lumière en une série de nouvelles lumières de fréquences beaucoup plus élevées et permet de produire des impulsions lumineuses extrêmement courtes, dans le domaine attoseconde.

R. G. : Ces impulsions lumineuses lasers sont ensuite





Le dispositif du Lidyl permet de mesurer avec une grande précision des électrons éjectés d'un solide. On accède ainsi à la structure électronique de la matière.

envoyées dans un interféromètre, un dispositif optique composé de miroirs qui permet de séparer les lasers en deux. Ensuite, on fait parcourir à leur lumière des chemins différents dans l'espace et on les remet ensemble. L'idée étant de séparer la lumière et de la recombiner pour gérer le temps que parcourt l'une par

rapport à l'autre, et de réaliser ainsi des expériences.

SVHS : ***Vous réalisez des expériences au sein du Lidyl, le laboratoire interactions, dynamiques et lasers, à Saclay, installé sur le socle en béton d'un ancien accélérateur de particules. Pour faire ce type d'expérience, un cahier des charges précis doit être respecté ?***

P. M. : Oui, et nous avons développé des

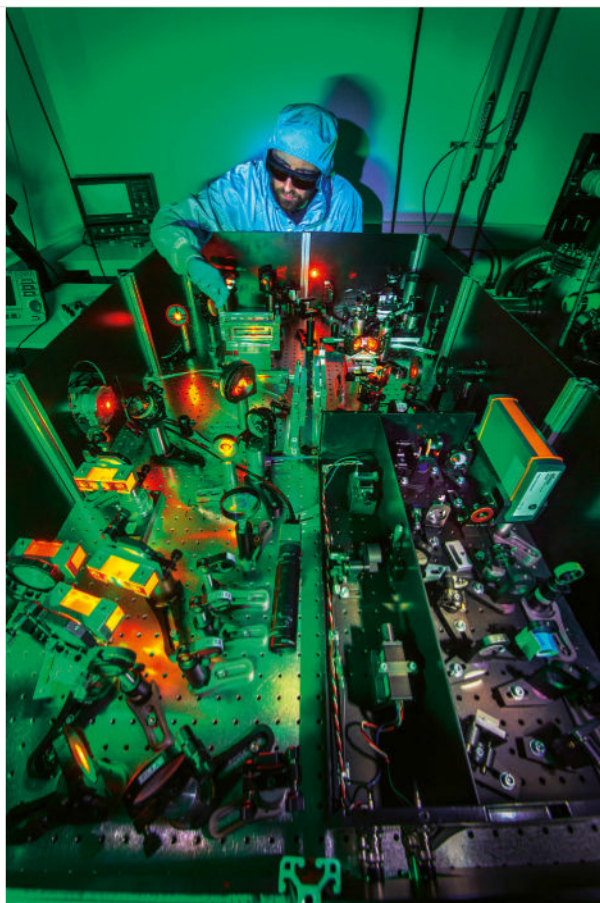
infrastructures qui répondent à des contraintes. Il faut que toutes nos expériences soient posées sur une dalle très stable qui ne vibre pas. La température doit aussi être régulée à moins de 0,5°C, parce qu'un changement de température provoque des modifications du chemin optique. Pour la même raison, il faut que l'hygrométrie soit régulée, parce que cela pourrait jouer sur le délai entre les deux impulsions.

“ Ce n'est qu'une fois qu'on a compris les mécanismes intrinsèques de la matière qu'on peut penser au contrôle ”

R. G. : Il faut faire la chasse à toutes les vibrations que nos propres instruments peuvent apporter. En particulier les expériences que l'on fait : elles se passent sous vide et nous utilisons donc des pompes pour enlever l'air de l'intérieur des chambres. Or, ces pompes génèrent des vibrations. Isoler ces vibrations pour qu'elles ne gênent pas le parcours du faisceau laser est le savoir-faire principal d'un laboratoire attoseconde !

SVHS : Et c'est pour ça que les chercheurs du monde entier viennent chez vous ?

P. M. : Nous sommes une plateforme internationale qui reçoit des demandes d'accès des chercheurs. Ils envoient des propositions de campagnes expérimentales. Elles sont retenues – ou non – en fonction de l'intérêt scientifique et de la capacité à les mener dans nos installations. En parallèle, il y a le temps interne, réservé aux chercheurs du laboratoire.



Dispositif optique de la plateforme ATTOLab du Lidyl dédié à la génération d'impulsions laser ultrabrèves, de l'ordre de quelques milliardièmes de milliardièmes de seconde.

SVHS : Quelles limites actuelles de la physique attoseconde devront être dépassées dans les années à venir ?

P. M. : D'énormes progrès sont faits sur les lasers. Plus on aura des lasers stables et fiables, plus on réussira à compenser ces problèmes.

R. G. : Aujourd'hui, les expériences attosecondes restent difficiles. À chaque fois qu'on réussit à obtenir un jeu de données, on est vraiment content parce que parfois, ça ne marche tout simplement pas ! On reste sur quelque chose d'exceptionnel. Mon

principal espoir est que l'on passe un gap technique et que les mesures attosecondes deviennent quelque chose de commun, voire de trivial. Ainsi on pourra se concentrer sur les mesures et sur notre compréhension de la matière. ■

(1) Prix Nobel attribué à Anne L'Huillier, Pierre Agostini et Ferenc Krausz.
(2) Pascal Monot est directeur adjoint du Lidyl CEA-Saclay ; Romain Gêneaux est chercheur au Lidyl CEA-Saclay.

BIENTÔT DANS SCIENCE & VIE

UN DOSSIER INÉDIT SUR LES SMART CITIES

ABONNEZ-VOUS

pour

89€

au lieu de 153,96€*

-42%

+



EN CADEAU

Votre livre de Bill François
« La Truite et le Perroquet »



PROFITEZ-EN

en flashant le QR code
ci-dessus ou rendez-vous
sur bit.ly/svhs-325

Inclus dans votre abonnement

- ✓ 12 numéros + 6 hors-séries
- ✓ Version numérique à consulter sur KiosqueMag.com
- ✓ Accès illimité au site et à **SCIENCE & VIE TV** le replay et le streaming
- ✓ Podcasts de nos journalistes
- ✓ Accès à La Science en direct, visioconférence animée par la rédaction
- ✓ **EN CADEAU** Votre livre de Bill François « La Truite et le Perroquet ».



Bulletin d'abonnement à compléter et à retourner sous enveloppe affranchie à : Service abonnements Science & Vie - 59898 Lille Cedex 9

① Je choisis la formule d'abonnement (je coche la case) :

M030 # D1654342

- ☐ **Formule annuelle avec hors-séries** : 12 numéros + 6 hors-séries + l'accès illimité au site Science & Vie (dont TV) + **le livre en cadeau** (1)
- ☐ **Formule annuelle** : 12 numéros + l'accès illimité au site Science & Vie (dont TV) + **le livre en cadeau** (2)

Mon abonnement se renouvellera automatiquement à date anniversaire sauf résiliation de ma part.

- ☐ **Formule mensuelle avec hors-séries** : 1 numéro par mois + 1 hors-série tous les 2 mois + l'accès illimité au site Science & Vie (dont TV) (3)
- 6,90€** par mois au lieu de 12,89€* **-46%**

Je réisie quand je le souhaite. Après la première année, je serai prélevé de 7,90€/mois.

② Je choisis le mode de paiement :

➔ Par prélèvement automatique :

je complète l'iban ci-dessous à l'aide de mon **Relevé d'Identité Bancaire (R.I.B.)** à joindre.

IBAN :

Vous autorisez Reworld Media Magazines à envoyer des instructions à votre banque pour débiter votre compte, et votre banque à débiter votre compte conformément aux instructions de Reworld Media Magazines. Créancier : Reworld Media Magazines 40 avenue Aristide Briand - 92220 Bagneux - France. Identifiant du créancier : FR 05 ZZZ 489479

Date et signature obligatoires

Date :

➔ Par carte bancaire :

je me rends sur KiosqueMag.com :

bit.ly/svhs-325

La boutique officielle de Science & Vie.

Plus simple, plus rapide, 100% sécurisé !



SCANNEZ-MOI !

➔ Par chèque (formules annuelles uniquement) :

je renvoie le coupon accompagné de mon chèque libellé au nom de Science & Vie (sans agrafe, ni scotch) à : Science & Vie Service abonnement - 59898 Lille Cedex 9

③ Je complète les coordonnées du bénéficiaire de l'abonnement :

** À remplir obligatoirement.

Nom** : Prénom** :

Adresse** :

CP** : Ville** :

Date de naissance : (pour lui fêter son anniversaire) Tél. (portable de préférence) : (envoi d'un SMS en cas de problème de livraison)

Email :

☐ Je ne souhaite pas recevoir les offres Privilège Science&Vie et Kiosquemag sur des produits et services similaires à ma commande par la Poste, e-mail et téléphone. Dommage !

☐ Je ne souhaite pas que mes coordonnées postales et mon téléphone soient communiqués à des partenaires pour recevoir leurs bons plans. Dommage !

*La prix de référence à l'année de la formule sans hors-série se compose du prix kiosque (€1,20), des frais de port (€0,60), du site internet (€1,40). Le prix de référence à l'année de la formule avec hors-série se compose du prix kiosque (€1,20), des frais de port (€0,60), du site internet (€1,40). (1) Formule mensuelle sans engagement : je peux résilier à tout moment sans préavis. (2) Formule annuelle avec engagement : je serai prélevé de 7,90€/mois pendant 1 an. Après la première année, je serai prélevé de 7,90€/mois. Pour toute autre information, vous pouvez consulter nos CGV sur KiosqueMag.com et contacter le service client par mail sur serviceclient@kiosquemag.fr ou par courrier à Reworld Media Magazines - Service Client - 40 avenue Aristide Briand - 92227 Bagneux. Offre réservée aux nouveaux abonnés en France Métropolitaine valable jusqu'au 31/03/2025. DDM-TOM et autres pays nous consulter. Vous disposez, conformément à l'article L. 221-18 du code de la consommation, d'un droit de rétractation de 14 jours à compter de la réception du magazine en notifiant clairement votre décision à notre service abonnement. Les informations demandées sont destinées à la société REWORLD MEDIA MAGAZINES KiosqueMag à des fins de traitement et de gestion de votre commande, de la relation client, des réclamations, de réalisation d'études et de statistiques et, sous réserve de vos choix, de communication marketing par KiosqueMag et/ou ses partenaires par courrier, téléphone et courrier électronique. Vous bénéficiez d'un droit d'accès, de modification, d'effacement de vos données ainsi que d'un droit d'opposition en écrivant à RMA-SPD, c/o service juridique, 40 avenue Aristide Briand - 92220 Bagneux, ou par mail à dp@reworldmedia.com. Vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL - www.cnil.fr. Pour en savoir plus sur la gestion de vos données personnelles, vos droits et nos partenaires, consultez notre politique de Confidentialité sur www.kiosquemag.com.



3 MÉTHODES POUR REMONTER LE TEMPS

Remonter le temps ? C'est possible... sur le papier. Mais faute d'avoir découvert comment fonctionne la DeLorean de *Retour vers le futur*, personne n'y est encore parvenu. PAR ADRIEN DENÈLE

Le temps quantique

1

"Remonter le temps revient à avoir un système parfaitement conservatif", résume Philippe Verkerk, directeur de recherche du laboratoire de physique des lasers, atomes et molécules (PhLAM, à Lille). "C'est impossible dans le monde macroscopique, mais cela peut fonctionner en physique quantique."

À cette échelle, un système peut en effet évoluer d'un état à un autre, puis revenir en arrière sans perte d'énergie. Mais attention au contresens: *"Inverser l'évolution d'un système ne signifie pas que le temps lui-même s'inverse"*, insiste la physicienne Ruth Durrer. Le temps tel que nous le percevons reste régi par la relativité générale, tandis que le monde quantique obéit à d'autres règles. Or, ces deux cadres théoriques résistent toujours à toute unification. *"Nous avons bien sûr des hypothèses unificatrices, comme la théorie des cordes, rappelle Philippe Verkerk, mais elles restent aujourd'hui impossibles à vérifier expérimentalement."* En l'absence d'une théorie complète de la gravitation quantique, le mystère du temps demeure entier.

Le multivers

2

Si le concept théorique date des années 1950, les années 2010 ont vu émerger cette idée vertigineuse: le multivers postule l'existence d'une multitude d'univers, chacun réalisant des scénarios différents. Dans ce cadre, remonter le temps ne consisterait plus à modifier notre passé, mais à rejoindre un univers parallèle correspondant à une version antérieure du nôtre. Ces théories restent spéculatives. *"Le multivers est une idée intéressante, mais qui a le défaut de n'offrir aucune manière directe de le prouver"*, souligne Ruth Durrer. Aucun dispositif expérimental ne permet aujourd'hui de confirmer l'existence d'univers parallèles, encore moins d'y voyager. Les cosmologistes, qui scrutent en permanence trous noirs, supernovæ et ondes gravitationnelles, *"sont néanmoins les mieux placés pour en détecter d'éventuels signes"*, ajoute la physicienne.

Les trous de ver 3

Ce sont des tunnels hypothétiques de l'espace-temps. Sur le papier, ils pourraient relier deux régions éloignées de l'Univers, voire deux instants différents. Mais leur statut reste extrêmement fragile. *"Le fait qu'une solution existe dans les équations ne signifie pas qu'elle puisse exister dans la nature"*, rappelle Ruth Durrer. Pour rester ouverts, les trous de ver nécessiteraient des formes de matière exotique aux propriétés très particulières, jamais observées. *"Il faudrait une pression... négative!"*, explique la physicienne. Un concept mathématiquement cohérent, parfois exploité en physique quantique, mais qui n'a aucune réalité démontrée à notre échelle. À cela s'ajoute un problème majeur : leur stabilité. Les effets quantiques pourraient en effet faire apparaître puis disparaître instantanément les trous de ver. Et même s'ils existaient, un dernier obstacle demeure : les paradoxes. Revenir dans le passé implique la possibilité de modifier son propre futur, et donc d'empêcher le voyage initial. Pour Ruth Durrer, il est donc possible que la nature *"interdise ce que les mathématiques autorisent"*.

Qui sont les maîtres des horloges ?

Le Temps universel coordonné (UTC), indispensable au bon fonctionnement de nos smartphones, est le résultat d'un partenariat international impliquant des super-horloges, des satellites et même l'ISS.

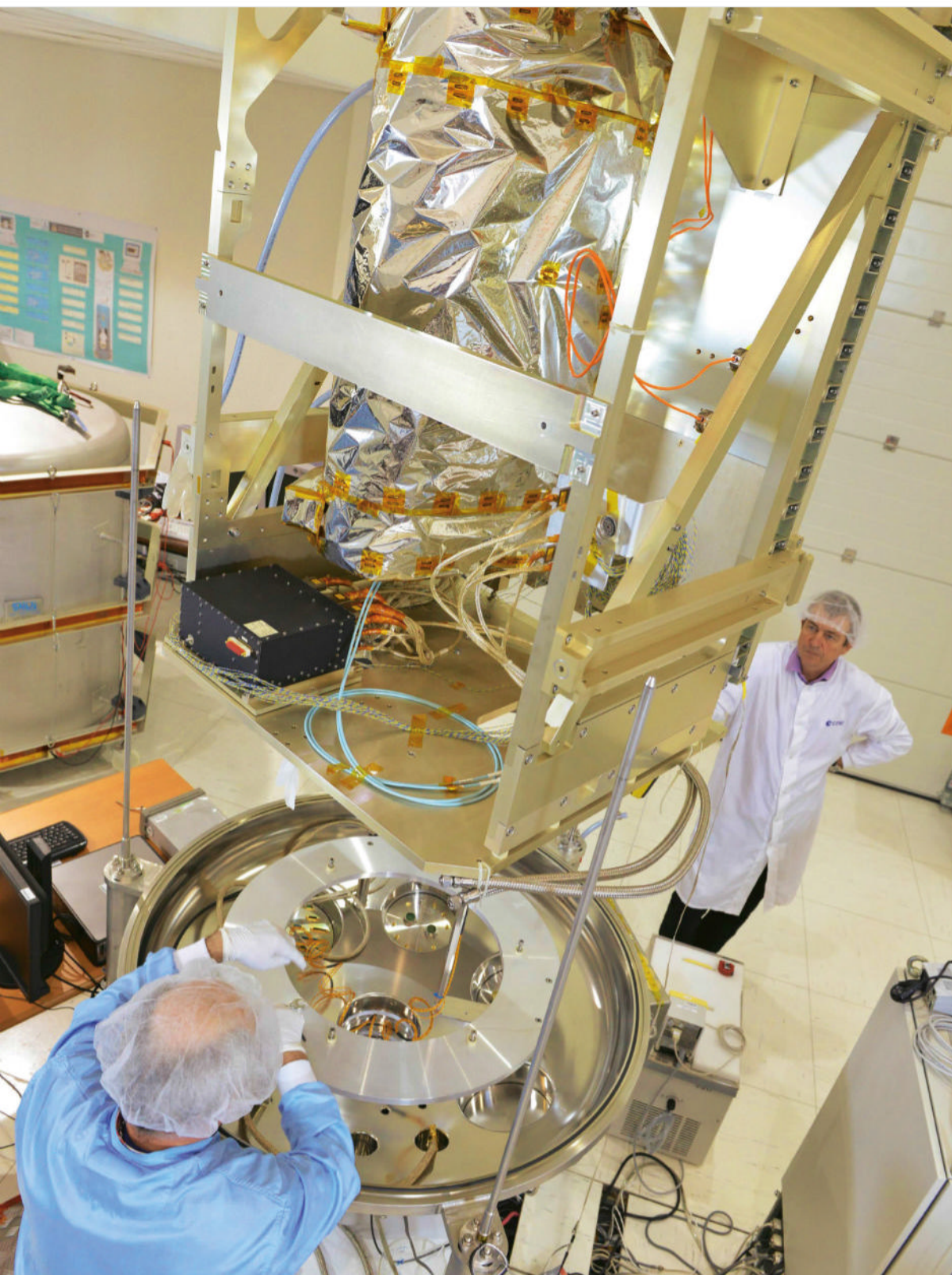
PAR EVRRARD-OUICEM ELJAOUHARI

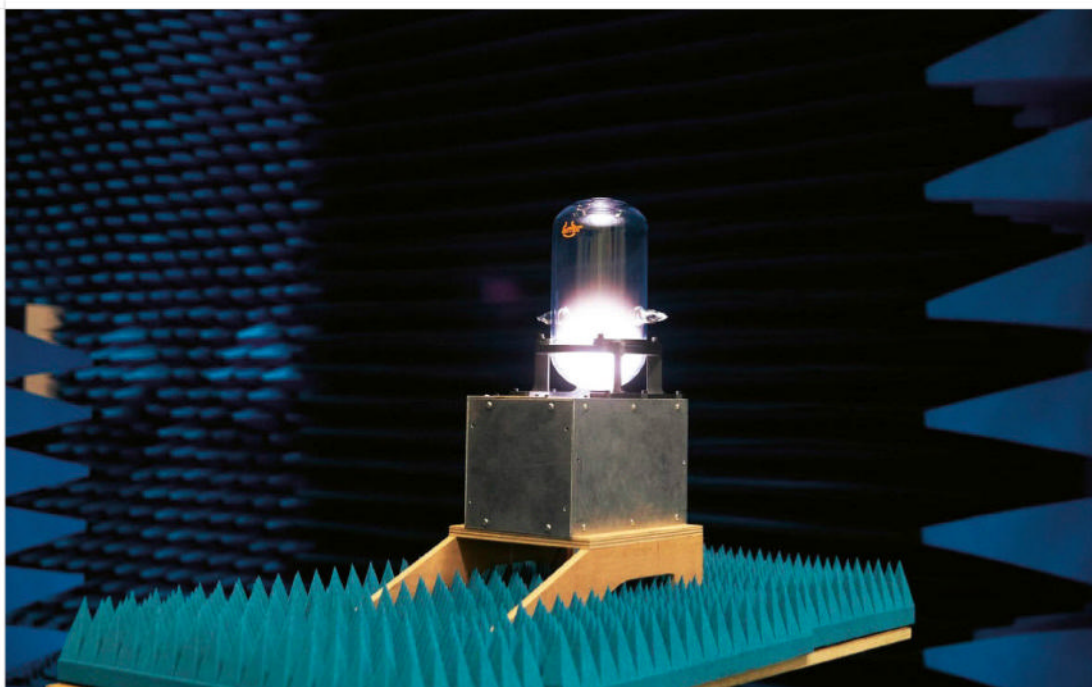
C'est en France qu'est définie l'heure mondiale. Plus précisément à Sèvres, au siège du Bureau international des poids et mesures (BIPM). Sa mission consiste à construire le Temps universel coordonné (UTC), l'échelle de temps adoptée par la quasi-totalité des pays du globe. L'existence même de cette mesure commune repose sur la Convention du mètre de 1875. Sans cette synchronisation internationale garantie par la Convention, les systèmes de positionnement par satellites, les réseaux de télécommunications et l'infrastructure même d'Internet cesseraient de fonctionner correctement. La gouvernance est assurée par le Comité international des poids et mesures (CIPM), tandis que la Conférence générale des poids et mesures (CGPM) réunit pour sa part les États membres tous les quatre ans pour voter les évolutions majeures du système.

On pourrait être tenté de croire qu'une seule horloge parfaite suffirait à donner l'heure au monde. Pourtant, le temps possède une caractéristique unique : *"C'est la seule grandeur physique que l'on ne peut pas s'arrêter de mesurer"*, pose Noël Dimarcq, directeur de recherche CNRS à l'université Côte d'Azur et membre du CIPM. Contrairement à une règle que l'on range dans un tiroir, le temps exige une mesure continue, sans aucun temps mort. Si cette horloge unique tombait en panne ou subissait une microdérive, la référence mondiale serait instantanément perdue ou faussée, sans aucun moyen de s'en rendre compte.

"C'est pourquoi la redondance est la clé de la fiabilité", assure Noël Dimarcq. Avec deux horloges, on peut constater un désaccord, mais il est impossible de savoir laquelle des deux dévie. En augmentant leur nombre, les erreurs individuelles sont lissées. Aujourd'hui, 450 horloges réparties dans 80 instituts de métrologie à travers le monde collaborent à cette tâche. La grande majorité de ces horloges sont des masers à hydrogène et des horloges à césium industrielles. *"Une horloge atomique compte les oscillations extrêmement régulières associées à une transition quantique de l'atome"*, décrit Martin Boutelier, de l'Agence spatiale française. *Dans une horloge à césium, par exemple, on utilise une fréquence micro-onde bien précise capable de faire basculer*

L'horloge à atomes de césium refroidis, Pharaos, actuellement en orbite sur l'ISS, mesure le temps avec une exactitude de 10^{-16} .





l'atome entre deux états d'énergie. Lorsque cette fréquence est correctement ajustée, chaque oscillation devient un "tic" parfaitement reproductible. En les comptant, l'horloge définit la durée exacte d'une seconde.

Ces 450 horloges sont constamment comparées les unes aux autres grâce à des techniques satellitaires sophistiquées. Les instituts utilisent principalement les systèmes GNSS (GPS américain, Galileo européen, Glonass russe ou BeiDou chinois) pour échanger leurs signaux temporels. Dans ce vaste réseau, chaque horloge se voit attribuer une valeur par le BIPM. Cette valeur n'est pas fixe : elle est d'autant plus importante que l'horloge se montre stable sur la durée. Si un instrument s'arrête ou commence à fluctuer de manière erratique, son influence dans le calcul global est immédiatement réduite. Ce traitement

Dans une chambre qui absorbe les ondes radio, des chercheurs étudient comment un jet de plasma, comme celui émis par certains petits satellites, perturbe les antennes de navigation GNSS.

statistique minutieux aboutit à la création de l'Échelle atomique libre (EAL). C'est une première étape théorique indispensable. *"Chaque mois, le BIPM récupère cet ensemble massif de données mondiales et calcule l'EAL. Il renvoie ensuite à chaque institut de combien son horloge locale s'est décalée par rapport à cette moyenne mondiale"*, décrit Noël Dimarcq.

Une fois la stabilité de l'EAL fixée, il faut s'assurer que son rythme correspond parfaitement à la définition de la seconde du Système international. C'est le rôle du Temps atomique international (TAI). Pour passer de l'EAL au TAI, on procède à un étalonnage périodique grâce à une quinzaine de "super-horloges" de très haute exactitude opérées par des laboratoires, appelées étalons primaires. En France, ces instruments d'exception se trouvent à l'Observatoire de Paris, au sein du Laboratoire temps espace.

Ces étalons ont des performances bien supérieures aux horloges industrielles classiques utilisées pour l'EAL. De plus, ces horloges de pointe n'ont pas besoin de fonctionner en continu. Leur rôle est plutôt d'agir comme

“ Le temps est la seule grandeur physique que l'on ne peut pas s'arrêter de mesurer ”





Le Service des références nationales de temps au Laboratoire national de métrologie et d'essais est chargé d'élaborer des normes de référence en matière de temps et de fréquence.

des juges de paix : elles viennent périodiquement vérifier et corriger le rythme du TAI et s'assurent que le rythme auquel s'écoulent les secondes est exact. Le TAI est donc le résultat de cette fusion entre la stabilité du grand nombre d'horloges et l'exactitude extrême des étalons de laboratoire... bientôt épaulés par des références orbitales !

SYSTÈME DE SYNCHRONISATION

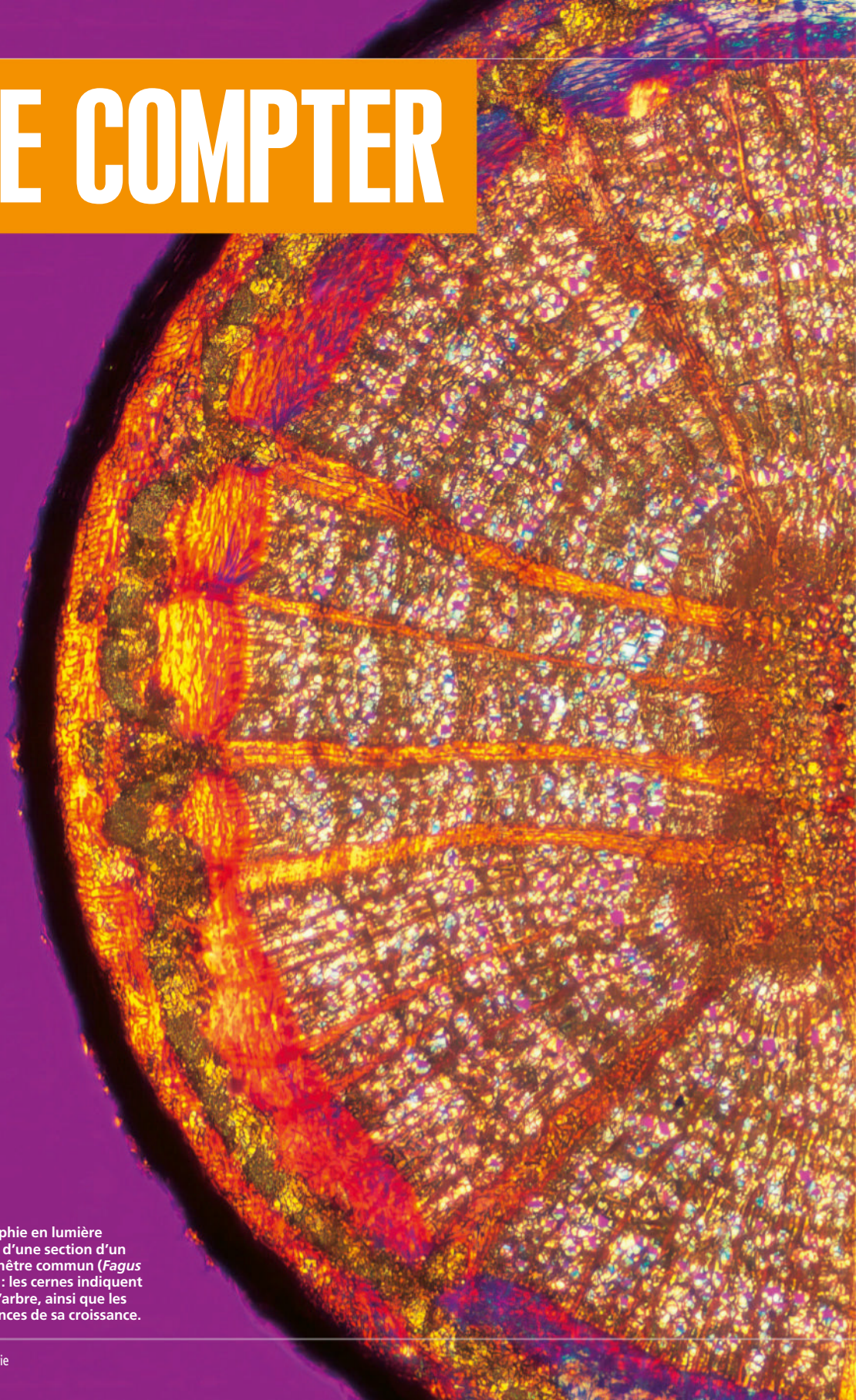
En effet, depuis l'extérieur de la Station spatiale internationale, l'horloge atomique Pharaon renforce cet édifice temporel. De conception française, cette horloge à atomes froids de césium, installée en avril 2025, opère en microgravité, ce qui améliore la précision de la mesure. *"Pharaon permet de comparer les horloges au sol avec une exactitude inédite"*, se réjouit Martin Boutelier.

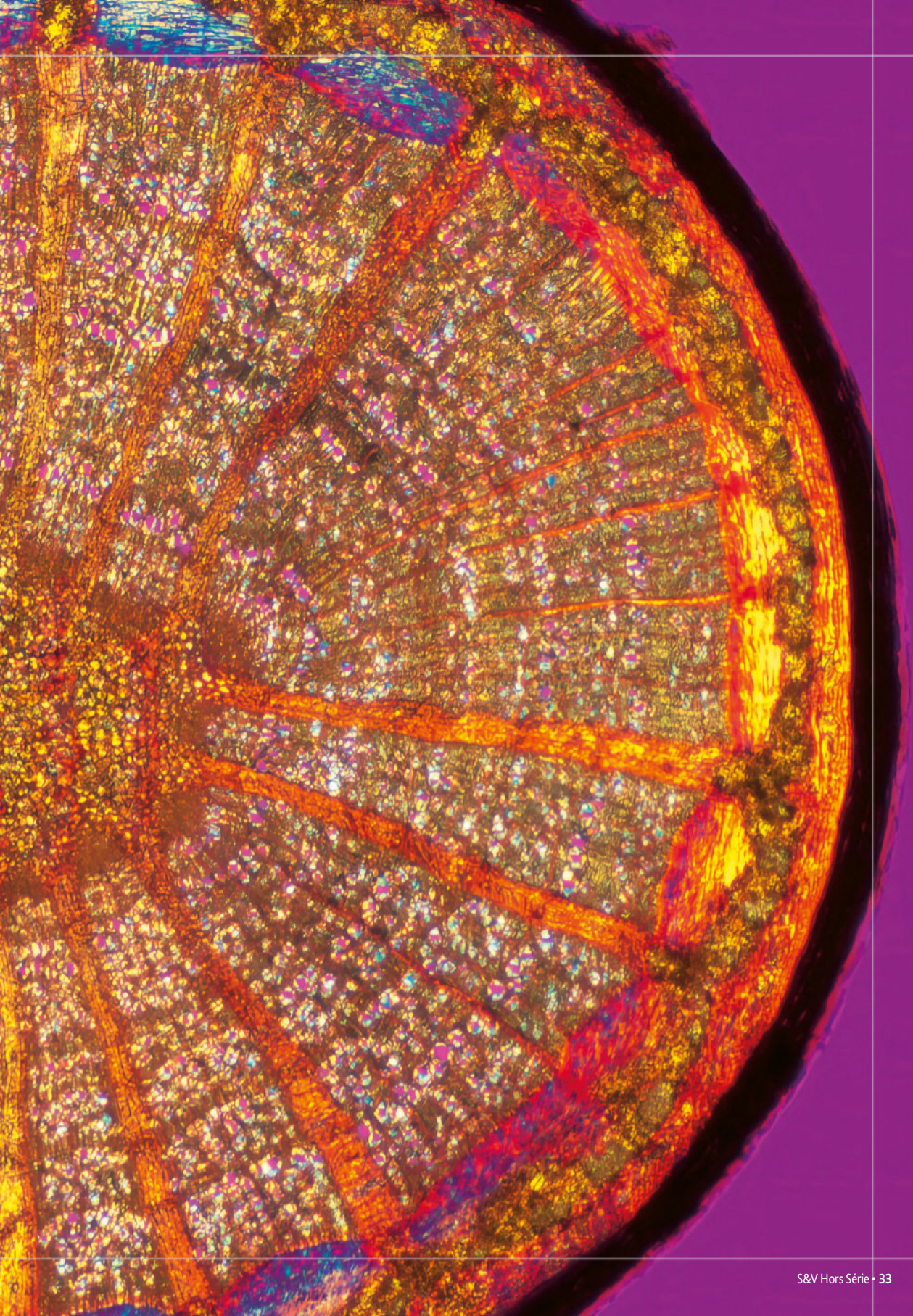
Pendant des millénaires, l'astronomie a été la seule maîtresse du temps. L'heure était définie par la rotation de la Terre... un chronomètre bien loin d'être parfait : la vitesse de rotation de notre planète n'étant pas constante. *"Sous l'effet des marées ou des interactions entre son noyau liquide et le manteau, elle fluctue"*, explique Noël Dimarcq. Le temps astronomique finit inévitablement par s'écarter du temps atomique, dont l'exactitude reste

immuable. Il a donc fallu inventer un système de synchronisation entre le monde des atomes et celui des étoiles. Le Temps universel coordonné (UTC) en est le produit final. Il bat exactement au même rythme que le TAI, mais il intègre une correction cruciale : des secondes intercalaires, pour compenser l'écart dû aux variations de la rotation de la Terre. Une correction qui pourrait cependant être bientôt abandonnée...

L'établissement du temps mondial commence donc par 450 horloges individuelles réparties à travers la planète. De toutes ces heures, le BIPM extrait l'EAL, une échelle stable qui lisse toutes les imperfections locales. Le TAI vient ensuite affiner cette échelle en ajustant sa fréquence grâce aux "super-horloges", qui garantissent que chaque seconde dure exactement le temps prévu par les lois de la physique. Enfin, l'UTC adapte ce temps atomique parfait à la réalité de la rotation terrestre via les secondes intercalaires. C'est cet UTC qui, diffusé par les satellites et les serveurs Internet, vient finalement s'afficher sur les écrans de nos smartphones. ■

LE COMPTER







Douze nuances de temps

Le passé, le futur et, entre les deux, des savants au présent pour créer des outils permettant de calculer et de représenter le temps. Si cette vision linéaire domine aujourd'hui, elle n'a cependant rien d'universel.

PAR MATHIAS CHAILLOT

Des cercles de pierre aux horloges atomiques, les sociétés ont inventé de multiples manières de compter et d'appréhender le temps. Ainsi, chez les Aborigènes d'Australie, il n'est pas linéaire, sans être cyclique pour autant : il ne se calcule pas et ne se projette pas. Les événements fondateurs, survenus dans le "Temps du rêve" ne relèvent pas d'un passé révolu, mais



2800 À 1100 AV. J.-C.

Stonehenge

La fonction du célèbre cercle de pierres préhistorique, en Grande-Bretagne, fait toujours débat. Temple, calendrier, observatoire ? Le monument est en tout cas conçu pour que le soleil passe dans son axe principal aux solstices d'été et d'hiver, signe de la prise en compte du cycle perpétuel de la Terre et du Soleil des millénaires avant notre ère.

coexistent en permanence avec le présent. Indissociable de l'espace, le temps est inscrit dans les paysages, les rituels ou les lois. Vivre, c'est réactiver constamment cet ordre primordial pour maintenir l'équilibre du monde plutôt que le transformer.

Pas de progression non plus chez les Hindous, pour qui le temps cosmique est fondamentalement cyclique, sans commencement ni fin. Il est structuré en *mahayuga* de 4,32 millions d'années (Ma), chacun divisé

en quatre âges correspondant à des phases de déclin de l'ordre social et moral. Une journée de Brahma, le dieu créateur, équivalant à 1 000 mahayuga, un cycle fait 4,32 milliards d'années (Ga) humaines. Il s'achève par une dissolution du monde physique, suivie d'un état de latence d'une durée équivalente, la nuit de Brahma. Et après un jour et une nuit... un nouveau cycle de création débute. Dans cette vision, même le créateur est soumis au temps, avec une vie de 311 040 Ga. Puis un

nouveau Brahma apparaît, et l'Univers entier repart à zéro. Le salut ne consiste alors pas à transformer l'histoire, mais à se libérer du temps lui-même.

De nombreux calendriers païens, africains ou asiatiques reposent d'abord sur les cycles lunaires, les plus simples à observer. Le calendrier musulman est d'ailleurs toujours fondé sur les rotations de la Lune, assumant son décalage avec l'année solaire. Les Hébreux, eux, institutionnalisent la semaine, déjà utilisée en Mésopotamie, en découpant le mois lunaire en quatre phases.

POUVOIR ET AUTORITÉ

Les Mésopotamiens, justement, renforcent la notion de continuité historique grâce à l'usage de l'écriture, en conservant une trace du passé sur leurs tablettes pour anticiper l'avenir via l'astrologie. Ils élaborent aussi, trois mille ans avant notre ère, des concepts toujours en vigueur : le système numérique de base 60, duquel découlent nos heures et nos minutes, ou le calendrier lunaire et solaire de 12 mois. Pour rester en phase avec le cycle solaire, ils ajoutent régulièrement un mois supplémentaire, de la même façon que nous ajoutons aujourd'hui un jour aux années bissextiles.

Pour autant, le temps demeure longtemps une notion locale. Le début de l'année est fixé, de manière arbitraire, aux solstices, aux équinoxes ou à des dates religieuses ou politiques. Chaque cité grecque dispose ainsi de son propre calendrier. Ailleurs, les grandes ères commencent souvent avec l'avènement d'un souverain ou d'une dynastie, comme c'est encore le cas au Japon : compter le temps revient à rappeler le pouvoir.

Avec le christianisme, l'Église devient ordonnatrice du temps. L'année s'organise autour des fêtes religieuses, imposant un rythme commun à l'ensemble de la société. Le comput pascal (le calcul de la date de Pâques) devient même un enjeu scientifique et théologique majeur. Et quand le clergé veut punir un village, il peut même le priver de repère temporel : les cloches qui ne sonnent plus déstabilisent la communauté.

À partir du ^{xiv}e siècle, en Europe, le temps se donne à voir, avec des horloges installées sur les beffrois qui complètent progressivement



1900 À 1600 AV. J.-C

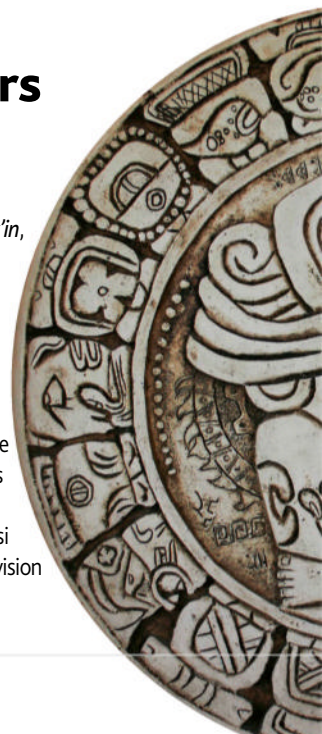
Les tablettes babyloniennes

Parce qu'elle servait l'astrologie, l'astronomie était cruciale à Babylone dès le II^e millénaire av. J.-C. Consignées sur des tablettes, les comptes rendus (phases de la Lune, cycles des planètes, éclipses, etc.) ont démontré une connaissance précise des cycles naturels utilisés pour la conception d'un calendrier déjà complexe.

ENV. 500 AV. J.-C.

Les calendriers mayas

Le *Ha'ab*, calendrier solaire de 365 jours (ci-contre), et le *Tzolk'in*, calendrier rituel de 260 jours, se synchronisent tous les 52 ans, formant un 3^e calendrier. Celui-ci, le Compte long, permet de dater des événements depuis l'origine supposée du monde, tandis qu'un calendrier de 819 jours pourrait être lié à l'observation des cinq planètes visibles à l'œil nu sur un cycle de 45 ans. Le temps maya associe ainsi un comptage linéaire précis à une vision cyclique du sens des événements.



400AV.J.-C.

Les horloges hydrauliques chinoises

Dès le IV^e siècle av. J.-C., la Chine utilise des horloges hydrauliques pour mesurer l'écoulement du temps. Simples, comme une cuve percée, ou complexes, avec plusieurs bassins et flotteurs gradués, elles sont parfois associées à des tambours ou à des cloches pour marquer l'heure auprès des populations. La plus célèbre, terminée en 1092 par Su Song, mesurait près de 12 m de haut et activait gongs et figurines animées.

10AV.J.-C.

L'Horologium d'Auguste

Érigé en 10 av. J.-C. à Rome, l'obélisque (ci-contre, sa pointe) étendait son ombre sur une centaine de mètres. Longtemps considéré comme un cadran solaire, il serait une méridienne permettant d'identifier le midi solaire et de suivre solstices et équinoxes, avec un possible



1410 APR. J.-C.

L'horloge astronomique de Prague

Installé en 1410, ce véritable chef-d'œuvre d'art gothique et de technique médiévale est la plus ancienne horloge astronomique en fonctionnement. Elle affiche les mouvements du Soleil et de la Lune, les signes du zodiaque et plusieurs mesures du temps, notamment l'heure babylonienne, qui débute au lever du soleil.



le rôle tenu jusqu'alors par les clochers. Elles marquent l'autorité et régulent la vie des travailleurs, dans un contexte d'essor du commerce et de la finance, après une ère dédiée à l'agriculture pour laquelle les cycles solaires et lunaires suffisaient. Le temps s'uniformise peu à peu.

MARQUEURS SOCIAUX

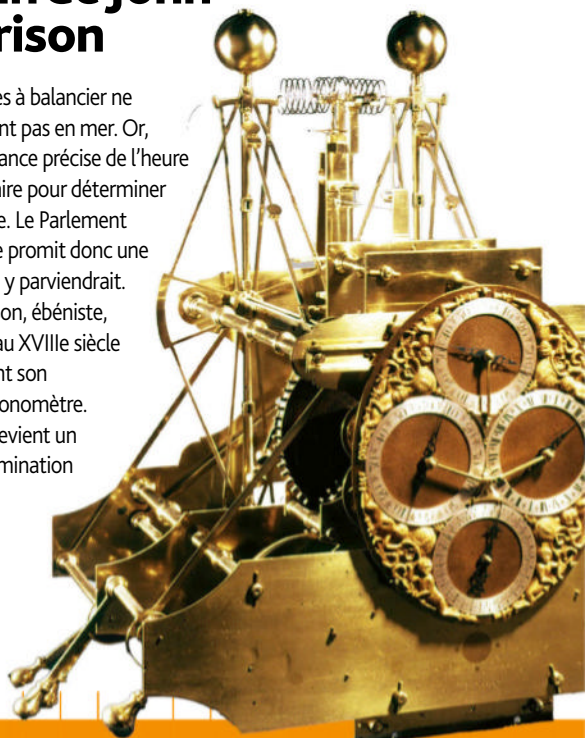
Au XIX^e siècle, ce sont les compagnies ferroviaires qui imposent enfin une heure de référence sur l'ensemble de leurs réseaux, remplaçant définitivement les heures solaires locales. Le but : éviter les accidents et organiser la circulation. Le temps est désormais unifié, les montres des cheminots connectent les territoires et celles des classes bourgeoises deviennent des marqueurs sociaux et des accessoires de mode.

Aujourd'hui, le temps se compte même à rebours. Combien avant l'apocalypse, nucléaire ou climatique ? C'est ce que matérialise la Doomsday Clock, l'Horloge de la fin du monde, réglée depuis 1947 par un comité de chercheurs. En janvier 2026, elle indiquait minuit moins 85 secondes... ■

1735

Le chronomètre marin de John Harrison

Les horloges à balancier ne fonctionnent pas en mer. Or, la connaissance précise de l'heure est nécessaire pour déterminer la longitude. Le Parlement britannique promet donc une prime à qui y parviendrait. John Harrison, ébéniste, l'emporte au XVIII^e siècle en inventant son célèbre chronomètre. Le temps devient un outil de domination maritime





1851

Le pendule de Foucault

Un simple pendule, suspendu à grande hauteur, semble changer de direction au fil des heures: ce n'est pas le pendule qui tourne, mais la Terre. En 1851, le physicien français rend la rotation de notre planète, donc le déroulement d'une journée, perceptible à tout un chacun.

1728

Le Yantra Mandir

L'observatoire (littéralement "le temple des instruments") construit au XVIII^e siècle à Jaipur, en Inde, comprend une vingtaine d'instruments monumentaux, dont le plus grand cadran solaire au monde. Il permet l'observation des positions astronomiques à l'œil nu, et donc les prédictions astrologiques de la Cour.

1926

La montre Oyster Rolex

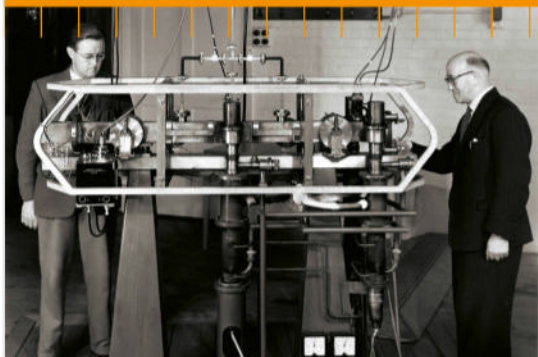
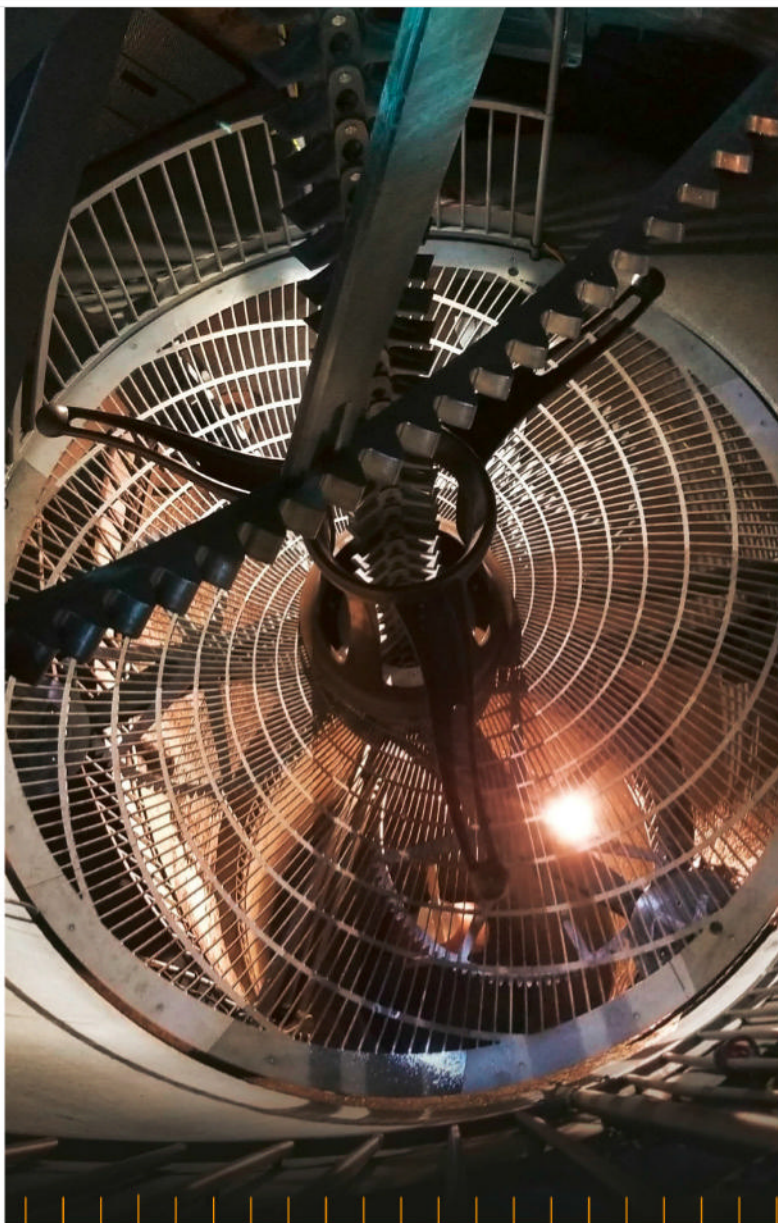
Les chronomètres marins, simplifiés et moins chers à produire, commencent à équiper les classes bourgeoises aux XIX^e et XX^e siècles, qui les portent dans une poche, puis au poignet: la montre est née. Elle reste cependant sensible aux poussières et à l'eau, jusqu'en 1926, où Rolex invente la première montre étanche.



10 000?

L'horloge du "Long Now"

À la fois mécanique, thermique et solaire, l'horloge du "Long Now" est en construction dans le désert du Texas, après deux prototypes en taille réduite. Elle est censée fonctionner pendant dix mille ans et affichera heures, équinoxes, années, position du Soleil et de la Lune. Plus que de calculer le passage du temps, son objectif est de nous y faire réfléchir.



1967

L'horloge atomique

La transition entre deux niveaux d'énergie d'un atome devient la norme de mesure internationale du temps en 1967 : *"la seconde est la durée exacte de 9 192 631 770 oscillations de la transition entre les niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de ^{133}Cs ", ou césium.* La définition du temps passe de l'astronomie à la physique.

Un voyage poétique et scientifique À LA DÉCOUVERTE DES OISEAUX !

Illustré de gravures et d'œuvres exceptionnelles, cet ouvrage retrace la naissance de l'ornithologie, depuis les légendes anciennes jusqu'aux découvertes contemporaines. Des premières images à Buffon et Audubon, de Darwin aux préoccupations actuelles de préservation du vivant, une aventure passionnante à travers les siècles !

L'auteur **Bill François** est physicien, écrivain et vulgarisateur scientifique. Passionné par la nature et les mots, il croise science, histoire, poésie et humour dans des ouvrages qui invitent à voir le monde autrement.

À travers anecdotes, portraits et images rares, **Merveilles à plumes** célèbre à la fois la naissance de la science ornithologique et l'émerveillement éternel que suscitent ces créatures du ciel.



Hors-série Les Cahiers Science&Vie,
144 pages, Format 19,5 x 27 cm.

EN VENTE SUR WWW.KIOSQUEMAG.COM/BOUQUINE ou par téléphone au **01 46 48 48 03** au prix d'un appel local, du lundi au samedi (paiement en CB uniquement) ou en retournant le coupon ci-dessous ▼

BON DE COMMANDE

à retourner à Boutique Science&Vie - 59898 Lille Cedex 9

Où je commande	Réf	Qté	Prix	Total
Hors-série "Merveilles à plumes"	433 607		19,90 €	
Envoi en collico. Livraison : 2 semaines après enregistrement de ma commande.				+ 4,00 €
MONTANT TOTAL DE MA COMMANDE				€

Je règle par chèque joint libellé à l'ordre de Science&Vie.



Vous souhaitez régler par carte bancaire ?
Rapide et 100% sécurisé, rendez-vous sur
www.kiosquemag.com

Offre valable France Métropolitaine valable jusqu'au 30/04/2026 dans la limite des stocks disponibles. Conformément à l'article L 221-18 du code de la consommation, vous disposez d'un droit de rétractation de 14 jours à compter de la réception de votre commande et vous pouvez nous retourner votre colis dans son emballage d'origine complet. Les frais d'envoi et de retour restent à votre charge. Les informations demandées sont destinées à la société LEWORLD MEDIA MAGAZINES (KiosqueMag) à des fins de traitement et de gestion de votre commande, d'opérations promotionnelles, de fidélisation, de la relation client, des réclamations, de réalisation d'études et de statistiques et, sous réserve de vos choix, de communication marketing par KiosqueMag et/ou ses partenaires par courrier, téléphone et courrier électronique. Vous bénéficiez d'un droit d'accès, rectification, d'effacement de vos données ainsi que d'un droit d'opposition en écrivant à RMM-PPD, c/o service juridique, 40 avenue Aristide Briand - 92220 Bagneux, ou par mail à dpd@reworldmedia.com. Vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL - www.cnil.fr. Pour en savoir plus sur la gestion de vos données personnelles, vos droits et nos partenaires, consultez notre politique de Confidentialité sur www.kiosquemag.com.

MES COORDONNÉES (* À remplir obligatoirement)

MO91 # V 1661115

Nom*

Prénom*

Adresse*

Code Postal* Ville*

E-mail

Téléphone portable de pré. Date anniversaire

- ☐ Je ne souhaite pas recevoir les offres Privilege de Science&Vie et Kiosquemag sur des produits et services similaires à ma commande par la Poste, e-mail et téléphone. Dommage !
- ☐ Je ne souhaite pas que mes coordonnées postales et mon téléphone soient communiqués à des partenaires pour recevoir leurs bons plans. Dommage !





“Tout progrès technologique dégage du temps”

Nous produisons de plus en plus, et de plus en plus vite. Cette course à la productivité a façonné nos économies, mais nous rend-elle plus libres de notre temps ? Réponse avec l'économiste Erwann Tison *. PAR HÉLOÏSE RAMBERT

Des employés travaillent sur des machines-outils dans une usine de fabrication de la société allemande Porsche, à Stuttgart.



SVHS: Comment mesurer l'efficacité au travail ?

Erwann Tison : Le calcul de la productivité reste le meilleur moyen à notre disposition. C'est elle qui permet de savoir si une personne est au bon endroit, au bon moment, et si elle dispose des bons outils pour faire son travail, auquel elle alloue une partie de son temps. La

productivité d'un ouvrier dans une industrie automobile, par exemple, est mesurée facilement en prenant en compte le nombre de voitures qu'il produit par heure, le prix de vente de la voiture et toutes les ressources qu'il a fallu engager pour produire ladite voiture. Mais la notion a ses limites : il est quasiment impossible d'évaluer la productivité dans bon nombre

de métiers qui relèvent de la sphère non marchande. Quelle est la productivité d'un enseignant ? Elle est qualitative et ne se mesure pas instantanément, mais plutôt à l'échelle de trente ou quarante ans. De nombreux économistes estiment qu'il faut repenser la productivité et y inclure d'autres facteurs. Quiconque a déjà été réconforté à l'hôpital par une

aide-soignante sait que ce contact humain a une valeur qui surpasse largement sa valeur marchande.

SVHS : Depuis la révolution industrielle, on n'a cessé de produire des biens marchands de plus en plus efficacement...

E. T. : Oui, et regarder l'évolution du temps de travail nécessaire pour s'offrir l'un ou l'autre de ces biens est parlant. Il a drastiquement baissé au cours du temps. Le nombre d'heures travaillées pour acheter une voiture, par exemple, a été quasiment divisé par deux en cinquante ans. Le seul vecteur de l'augmentation des salaires, et donc du pouvoir d'achat, c'est la productivité. Elle fait aussi baisser les prix. C'est la hausse de la productivité qui fait que nous vivons dans cette économie postindustrielle capitaliste, qui nous a vraiment fait entrer dans une économie de l'abondance. Aujourd'hui, avec les technologies à notre disposition, nous pouvons produire des biens quasiment à la demande, de

manière instantanée.

SVHS : Quels ont été les ressorts de cette incroyable accélération et son effet sur le temps de travail ?

E. T. : Tout progrès technologique majeur a façonné son époque et a dégagé du temps pour les personnes. Le temps de travail n'a cessé de baisser. Avant la révolution industrielle, de 80 % à 85 % des salariés dépendaient directement du travail dans les champs. Aujourd'hui, c'est 1,5 %. D'abord, il y a eu la machine à vapeur. La mécanisation appliquée à l'agriculture a été une véritable révolution copernicienne. Elle a permis de libérer les travailleurs de gestes extrêmement pénibles et répétitifs. Opérante 24 heures sur 24, la machine a fait gagner un temps incroyable à l'humanité, qui a pu occuper ce temps à autre chose. C'est de là que sont nés le secteur industriel et les métropoles. À l'époque industrielle, les ouvriers travaillaient entre 12 heures et 16 heures par jour. En appliquant le même procédé de mécanisation

La mécanisation de l'agriculture a permis de libérer du temps de travail, tout en augmentant la sécurité et la productivité.



et d'automatisation des chaînes de production, on a pu, encore une fois, leur libérer du temps, non seulement dans la semaine, mais à l'échelle de leur vie. On connaît la forte corrélation qui existe entre pénibilité du travail et espérance de vie. Et ce temps, de nouveau, il a fallu l'occuper : le secteur tertiaire a été créé et a représenté un changement anthropologique majeur qui embauche aujourd'hui de 70 % à 75 % des personnes. Elles aussi ont commencé par travailler sur une large amplitude horaire. Aujourd'hui, on est en train d'assister aux mêmes phénomènes que ceux qui ont transformé les secteurs agricole et

“ La hausse de la productivité fait que nous vivons dans cette économie postindustrielle capitaliste qui nous a vraiment fait entrer dans une économie de l'abondance ”



industriel, cette fois par le biais de l'informatique et de l'intelligence artificielle.

SVHS : *L'IA s'inscrit donc dans la continuité des précédentes révolutions technologiques ?*

E. T. : Oui, dans le sens où elle permet l'automatisation de certaines tâches. À la différence que, cette fois, elle ne concerne plus les couches les moins qualifiées du marché du travail. Mais, désormais, une question se pose : que faire de ce nouveau temps libre ? Que va-t-il se passer dans les cinquante, cent prochaines années ? L'humanité va-t-elle se créer de nouveaux besoins et, donc, un quatrième secteur ? Il faut

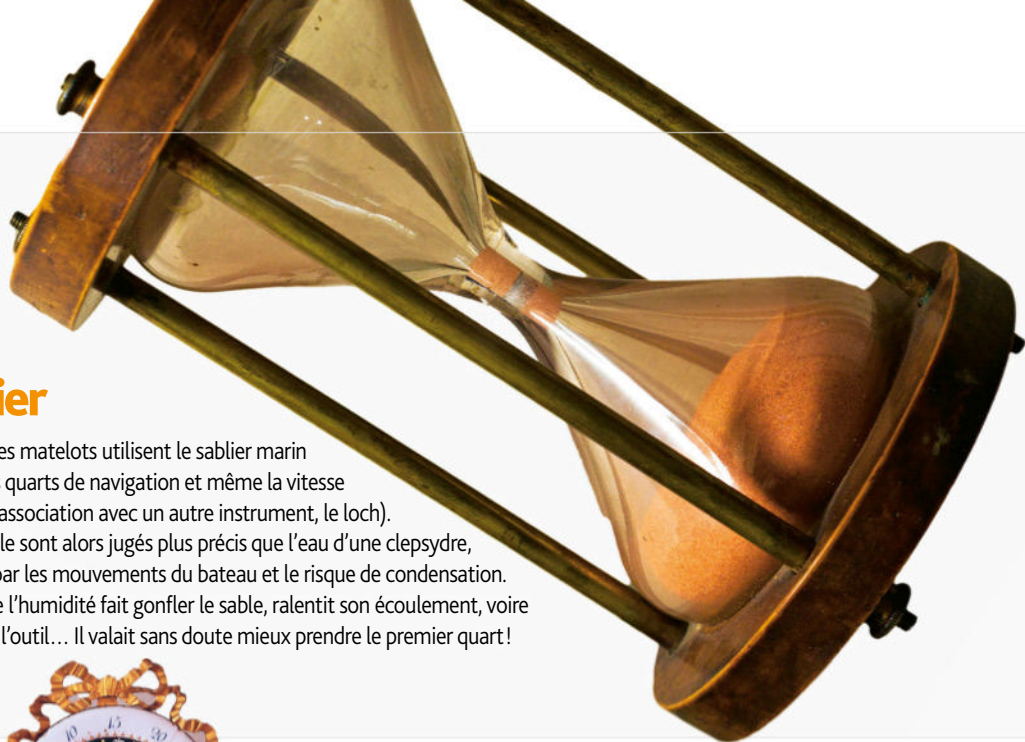
comprendre que l'économie continuera à être en croissance tant qu'il y aura de nouveaux besoins à satisfaire. Sinon, ce sera la compression de la demande, et donc de l'offre. Certains économistes estiment que cela se traduira par le chômage de masse, car nos besoins sont comblés. D'autres, dont je fais partie, pensent que les besoins humains sont infinis et que le marché va se restructurer.

SVHS : *On parle beaucoup de l'ubérisation du travail. Pensez-vous que cette tendance soit émancipatrice ou qu'elle nous asservit ?*

E. T. : Je préfère le terme de "plateformisation" à celui

d'"ubérisation", qui vient directement du marketing. J'y vois un moyen de redevenir un peu propriétaire de son temps et le promoteur de ses propres compétences, que l'on peut vendre de manière non exclusive à la structure de son choix. La création de microentreprises concerne principalement les moins de 40 ans dont la valeur cardinale n'est plus seulement la maximisation des revenus, mais un meilleur équilibre entre vie professionnelle et vie personnelle. Ils sont nombreux à vouloir construire autour de leur vie privée, sportive, associative et faire de leur travail un "hobby alimentaire". Mais la plateformisation ne fonctionne vraiment que pour les personnes très qualifiées avec des compétences très rares et des salaires déjà très élevés. Je pense aux informaticiens, financiers, certains *data scientists*. En pratique, quand on parle d'"uberisation", on pense plus aux chauffeurs VTC et aux livreurs de repas dans les villes. À eux, ce modèle, encore largement imparfait, ne permet pas de moins travailler, au contraire. Il est assez ironique de constater que la technologie a fait disparaître les porteurs d'eau des villes il y a cinquante ans et a recréé des métiers précaires comparables. ■

** Erwann Tison est chargé d'enseignement à l'université de Strasbourg et directeur des études de l'Institut de l'entreprise.*



Le sablier

Au Moyen Âge, les matelots utilisent le sablier marin pour mesurer les quarts de navigation et même la vitesse des bateaux (en association avec un autre instrument, le loch). Les grains de sable sont alors jugés plus précis que l'eau d'une clepsydre, trop influencée par les mouvements du bateau et le risque de condensation. Il n'empêche que l'humidité fait gonfler le sable, ralentit son écoulement, voire bouche le col de l'outil... Il valait sans doute mieux prendre le premier quart !

TIC TOC BIM!

Horloges capricieuses, dispositifs lunatiques ou trop compliqués : l'histoire de la mesure du temps regorge d'inventions qui marchaient... vraiment très mal.

PAR ARMELLE CAMELIN



Le temps décimal

Il y a 24 heures dans une journée – ce mode de comptage remonte à la Mésopotamie, voici cinq mille ans. Mais ce serait quand même plus simple si la journée était divisée en 10 heures de 100 minutes (chaque minute comptant 100 secondes), non ? Eh bien, cela fut tenté pendant la Révolution française. À partir de 1793, dans le cadre de l'uniformisation des mesures sur une base décimale, les journées des Français ne comptaient plus que dix heures... Jugé trop compliqué, le système fut délaissé en 1795.



Le merkhet

C'est la première horloge astronomique. Utilisé en Égypte dès le Nouvel Empire, le merkhet permet de mesurer le temps pendant la nuit, quand les cadrans solaires ne fonctionnent plus. Il est composé d'une barre à laquelle est fixé un fil à plomb. Il faut être deux pour s'en servir. L'outil sert à suivre l'alignement de 10 étoiles pour les 10 heures de la nuit. Les Égyptiens considéraient en effet qu'un jour comptait 24 heures réparties comme suit : 12 heures de jour, 1 heure pour le coucher du soleil, 1 heure pour le lever et 10 heures pour la nuit. Certes, la durée du jour et de la nuit varie dans l'année, mais tant pis – c'est la première limite du merkhet. La deuxième, et pas des moindres : par temps couvert ou pleine lune, l'horloge céleste reste muette.

La clepsydre

Elle trouve sa source vers 1600 av. J.-C., date à laquelle les Égyptiens l'inventent. Le principe : un récipient percé dont l'eau s'écoule goutte à goutte. Le but de cette horloge est de mesurer la durée d'un événement : une plaidoirie, un tour de garde ou une expérience. Pour chronométrer ces durées, les récipients sont gradués à l'intérieur. Sauf qu'il y a deux problèmes majeurs. D'abord, plus le niveau de l'eau baisse dans le récipient, plus la pression à la sortie diminue et le débit avec elle. Ensuite, ce même débit dépend de la température ambiante, de l'humidité et de... l'usure du trou. Une même clepsydre n'avance pas à la même vitesse le matin et l'après-midi ! Malgré ces variations, à Athènes, ces horloges à eau servaient à limiter le temps de parole des orateurs au tribunal. À cause de ces variations physiques, certains chanceux parlaient plus longtemps que d'autres. Une justice à débit variable...



La montre binaire

Au ^{xx}e siècle, l'ère informatique inspire une idée novatrice aux horlogers : afficher l'heure en binaire. Le principe est simple : des rangées de leds représentent les heures, et d'autres rangées les minutes (d'autres encore les secondes sur certains modèles). Chaque point allumé vaut une puissance de deux : 1,

2, 4 ou 8. Pour lire l'heure, il faut additionner les valeurs des leds allumées. Problème : cette montre exige de son propriétaire non seulement de savoir parfaitement lire le binaire, mais aussi de le faire rapidement ! Une montre extrêmement précise, donc, mais inutilisable pour répondre simplement à la question "Quelle heure est-il ?"



Le feu

Le feu est aussi mis à contribution pour mesurer le temps, avec des cierges gradués. La légende raconte que, au ^{ix}e siècle, le roi anglo-saxon Alfred le Grand les utilise pour rythmer ses journées et consacrer un tiers de son temps à Dieu. Sauf que le moindre courant d'air accélère la combustion. En Chine, au ^{vi}e siècle, on utilisait des horloges à encens pour indiquer l'heure. Là encore, l'humidité et les courants d'air transformaient la mesure du temps en loterie parfumée.



“Cerveau et musique se synchronisent”

Face à un rythme musical, notre corps bat la mesure. Pas, pouls, respiration... les scientifiques explorent cette synchronisation. Et lui trouvent des débouchés thérapeutiques. Le point avec le chercheur Benoît Bardy*.

PAR HUGO LEROUX



SVHS: *Pourquoi avons-nous naturellement tendance à nous synchroniser avec la musique, à remuer ou à dodeliner de la tête en rythme ?*

Benoît Bardy : Il y a un double mécanisme. Le premier est souvent sous-estimé : il est d'ordre physique. Lorsque l'on prend deux systèmes oscillants ayant des fréquences proches et qu'on les met en interaction, ils ont naturellement tendance à se synchroniser. Ce phénomène est universel. On peut l'observer avec des métronomes posés sur une surface mobile : lancés de manière désordonnée, ils finissent par battre à l'unisson. Mais il ne concerne pas que des objets inertes. On le retrouve partout dans la nature : bancs de poissons, vols d'oiseaux, lucioles

qui clignent ensemble... et humains dans un stade lors d'une ola. Nos fonctions corporelles oscillent naturellement – dans la marche, la respiration, le cœur – et dès qu'un couplage s'installe, par la vision ou le son, par exemple, la synchronisation tend à émerger.

SVHS: *Et le second mécanisme ?*

B. B. : Il est cérébral. Le cerveau est lui-même un système oscillant, composé de réseaux de neurones qui communiquent à différentes fréquences, en alternant des phases de plus forte et plus faible excitabilité. Lorsqu'un rythme musical externe entre dans une gamme de fréquences proche de celle d'une région du cerveau, il peut l'entraîner vers une synchronisation partielle ou totale. On observe

par exemple que des passants ajustent inconsciemment leur cadence lorsqu'ils traversent une place où joue un percussionniste, puis perdent cette synchronisation en s'en éloignant.

SVHS: *Comment fonctionne précisément cet entraînement cérébral au rythme ?*

B. B. : Nous en avons appris davantage ces dernières années, grâce à des travaux majeurs comme ceux d'Ed Large, aux États-Unis (université du Connecticut), ou Sylvie Nozaradan, à l'université de Bruxelles, qui ont étudié le cerveau par des méthodes électroencéphalographiques (EEGs). Celui-ci “fonctionne” selon plusieurs bandes de fréquences : certaines très

Georg Solti (1912-1997), chef d'orchestre hongrois, lors d'une répétition au Carnegie Hall, à New York, dans les années 1960.



“Lorsqu’un rythme musical externe est proche des fréquences bêta du cerveau, il peut entraîner des oscillations cérébrales”

lentes, de 1 Hz à 4 Hz, et d’autres plus rapides, entre 15 Hz et 30 Hz. Ces dernières, dites bêta, sont très liées à la sensorimotricité, donc au mouvement. Lorsqu’un rythme musical externe est proche de ces fréquences, il peut entraîner ces oscillations cérébrales, les faire tendre vers une forme de synchronisation sans nécessairement qu’il y ait une correspondance stricte battement par battement.

SVHS: Le rythme musical

En 2024, des chercheurs de l’Inserm ont trouvé que ce qui nous poussait à danser est un rythme d’une complexité intermédiaire. Il stimule notre cerveau, active la zone motrice et nous pousse à bouger pour mieux anticiper et comprendre la musique.

façonne-t-il notre perception du temps ?

B. B. : Oui, cela aussi a été démontré. Un tempo rapide nous conduit à évaluer le temps comme s’écoulant plus lentement, et inversement. Mais les mécanismes derrière ce phénomène restent débattus. Certains chercheurs (par exemple Emmanuel Bigan à Dijon) tablent sur l’existence d’une horloge interne du cerveau. Un tempo rapide augmenterait alors l’état d’éveil physiologique, accélérant ce mécanisme de comptage du temps : à durée réelle égale, le temps est alors perçu comme plus long. Selon d’autres

chercheurs (Ed Large déjà cité), pas besoin d’horloge interne : la synchronisation entre oscillations cérébrales et pulsation musicale crée des pics d’attention attendus. Le cerveau anticipe la prochaine pulsation, ce qui segmente le temps en unités prévisibles. En résumé, dans un cas, le mécanisme prendrait source en nous, dans l’autre cas, il nous serait imposé par l’extérieur.

SVHS: Quelles autres questions de recherche restent aujourd’hui ouvertes ?

B. B. : Un point clé demeure mystérieux, celui qui dit que, à tempo égal, un métronome et un morceau de musique ne produisent pas les mêmes effets. On réagit davantage au métronome, mais on anticipe davantage la musique – le cerveau se met en quête du prochain battement. La synchronisation est aussi plus variable, plus “élastique” avec la musique, et



nous ne comprenons pas encore pleinement pourquoi. L'explication la plus probable est que la musique est rythmiquement plus riche. Elle contient plusieurs niveaux temporels imbriqués – pulsation principale, mais aussi rythmes propres de la mélodie ou des différents instruments, microvariations liées au groove. La musique, en épousant cette variabilité, se synchronise plus efficacement avec la diversité naturelle de nos rythmes biologiques.

SVHS: Ces connaissances peuvent-elles nous aider à mieux soigner certaines maladies ?

B. B. : Des applications numériques visent aujourd'hui à exploiter cette synchronisation en rééducation, notamment pour la maladie de Parkinson. Cette maladie touche les ganglions de la base, une structure cérébrale planifiant l'activité motrice. Or, la musique permet à la fois de réactiver certains circuits neuronaux lésés – par des mécanismes encore mal compris – et de contourner ces régions en mobilisant d'autres réseaux sensorimoteurs. À l'aide de capteurs placés sur les pieds et d'algorithmes capables de dilater ou de compresser la musique sans en altérer la mélodie, il est possible d'adapter le tempo musical à la cadence de marche d'un patient. Le but est souvent d'accélérer subtilement la marche vers une zone de stabilité – la lenteur des pas étant une cause majeure de chutes chez les patients parkinsoniens.

Quand le rythme amène la transe

Notre cerveau anticipe le rythme. Les polyrythmes – la superposition de plusieurs rythmes dans une même temporalité – jouent avec cette capacité jusqu'à parfois provoquer la transe. À commencer par l'un des rythmes les plus simples, le 3:2 (ou hémiole), omniprésent – des percussions africaines à la musique actuelle –, qui fascine particulièrement les musiciens et chercheurs. Trois battements sur la même durée que deux autres : un rapport de fréquences très stable pour le cerveau et le corps, qui révèle notre aptitude à gérer plusieurs tempos à la fois...



SVHS: Où en sont ces développements ?

B. B. : Plusieurs équipes, dont le laboratoire Brams à Montréal ou mon équipe à EuroMov (via la start-up BeatHealth et en collaboration avec la clinique BeauSoleil de Montpellier), sont en train d'évaluer de tels systèmes lors d'essais cliniques avancés. Nous essayons de quantifier ces bénéfices en termes de réduction des chutes et, en parallèle, nous regardons par IRM si les régions du cerveau lésées ont été remodelées, ce qui serait signe d'une forme

En 2019, à Essaouira (Maroc), les Gnawa célèbrent l'inscription de leur art au patrimoine immatériel de l'Humanité : musique, chant spirituel et transe.

de guérison. Les prochains mois ou années apporteront des résultats décisifs. Au-delà de la seule rééducation, nous explorons aussi ce type d'application pour la performance sportive : aider, par de la musique synchronisée, à optimiser le rythme de course des athlètes par exemple. ■

**Benoît Bardy, professeur en science du mouvement à l'université de Montpellier, explore les liens entre rythme, mouvements et perception temporelle.*

“ Des applications numériques visent aujourd'hui à exploiter cette synchronisation en rééducation, notamment pour Parkinson ”



LE CASSE-TÊTE DES FUSEAUX HORAIRES

Trente-huit : c'est le nombre de fuseaux différents dans le monde ! De Pékin à Madrid et du Pacifique à l'Europe, décider de l'heure est un acte hautement politique. PAR DAVID MARCHAND

Quelle heure est-il, s'il vous plaît ? Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, la réponse à cette question dépendait de la ville dans laquelle on se trouvait. Chaque localité avait l'habitude de définir l'heure à partir de son propre midi solaire – quand le Soleil passe au plus haut dans le ciel à cet endroit précis. Selon ce critère, lorsqu'il est midi à Paris, il peut être 12 h 10 à Lyon, et seulement 11 h 44 à Nantes. Aux États-Unis, à la même époque, le réseau ferroviaire fonctionne avec plus de trois cents heures locales différentes. On ne compte plus les retards et les correspondances manquées. En 1853, à Valley Falls, dans le Rhode Island, deux trains se percutent parce que leurs conducteurs consultent des horloges légèrement décalées. Ce désordre démontre alors l'urgence de choisir un méridien d'origine, une ligne zéro à partir de laquelle définir des heures communes.

Deux nations se disputent alors la maîtrise du temps : la France, qui défend le

méridien de Paris, et le Royaume-Uni, qui pousse celui de Greenwich, centre de sa puissance maritime. Une bataille acharnée entre deux prétendants à la domination universelle, temps y compris ! *"Si le monde entier s'accorde sur l'unification des longitudes et des heures en acceptant le méridien de Greenwich comme point de départ", stipule la VII^e Conférence générale de l'assemblée géodésique internationale, qui se tient à Rome en 1883, "la Grande-Bretagne trouvera dans ce fait un motif de plus pour faire un nouveau pas en faveur de l'unification des poids et mesures en adhérant à la Convention du mètre du 20 mai 1875..."* En 1884, la conférence internationale de Washington arbitre ce duel. Depuis longtemps, la plupart des navires marchands utilisent les cartes de l'Amirauté britannique basées sur





Greenwich et près de 70 % du trafic maritime mondial s'y réfère. Le vote ne fait qu'entériner cette domination : le méridien zéro devient celui de Greenwich. Le système théorique imaginé à cette époque prévoit 24 fuseaux, un pour chaque heure nécessaire à la Terre pour tourner sur elle-même. Mais cette géométrie

idéale ne sera pas appliquée strictement. Les États adaptent les fuseaux à leurs intérêts, ce qui explique pourquoi le monde utilise aujourd'hui 38 heures officielles. Des décalages de 30 ou 45 minutes traduisent souvent la volonté de se distinguer d'un voisin. L'Inde a ainsi adopté un fuseau avec 5 h 30 supplémentaires, et le Népal a ajouté 15 minutes afin de marquer son indépendance horaire. La Chine, elle, n'utilise qu'un seul fuseau malgré son immensité. Une heure unique imposée en 1949, destinée à affirmer l'unité nationale. Conséquence : dans l'ouest du pays, le midi solaire peut survenir en milieu d'après-midi.

DÉCALAGES POLITIQUES

Certains États redessinent parfois le temps avec audace. En 2011, les Samoa effacent un jour complet pour basculer du côté asiatique de la ligne de changement de date et s'aligner sur leurs partenaires commerciaux. La Russie, elle, modifie régulièrement ses fuseaux ou l'usage de l'heure d'hiver pour recentraliser son organisation. L'Europe offre aussi des exemples de décalages pour raisons politiques. L'Espagne, située à la longitude du Maroc, devrait logiquement être alignée sur Londres. Elle a pourtant, sous la dictature franquiste, adopté l'heure d'Europe centrale en 1940 pour se rapprocher de l'Allemagne. Un choix qui n'a jamais été annulé. Ainsi que le résume Barbara Adam, sociologue anglaise : *"Loin d'être immuable, le temps peut être marchand, compressé et contrôlé."* Les débats autour de l'heure sont donc loin d'être clos ! ■

LE VIVRE



Atelier dans une horlogerie industrielle.
La taylorisation des tâches au tournant
du XX^e siècle a permis d'augmenter
la productivité des ouvriers.



Notre corps est une horloge

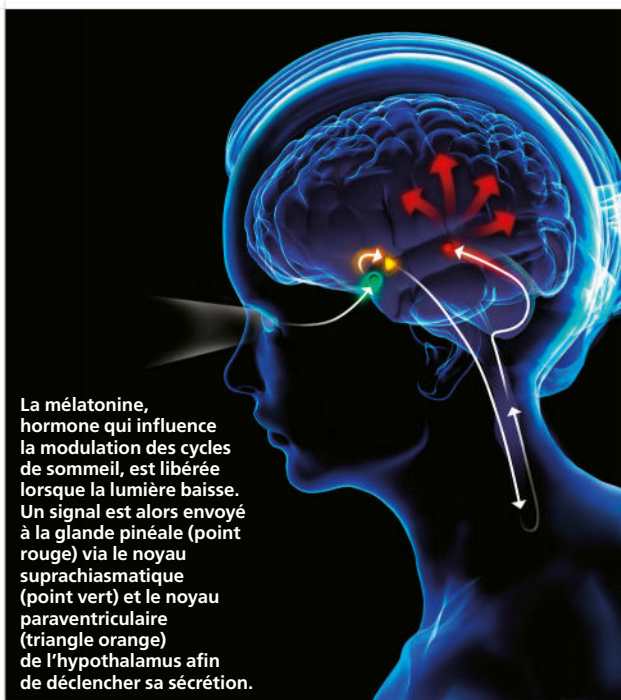
Le temps est une caractéristique biologique : notre corps renferme en effet un fascinant chronomètre naturel. Comment est-il régulé ? Éléments de réponse. PAR KHEIRA BETTAYEB

Après le passage à l'heure d'été fin mars, nous avons tous eu besoin de quelques jours pour nous habituer au nouveau rythme – un peu comme lorsque l'on prend un vol long-courrier, qui nous fait traverser plusieurs fuseaux horaires. Ce phénomène est lié à un décalage entre la nouvelle heure affichée sur nos montres et notre propre horloge interne. Car en chacun de nous réside un système de mesure de temps autonome qui fonctionne à son propre rythme, tout en étant synchronisé avec les cycles jour-nuit. Cela depuis notre naissance, sans que l'on en soit conscient. Un véritable bijou d'ingénierie de la nature.





En 2021, 15 volontaires ont passé quarante jours enfermés dans la grotte des Lombrives, en Ardèche, dans le cadre du projet Deep Time. Une aventure scientifique, menée par l'explorateur Christian Clot, pour comprendre les effets physiologiques et psychologiques de l'absence de repères temporels.



Présent chez la plupart des organismes vivants (animaux, plantes, champignons...), ce métronome biologique est indispensable à la vie : *“il nous aide à anticiper les changements environnementaux liés à la rotation de notre planète et, ainsi, à adapter nos fonctions physiologiques au cycle jour-nuit”*, développe Franck Delaunay, chronobiologiste à l'institut de biologie Valrose, à Nice.

Sommeil, sécrétion d'hormones, digestion, température corporelle... Ce système cale quasiment toutes nos fonctions physiologiques sur des rythmes circadiens (du latin *circa* “autour” et *dies* “jour”), d’une durée proche de 24 heures. C’est notamment grâce à lui, par exemple, que nous sombrons tous les soirs dans les bras de Morphée et que nous les quittons tous les matins.

Contrairement à ce que l’on pourrait penser, ce métronome naturel n’est pas unique, mais multiple, car *“composé de nombreuses horloges travaillant en collaboration”*, explique François Rouyer, chronobiologiste à l’institut des neurosciences Paris-Saclay. La plus connue est l’horloge biologique centrale, nichée au cœur de notre cerveau, *“dans deux petites structures renfermant chacune 10 000 neurones : les noyaux suprachiasmatiques”*, précise le chercheur. Mais il existe aussi plusieurs autres horloges biologiques : les cérébrales secondaires, *“situées dans d’autres zones cérébrales, par exemple, l’hypothalamus médiobasal et le tronc cérébral”* ; et les périphériques, *“actives dans quasiment chacune des cellules de nos autres organes”*.

Le fonctionnement de ces horloges repose sur un réseau complexe de protéines, sous le contrôle d’une quinzaine de gènes “d’horloge” – Clock, Bmal1, Period, Cryptochrome... *“Décrypté notamment par les chercheurs américains récompensés par le prix Nobel de physiologie ou médecine de 2017, ce réseau induit une production cyclique de nombreuses protéines, à l’origine des rythmes biologiques d’environ 24 heures”*, expose François Rouyer.

DÉCALAGE DE 10 MINUTES

Dans l’espèce humaine, ces cycles durent en moyenne 24 heures et 10 minutes et dépassent ainsi la durée du jour de 10 minutes. *“En l’absence de lumière, nos horloges biologiques se décaleraient chaque jour de 10 minutes en moyenne avec un coucher et un lever de plus en plus tardifs”*, souligne François Rouyer. Heureusement, tous les jours, elles sont synchronisées sur le cycle journalier de 24 heures, et en particulier par la lumière. Comment ? *“La lumière*

“En l’absence de lumière, nos horloges biologiques se décaleraient chaque jour de dix minutes avec un coucher et un lever de plus en plus tardifs

est reçue par la rétine (membrane au fond de l'œil), d'une part par les cônes et les bâtonnets – des cellules également utilisées pour la vision –, et d'autre part par des cellules spécialisées, les cellules ganglionnaires à mélanopsine, sensibles à la lumière bleue. Le message nerveux qui en découle passe ensuite par une voie nerveuse différente de celle impliquée dans la vision, reliée à l'hypothalamus et donc à l'horloge centrale."

Quant aux autres horloges, elles sont également ajustées en partie par la lumière,

de façon indirecte *"grâce à des signaux parvenant de l'horloge centrale", mais "aussi et surtout par d'autres signaux en lien avec leurs activités, comme l'horaire des repas pour l'horloge du foie"*, ajoute Franck Delaunay.

Outre le changement d'heure et les vols long-courriers, nos horloges biologiques peuvent être désynchronisées par d'autres facteurs : des horaires de lever et de coucher irréguliers, le travail de nuit, l'exposition à la lumière bleue des écrans le soir ou l'exposition insuffisante à la lumière du jour. Donc, prudence... ■



Haro sur nos rythmes scolaires !

L'alerte est lancée par la Cour des comptes dans un rapport publié en 2025, et qui reprend des conclusions divulguées en 2010 par l'Académie nationale de médecine. Celle-ci, déjà, soulignait que *"l'aménagement du temps scolaire en France n'est pas en cohérence avec [nos] connaissances de la chronobiologie de l'enfant"*, avant de pointer la semaine de 4 jours, *"néfaste pour la vigilance et les performances des enfants"*. Cette organisation condense en effet la totalité des heures d'enseignement obligatoires sur 4 jours. Or, *"la vigilance, nécessaire aux apprentissages, n'est élevée que pendant quelques heures dans la journée, surtout en matinée."*

Donc, une matinée de cours en plus serait la bienvenue", explique Stéphanie Mazza, professeure de neuropsychologie à l'Institut national supérieur du professorat et de l'éducation de Lyon. Ensuite, *"le mercredi 'chômé' incite souvent à décaler les horaires du coucher du mardi soir ; ce qui induit un lever tardif le mercredi et désynchronise ainsi les rythmes biologiques des enfants"*. Pour certains chercheurs, le samedi matin vaqué est pire : cela favoriserait des couchers tardifs vendredi et samedi ; du coup, l'enfant est désynchronisé deux matins de suite. Mais pour Stéphanie Mazza, *"c'est le mercredi qui ne devrait pas être chômé, car le samedi permet du temps en famille,*

très important". Pour les adolescents, *"le début des cours à 8 heures pose problème"*, souligne la chercheuse.

Lors de la puberté, leurs horloges se décalent progressivement, repoussant ainsi leur endormissement. Aussi, les faire se lever tôt pour être au collège ou au lycée dès 8 heures induit une dette de sommeil importante, ce qui diminue leurs facultés d'apprentissages et favorise, par ailleurs, les troubles anxieux et dépressifs. Voilà pourquoi, en 2025, les participants de la Convention citoyenne sur les temps de l'enfant ont approuvé à 95 % l'idée de reculer le début des cours à 9 heures, au collège comme au lycée.

CHRONOCEPTION

MODE D'EMPLOI

Pourquoi notre perception du temps varie-t-elle en fonction des circonstances ?

La recherche en psychologie permet d'apporter des réponses intéressantes.

PAR KHEIRA BETTAYEB

Nous en avons déjà tous fait l'expérience : parfois, le temps semble passer au ralenti ; et d'autres fois... filer à toute allure !

Pourquoi ? *"Cela s'explique par le fait que, même si on parle ici de temps, en réalité, on fait référence à tout autre chose"*, éclaire Sylvie Droit-Volet, chercheuse en psychologie sociale et cognitive, spécialiste du temps psychologique à l'université Clermont-Auvergne. De fait, les sentiments de ralentissement et d'accélération du temps ne concernent pas la perception de la durée même des événements, mais celle que l'on a de la vitesse à laquelle ils s'écoulent.

En étudiant les temps psychologiques, Sylvie Droit-Volet et son équipe ont découvert plusieurs facteurs pouvant expliquer les distorsions subjectives du temps. C'est le cas notamment des émotions. Lors d'une recherche parue en 2022 dans *Psychological Research*, les scientifiques ont demandé à des étudiants de visionner des vidéos générant une émotion positive (joie) ou négative (tristesse), puis d'estimer la vitesse d'écoulement du temps pendant ces vidéos. Résultat : *"le passage du temps était toujours perçu comme plus rapide pour les premières, et*

plus lent pour les secondes. Et ce, même si les durées des vidéos étaient les mêmes", résume Sylvie Droit-Volet.

Autre facteur capable d'induire des distorsions temporelles : la difficulté de la tâche à laquelle on s'adonne. Dans une autre expérience, les étudiants ont dû cette fois réaliser le plus rapidement possible une série d'exercices plus ou moins difficiles. Et il s'est avéré que le passage du temps était perçu comme plus lent pour la tâche facile que pour celles de difficulté moyenne ou difficile. En cause : *"le sentiment de ne pas avoir assez de temps pour réaliser ce qu'on leur demandait"*, précise la chercheuse. D'où la théorie que *"les sentiments de ralentissement et d'accélération du temps*



découlent en fait d'une métaphore où on utilise la notion du temps pour exprimer les changements ressentis dans la dynamique de soi, laquelle varie selon nos états émotionnels et notre charge cognitive". Concernant spécifiquement les seniors, lors d'une étude de 2016 (*Time and Society*), Sylvie Droit-Volet a interrogé quotidiennement, pendant plusieurs jours, des personnes de moins et de plus de 75 ans sur leur sentiment du passage du temps. Et, contrairement à une idée reçue, chez les plus de 75 ans, il n'y avait pas d'accélération du temps... mais un ralentissement. C'est "qu'à cet âge, on est plus souvent seul, triste ou en perte d'autonomie ; alors, dans la vie de tous les jours, le temps s'étire...", explique la chercheuse.

Mais paradoxalement, quand il s'agit d'évaluer rétrospectivement la vitesse de passage du temps sur de longues périodes – et non sur un seul jour –, les plus de 70 ans ont souvent le sentiment qu'il s'écoule plus vite que lorsqu'ils étaient jeunes. La raison ? "Cela pourrait s'expliquer par la raréfaction des nouvelles expériences à l'âge adulte, alors qu'elles sont plus fréquentes dans l'enfance", explique Nathalie Bailly, chercheuse en psychologie gériatrique à l'université de Tours. "En effet, le fait de vivre moins de nouveautés et davantage de routine peut donner l'impression que le temps s'écoule plus vite." ■

“Chronobiologie, une science qui a de l'avenir !”

Sport, travail, examens, repos, repas, sommeil, soins médicaux... Quel est le meilleur moment pour pratiquer ces “activités” ? Réponse d'Étienne Challet *, neuroscientifique.

PAR RIVA BRINET-SPIESSER



SVHS : *Quels sont les facteurs qui influencent nos rythmes biologiques ?*

Étienne Challet :

Notre système circadien, calé sur 24 heures environ, est gouverné par une horloge principale logée dans le cerveau. Elle est remise à l'heure essentiellement par la lumière ambiante, via la rétine. Cette horloge principale est le chef d'orchestre des horloges secondaires qui, elles, sont davantage synchronisées par des facteurs dits “non-photiques”, car différents de la lumière, comme l'activité physique, le sommeil ou l'alimentation. Si nos rythmes de vie se décalent, par exemple si



l'horaire du repas du soir est repoussé, alors nos horloges principales et secondaires ne se comprennent plus : à 22 h, notre horloge principale nous dit qu'il est temps d'aller dormir quand nos horloges secondaires reçoivent le signal que c'est l'heure du repas. Cette

désorganisation perturbe notre

métabolisme, d'où l'importance que nos habitudes de vie soient en phase avec notre cycle circadien.

SVHS : Est-ce à dire que le moment où l'on mange dans la journée est plus important que la quantité et la qualité de notre alimentation ?

E. C. : Non. Ces critères sont tous fondamentaux pour une bonne santé ! Mais l'importance du rythme de notre alimentation est moins connue. Les horaires des repas sont

gouvernés par un ensemble d'hormones : par exemple, notre estomac libère par pic (à 8 h, 13 h et 18 h) de la ghréline, qui stimule la faim. Une fois que l'on a mangé, c'est au tour de la leptine d'être sécrétée, une hormone qui favorise la satiété et qui indique à notre cerveau qu'il est temps de mettre fin aux réjouissances. Malheureusement, il n'est pas toujours

Chaque fonction biologique est régie par des horloges cérébrales secondaires et des horloges périphériques actives dans les cellules des organes ou la circulation sanguine. Ces dernières, par exemple, sont présentes dans le cœur où elles rythment l'activité cardiaque.



possible de respecter ces rythmes biologiques, comme lors d'un travail de nuit ou d'un travail posté [quand les équipes se relaient sur 24 heures, ndlr]. Autre paramètre-clé en chronobiologie : la fenêtre d'alimentation, soit la période entre le moment où l'on commence à manger (au réveil) et le moment où l'on s'arrête (le soir après le dîner). Il faut, si possible, qu'il y ait au moins 12 heures entre ces deux temps, car maintenir une période d'alimentation et une période de jeûne favorise l'équilibre de notre métabolisme.

SVHS : Comment gérer au mieux son temps de repos ?

E. C. : Nous n'avons pas tous les mêmes cycles de veille-sommeil. Certaines personnes ont un chronotype précoce, elles se lèvent et se couchent tôt. D'autres ont un chronotype tardif : elles ont du mal à se lever le matin, mais sont très efficaces le soir. Il y a cependant quelques bonnes pratiques à respecter. Pour éviter de perturber son sommeil, il faut mettre au repos son organisme deux heures avant d'aller se coucher : ne plus pratiquer d'activité physique, arrêter de manger et surtout éviter la lumière intense. S'exposer à la lumière bleue des écrans de télévision ou



du téléphone portable avant de dormir retarde nos horloges. Le lendemain, on aura envie de se coucher plus tard, et encore plus tard la nuit suivante. Ces habitudes "des temps modernes" dérèglent nos cycles jour/nuit.

SVHS : Des recherches ont été menées sur le lien entre activités physiques et horloges biologiques. Que disent-elles ?

E. C. : On s'est rendu compte que lorsqu'on change de cage un hamster en journée (soit la nuit pour lui, car c'est un animal nocturne) et qu'il reprend une activité physique en courant dans sa roue, il a, le jour suivant, un déphasage de son cycle veille-sommeil. Chez les

Plusieurs études, citées par l'Inserm, ont conclu qu'une chimiothérapie le matin ou tôt dans la journée est associée à un meilleur pronostic qu'une administration l'après-midi ou le soir.

humains, une pratique physique couplée à une exposition à la lumière intense en plein jour améliore la mise à l'heure de notre horloge.

SVHS : Comment expliquer que la périodicité de nos activités (repas, sport, repos) influence notre état de santé ?

E. C. : Notre rythmicité circadienne provoque des oscillations de nos fonctions biologiques (cycle veille-sommeil, cycle de température ou hormonal). Toutes ces oscillations ont une amplitude, c'est-à-dire une variation, plus ou moins forte. Plus ces variations sont marquées, meilleur est notre

Prendre en compte l'heure d'admission des chimiothérapies améliore l'efficacité du traitement et diminue les effets secondaires !



Dans les Ehpad, une exposition plus intense à la lumière du jour et une pratique sportive permettent de réguler les rythmes circadiens et de ralentir le déclin cognitif.

état de santé. À l'inverse, les personnes chez qui l'alternance jour-nuit "s'aplanit" ont souvent une santé plus fragile, associée à des problèmes métaboliques, à des pathologies neurodégénératives et à certains cancers. On sait même que maintenir une bonne amplitude de ces rythmes ralentit les effets délétères de certaines maladies. Dans les Ehpad, les personnes âgées n'ont plus cette variation entre "forte luminosité la journée" et "obscurité la nuit", car, d'une part, les établissements sont faiblement éclairés le jour et, d'autre part, les résidents ont tendance à se réveiller la nuit et à allumer la lumière. Des études ont montré qu'exposer ces personnes à des lumières plus intenses la journée permet de ralentir le déclin cognitif. Autre exemple, celui de la privation de sommeil. Nous

avons observé, sur des rongeurs, que le manque de sommeil perturbe la régulation du glucose et peut conduire à un état prédiabétique, comme cela a été confirmé chez les humains.

SVHS : On s'est aperçu aussi que l'heure de la prise de médicaments influe sur l'efficacité du traitement. Où en est-on de ces recherches ?

E. C. : Il s'agit d'une discipline appelée "chronomédecine". Les premières recherches sur le sujet ont démarré il y a déjà quelques années. Malheureusement,

elles n'ont pas diffusé au sein du corps médical. Tout d'abord parce que la chronobiologie n'est pas enseignée comme une science à part entière en faculté de médecine. Je suppose aussi que les industries pharmaceutiques n'ont pas intérêt à promouvoir la chronomédecine, puisque son efficacité permettrait de réduire les doses de médicament. C'est regrettable, car la chronothérapie a très bien été étudiée en oncologie avec des effets spectaculaires. On a observé que prendre en compte l'heure d'admission des chimiothérapies améliore l'efficacité du traitement et diminue les effets secondaires ! L'état des cellules varie au cours des 24 heures et il y a des moments du cycle où les molécules administrées agissent plus efficacement qu'à d'autres. La chronobiologie a de l'avenir ! ■

**Étienne Challet est directeur de recherche du CNRS à l'université de Strasbourg. Il codirige l'équipe Régulation et perturbation des rythmes neuroendocriniens de l'Institut des neurosciences cellulaires et intégratives.*

“ Les industries pharmaceutiques n'ont pas intérêt à promouvoir la chronomédecine, puisque son efficacité permettrait de réduire les doses de médicament... ”

NOTRE HORLOGE INTIME PEUT-ELLE DÉRAILLER?

La perception du temps n'est pas toujours une évidence. A fortiori lorsque l'on souffre d'une maladie psychique. PAR CÉLINE LISON

Comment notre cerveau mesure-t-il le temps qui passe ? Chacun l'a expérimenté : passer deux heures dans les bouchons ou deux heures devant un grand film ne provoque pas du tout le même ressenti. Mais le cerveau mesure aussi l'ordre temporel, c'est-à-dire la survenue successive de deux événements très proches, mais distincts dans le temps. Dans une analyse publiée dans *Nature* en octobre 2022, Jennifer Coull et Anne Giersch avaient montré que, même s'il n'y a qu'un seul temps qui passe (on parle de la "flèche du temps"), nous avons deux façons parallèles de l'appréhender en distinguant, d'une part, la durée d'un événement et, d'autre part, l'ordre temporel entre deux événements. D'ailleurs, ces deux façons de conscientiser le temps ne sollicitent pas les mêmes zones cérébrales. Ainsi, la mesure de la durée – la longueur de l'événement – recrute une zone assez large constituée de l'aire motrice, mais aussi des ganglions de la base, du cervelet et du cortex préfrontal. Le cortex pariétal inférieur gauche, lui, est impliqué dans l'appréhension de l'ordre temporel, c'est-à-dire notre capacité à juger quand un événement se produit par rapport à un autre.

Au cours de leurs recherches, les deux scientifiques ont permis de mieux comprendre les difficultés de perception du temps chez les

personnes schizophrènes. En effet, la perception de la durée et celle de l'ordre temporel sont largement bousculées par la maladie. *"La mesure de la durée dépend d'un jugement qui implique à la fois l'attention et la mémoire de travail. Or, ces facultés sont altérées chez les patients schizophrènes"*, souligne Anne Giersch, directrice de recherche à l'Inserm et responsable de l'équipe Psychiatrie de l'unité neuroscience et psychiatrie translationnelle de Strasbourg.

DISPARITION DU TEMPS

Plusieurs expériences ont montré que, lorsque l'on présente à ces patients des ampoules qui s'allument en deux temps très rapprochés, ceux-ci ont du mal à dire si les lampes se sont allumées en même temps ou successivement. Ces observations ont fourni une clé pour comprendre les étranges ressentis de fragmentation temporelle des patients. *"Sur ce test, inconsciemment, un sujet sain 'prédit' ce qui va se passer dans les instants qui suivent : une lampe va s'allumer. Il n'y a donc pas de 'trou temporel', d'où l'impression de continuité*, précise la chercheuse. *En revanche, si les séquences varient, les schizophrènes n'arrivent plus très bien à projeter la suite. Pour eux, le temps*



Chez les patients schizophrènes, une expérience utilisant des ampoules qui s'allument et qui s'éteignent a mis en évidence une perception différente de celle d'un sujet sain.

peut disparaître, comme s'il ne passait plus."

Une différence dans l'appréhension du temps a également été mise en évidence – mais à un degré moindre – chez certains patients bipolaires qui, eux, ont parfois l'impression que leurs pensées accélèrent ou qu'elles s'expriment en parallèle.

MARQUEURS DE PSYCHOSE

Si les mécanismes de ces troubles sont encore mal compris, les spécialistes poursuivent leurs travaux pour mieux appréhender ce que vivent leurs patients. En outre, ils veulent vérifier si, comme le suggèrent certaines données, les troubles sensoriels et les troubles du sens de soi qui leur sont associés sont des marqueurs de l'entrée dans la psychose. Si c'est le cas, agir sur les zones concernées du cerveau pourrait constituer l'une des pistes pour un traitement préventif. ■

La nature, cette archiviste

Glaciers, arbres ou ossements renferment des marqueurs chronologiques très précis, que les scientifiques déchiffrent pour retracer notre histoire. PAR LISE GOUGIS

Longtemps, lire le temps dans la nature s'est limité à l'observation des strates géologiques. Puis, pour reconstituer l'histoire de notre planète et celle des sociétés humaines, les chercheurs ont appris à déchiffrer bien d'autres archives, capables d'enregistrer sur des millénaires, année après année, voire saison après saison, les variations climatiques à l'échelle mondiale, tout comme les migrations et modes de vie à l'échelle d'une vie humaine.

Les archives glaciaires font notamment office de véritables capsules temporelles, car elles renferment des informations cruciales sur le climat. Prélevées sous la forme de carottes d'environ 11 cm de diamètre, elles sont ensuite découpées en tronçons de 1 m pour être transportées, stockées et étudiées. *"Ce qui est assez génial avec les glaces polaires, c'est qu'elles emprisonnent des petites bulles d'air qui sont d'authentiques échantillons des atmosphères passées"*, s'enthousiasme Frédéric Parrenin, directeur de recherche au CNRS. De quoi retracer l'évolution de la composition atmosphérique, mais aussi les fluctuations de température grâce à l'analyse chimique de la glace.



Entrée de la cave de glace
où sont conservées les
carottes du projet de forage
européen Epica, initié
en 1995, sur la station
Concordia, en Antarctique.





Les White Mountains, en Californie, sont réputées pour l'ancienneté de leurs pins Bristlecone (*Pinus longaeva*). Elles abritent, par exemple, l'arbre Mathusalem qui serait âgé de plus de 4780 ans.

C'est ainsi que Claude Lorius et Jean Jouzel, deux scientifiques français, ont démontré en 1985 le lien entre climat et effet de serre. "Au cours des 800 000 dernières années, les concentrations de dioxyde de carbone ont oscillé entre 180 et 300 parties par million (ppm). Aujourd'hui, on est à 425 ppm, c'est sans précédent", indique Frédéric Parrenin. Les carottes glaciaires révèlent aussi l'ampleur et la rapidité de certaines variations climatiques. "Au Groenland, par exemple, la température a parfois augmenté de 15°C en l'espace d'une décennie, poursuit le glaciologue. On a aussi pu établir un catalogue des éruptions volcaniques passées, dont on retrouve la trace dans la glace." Les chercheurs espèrent bientôt pouvoir remonter dans le temps jusqu'à 1,2 million d'années grâce à un nouveau forage dans le cadre du projet Beyond Epica en Antarctique. "Les analyses sont en cours", révèle Frédéric Parrenin. Reste toutefois à savoir si elles seront exploitables : "Plus on se rapproche du fond de la calotte, plus la glace risque d'être altérée."

AU MOIS PRÈS

À l'échelle locale, les arbres sont de précieux témoins des fluctuations environnementales. L'étude de leurs cernes, la dendrochronologie, ne se limite pas à compter les anneaux de croissance correspondant à la production annuelle de bois. "On va observer les variations de la largeur des cernes qui reflètent les

conditions extérieures. Par exemple, un cerne étroit ou incomplet va traduire un stress, comme une éruption volcanique qui a masqué le soleil et empêché la photosynthèse. Un cerne pâle est associé à des conditions estivales particulièrement fraîches et humides. On a aussi des cernes de gel en cas d'hiver précoce ou tardif", détaille Benoît Brossier, ingénieur d'études au CNRS. Grâce à cette finesse d'analyse, il est possible de dater certains événements au mois près. "On peut



“ On a mis au point une nouvelle approche qui permet de découper et de poncer le charbon de bois pour l'étudier ”

savoir, en cas d'incendie, s'il s'est produit en début ou en fin d'été par exemple.”

Les arbres permettent aussi de mettre en évidence des fluctuations climatiques à moyen terme, notamment grâce à des espèces à forte longévité comme le pin Bristlecone, qui peut vivre jusqu'à 5 000 ans. “On peut couvrir les 10 000 dernières années”, poursuit le chercheur. Depuis peu, ces méthodes s'appliquent également au charbon de bois. “On a mis au point une nouvelle approche qui permet de le découper et de le poncer comme le bois pour l'étudier, explique Benoît Brossier. Cela sera très utile pour la datation de sites archéologiques, pour déterminer quel type d'arbre était utilisé pour faire du feu ainsi que leur âge.”

Un outil précieux de plus pour les archéologues, qui s'appuient sur un large répertoire de méthodes de datation, dont la plus connue reste la mesure du carbone 14. Cet isotope

instable possède une demi-vie d'environ 5 730 ans. “C'est le temps qu'il va mettre à perdre la moitié de ses atomes. Selon la proportion restante, on peut en déduire l'âge d'un reste organique, comme les os et les dents”, explique Rozenn Colleter, archéoanthropologue à l'Inrap. De quoi remonter jusqu'à environ 40 000 ans. Pour aller au-delà, il faut se tourner vers d'autres éléments aux périodes de vie plus longues, comme le thorium et l'uranium dans les minéraux, et le potassium dans les roches magmatiques. Mais là encore, les isotopes ne servent pas qu'à dater. “On utilise de plus en plus les isotopes stables pour reconstituer le vécu des individus. Par exemple, le rapport entre l'azote 14 et l'azote 15 nous indique si la personne était carnivore, et le taux de soufre si elle a vécu près de la mer ou non. En le combinant avec d'autres isotopes comme le strontium, qui révèle la nature du sous-sol, et l'oxygène pour l'altitude, et en comparant les valeurs retrouvées dans les os et les dents, on peut reconstituer où elle a grandi et où elle est morte”, illustre la chercheuse. C'est grâce à ce type d'analyses que l'origine des soldats retrouvés enterrés sous le couvent des Jacobins à Rennes, dans des fosses datant du ^{xv}^e siècle, a été établie en 2021. “On a pu différencier les camps : les soldats locaux, bretons, et les assaillants issus de l'armée française”, pointe Rozenn Colleter. ■



Une carothèque en Antarctique

La première “bibliothèque” de carottes de glace au monde a été inaugurée en janvier 2026 à la station de recherche Concordia, en Antarctique. Baptisée “Ice Memory”, cette cave a été spécialement creusée à 9 m de profondeur pour stocker, à -50°C, sans système de réfrigération, des archives glaciaires venues du monde entier, en particulier celles

qui proviennent des montagnes. Car depuis 2000, les glaciers ont perdu entre 2 % et 39 % de leur volume selon les régions, et le pic de fonte est attendu vers 2040, menaçant de disparition des millénaires d'informations précieuses sur le climat du passé. “En percolant à l'intérieur de la colonne, l'eau provenant de la fusion en surface

risque de perturber l'enregistrement et de le rendre inutilisable”, alerte Frédéric Parrenin. La carothèque a accueilli ses premiers échantillons provenant des glaciers alpins. Des dizaines d'autres, prélevés dans les Andes, le Caucase ou encore l'archipel norvégien du Svalbard, devraient les rejoindre dans les prochaines années.

LES ANIMAUX SONT-ILS À L'HEURE?

Poulpes, geais, souris, singes... Comment font-ils pour vivre sans montre? Ont-ils conscience du temps qui passe ou vivent-ils pleinement dans le présent?

PAR LISE GOUGIS

Il suffit qu'on nous retire montres et chronomètres pour que notre rapport au temps vacille : il devient difficile de dire avec précision si une heure ou deux se sont écoulées... La notion du temps est éminemment subjective. Émotions, température ou distractions peuvent modifier la perception des durées. Un phénomène bien connu chez l'humain, mais encore relativement inexploré chez les animaux.

Certaines expériences suggèrent toutefois que ces derniers sont capables d'estimer des délais. Dans les années 1990, des chercheurs de l'université de Cambridge ont montré que les geais buissonniers, des corvidés connus pour cacher leur nourriture, ne retournaient pas chercher les vers frais une fois leur date de péremption dépassée – sans doute car ils les savaient immangeables –, mais ciblaient alors les cachettes contenant des noix, pourtant moins appréciées, mais non périssables. Des capacités similaires ont été mises en évidence chez les colibris, les grands singes, mais aussi la seiche. *“Lorsqu'elle découvre une bonne source de crevettes, son péché mignon, elle attend plusieurs heures avant d'y retourner et se contente entre-temps de proies moins*

attractives”, explique Christelle Jozet-Alves, éthologue à l'université de Caen Normandie.

Par quels mécanismes ces animaux parviennent-ils à estimer les durées ? *“Peu d'études ont exploré ce qui se passe précisément au niveau cérébral, elles ont essentiellement été menées chez des rongeurs. On est en train d'explorer la question chez les invertébrés, dont le cerveau est très différent”*, répond la chercheuse. En 2018, une équipe américaine de l'université de Northwestern a identifié chez des souris la zone où se produirait ce décompte du temps écoulé : dans le cortex entorhinal, lui-même situé dans le lobe temporal, une région associée à la navigation et à la mémorisation.





Mais toutes les espèces ne perçoivent pas le temps de la même manière. *“Les macaques rhésus ou les poulpes, par exemple, ne font pas la différence entre une heure, deux heures ou quatre heures”*, souligne la chercheuse. Plutôt que d’estimer un délai écoulé, ils s’appuient sur des indices externes, comme le font les animaux qui hibernent ou migrent, avec la durée du jour et les températures, ou sur des enchaînements d’événements : savoir ce qui est arrivé avant ou après. Tout simplement parce qu’une compétence qui est utile pour les uns ne l’est pas forcément pour les autres. *“Par exemple, la seiche ne bouge qu’une heure sur 24 heures : pour être efficace, elle doit savoir où aller chercher sa nourriture et quand. Chez le poulpe, en*

revanche, le renouvellement des moules qu’il consomme excède souvent sa propre durée de vie : la pression environnementale n’est pas la même”, pointe Christelle Jozet-Alves.

HORLOGE CANINE

Et quid de nos animaux de compagnie ? Une étude suédoise publiée en 2011 a montré que les chiens manifestent davantage leur joie en retrouvant leur maître après plusieurs heures d’absence que lorsqu’il est parti 30 minutes, mais sans véritablement faire la différence entre deux heures et quatre heures. *“Ces variations de comportement peuvent s’expliquer par des modifications hormonales liées au stress, et pas nécessairement par une estimation du temps”*, précise l’éthologue. Pour anticiper l’heure de la promenade ou du repas, nos petits compagnons se fient surtout à nos gestes et à des routines bien rodées. Pas besoin, pour eux, d’être à l’heure ! ■

Quand le vivant ralentit le temps

L'hibernation révèle une stratégie active, finement régulée par le cerveau et les hormones, qui interroge aussi notre propre rapport au temps biologique.

PAR AMANDA SCHREPF SANZ

Fin août, quelque part en Amérique du Nord, alors qu'il fait encore plus de 20°C, un spermophile rayé (*Ictidomys tri-decemlineatus*) s'engouffre profondément sous terre. Blotti dans sa cachette, cet écureuil terrestre s'enroule sur lui-même, et plonge dans une torpeur profonde. Pendant des mois, il ne mange plus, il ne boit plus, il ne respire que deux à trois fois par minute, son cœur bat à peine et sa température corporelle chute sous les 5°C. Le petit rongeur semble mort. Pourtant, au printemps suivant, il se réveillera... tout comme certains monotrèmes (échidnés d'Australie et de Nouvelle-Guinée), marsupiaux (opossums pygmées) et plus de 80 espèces de mammifères placentaires, comme l'ours ou la marmotte, qui pratiquent également cette pause hivernale. Le champion étant le loir gris qui peut passer en mode "économie d'énergie" pendant 11 mois !

Il s'agit là d'une déclinaison d'un phénomène bien plus vaste dans lequel le vivant semble ralentir le temps : les plantes entrent en dormance, les insectes en diapause, les

reptiles en brumation. Il existe même un oiseau, l'engoulevent de Nuttall, capable d'une telle prouesse.

Les mécanismes diffèrent néanmoins. Chez les plantes, la dormance est souvent déclenchée par la modification de la durée du jour – ou photopériode – et le froid. Elle s'accompagne, par ailleurs, d'un arrêt quasi complet de la croissance. Chez les insectes, la diapause est programmée génétiquement. Chez les mammifères, le fonctionnement de ce temps biologique n'est pas encore totalement compris. *"On observe des espèces qui entrent en hibernation alors que la nourriture est encore disponible"*, souligne Théo Constant, chercheur en écologie évolutive au centre de recherche sur la biodiversité et l'environnement (CRBE), à Toulouse. Ce phénomène correspond souvent à la fin de la saison reproductive. Un moment où continuer à être actif n'apporte plus de bénéfice, mais expose à des risques élevés de prédation, de maladies ou de compétition avec d'autres espèces. Hiberner favorise la survie. *"Ces animaux n'obéissent pas uniquement au temps de l'environnement. Ils possèdent des horloges internes, capables de rythmer l'activité et l'inactivité à l'échelle de l'année,*

Pendant ses longs mois d'hibernation, le spermophile rayé ne subit pas de perte musculaire, malgré le jeûne. En 2022, des chercheurs ont résolu le mystère : leur corps utilise l'azote produit par l'urée pour fabriquer des protéines dans le foie et les muscles.



“ Ces animaux possèdent des horloges internes, capables de rythmer l'activité et l'inactivité à l'échelle de l'année ”

explique le chercheur. *Des espèces hibernantes ont été placées dans des conditions constantes pendant plusieurs années, sans variation de température ni de photopériode. Ces expériences ont permis d'observer des phases d'activité et d'autres d'hibernation, malgré tout.* ” Le signal d'entrée en hibernation est inscrit dans l'organisme, piloté par le cerveau et les hormones, et non une simple réponse au froid ou au manque de nourriture.

REÉQUILIBRAGE DU MÉTABOLISME

Le cerveau est le centre de régulation des besoins alimentaires pendant ces longs mois. Une équipe de chercheurs internationale, regroupant les universités de Yale, du Wisconsin et le centre de recherche en neuroscience Achucarro, en Espagne, ont montré que, pendant l'hibernation, le spermophile rayé coupe volontairement la sensation de faim, même lors des courts réveils où l'animal redevient presque actif. Cette mise en pause de l'appétit vient d'un manque temporaire d'une hormone clé, la triiodothyronine (T3), dans une région du cerveau qui contrôle l'alimentation. Fait remarquable, le reste du corps conserve des niveaux hormonaux normaux. Lorsque les scientifiques réinjectent de la T3 directement dans le cerveau, l'animal recommence à manger. L'écureuil n'ignore donc pas la faim : son cerveau la désactive pour survivre à l'hiver.

Mais ce retrait du monde n'a rien d'un long sommeil paisible. Lors des courts réveils inter-épisodes, le corps glacé des hibernants se réchauffe en quelques heures à peine, jusqu'à retrouver une température proche de celle de l'éveil. Un exploit physiologique... mais aussi une dépense énergétique colossale. Pourquoi

persister dans une stratégie aussi coûteuse ? Le mystère demeure. Dans une analyse publiée en 2022 dans *Frontiers in Physiology*, les hypothèses avancées par les chercheurs sont le rééquilibrage du métabolisme, l'élimination des déséquilibres accumulés pendant la torpeur ou la réparation des cellules. Plus surprenant, “certaines espèces hibernantes arriveraient à restaurer leurs télomères [extrémités des chromosomes, NDLR], c'est-à-dire à augmenter leur longueur, explique Théo Constant. Il est vrai que pendant la phase de torpeur, la diminution de l'activité cellulaire entraînerait moins de divisions cellulaires, et donc moins d'érosion des télomères. Mais d'un autre côté, les



À l'université d'Alaska, des chercheurs travaillent sur l'hibernation du spermophile rayé en vue des futures missions spatiales longue durée de la Nasa.

phases de réchauffement sont extrêmement énergivores avec potentiellement une réduction possible de leur taille. Ce que l'on sait, c'est que les hibernants sont aussi capables d'allonger leurs télomères pendant la saison active et que d'autres espèces non hibernantes le font aussi. Ce n'est pas un phénomène spécifiquement associé à l'hibernation. Tout l'intérêt des études à venir sera de savoir si la réduction est moins importante chez les individus qui n'entrent pas en hibernation. "

MISSIONS VERS MARS

Cette machine complexe qui rend possible cette parenthèse temporelle pourrait être perturbée par le changement climatique. *"Selon les espèces, on observe des sorties d'hibernation plus tardives et d'autres plus précoces, explique Théo Constant. La question est aussi de savoir comment le cycle de reproduction va être impacté et comment il va pouvoir se réguler."* Même constat du côté de la végétation : le "complexe du soir" est un élément central de l'horloge circadienne des plantes. Actif la nuit, il est formé de trois protéines – ELF3, ELF4 et LUX – qui se fixent à l'ADN pour réprimer les gènes de croissance et de floraison lorsque les températures sont fraîches. Il agit aussi comme capteur thermique : quand les nuits se réchauffent, il se lie moins bien à l'ADN, laissant les gènes de floraison actifs

et provoquant une floraison plus précoce. Le réchauffement climatique perturbe ainsi ce réglage fin, avec des conséquences sur la reproduction et la production végétale.

Et l'homme dans tout ça ? *"Il existe des primates capables d'entrer en hibernation. Donc la question mérite d'être posée"*, reconnaît Théo Constant. Après tout, en 2020, des paléontologues ont avancé l'hypothèse d'une hibernation saisonnière, durant une période de glaciation extrême, après avoir analysé des ossements préneandertaliens issus du gisement de Sima de los Huesos, en Espagne. Les lésions retrouvées, notamment chez les adolescents, étaient typiques de troubles du métabolisme osseux, observés aujourd'hui chez des patients atteints d'hyperparathyroïdie, causée, entre autres, par un manque de vitamine D.

Mettre l'être humain en hibernation n'est plus seulement un fantasme de science-fiction. La Nasa et l'Esa y travaillent. Dans le cadre du programme SciSpacE, l'Esa étudie ce ralentissement métabolique chez des animaux non hibernants, dans l'espoir de relever l'un des principaux défis des missions vers Mars : la durée. En induisant un état de torpeur, il serait possible de réduire la consommation de ressources, la taille des vaisseaux et les risques sanitaires pour les astronautes. L'homme serait-il, un jour, un ours comme les autres ? ■

Le site de Sima de los Huesos, à Atapuerca en Espagne, où auraient hiberné des hominidés d'après les conclusions des paléontologues Antonis Bartsiokas et Juan Luis Arsuaga.



L'IA PEUT-ELLE PRÉDIRE L'AVENIR?

Les outils de l'IA sont désormais mobilisés pour deviner certains événements d'un futur proche. Mais comment prédire l'avenir quand les données collectées sont celles du passé ?

PAR CHARLOTTE MAUGER

Répondre à une question, traduire un texte, proposer des idées ou générer des vidéos amusantes... Aujourd'hui, l'IA est utilisée pour une multitude de tâches. Ces usages tendent toutefois à occulter les autres, car l'IA générative ne représente qu'une petite portion du paysage de l'apprentissage automatique. Un autre domaine, très dynamique, est celui de la prédiction : l'IA sert aussi à anticiper l'avenir.

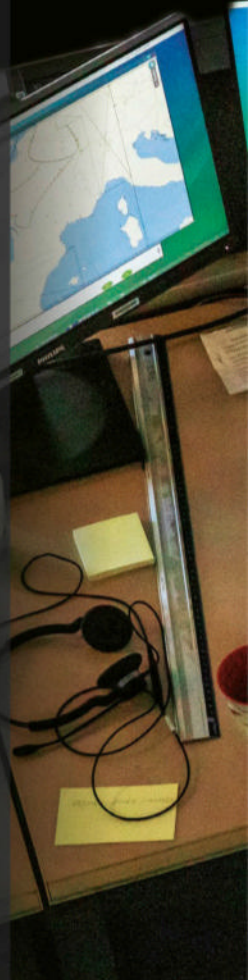
Laissons de côté nos fantasmes de prémonition : non, nous ne pouvons pas deviner l'issue d'un tirage du loto grâce à ces outils. Néanmoins, ils sont déjà utilisés pour prédire le temps qu'il fera demain, pour estimer des consommations d'électricité, pour anticiper les pannes sur des machines agricoles ou industrielles, pour ajuster des stocks aux ventes potentielles ou pour modéliser l'évolution d'un cancer.

MODÈLES PRÉDICTIFS

Ces modèles dits prédictifs sont entraînés à identifier une donnée brute (image, fichier, texte, vidéo...) et à l'étiqueter, c'est-à-dire à spécifier son contexte. Cet étiquetage permet d'établir des liens, par exemple entre des données médicales et de potentiels problèmes de santé. Cela aide les modèles à interpréter correctement les données et

leur permet d'établir des prévisions correctes. La formule est mise à jour jusqu'à ce que le modèle réussisse à faire les bonnes correspondances. L'idée étant qu'il puisse deviner un phénomène à venir à partir des données du présent. *"Mais c'est la difficulté majeure : on ne veut pas que le modèle soit bon sur les données du passé, mais sur celles du futur, qu'il n'a encore jamais vues",* souligne Élisabeth Fromont, enseignante-chercheuse à l'université de Rennes, responsable de l'équipe Malt (Apprentissage automatique avec contraintes temporelles). La performance du modèle va ainsi dépendre de la ressemblance entre les données traitées pendant son entraînement et celles à venir. Or, les données que l'on récupère sont extrêmement variables, elles dépendent des aléas du monde "réel" : elles peuvent être de mauvaise qualité. *"L'autre problème, c'est que les données sont dépendantes les unes des autres dans le temps, et qu'il y a de nombreux facteurs à prendre en compte",* ajoute Élisabeth Fromont. Prenons l'exemple d'un modèle qui prédit la consommation d'électricité d'un foyer. Il faut prendre en compte la date, l'heure de la journée, les événements (notamment sportifs) qui font rester à la maison, le télétravail, les vagues de froid... Sachant que tous ces éléments peuvent avoir des liens.

Pour s'adapter aux conditions réelles, il est possible de faire du *forecasting*, c'est-à-dire



de mettre à jour le modèle si ses prévisions sont très loin de la réalité. *“Cela évite de propager les éventuelles erreurs”*, soutient la chercheuse. Et empêche donc que les prévisions se dégradent au fil du temps.

MODÈLES HYBRIDES

L'autre solution est de s'appuyer sur des modèles hybrides. Pour la météo, par exemple, les méthodes sont basées sur la physique, des modèles sans intelligence artificielle qui permettent de calculer les prévisions des jours suivants. Or, il est possible de combiner ces équations physiques avec de l'intelligence artificielle. C'est ce que pratique Météo-France depuis 2021, en utilisant

et testant des modèles d'IA pour faire des prévisions météorologiques. Aura-t-on un jour un unique modèle capable de nous éclairer sur n'importe quelle question concernant l'avenir ? Pour l'instant, cela semble impossible. Un même modèle ne peut pas aussi bien prédire une panne sur une machine que deviner la météo de la semaine suivante. *“On peut créer des modèles de langage très généraliste, car le langage est très structuré, il a une grammaire. Mais pour les séries temporelles, c'est très différent, la généralisation est beaucoup plus compliquée”*, souligne Élisabeth Fromont. Bref, à la question *“l'IA peut-elle prédire l'avenir ?”*, il faut répondre : oui, mais seulement sur une question précise et à condition qu'on l'ait entraînée à réussir cette tâche en particulier. ■



En météorologie, l'IA permet d'améliorer les prévisions et affiner les modèles climatiques. Deux clés pour anticiper les risques et assurer au mieux la sécurité des personnes.

L'ANTICIPER





Façade d'un moulin en ruine à Lodz, en Pologne. La plupart des constructions modernes ne sont pas conçues pour résister plus de quelques décennies à l'usure du temps.

© JACEK NIETAD/ALAMY STOCK PHOTO/HEMIS.FR



Dans les musées, une lutte acharnée

Pour préserver les œuvres muséales du temps qui passe, conservateurs et chercheurs déploient matériaux innovants et numérisation de pointe.

PAR LISE GOUGIS

Comment protéger les œuvres du patrimoine tout en les maintenant accessibles au grand public ? C'est le dilemme permanent des conservateurs de musée, notamment pour les objets composés de matériaux organiques particulièrement vulnérables. *"Le papier, par exemple, est très sensible à la lumière, il jaunit à force d'y être exposé, ce qui peut nuire à la lisibilité de l'œuvre sur le long terme et changer complètement sa perception"*, pointe Emilia Philippot, chargée de la formation des élèves conservateurs à l'Institut national du



patrimoine (INP). Pour limiter ces dégradations, des règles strictes s'imposent : l'exposition limitée à trois mois, sous un éclairage n'excédant pas 50 lux, suivie d'une mise au noir durant trois ans.

Température et humidité font également l'objet d'une surveillance constante. *"La plupart des collections doivent être conservées entre 18°C et 20°C, avec une hygrométrie d'environ 50 %, plus ou moins 10 %"*, précise la conservatrice. Là encore, tout dépend du matériau. Photographies et films anciens, souvent à base de nitrate ou d'acétate, nécessitent des conditions bien plus drastiques.

Les statues en plomb du bassin de Latone, au château de Versailles, ont bénéficié d'une restauration majeure en 2012 pour leur redonner tout leur éclat. Autrefois recouvertes d'or, elles avaient été repeintes en "faux or" dans les années 1970. Le temps passant, elles étaient devenues jaune orangé.

"On les conserve autour de 10°C, parfois dans des chambres froides, car ils supportent très mal la chaleur et peuvent devenir inflammables en vieillissant", poursuit l'experte. À l'inverse, certaines œuvres tolèrent des températures plus élevées. *"Il vaut mieux alors les laisser dans ces conditions. Le principal ennemi, c'est le choc climatique"*, martèle Emilia Philippot. Pour y faire face, les musées misent de plus en plus sur l'isolation

“ Le principal ennemi, c'est le choc climatique ”

des bâtiments plutôt que sur des centrales climatiques énergivores et susceptibles de tomber en panne. La vigilance est également maximale lors des transports : caisses multicouches, matériaux amortissants et parfois même des capteurs pour surveiller les variations subies par les œuvres tout au long de leur déplacement

COPIES NUMÉRIQUES

Depuis peu, un nouveau point de vigilance émerge : les vibrations. *“Les objets d'art y sont de plus en plus soumis avec l'organisation d'événements dans des lieux patrimoniaux, tels que des défilés de mode ou le tournage de clips, qui occasionnent des niveaux acoustiques assez élevés. Sans compter la proximité de travaux ou d'infrastructures de transport, comme c'est le cas du musée d'Orsay situé juste au-dessus d'une gare RER”,* relève Sandie Leconte, responsable du laboratoire de l'INP. Son équipe cherche à évaluer les dommages potentiels afin d'établir des seuils acceptables et développer des dispositifs de protection. *“On s'est rendu compte que les mousses de conditionnement des œuvres laissaient passer les vibrations à basse fréquence, entre 20 Hz et 200 Hz. On évalue donc les propriétés vibratoires de nouveaux matériaux qui soient écologiques et compatibles d'un point de vue physico-chimique avec les œuvres”,* continue l'ingénieure de recherche. Un système d'amortisseur de vibrations destiné à être placé sur le socle des objets exposés est également en développement. *“L'idée est d'émettre la vibration inverse à celle qui est enregistrée, de manière que les deux ondes s'annulent en se rencontrant”,* explique Sandie Leconte.

Malgré toutes ces précautions, de nombreux objets restent trop fragiles ou trop précieux pour être exposés. *“Quand la dégradation devient inévitable, la meilleure conservation est celle de l'information, pour*

poursuivre notre mission de transmission et de diffusion”, estime Emilia Philippot. D'où l'essor des copies numériques, de plus en plus fidèles, réalisées à l'aide de dispositifs comme “La Coupole”, développé par l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria) à Bordeaux. *“Ce système hybride combine à la fois des scanners 3D haute résolution pour capturer la forme des objets, et des appareils photo pour acquérir leurs propriétés optiques”,* résume Romain Pacanowski, chargé de recherche à l'Inria. De quoi reproduire chaque détail, du plus petit relief à la multitude de reflets que l'on serait capable de percevoir en fonction de l'éclairage. Conçu au départ pour numériser une partie des collections textiles du musée d'Ethnographie de Bordeaux, ce prototype a vocation à s'appliquer à d'autres types d'objets. *“On participe actuellement au projet européen Automata qui vise à numériser des vestiges archéologiques lithiques et céramiques en 3D”,* révèle le chercheur. De quoi les contempler et les étudier indéfiniment, sans jamais les mettre en danger. ■



De nombreuses œuvres ont été endommagées lors du tremblement de terre qui a frappé l'Émilie-Romagne, en 2012, comme ce volet en forme de crucifix de l'église de Jésus, à Mirandola.



QUAND LES ANCIENS DÉFIAIENT LE TEMPS

Comment expliquer que des tablettes d'argile vieilles de plus de cinq mille ans soient encore lisibles, que les pyramides d'Égypte dominent toujours le désert et que le Panthéon de Rome continue à supporter la plus grande coupole de l'Antiquité après deux millénaires ? Leur longévité tient à une combinaison de matériaux robustes, de choix architecturaux judicieux... et parfois de hasard.

- Les tablettes sumériennes (*ci-contre*)

en sont l'exemple le plus frappant.

Gravées dans de l'argile humide à l'aide d'un roseau, elles n'étaient pas nécessairement conçues pour durer : séchées à l'air, elles restaient friables et pouvaient même être recyclées en étant réhumidifiées. Mais nombre d'entre elles ont été accidentellement cuites lors des incendies qui ont ravagé les villes mésopotamiennes.

Transformée en céramique,

l'argile est alors devenue un support d'une durabilité exceptionnelle, bien plus résistant que le papyrus ou le parchemin. Ce qui a inspiré le projet "Memory of Mankind", fondé en 2012, dont l'objectif est de sauvegarder les connaissances modernes, inscrites sur des tablettes de céramique dans la mine de sel d'Hallstatt, en Autriche.

- Les pyramides égyptiennes (*ci-dessus*) doivent leur survie à leur

forme, large à la base, qui répartit efficacement les contraintes. La taille des blocs de pierre utilisés, pesant chacun plusieurs tonnes, pourrait aussi expliquer la robustesse de ces ouvrages. D'autant qu'il s'agit souvent de granite, un matériau extrêmement résistant aux intempéries. Surtout, ils ont été taillés avec une telle précision que les joints sont quasiment étanches, limitant les dégâts liés aux infiltrations d'eau.

- Le béton romain (*en haut à gauche*) doit sa solidité à l'ajout de cendres volcaniques au mortier et à un procédé de fabrication impliquant de la chaux vive.

En 2023, des chercheurs du MIT ont montré que ce mélange à très haute température favorise des réactions chimiques permettant au matériau de se renforcer et de s'autoréparer au contact de l'eau. Une propriété dont le béton moderne pourrait s'inspirer à l'avenir.



LE TEMPS, C'EST (VRAIMENT) DE L'ARGENT

Sa mesure a un coût énergétique... exorbitant.
Des chercheurs en thermodynamique veulent faire
baisser la note. PAR SANDRINE MARY

Les horloges sont toujours composées de deux éléments : un mécanisme capable de traquer le passage du temps, comme un pendule qui oscille, le fameux tic-tac, et un système qui permet de restituer cette mesure, telles les aiguilles d'un cadran. Comme toute machine, son fonctionnement consomme de l'énergie. À notre échelle, cette consommation se limite au remplacement des piles de nos montres, mais à l'échelle microscopique, notamment pour les horloges atomiques qui équipent les satellites ou les ordinateurs quantiques, cette dépense énergétique devient un véritable défi. Dans un satellite équipé d'une telle horloge, l'énergie nécessaire à son fonctionnement représente entre 10 % et 20 % de la consommation énergétique totale. Alors, comment réduire la facture ?

Une expérience innovante, menée en collaboration entre les universités d'Oxford et de Vienne, a consisté à mesurer séparément deux types de consommation d'énergie dans une horloge : celle nécessaire pour traquer le passage du temps et celle requise pour lire la mesure. Pour cela, l'équipe a utilisé une horloge quantique qui utilise le saut d'un seul électron entre deux niveaux d'énergie : c'est le tic-tac. Elle a ensuite détecté à l'aide de micro-ondes les oscillations de cet électron pour restituer la valeur du temps. Les résultats, publiés en

novembre 2025 dans la revue *Physical Review Letters*, révèlent que l'énergie nécessaire pour entretenir les oscillations de l'électron est un milliard de fois inférieure à celle requise pour lire et restituer la valeur du temps.

HORLOGES ATOMIQUES FRUGALES

Pour Florian Meier, cosignataire de la publication et chercheur à l'université de Vienne, *"le fait de savoir que mesurer le temps est bien plus énergivore qu'entretenir les oscillations de l'électron pourrait nous permettre de concevoir des horloges plus économes. Par exemple en imaginant des horloges intelligentes qui ne donnent la mesure du temps que lorsque cela est vraiment nécessaire, plutôt que des horloges qui mesurent le temps en continu"*. Et le chercheur d'ajouter : *"Nous pourrions aussi utiliser les oscillations, le fameux 'tic-tac', pour déclencher des systèmes sans mesurer directement le temps."* Pour les satellites, cela pourrait entraîner une réduction des coûts énergétiques des horloges de l'ordre de 20 % à 50 %, augmentant d'autant leur durée de vie. Rendre les horloges atomiques plus frugales pourrait aussi avoir un impact sur le développement des ordinateurs quantiques (*photo*), qui nécessitent une mesure du temps d'une grande précision, mais restent très énergivores.

Cette expérience a ouvert une autre réflexion. *"Si l'on regarde la mesure du temps*

d'un point de vue thermodynamique, explique Florian Meier, le coût énergétique de sa mesure génère de la chaleur, ce que l'on appelle de l'entropie, c'est-à-dire de l'agitation atomique et du chaos. Selon le second principe de la thermodynamique, l'entropie ne va que dans un sens, elle augmente. Cette expérience met donc en lumière que la lecture du temps participe à l'augmentation de l'entropie globale de notre Univers et contribue ainsi à l'irréversibilité du temps." ■



Comment la guerre accélère

Capteurs avancés, systèmes d'aide à la décision... L'intelligence artificielle fait gagner de précieuses minutes sur le champ de bataille. Oui, mais... Jusqu'où peut-on aller dans l'accélération sans perdre le contrôle ?

PAR HUGO LEROUX



Des militaires du Centre des opérations aériennes combinées de la base aérienne d'Al Udeid, au Qatar, surveillent des flux de données et d'imagerie dans le cadre des missions de renseignement, surveillance et reconnaissance en s'appuyant notamment sur des outils d'IA pour le traitement automatisé des données et l'aide à la décision.

Voir plus vite que l'adversaire. Comprendre avant lui ce qui se prépare. Décider sans traîner. Dans les conflits contemporains, la guerre se joue de plus en plus sur le tempo. C'est pour gagner ces heures, ces minutes, voire ces secondes décisives que l'Otan a validé en 2025 l'intégration de capacités issues de Maven, un système d'aide à la décision développé aux États-Unis par la société championne – et très controversée – de l'IA militaire : Palantir.

Maven agrège en continu des flux massifs de données militaires (images de drones, satellites, interceptions radio, informations de terrain) pour en extraire rapidement des alertes et des options d'action. Là où des analystes humains mettent parfois des jours à rassembler les informations pertinentes, l'algorithme promet une immédiateté inédite. En France, des acteurs comme la start-up Comand AI explorent des logiques similaires, promettant dans leur communication *“une prise de décision quatre fois plus rapide”* pour les officiers. En bref, accélérer est devenu une priorité.

“L'IA booste toutes les étapes de la boucle 'OODA' : observer, orienter, décider, agir”, confirme Alain Filipowicz, ancien ingénieur de la Direction générale de l'armement (DGA) et chercheur associé à l'Institut de relations internationales et stratégiques (Iris). Un boost d'abord effectif dans les capteurs. Caméras, radars ou systèmes de tous types ne se contentent plus de transmettre des images ou des sons bruts : des algorithmes intégrés détectent des anomalies, signalent un mouvement suspect ou distinguent un leurre d'un objet réel. *“L'information qui remonte n'est plus brute, mais déjà triée”*, explique l'ingénieur. Cette forme d'IA est déjà intégrée dans des fleurons tricolores comme le chasseur Rafale ou le véhicule blindé Griffon pour détecter plus rapidement des cibles potentiellement lointaines ou camouflées.

DOOMSDAY MACHINE

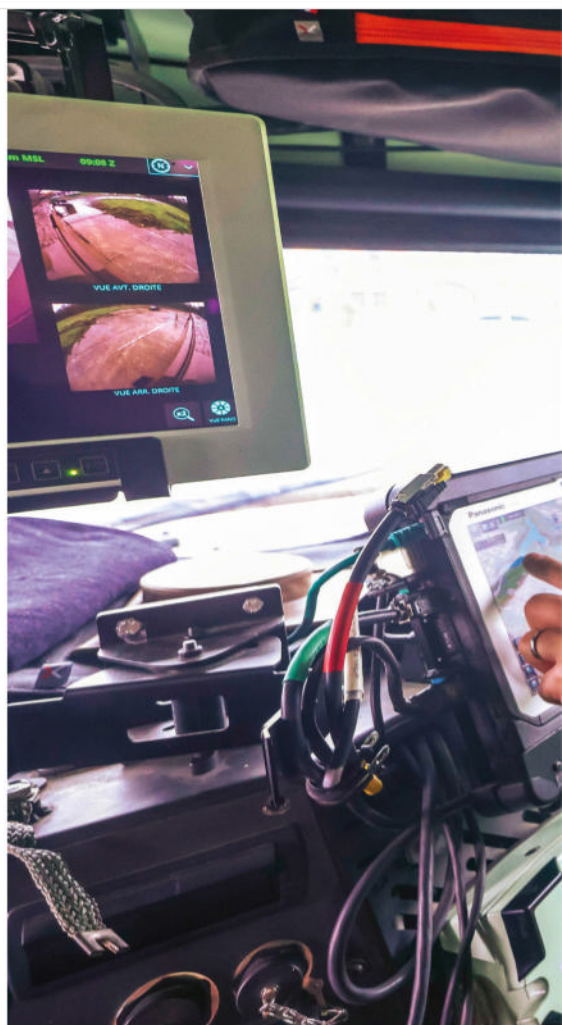
Même logique dans l'analyse. Croiser manuellement images satellites, rapports de terrain et autres sources d'information prend du temps. L'IA peut le faire à grande échelle,

en continu, et ainsi mieux faire émerger les “signaux faibles” : des engins de chantier apparaissant près d’une frontière, des unités changeant discrètement d’itinéraire ou une activité inhabituelle autour d’une base. *“Pris isolément, ces indices semblent anodins. Agrégés, ils peuvent révéler la préparation d’une offensive”*, souligne l’expert.

Là où le débat se tend, c’est sur la prise de décision elle-même. En filigrane plane la crainte de la “doomsday machine”, en référence au programme de riposte automatique déclenchant une apocalypse nucléaire dans le film *Docteur Folamour*, réalisé par Stanley Kubrick... en 1964. Alain Filipowicz se souvient avoir travaillé dans les années 1990 sur un projet reliant directement un radar de détection de missiles ennemis à des batteries d’artillerie : *“Le projet a été heureusement abandonné, car il écartait tout processus de délibération humain”*, se souvient le spécialiste. Aujourd’hui, la doctrine, en France comme ailleurs, est la suivante : *“l’IA peut proposer plusieurs options, mais in fine c’est toujours un chef militaire, bien humain, qui arbitre”*, martèle Alain Droniou, sous-directeur technique de l’Agence ministérielle pour l’IA de défense (Amiad), créée en 2024.

BIAS D’AUTOMATISATION

Reste qu’en situation de combat ou d’urgence, cette ligne rouge peut devenir floue. Dans la guerre menée par Israël contre Gaza – le premier théâtre d’opérations, avec l’Ukraine, où l’IA a joué un rôle massif et transversal –, des opérateurs israéliens ont témoigné ne disposer parfois que d’une vingtaine de secondes pour valider ou annuler un ciblage proposé par un système de frappe automatisé. *“La question n’est pas seulement de savoir si l’humain est encore dans la boucle, mais s’il*



a réellement le temps d’exercer un jugement éclairé”, alerte Laure de Roucy-Rochegonde, directrice du Centre géopolitique des technologies de l’Ifri.

D’autant que les algorithmes d’IA fonctionnent souvent en “boîte noire” : ils livrent une recommandation sans expliquer clairement leur raisonnement. Face à un écran affichant une cible avec un fort taux de confiance, dire non devient psychologiquement difficile. C’est le biais d’automatisation : *“L’opérateur finit par douter de son intuition face à une machine supposée plus rationnelle que lui”*, explique la chercheuse.

C’est pourquoi les armées planchent désormais sur un sujet capital : la gestion de la surcharge cognitive. *“Demander à un humain de caractériser une menace et d’ouvrir le*

“ L’IA booste toutes les étapes de la boucle “OODA” : observer, orienter, décider, agir



feu en quelques secondes, c'est lui imposer une charge mentale intenable", reconnaît Alain Droniou. D'où une approche consistant à utiliser l'IA pour gérer les informations jugées périphériques (navigation, détection des menaces, priorisation) afin de laisser l'humain se concentrer sur les décisions critiques : faut-il engager ou non ? C'est l'esprit du projet Pendragon, piloté par l'Amiad et l'Armée de terre, qui vise à permettre à un seul commandant humain d'opérer une meute de drones et de robots. L'humain définit le cadre de la mission et les règles d'engagement ; l'IA se charge de répartir les tâches entre les systèmes. "Tout l'enjeu est d'ajuster le degré de liberté accordé à l'IA en fonction de la sensibilité des missions", précise le spécialiste.

Un militaire français dans un véhicule blindé lors de l'exercice Defnet, en 2024, mettant à l'épreuve les systèmes numériques embarqués face à des cyberattaques simulées.

Reste une interrogation centrale : combien de temps cette doctrine de "l'humain dans la boucle" peut-elle tenir dans la course actuelle à l'adoption d'outils d'IA militaires, perçus comme indispensables pour la suprématie ? *"Les Américains supportent de moins en moins la lenteur des systèmes démocratiques. Le droit international, l'éthique, tout cela est perçu comme des freins. Leur obsession, c'est d'aller vite",* pointe Alain Filipowicz. Au point de faire sauter les temps de délibération et les garde-fous humains... Et avec eux, tout l'"art de la guerre" ? L'IA a déjà transformé le champ de bataille. Reste à savoir si les humains sauront suivre son rythme. ■

UNE RESSOURCE MAL RÉPARTIE

Si nous avons tous l'impression de courir après le temps, les inégalités sont prégnantes entre les catégories sociales et entre les genres. PAR CÉLINE LISON

Durée du temps de travail, examen de la réforme des retraites, réforme des rythmes scolaires, loi d'orientation des mobilités... Si elle n'apparaît pas toujours au premier plan, la question du temps et de ce que chaque individu peut en faire est régulièrement mise à l'honneur dans les questions de société. Au sein du foyer, le "temps libre" – lié, en creux, à celui dévolu aux tâches domestiques – reste inégalement réparti. Une enquête très fine publiée en 2010 par l'Insee révélait ainsi que les femmes passaient quotidiennement 3 h 30 à s'occuper de l'entretien de la maison, de la cuisine et des enfants, quand les hommes y passaient deux heures... laissant à ces derniers 10 h 30 potentiellement libres en plus chaque semaine. Plusieurs indices montrent qu'aujourd'hui, les hommes s'impliquent davantage au sein de leurs foyers, réduisant cette inégalité... sans pour autant la combler.

L'autre grande inégalité temporelle a lieu au travail. Cette fois, ce n'est pas tant le genre qui fait la différence que le milieu social – même si les deux peuvent se cumuler. *"Ce qui est en jeu ici réside notamment dans le manque de maîtrise de l'emploi du temps"*, commente Anne Brunner, directrice des études de l'Observatoire des inégalités. *"Dans ce domaine, les ouvriers et les employés sont bien plus touchés que les cadres, en particulier en ce qui concerne les contrats très courts, le temps partiel subi et parfois des horaires modifiés chaque semaine. Tout ça suppose une grande flexibilité de la part de ceux*



qui le subissent. " Au ^{xxi}^e siècle, le rythme de travail peut encore être soumis à la cadence d'une machine ou à un contrôle hiérarchique permanent, comme c'est le cas pour 40 % des ouvriers (à l'usine, par exemple) et 30 % des employés (notamment à la caisse).

HORAIRES ATYPIQUES

Par ailleurs, le temps nécessaire à un repos de qualité est amputé par les horaires nocturnes – entre minuit et 5 h du matin. D'après le ministère du Travail, en 2019, le travail de nuit – souvent cumulé avec des horaires variables et du travail de fin de semaine – concernait 6 % des employés (avec une part importante dans la fonction publique), 5 % des professions intermédiaires, 1 % des cadres et 14 % des ouvriers qualifiés. Les hommes sont ici deux fois plus touchés que les femmes (respectivement 8 % et 4 %).

Derrière cette question d'horaires atypiques et d'absence de maîtrise du temps se cachent aussi beaucoup d'incertitudes pour les personnes concernées. Avec un temps de travail segmenté, il est souvent impossible de faire des projets, de programmer des vacances, d'avoir des loisirs ou de prendre un rendez-vous médical. *"D'autant que cette fragmentation du temps de travail est souvent corrélée à un manque de moyens, souligne Anne Brunner. Les catégories de populations qui en pâtissent ont de plus en plus le sentiment d'être écartées, alors qu'on leur demande toujours plus de disponibilité et de flexibilité. Pourtant, cette question suscite peu de débats publics, et encore moins de propositions du monde politique."* ■

“Nous vivons dans un maintenant narcissique”

Penser en millénaires ou en millions d'années est devenu plus compliqué pour l'humain moderne. La géologue Marcia Bjornerud* et l'historien François Hartog** interrogent les origines et les conséquences de cette perte du temps long.

PAR MATHIAS CHAILLOT



SVHS : *Pourquoi avons-nous tant de mal à nous projeter dans le temps très long ?*

Marcia Bjornerud : Notre expérience directe du temps est biologiquement limitée à nos sens et à la durée de nos vies. Mais cette expérience n'est pas entièrement biologique, ce que montre ironiquement le fait suivant : dans le passé, lorsque les gens avaient des vies plus courtes, ils étaient davantage conscients de faire partie d'un continuum de l'humanité et avaient donc, sans doute, une vision à plus long

terme. Certaines sociétés, comme les Iroquois, imposaient une planification à long terme : aucune décision ne devait être prise sans en anticiper les effets sur sept générations. Aujourd'hui, nous avons l'illusion que nous allons vivre éternellement et que notre temps est “le” temps. C'est ce que j'appelle un “maintenant narcissique”, une vision très étroite par rapport aux générations précédentes. Mais en tant





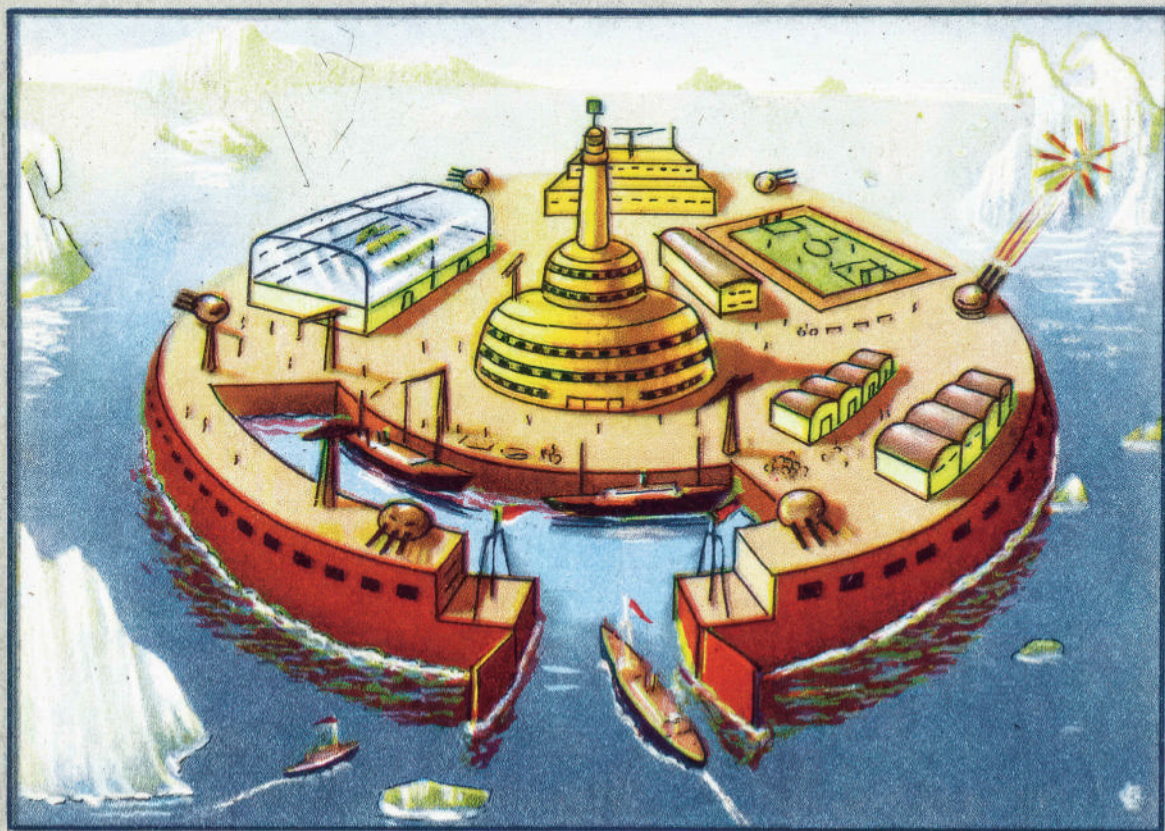
que scientifique, je résiste à l'idée selon laquelle nous serions incapables de penser le long terme. C'est mon travail en tant que professeure de géosciences : entraîner les gens à penser de manière géologique et à étirer cette capacité, non seulement sur quelques siècles, mais sur des millions, des milliards d'années. Bien sûr, nous ne pouvons pas comprendre de manière viscérale ce que signifie un million d'années,

mais nous pouvons commencer à nous faire une idée de ce qui peut se produire sur une telle période.

François Hartog : Cette capacité à conceptualiser le temps long est très variable, en fonction des éléments qui fondent le rapport au temps d'une société à un moment donné, son régime d'historicité. Aujourd'hui, nous vivons dans un temps que je qualifie de "présentiste". En revanche, dans l'ancien

Carte à collectionner "Kermesse", issue de l'album *L'An 2000*, édité par la chocolaterie l'Aiglon, en Belgique, en 1953.

régime d'historicité, le regard vers le passé faisait partie de la façon de vivre son présent : pour répondre aux grandes questions qui agitent le présent, on commençait par regarder le passé pour y chercher des exemples, des modèles, des références. Ainsi, la Mésopotamie ancienne recourait à des



devins qui, après avoir sacrifié un animal, recherchaient dans leurs archives une configuration identique.

SVHS : Quelles sont les caractéristiques de ce "régime du présentisme" ?

F.H. : Le présent est devenu omniprésent. Le présentisme est renforcé par la révolution de l'information, fondée sur l'instantanéité et la simultanéité. Les réseaux sociaux et l'intelligence artificielle en sont aujourd'hui des vecteurs majeurs, en produisant une forme de quasi-suppression du temps. Mais, à l'inverse, l'anthropocène impose l'idée que l'humanité doit désormais s'envisager comme une force géologique, participant

de temporalités extrêmement longues.

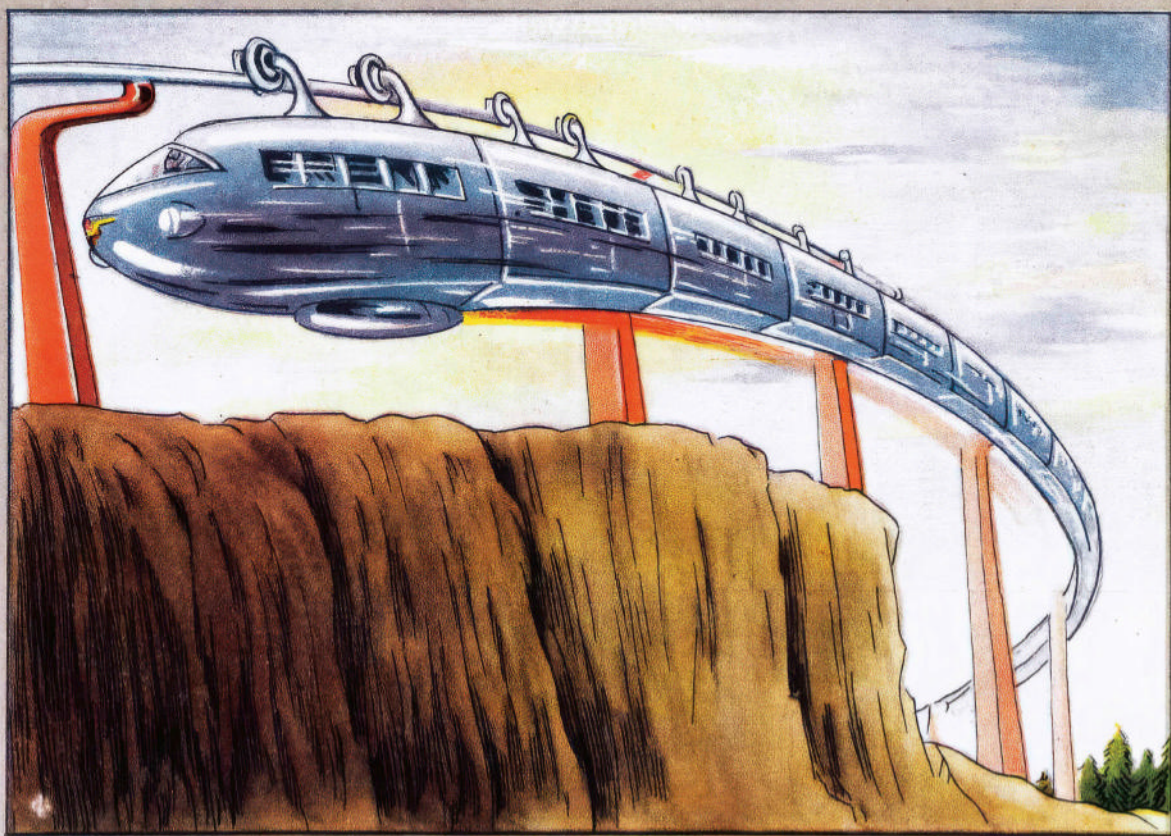
SVHS : À quel moment le temps long s'est-il effacé de nos décisions collectives ?

F.H. : La vision d'un temps porté par le progrès et caractérisé par une accélération continue est propre à l'ère moderne. Mais cette confiance est mise à l'épreuve par les grandes crises du XX^e siècle, en particulier après la Seconde

Guerre mondiale, lorsque l'extermination des juifs rend impossible l'idée que progrès technique et progrès de l'humanité puissent encore aller de pair. De là découle que le futur n'est plus une évidence vers laquelle il faudrait aller le plus vite possible. Reprendre le passé comme guide ne paraît pas non plus vraiment possible. Au fond, par défaut, ne reste que le présent, au point qu'on ne parle plus seulement de

Cartes à collectionner "île flottante" et "Train monorail", issues de l'album *L'An 2000*.

„ Bien sûr, nous ne pouvons pas comprendre de manière viscérale ce que signifie un million d'années ”



“vivre avec son temps”, mais de “vivre au présent”.

SVHS : *En quoi cette difficulté à penser le long terme entrave-t-elle notre capacité à affronter des défis comme le changement climatique ?*

M.B. : Cette incrédulité face au fait que notre temps va passer est au cœur de notre incapacité à agir. Nos institutions, et la machine capitaliste avec ses bilans annuels ou trimestriels, ne sont pas conçues pour la pensée à long terme. Il y a aussi une composante scientifique à cette difficulté. La science s'est structurée à l'époque des Lumières autour de la physique, devenue le modèle de référence, une sorte de “science pure”.

Or, elle est largement perçue comme étant en dehors du temps : ses lois ne sont liées à aucun moment particulier. L'écologue John Harte, de l'université Berkeley, distingue ainsi deux visions : une newtonienne, fondée sur des lois intemporelles, et une darwinienne, centrée sur l'évolution et les trajectoires particulières. La première a dominé pendant plusieurs siècles. Aujourd'hui, avec le changement climatique et d'autres crises environnementales, la seconde doit être pleinement intégrée. Le prestige de la physique a toujours été lié aux impressionnants phénomènes cosmiques et à l'exploration spatiale. Les sciences de la Terre et de

la vie peuvent aussi inspirer l'admiration, mais elles doivent désormais être messagères de nouvelles moins déprimantes.

SVHS : *Le temps long a-t-il servi à construire des récits nationaux ou religieux ?*

F.H. : Les mémorialistes ont précisément mis en récit l'histoire d'une famille, d'une dynastie et, à l'époque moderne, d'une nation, en cherchant son origine : plus on peut la poser loin dans le temps, meilleure elle est. En Chine ancienne, la perspective de très longue durée a aussi une fonction sociale : il y a les gens qui ont une généalogie et ceux qui n'en ont pas. Du point de vue

“ La science s’est structurée à l’époque des Lumières autour de la physique. Or, celle-ci est perçue comme en dehors du temps ”

religieux, c’est plus compliqué. Le temps chrétien ne mise pas sur la longue durée du passé. La césure entre l’Ancien et le Nouveau Testament, l’Incarnation, vient briser le temps. Ce qui compte, c’est le temps nouveau qui va jusqu’au Jugement dernier.

SVHS: La science a-t-elle

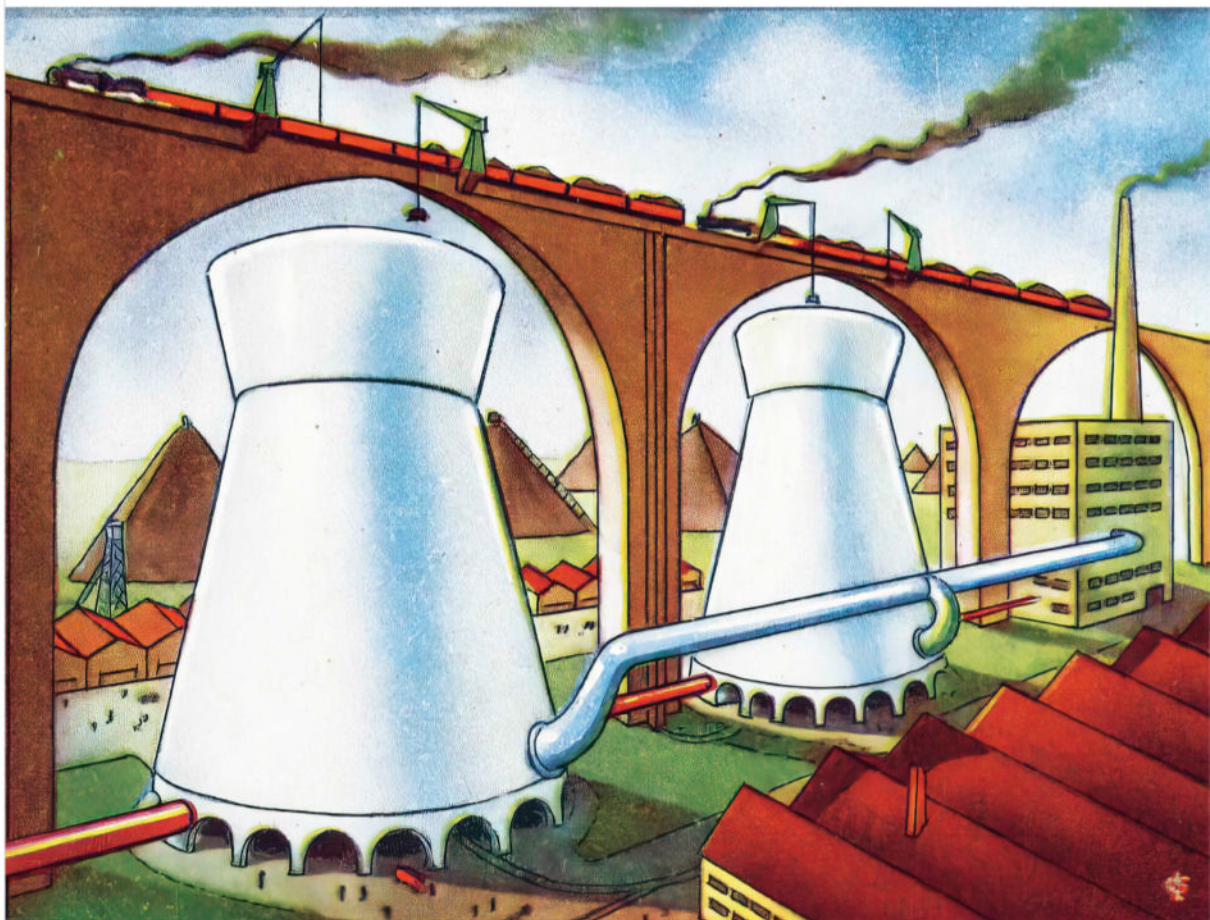
permis de réintroduire une idée de temps long ?

F.H. : Jusqu’au XVIII^e siècle, selon la Bible, on considérait que l’âge du monde était de 6000 ans. Ceux qui font tomber ces limites sont d’abord Buffon, avec le temps de la Terre : il réalise des expériences de refroidissement qu’il extrapole, et conclut que celui-ci s’est fait sur

des millions d’années. Mais il estime qu’un ou deux millions paraissent déjà invraisemblables, compte tenu des limites de nos capacités cognitives. Il publie le chiffre de 75000 ans. En aval, Condorcet fait tomber la limite du futur avec sa théorie du progrès indéfini, qui permet la représentation d’une humanité en marche, dont la réalisation pleine pourra s’envisager sur des millions d’années.

Carte à collectionner
“Haut-Fourneau géant”, issue de l’album *L’An 2000*.

SVHS: Marcia Bjornerud, vous défendez le concept de “timefulness”, une conscience du temps très long. En quoi cela change-t-il



notre rapport au monde ?

M.B. : J'ai inventé ce terme comme un contrepoint à la fois à la *"timelessness"* [intemporalité, NDLR], l'idée que les choses seraient éternelles et immuables ; et à la *"mindfulness"* [pleine conscience, NDLR] qui, dans son interprétation occidentale, invite à habiter uniquement l'instant présent. C'est peut-être utile individuellement, mais dangereux collectivement. La *timefulness*, c'est au contraire le sentiment d'être enchâssé dans le temps long, physiquement enveloppé par des temps passés : les roches et les paysages qui nous entourent sont des textes qui nous en parlent et les infrastructures dans lesquelles nous vivons. C'est une manière de voir le monde en quatre dimensions, propre à la géologie.

SVHS : Comment se réapproprier ce temps long ?

F.H. : Cela passe par la prise de conscience des impasses du présentisme, dont la phase ascendante est à mon avis passée. Nous sommes désormais dans une phase de doutes et d'inquiétudes. Cela devrait aussi passer par les politiques, mais c'est exactement le contraire qui se produit, puisqu'ils sont à la remorque des opinions publiques, elles-mêmes malaxées par les réseaux et les algorithmes. Ce qui compte, c'est de capitaliser sur le moindre incident, donc sur les émotions. Or, il n'y a rien de plus présentiste que les émotions.

M.B. : Je pense que cela

doit commencer par un profond changement culturel – le type de changement le plus difficile –, mais sa mise en œuvre nécessitera des mesures incitatives. Nous devrions utiliser l'effet de levier du marché : des systèmes comme les taxes carbone commencent à aligner le comportement humain et l'énorme puissance du système capitaliste vers une forme de rationalité planétaire. En même temps, il faut inculquer aux enfants un sentiment profond d'être des habitants de la Terre : "Terrien" devrait être notre identité première. Les enfants devraient être exposés à des informations rigoureuses sur le fonctionnement de la planète, du système climatique ou des eaux souterraines. Beaucoup de gens n'ont jamais eu la chance d'apprendre les échelles intrinsèques de ces questions. Cela pourrait produire un changement culturel. Le pays de Galles a aussi un ministère du Futur, considérant que nous avons besoin de personnes dont le travail est de penser sur ces échelles.

SVHS : Comment envisager l'avenir lointain sans se décourager ?

M.B. : Je trouve un réconfort existentiel dans le fait de savoir que la Terre est ancienne et résiliente. Elle a traversé bien des crises climatiques et des extinctions de masse, sans qu'il y ait eu de rupture dans la continuité de la vie depuis au moins 3,5 milliards d'années. Nous pouvons rendre les choses très difficiles pour nous-mêmes, mais je pense malgré tout que la vie survivra. Il y a beaucoup de sagesse dans la manière dont fonctionne la Terre et dans les cycles biogéochimiques qui recyclent toute chose. ■

**Marcia Bjornerud, professeure de géosciences, est l'autrice de Timefulness : How Thinking Like a Geologist Can Help Save the World (éd. Princeton University Press) et Turning to Stone: Discovering the Subtle Wisdom of Rocks (éd. Flatiron Books).*

***François Hartog, historien, est l'auteur de Chronos. L'Occident aux prises avec le Temps (éd. Gallimard) et À la rencontre de Chronos (CNRS éditions).*

“ La *timefulness*, c'est le sentiment d'être enchâssé dans le temps long, physiquement enveloppé par des temps passés ”

Bibliographie

À LIRE



CHRONOS. L'OCCIDENT AUX PRISES AVEC LE TEMPS

De François Hartog,

éd. Folio, 2024, 448 p., 10 €.

Avec cet essai, l'historien François Hartog montre que chaque époque articule différemment passé, présent et futur. Le christianisme, par exemple, installe un présent situé entre l'Incarnation et le Jugement dernier : le passé devient annonce prophétique, le futur accomplissement attendu. Plus tard, la modernité inverse la perspective en subordonnant le présent et le passé à un avenir porteur de progrès. Mais l'horizon s'est à nouveau obscurci : l'anthropocène fait surgir la possibilité d'une fin sans salut. Ce livre, grand prix Gobert de l'Académie française en 2021, réédité en poche en 2024, est une réflexion ample et stimulante pour comprendre nos inquiétudes face à un temps devenu pressant.



L'ORDRE DU TEMPS

*De Carlo Rovelli,
Champs Sciences
Flammarion, 2019,
288 p., 9 €.*

Professeur à l'université d'Aix-Marseille, physicien et grand vulgarisateur, l'auteur s'attelle à une tâche difficile : nous faire comprendre ce qu'est réellement le temps. Celui des poètes et des philosophes, chantres de la condition humaine, mais aussi, et surtout, celui des physiciens. Où l'on (re)découvre comment le temps, dont la définition semble si limpide

avec Newton, s'est singulièrement compliqué avec Einstein... et bien plus encore avec les physiciens quantiques. De la "métempsochse" à l'"univers-bloc" en passant par la superposition d'états et l'espace-temps, Carlo Rovelli nous entraîne dans une saga millénaire : la grande histoire du temps qui passe.



LE TEMPS EXISTE-T-IL ?

*De Marc Lachièze-Rey,
livre audio, CNRS
éditions, 2008, 9,99 €.*

La disparition du temps : tel est l'enseignement déroutant de la relativité. Avec pédagogie, l'astrophysicien interroge ce que nous croyons le plus évident – l'écoulement régulier des heures – pour mieux en révéler les limites. Que devient le présent lorsque passé et futur cessent d'être absolus ? Qu'est-ce qui remplace le temps dans la physique moderne ? En rendant

accessibles les concepts nés au début du xx^e siècle, l'auteur éclaire les fondements de notre vision actuelle de l'Univers. Un enregistrement clair et stimulant pour comprendre, enfin, la portée de la relativité.



TRANSITION ÉCOLOGIQUE. EN QUÊTE DU BONHEUR À FAIBLES ÉMISSIONS

*Sous la direction de Loïc Hamon
(autoédition), 2025, 164 p., 29 €.*

Voici un manifeste en faveur du temps long, temps à soi et temps partagé, mis au service d'une écologie sensible et désirable. Ce livre est le fruit d'une collaboration entre anthropologues, océanographes, enseignants, navigatrices et bien d'autres, sous la direction du fondateur du projet Slow Saint-Malo. Un ouvrage plurimédia qui mêle entretiens, reportages, photographies et podcasts. ■

C'est dit

"Le temps et l'espace ne sont pas des conditions d'existence, le temps et l'espace sont un modèle de réflexion"

ALBERT EINSTEIN, PHYSICIEN THÉORICIEN HELVÉTIQUE-AMÉRICAIN, 1879-1955.

"Je pense que vous pouvez comprendre le temps simplement par le fait que tout, absolument tout change. Tout vieillit. Vous naissez, vous mourez"

MARGHERITA HACK, ASTROPHYSICIENNE ITALIENNE (1922-2013)
DANS UNE INTERVIEW DONNÉE À EURONEWS EN 2011.

"Il n'est rien que le temps n'enseigne en vieillissant"

ESCHYLE, DRAMATURGE GREC, VERS 525 AV. J.-C. - 456 AV. J.-C.



L'ISS, un laboratoire pour le corps humain

Avec l'astronaute Sophie Adenot (photo) à bord de la Station spatiale internationale (ISS), l'Europe et la France poursuivent leur étude de la physiologie humaine en orbite. Ces prochains mois, de nouveaux outils permettront de scruter l'évolution de son organisme dans un contexte d'impesanteur, des points de vue cardiovasculaire, osseux et musculaire.

GÉNÉTIQUE

L'ADN permettra bientôt d'authentifier une toile

Des scientifiques ont retrouvé la trace d'un ADN proche d'un cousin de Léonard de Vinci sur une œuvre attribuée au maître. Une révolution dans le monde de l'art !

PALÉONTOLOGIE

L'"extinction de Sinsk" décryptée en Chine

8 600 nouveaux fossiles remarquablement bien conservés dévoilent comment la nature a surmonté une extinction de masse survenue voici un demi-milliard d'années.

"L'ESPACE EST UN ACCÉLÉRATEUR POUR LA RECHERCHE MÉDICALE"



La Française Sophie Adenot (au premier plan) et une équipe de l'ESA à l'entraînement avec leurs instructeurs lors d'un vol parabolique effectué au-dessus de Bordeaux à bord d'un Airbus A310 "Zéro G".



Que peut la médecine pour adapter l'humain à l'espace et relever les défis des missions lunaires ou martiennes ? Réponses avec les scientifiques Guillemette Gauquelin-Koch* et Audrey Berthier**.

PAR NATACHA SCHEIDHAUER



SVHS: Une astronaute française, Sophie Adenot, monte à nouveau dans l'ISS. Quelles expériences va-t-elle mener ?



Guillemette Gauquelin-Koch:

Elle va réaliser pas moins de 200 expériences pour le compte de la communauté scientifique internationale. Dans le prolongement des missions précédentes, ces expériences nous aident à mieux comprendre comment l'organisme humain se comporte en microgravité des points de vue cardiovasculaire, musculaire, osseux... Il y a par exemple EchoBones, un échographe innovant que va utiliser Sophie Adenot pour nous permettre d'étudier l'anatomie intraosseuse et mieux comprendre la perte de densité qu'induit l'impesanteur subie dans la station.

Audrey Berthier: Les données recueillies par Sophie Adenot vont s'ajouter à celles que l'on possède déjà sur le déconditionnement physique en impesanteur. Nous évaluerons de nouveaux équipements pour le suivi médical des équipages, par exemple l'expérience PhysioTool qui intègre différents capteurs physiologiques synchronisés.

SVHS: Quelle place occupe la France en matière de médecine et physiologie spatiales ?

G.G.-K.: Nous étudions ces sujets depuis au moins 1982 et le séjour de Jean-Loup Chrétien dans Saliout-7. Il a notamment testé le premier échographe spatial, prédécesseur du dispositif EchoFinder. On a aussi l'avantage d'avoir des institutions de pointe, comme le Medes (Institut de médecine et physiologie spatiales). Il existe seulement trois structures de ce type en Europe, avec l'Allemagne et la Slovénie.

A.B.: Fondé en 1989 par le Cnes et le CHU de Toulouse, le Medes est pionnier en matière de médecine et physiologie spatiales et c'est aussi la seule structure de ce type intégrée dans un CHU. Aujourd'hui, avec tout un réseau de partenaires, nous développons plus largement les compétences françaises et européennes en la matière. Nos activités comprennent le support aux missions spatiales, la recherche clinique, mais aussi l'innovation en santé avec des retombées pour la médecine terrestre.

SVHS: Que fait-on au Medes qu'on ne peut réaliser dans l'ISS ?

G.G.-K.: Dans l'ISS, nous n'avons pas toujours accès aux astronautes, ils sont occupés à tout un tas de tâches, et puis leur temps coûte cher. Le Medes nous permet



Sur terre, le "bedrest" permet d'incliner le corps des participants à -6° en relevant le pied des lits de 17 cm pour obtenir la même répartition du flux sanguin qu'en microgravité.



“ Sophie Adenot va utiliser EchoBones, un échographe innovant, qui permet d'étudier l'anatomie intraosseuse ”

de reproduire au plus près les conditions de la microgravité, notamment avec de l'alitement prolongé ou "bedrest" et de l'immersion sèche. En "bedrest", on sait par exemple incliner le corps des participants à -6° en relevant le pied des lits de 17 cm pour

obtenir la même répartition du flux sanguin qu'en microgravité. L'immersion sèche, elle, immerge le volontaire dans un bac rempli d'eau sans qu'il en soit au contact. Cela répartit les appuis de manière inégale, ce que le corps interprète comme une absence d'appuis. Ça

n'est pas de la microgravité parfaite comme celle que l'on obtient dans les vols paraboliques, mais ces expériences nous permettent de la faire durer bien plus longtemps, jusqu'à plusieurs mois aujourd'hui.

A.B. : Ces modèles validés depuis plusieurs années permettent de mieux comprendre les adaptations physiologiques dans un environnement où l'on peut contrôler de nombreux paramètres, comme l'activité physique, la nutrition... On étudie à la fois les adaptations de l'os, du muscle, des systèmes cardiovasculaires, du système immunitaire, et les interactions entre eux. Cette approche

LES PREMIERS "PAS" EN ORBITE

1947

L'envoi d'animaux, notamment des macaques rhésus, permet de tester la viabilité d'un vol dans l'espace pour un organisme vivant.



1961

L'homme accède à l'espace: 108 min en orbite pour Youri Gagarine dans sa minuscule capsule, puis 3 jours en 1963 et première sortie dans le vide en 1965.





Les scientifiques du Medes s'efforcent de reproduire sur terre les conditions de la microgravité. Ici à l'aide de l'immersion sèche, un dispositif qui place le volontaire, couvert d'une bâche, dans un bac rempli d'eau, sans contact avec elle.

intégrative vise à trouver les contre-mesures les mieux adaptées aux vols spatiaux.

SVHS: Est-ce que les conditions d'expérimentations sont semblables à celles des futures missions, type Lune et Mars ?

G.G.-K. : L'ISS et des analogues comme le Medes nous sont très utiles pour observer comment les modifications surviennent et comment le corps s'adapte à la microgravité. Mais ce qui attend

les astronautes sur la Lune, a fortiori sur Mars, va bien au-delà. L'éloignement, à minima 1 000 fois supérieur à celui de l'ISS dans le cas de la Lune, va empêcher les communications en temps réel. Ils seront également exposés à plus de radiations. Sans compter un isolement incomparable à celui de l'ISS où on monte aujourd'hui avec son téléphone portable, et qui provoquera des troubles comportementaux en matière de sommeil et d'alimentation. De nouveaux

sujets de recherche intéressants !

A.B. : Les futures missions d'exploration posent de nouveaux défis tant les profils de missions et les conditions opérationnelles sont différents. Beaucoup de choses que l'on peut faire depuis l'ISS, par exemple le ravitaillement régulier ou de potentielles évacuations, seront très compliquées, voire impossibles. Il faudra trouver des solutions.

SVHS: Comment peut-on se préparer ?

G.G.-K. : On sait que pour prévenir toutes les atteintes physiologiques, il faut combiner activité physique, apport pharmacologique et nutritionnel. Contre les problèmes d'ostéoporose, on travaille sur les exercices musculaires. Contre les radiations, on étudie des médicaments spécifiques qui ont l'air efficaces, comme les statines. Et pour le volet psychologie, on multiplie les expériences en confinement, notamment à la station Concordia, en Antarctique. Le futur de l'exploration spatiale demande de faire de la physiologie intégrative, où tous les organes sont étudiés en même temps, dans un contexte émotionnel et psychologique.

A.B. : Il faut tester de nouvelles contre-mesures, par exemple la gravité artificielle, et proposer de nouvelles technologies pour assister

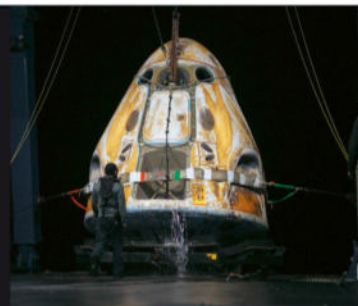
1986

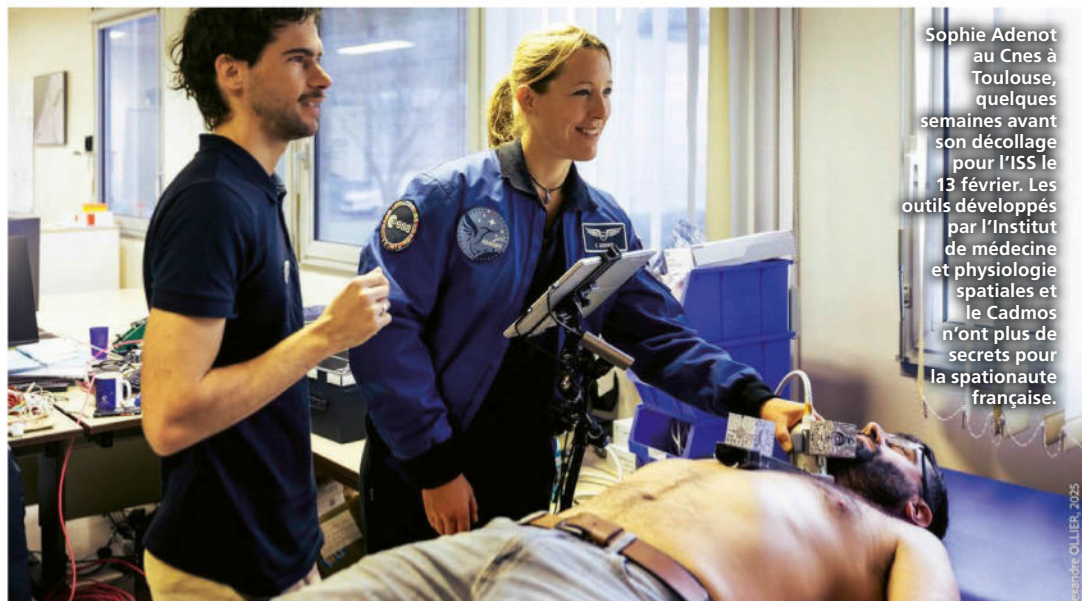
La station Mir placée en orbite basse par l'Union soviétique inaugure les séjours longue durée dans l'espace.



2026

Le 15 janvier, Crew-11 redescend de l'ISS à bord d'une capsule Dragon. C'est le premier retour anticipé d'une équipe pour raison médicale.





Sophie Adenot au Cnes à Toulouse, quelques semaines avant son décollage pour l'ISS le 13 février. Les outils développés par l'Institut de médecine et physiologie spatiales et le Cadmos n'ont plus de secrets pour la spationaute française.

PIERRE OLLIER, 2025

l'équipage, comme EchoFinder ou PhysioTool, des systèmes testés pendant la mission Epsilon. Le premier permet aux astronautes de réaliser des échographies de manière autonome, notamment avec l'aide de l'IA. Le second intègre un boîtier neurosensoriel pour réaliser des expériences en neuropsychologie. On prend en compte le fait que dans un environnement beaucoup plus hostile, il sera plus difficile de maintenir la santé mentale et les performances.

SVHS: Les programmes évoquaient des hommes sur Mars en 2030...

Quand l'humain sera-t-il prêt ?

G.G.-K.: Il faut déjà relever les trois grands défis de la Lune ! D'abord y survivre, ensuite essayer d'y vivre, puis essayer d'y habiter. Le support vie est un enjeu de taille : comment se nourrir, comment produire de l'oxygène, de l'hydrogène... Le quotidien apporte son lot de problématiques, d'autant qu'on l'envisage aujourd'hui avec un prisme plus global et plus

durable qu'hier. Mars sera une autre étape. Je l'imagine plutôt pour mes petits-enfants.

A.B.: Il faut avancer pas à pas, et certaines marches sont effectivement plus hautes que d'autres. En attendant la Lune et Mars, nos travaux sont également utiles pour la médecine terrestre. Un séjour en impesanteur nous renseigne aussi sur des problématiques comme la sarcopénie et l'ostéoporose, car il s'apparente à un vieillissement accéléré bien que réversible. Télémédecine, santé connectée... les exemples d'applications ne manquent pas. L'environnement spatial est un accélérateur pour la recherche médicale. ■

“ Le futur de l'exploration spatiale demande de faire de la physiologie intégrative, où tous les organes sont étudiés en même temps, dans un contexte émotionnel et psychologique ”

* Guillemette Gauquelin-Koch est responsable des sciences de la vie au Cnes.

** Audrey Berthier est directrice exécutive de l'Institut de médecine et physiologie spatiales (Medes).

Le corps à la peine

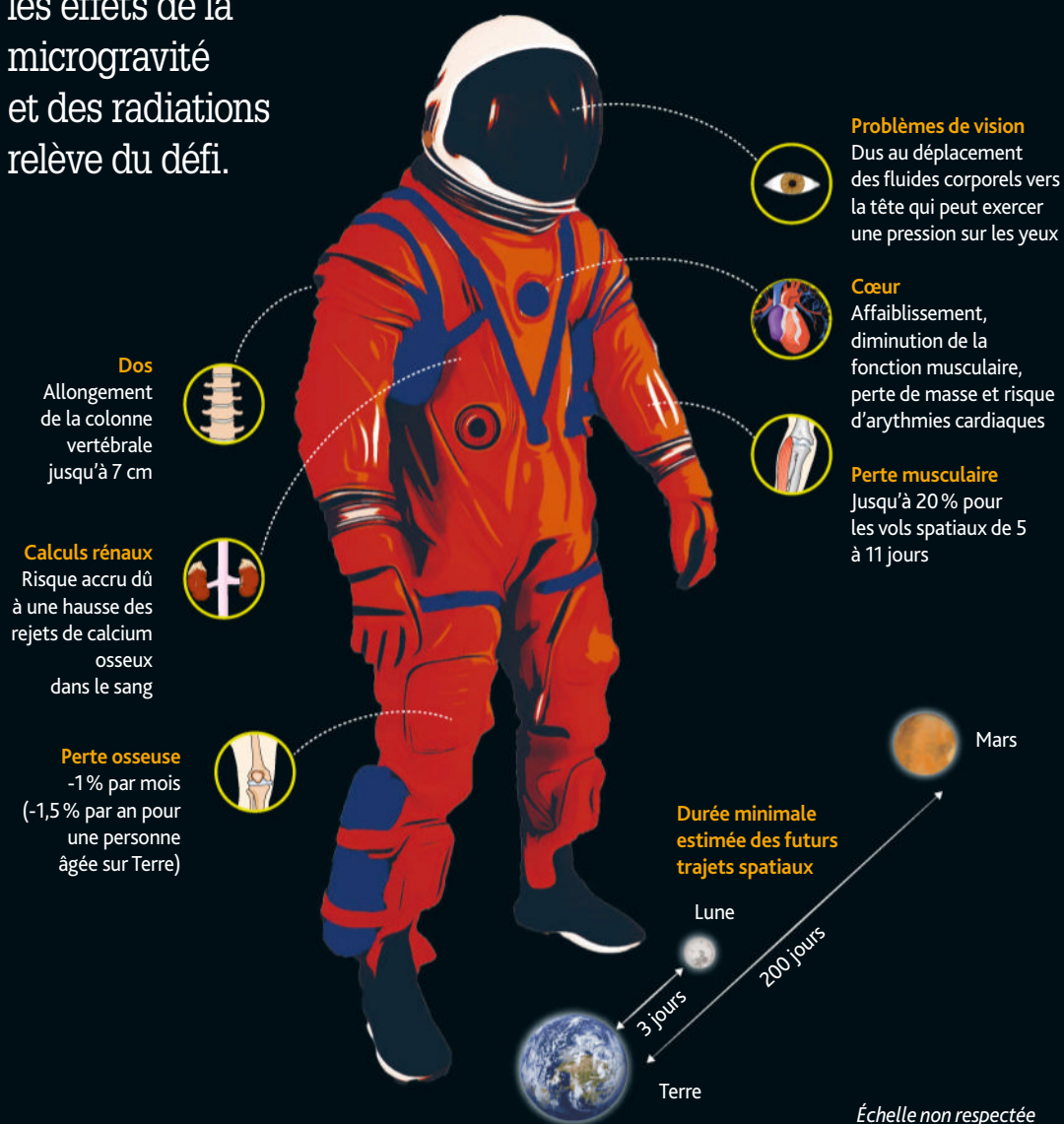
Pour les futures missions vers Mars et la Lune, contrer les effets de la microgravité et des radiations relève du défi.

MICROGRAVITÉ

Les astronautes se remettent de la plupart de ces effets après leur retour sur Terre

RADIATIONS

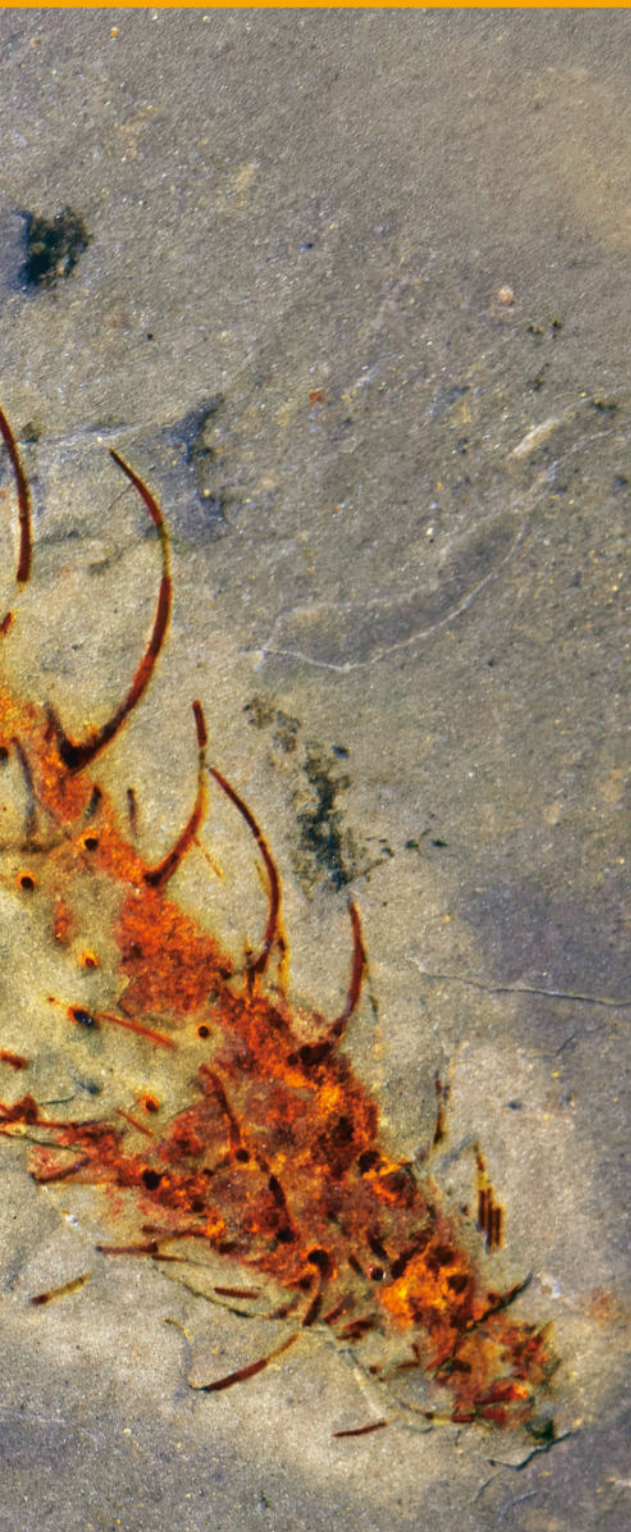
Cancer: risque accru
ADN endommagé: mécanismes de réparation modifiés
Système nerveux central: déficience cognitive





En direct du Cambrien

Un extraordinaire gisement fossilifère chinois a dévoilé des représentants d'une faune préhistorique en grande partie inconnue. À gauche (photo), *Allonnia*, un animal long de 5 mm et recouvert de spicules. Ci-dessous, *Leptomit*, une éponge. Leur état de conservation exceptionnel permet de distinguer les tissus mous et donc d'étudier la physiologie de ces animaux privés de squelette. Depuis 2021, plus de 8 600 fossiles ont ainsi été retrouvés par l'équipe de Maoyan Zhu, professeur à l'Institut de géologie et de paléontologie de Nanjing, sur un site du Hunan, dans le sud de la Chine. Ils sont datés de 512 millions d'années, une époque cruciale qui fait suite à un épisode d'extinction de masse, "l'événement de Sinsk", peut-être provoqué par une série d'éruptions volcaniques. Ces créatures s'ébattaient alors dans les profondeurs d'un océan situé dans la bande intertropicale. Leur nombre et leur variété prouvent que de nombreuses espèces vivant en eaux profondes ont survécu à la catastrophe.



4,5 millions

C'est le nombre d'années de vie en bonne santé que la pollution plastique pourrait nous faire perdre à l'horizon 2040. Cette estimation est basée sur la modélisation d'une équipe de chercheurs franco-britanniques dont les résultats ont été publiés en janvier dans la revue *The Lancet Planetary Health*. Afin d'avoir une meilleure idée des effets de cette pollution sur notre santé, ils ont étudié son impact depuis l'extraction du pétrole jusqu'au rejet des déchets dans la nature. Ils ont ainsi estimé que l'espèce humaine avait déjà perdu 2,1 millions d'années de vie en bonne santé en 2016 et que ce nombre pourrait plus que doubler d'ici à 2040 si rien ne changeait. Malgré ce constat alarmant, l'étude est hélas moins



inquiétante que la réalité, car les chercheurs n'ont pas intégré l'effet des microplastiques dans leurs travaux, faute de données exploitables. Bien

que méconnu, leur impact affole pourtant la communauté scientifique. En ce début d'année, une autre étude publiée dans *Science Advances* révélait ainsi qu'ils étaient dix fois plus présents que ce que l'on pensait dans l'atmosphère des grandes villes chinoises, tandis que le *Journal of Hazardous Materials: Plastics* alertait sur les effets délétères de ces particules sur la biodiversité marine.

À quel âge les T-rex cessaient-ils de grandir ?

Vers 40 ans, si l'on en croit les résultats d'une étude menée par Holly N. Woodward, Nathan P. Myhrvold et John R. Horner, dévoilés en janvier dernier, dans la revue *PeerJ*. Cette conclusion est le fruit d'une comparaison entre les ossements de 17 spécimens d'âges différents.

En se basant sur des anneaux observables sur les os, les chercheurs ont estimé qu'ils pouvaient révéler des cycles de croissance, à la manière des cernes d'un arbre. Ils en ont déduit que les T-rex atteignaient leur taille adulte vers 40 ans, pour un poids de 8 tonnes.





Est-ce une fleur ?

Absolument pas ! Ce sont des larves de méloés printaniers (*Meloe proscarabaeus*), une espèce de scarabées plutôt malins si l'on en croit les scientifiques de l'Institut Max-Planck d'écologie chimique. Dans une prépublication parue en début d'année sur la plateforme *bioRxiv*, ces chercheurs allemands ont mis en lumière la stratégie de mimétisme de ces larves, capables de biosynthétiser un composé chimique volatil, dérivés du (S)-linalol, d'ordinaire produit par des fleurs, afin d'attirer des insectes pollinisateurs. Une fois leur "hôte" à portée, les jeunes méloés s'y accrochent pour être ramenés dans son nid et y poursuivre leur croissance en bons parasites.

OÙ ÉCOUTER LA MER ?

À l'Institut océanographique de Monaco ! Ou tout du moins son histoire, mise en podcast avec le lancement d'*Oceano*. Une série de récits audio lancée cette année pour faire connaître et aimer les océans. Chaque épisode d'une trentaine de minutes plonge les auditeurs dans une histoire des sciences de la mer destinée à mieux comprendre les enjeux environnementaux actuels. Le premier épisode consacré au peintre-explorateur Louis Tinayre est en ligne sur toutes les plateformes de podcasts.

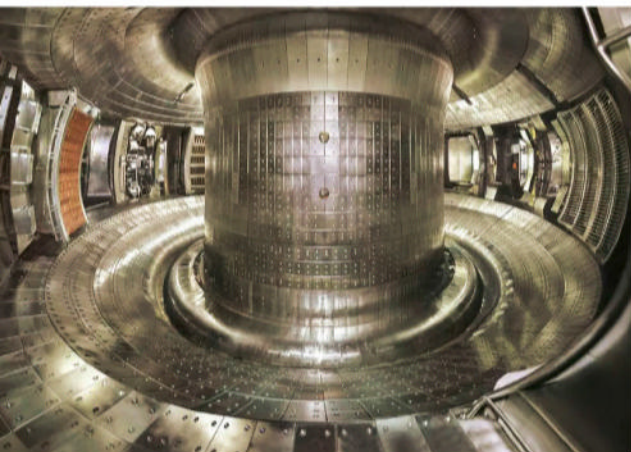


Jouer aux jeux vidéo est-il mauvais pour la santé ?

Au-delà d'un certain nombre d'heures, oui, d'après une étude dirigée par l'université australienne de Curtin. En janvier, le professeur Mario Servio et ses collègues ont révélé

leurs conclusions après avoir suivi 317 étudiants, âgés de 20 ans environ, répartis en trois groupes. Ils ont ainsi noté une nette détérioration de l'état de santé chez ceux qui jouaient le

plus intensément aux jeux vidéo – plus de 10 heures par semaine –, avec notamment une propension plus importante à l'obésité et des problèmes de sommeil accrus.



Fusion : peut-on dépasser la limite de Greenwald ?

L'équipe chinoise en charge du réacteur nucléaire EAST, de type Tokamak, l'a fait ! Grâce à de fins paramétrages de ce "soleil artificiel", les scientifiques ont réussi à maintenir pendant plusieurs secondes un plasma à un niveau de densité 1,65 fois supérieur au seuil critique de Greenwald, au-delà duquel une expérience de fusion nucléaire risquerait de devenir instable. Leur prouesse, dévoilée en début d'année dans la revue *Science Advances*, est un pas de plus vers une source d'énergie révolutionnaire.

Peut-on authentifier une toile de maître grâce à l'ADN ?

Les scientifiques du Leonardo Da Vinci DNA Project ont récemment fait une découverte majeure, grâce à une approche innovante. Comme expliqué en janvier sur la plateforme *bioRxiv*, ils ont retrouvé sur le tableau *Holy Child*, attribué à Léonard de Vinci, la trace d'un ADN de chromosome Y proche de celui prélevé sur une lettre authentifiée de son cousin. Si rien ne certifie qu'il s'agit bien de l'ADN du maître (celui-ci n'a eu aucun descendant connu et ses restes présumés n'ont pas encore permis d'en apprendre plus à ce sujet), leur usage des technologies de séquençage de nouvelle génération et de profilage taxonomique – couplé à une méthode de prélèvement non destructive – pourrait provoquer une petite révolution dans le monde de l'art. Jusqu'à présent, authentifier une œuvre grâce à des données génétiques était, en effet, trop hasardeux. Les échantillons réduits – pour ne pas dégrader l'objet – et bien souvent altérés empêchaient une analyse suffisamment fine pour distinguer les différents profils issus de manipulations plus ou moins récentes.



Pourquoi les Russes se sont-ils si peu mêlés aux Iakoutes ?

Sans doute à cause du froid extrême qui règne au nord-est de la Sibérie, où les Iakoutes vivent encore aujourd'hui. Cela expliquerait pourquoi ces derniers n'ont pas eu affaire à des vagues massives de colons russes à partir du XVII^e siècle, mais à de petites communautés qui se sont appuyées sur eux pour développer le commerce de fourrures. C'est la thèse d'une équipe de chercheurs franco-russe, menée par le CNRS et l'université de Toulouse, qui a étudié les corps de 122 individus, extrêmement bien conservés par le pergélisol. Leurs conclusions, publiées dans *Nature* en janvier, révèlent que les colons russes ont bien introduit certaines maladies et des changements de mode de vie, mais que leur impact sur l'ADN Iakoute a été très limité.





Le requin du Groenland est-il vraiment aveugle ?

Pas du tout, contrairement à ce qu'on a longtemps présumé. Une équipe de chercheurs suisses, danois et américains a en effet constaté que ce poisson, pouvant vivre plusieurs siècles dans les profondeurs des eaux arctiques, voit parfaitement bien. Ses yeux bénéficient même d'un mécanisme de réparation de l'ADN qui leur garantit un bon fonctionnement tout au long de la vie du requin. Le résultat de leurs recherches, publié dans *Nature Communications*, en janvier, pourrait fournir de nouvelles pistes dans la lutte contre les pathologies oculaires humaines liées à l'âge.



La lumière est-elle efficace contre la douleur ?

Oui... pour les souris. En exposant des rongeurs à une lumière proche du violet, une équipe du CNRS a réussi à activer une protéine photosensible, appelée TRAAK, qui freine la transmission des signaux douloureux. Ce résultat, produit en quelques minutes par une simple lampe, sans effets secondaires, n'est observable que sur les rongeurs. La méthode, appelée LIA (Light-Induced-Analgesia), n'est en effet pas transposable pour l'instant à l'humain, à cause d'une petite différence dans la séquence de la protéine TRAAK. En revanche, elle pourrait faire l'objet de nouvelles stratégies thérapeutiques, non médicamenteuses, afin de soulager plus efficacement la douleur.

POUR EN SAVOIR PLUS

CETTE ÉDITION DE MÀJ ACTUALISE DES THÉMATIQUES TRAITÉES DANS CES PRÉCÉDENTS HORS-SÉRIES DE SCIENCE & VIE...

#300 Espace, une nouvelle histoire

#301 Énergie, quels défis pour demain

#302 Le monde avant les dinosaures

#307 Plastique, le début de la fin ?

#308 Insectes, les nouveaux influenceurs de la science

#311 Dinosaures : le nouveau récit de leur extinction

#313 L'ADN va-t-il réécrire notre histoire ?

#319 Abysses : l'exploration accélère !

#324 Vaincre la douleur : les nouvelles pistes des scientifiques

ÉNERGIE CORPORELLE

EN 2011, UNE IDÉE INSOLITE GAGNE DU TERRAIN DANS LES LABORATOIRES: RÉCUPÉRER L'ÉNERGIE... DU QUOTIDIEN. MARCHER, DANSER, ATTENDRE UN TRAIN: AUTANT D'ACTIONS BANALES QUI PRODUISENT DES WATTS.

Il y a quinze ans, l'“energy harvesting” – littéralement “récupération d'énergie” – fait phosphorer chercheurs et ingénieurs. L'idée n'est pourtant pas neuve puisqu'elle est née au début des années 2000, mais dix ans après, on est passé du rêve à la réalité.

D'entrée, l'article rappelle un principe physique simple, mais trop souvent méconnu: “Marcher, c'est appliquer un poids sur le sol.” Une activité qui, à elle seule, peut produire “entre 50 et 100 watts, soit autant que la consommation de certaines ampoules électriques”. Ainsi, à Rotterdam, une discothèque installe 64 dalles montées sur ressorts, qui entraînent un générateur. Un pas fournit

6 watts et le dispositif permet d'éclairer la piste de danse. À Toulouse, un trottoir expérimental alimente un lampadaire LED grâce aux passants.

Plus au nord, la gare de Stockholm devient chaudière collective: 200 000 voyageurs par jour chauffent un immeuble voisin. “Ce dispositif va permettre de couvrir environ 30 % des besoins en chauffage”, précise l'article. Même le bruit s'y met: une plaque piézoélectrique vibre sous 100 décibels et produit quelques nanowatts. Rien de spectaculaire quand on compare ces volumes produits avec ceux des grandes sources d'énergie naturelles ou industrielles. Néanmoins, “l'une des motivations de ces recherches, c'est de pouvoir un jour alimenter des petits composants électroniques ne nécessitant pas de grosses puissances, comme les appareils nomades ou les capteurs médicaux”, explique Alper Erturk, du département d'ingénierie mécanique de l'université de Virginie. Finalement, brasser de l'air a peut-être son utilité!

C'ÉTAIT ÉCRIT
DANS
SCIENCE&VIE

FONDAMENTAL
TENDANCE

OBJECTIF RÉCUPÉRER L'ÉNERGIE DU QUOTIDIEN

Marcher, parler... La moindre de nos activités dégage une énergie... qui ne sera plus perdue! Car d'ingénieurs dispositifs visent à l'exploiter à des fins utiles. En voici déjà 5.

PAR MURIEL VALIN

Quel point commun entre un trottoir, une conduite d'eau, un portable ou une gare? Ce sont des sources d'énergie. Vous vous êtes bien vu un trottoir ou une "travaillerie" d'inspiration... produite de l'électricité? C'est que la recherche de nouvelles sources d'énergie ne connaît plus de limites, quitte à prendre des voies aussi insolites qu'ingénieuses. Ainsi, l'idée s'est-elle germée d'exploiter ici et là l'énergie qui se dégage du quotidien. Par exemple, la marche produit à elle seule entre 50 et 100 watts, soit autant que certaines ampoules électriques. Alors, pourquoi perdre

ceci? Et ça marche: véhicules sous forme de chaleur, d'ondes, de vibrations ou de mouvements, cette énergie peut alimenter d'autres applications, via d'innombrables dispositifs déjà opérationnels.

LA COURSE À LA RENTABILITÉ

À la pointe de ce "coucou", un projet baptisé "energy harvesting" (littéralement "récupération d'énergie"), ne l'a pas une dizaine d'années dans plusieurs laboratoires de recherche aux quatre coins du globe. Au départ, l'idée visait à récupérer cette énergie là où elle se trouve: cette énergie des capteurs auto-

premiers essais. Il faut dire qu'il s'agissait essentiellement sur deux principes physiques: la thermoélectricité (ou, plus précisément, la capacité de transformer la chaleur en électricité) et la piézoélectricité (soit la capacité de certains matériaux à créer une charge électrique dès qu'ils subissent une action mécanique). Or, à cette époque, ces technologies étaient peu matures et non rentables", se souvient Frédéric

matériaux (composés intermétalliques, skutterudites...). Changement, il y a deux ans, la donne en permettant à des applications thermoélectriques de résister à de plus hautes températures et d'avoir un meilleur rendement de conversion énergétique. Quant à la piézoélectricité, son développement dans le secteur industriel a contribué à sa maîtrise, ce qui a dopé ses performances et abaissé son coût. De quoi donner un coup de boost à l'energy harvesting.

Les dispositifs de tendent pas concurrencer les grandes sources traditionnelles ou alternatives. “Il faut avoir en tête qu'un élément thermoélectrique ne peut produire que 5 à 10 W/m² quand un panneau photovoltaïque fournit 120 W/m²”, résume Frédéric Gaillardet. Mais tel n'est pas le but. “L'une des motivations de ces recherches, c'est de pouvoir un jour alimenter des petits composants électroniques ne nécessitant pas de grosses puissances, comme les appareils nomades ou les capteurs médicaux”, explique Alper Erturk, du département d'ingénierie mécanique de l'université de Virginie. Cela pourrait aussi alimenter “des petits systèmes électroniques décentralisés, dans des lieux isolés où le réseau traditionnel coûte cher à développer: dans des vallées ou dans des pays en voie de développement. Cela pourrais même servir comme énergie d'appoint lors de pics de puissance électriques”, poursuit Frédéric Gaillardet. Conclusion: il n'y a pas de petites économies... y compris pour l'énergie!

LE CHIFFRE CLEF

Plus de 50 % de l'énergie produite par la plupart des installations industrielles (centrales nucléaires, usines, chaudières...) est aujourd'hui de l'énergie “perdue”.



CONCOURS

SCIENCE EN VUES

Concours de photos de science avec
Science & Vie et *Réponses Photo*.

PARTICIPEZ !

À GAGNER

**POUR LE GRAND GAGNANT
DE CHAQUE CATÉGORIE**

• Du matériel Canon

- Biodiversité : un appareil photo Canon EOS R7 et son zoom transtandard*
- Ciel nocturne : un appareil photo plein format Canon EOS R8 et un objectif grand angle*
- Labo / recherche : un appareil photo plein format Canon EOS R8 et un objectif macro*
- Catégorie -18 ans : une imprimante photo portable Canon SELPHY QX20*

• La publication de sa photo sur différents supports :
magazines, exposition, édition livre ou calendrier...

• Une rencontre avec Greg Lecoœur

**POUR LES 2^e ET 3^e GAGNANTS
DE CHAQUE CATÉGORIE**

**• La publication de leur photo et un abonnement
de 1 an au magazine de leur choix.**

* Ou équivalent.

NOTRE PARRAIN

Greg Lecoœur

*Photographe animalier
et naturaliste*



Crédits photos : Greg Lecoœur

3 CATÉGORIES Biodiversité, ciel nocturne, labo / recherche + coup de cœur **Science & Vie Junior**
LES CRITÈRES DE SÉLECTION Esthétisme, narration, contexte et informations scientifiques

POUR PARTICIPER Envoyez votre photo et ses informations
avec vos coordonnées à **photoscience@reworldmedia.com**
avant le 10 mai 2026



Règlement
et informations
via ce QR code

SCIENCE & VIE

**SCIENCE & VIE
JUNIOR**

**RÉPONSES
PHOTO**

Canon

muam
Musée des Arts et Métiers - Le Centre

**fête de la
Science**

CNRS

Reworld Media Magazines organise du 01/10/2025 au 31/12/2026 le concours « Science en vues » gratuit et sans obligation d'achat. Ce concours est ouvert à toute personne majeure, ou mineure avec une autorisation parentale, domiciliée en France métropolitaine. Les gagnants seront déterminés après leur participation selon les modalités prévues au Règlement du concours disponible gratuitement sur www.reponsesphoto.fr. La valeur des prix est communiquée à titre unitaire et indicatif. Conformément à la réglementation applicable en matière de protection des données personnelles (RGPD), les informations recueillies, font l'objet d'un traitement informatique fondé sur votre consentement, destinées à Reworld Media Magazines SAS. Les destinataires des données sont le service marketing et nos partenaires commerciaux pour vous permettre de participer au concours. Vous disposez notamment des droits d'accès, rectification, effacement, suppression de vos données, que vous pouvez exercer en écrivant à dpd@reworldmedia.com ou à Reworld Media Magazines - DPD Service Juridique 40, avenue Aristide Briand - 92227 Bagneux cedex. Visuels non contractuels.

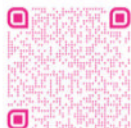


**Toutes les 7 minutes en France,
une femme meurt d'une maladie
cardio-vasculaire.**

Pourtant, 8 accidents cardio-vasculaires sur 10 pourraient être évités grâce à la prévention.

Les maladies cardio-vasculaires ne sont pas des maladies d'hommes : ce sont les femmes qui en meurent le plus ! Cette idée reçue n'est plus tolérable. Votre engagement à nos côtés peut tout changer. Vous pouvez nous aider à mener des actions de prévention dans tous les territoires, auprès des femmes qui en ont le plus besoin et à alerter les pouvoirs publics sur cette urgence médicale et sociétale. En prenant soin de votre santé et de celle de vos proches, ensemble, nous pouvons atteindre notre objectif : contribuer à sauver 100 000 vies d'ici 2030.

Agissez pour la santé des femmes avec le QR code ci-dessous.



Je m'engage, je sauve une vie.

agirpourlecoeurdesfemmes.com



**Agir pour
le Cœur
des Femmes**

Women's Cardiovascular Healthcare Foundation